ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS DE MÉDIA CAPACIDADE E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA INSERÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS – ESTUDO DE CASO: BRT TRANSOESTE

Murilo Cardoso de Miranda

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
Maurício Cardoso Arouca

Rio de Janeiro
Março de 2017

ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS DE MÉDIA CAPACIDADE E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA INSERÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS – ESTUDO DE CASO: BRT TRANSOESTE

Murilo Cardoso de Miranda

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 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

_____

Profº Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D. Sc.

_____

Profº Maurício Cardoso Arouca, D.Sc.

_____

Profº Ronaldo Balassiano, Ph. D.

_____

Profª Renata da Costa Barreto, D. Sc.

_____

Profº Carlos Alberto Aragão de Carvalho Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Miranda, Murilo Cardoso de

Eletrificação do Transporte de Passageiros de Média Capacidade e Avaliação do Potencial para Inserção de Fontes Alternativas - Estudo de Caso: BRT TransOeste / Murilo Cardoso de Miranda – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2017.

XVI, 145 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcellos de Freitas

Maurício Cardoso Arouca

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 131-145.

1. Eletrificação dos transportes. 2. Planejamento energético integrado. 3. Autoprodução de energia por fontes renováveis. I. Freitas, Marcos Aurélio Vasconcellos de, *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que sempre foi a base da minha vida, onde pude sempre contar com amor incondicional, apoio, conselhos, incentivos, motivação e força para seguir e superar qualquer desafio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos, que de uma forma ou de outra, fizeram parte desta minha trajetória acadêmica e que me proporcionaram muitos momentos e experiências enriquecedoras e de grande aprendizado.

Aos Professores Marcos Freitas e Maurício Arouca, pelos conselhos e pela parceria na orientação desta dissertação.

Aos professores Ronaldo Balassiano, Renata Barreto e Carlos Aragão, por aceitarem fazer parte da banca e dedicarem o tempo de cada um para a melhoria deste trabalho.

Aos professores do Programa de Planejamento Energético da COPPE, pelo convívio e pelos ensinamentos que contribuíram para minha formação, e também, por irem além do seu nobre dever de transmitir conhecimento, tornando-se também exemplos de competência e profissionalismo.

Aos funcionários do PPE, pela cordialidade e prontidão com que sempre me atenderam, ajudaram e deram conselhos, em especial a Sandrinha, Paulo, Fernando e Simoni.

Aos meus amigos e colegas de curso, pois guardo grande carinho por todos. Em especial, agradeço aos meus companheiros nesta jornada Cindy, Fabito, Isa e Paula, pelos grupos de estudo, pelos programas, pelas viagens e por estarem sempre juntos comigo. Ao Otto, pela força e identificação tijucana. Ao Fábio Nikity, pela grande amizade, estima e afinidade, além, de pelas cervejas que espero ele fazer. À Vanessa, por se divertir com minhas "murilagens" e estar sempre disposta a ajudar quando precisei. E, ao debandado Vinny, por suas loucuras e sua positividade.

Mas, principalmente, quero agradecer à Gabriela Nascimento, por ter sido minha maior parceira e símbolo de carinho, afeto, amor e amizade ao longo deste percurso.

Por fim, um especial agradecimento à minha família, que teve que entender minha indisponibilidade ao longo deste período, mas sempre me apoiou, se preocupou comigo e quis o melhor para mim.

“A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância.”

Mahatma Gandhi

“A expectativa de que haja uma fórmula para a vida é a fonte de tantas das nossas decepções. Que tal, de peito aberto, aberto pro mundo, encarar o mundo como ele é, no seu ineditismo, na sua virgindade, na sua irrepetibilidade, e saber, que sem fórmula nenhuma, estamos aí, diante de um mundo extraordinariamente competente para te entristecer, mas aqui e ali, também capaz, de te proporcionar grandes alegrias, grandes surpresas, momentos que você nunca mais gostaria que acabasse. São esses momentos que a gente persegue, e que farão da vida, sempre alguma coisa digníssima de ser buscada, e fantástica de ser vivida.”

Clóvis de Barros Filho

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

ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS DE MÉDIA CAPACIDADE E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA INSERÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS – ESTUDO DE CASO: BRT TRANSOESTE

Murilo Cardoso de Miranda

Março/2017

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas
Maurício Cardoso Arouca
Programa: Planejamento Energético

Em um contexto de crescente preocupação com questões ambientais, é importante atentar para o impacto que os transportes podem ter frente a esta temática. Em relação ao transporte público de passageiros, o presente estudo mostra que uma das principais formas de expansão do setor ocorre pela adoção dos sistemas de média capacidade, especificamente o BRT e o VLT. Com isso, o objetivo deste trabalho é avaliar estas alternativas, considerando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais, para definir critérios de decisão adequados às necessidades da sociedade. A metodologia desenvolvida por este trabalho utiliza dois modelos de otimização para tratar de três cenários possíveis, variando as tecnologias e os recursos energéticos utilizados. O primeiro modelo tem a função de avaliar as tecnologias para o transporte e o segundo modelo avalia cenários de potencial inserção de fontes alternativas no projeto e analisa a efetividade de políticas econômicas de baixo carbono. Os resultados mostram que maiores demandas favorecem a escolha pelo sistema VLT e conclui que, de acordo com o estudo de caso, esta é a melhor opção para valores acima de 13 a 17 mil passageiros na hora de pico. Posteriormente, são feitas análises de sensibilidade dos custos envolvidos e dos benefícios que não contabilizados na avaliação de custos, como a redução de emissões e a possibilidade de aumentar o uso de fontes renováveis na região.

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

ELETRIFICATION OF MEDIUM-CAPACITY TRANSIT SYSTEMS AND POTENTIAL ANALISYS FOR INSERTING ALTERNATIVE SOURCES - CASE STUDY: BRT TRANSOESTE

Murilo Cardoso de Miranda

March/2017

Advisors: Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas
Maurício Cardoso Arouca
Department: Energy Planning

In a context of increasing concern about environmental issues, it is important to look at the impact that transport sector can have on this issue. In relation to passenger public transport, the present study shows that the medium capacity systems, specifically BRT and VLT, have been the main alternatives for the expansion process of this sector. Thus, the objective of this work is to evaluate these alternatives, considering the technical, economic and environmental aspects, and define decision criteria appropriate to the society`s needs. The methodology developed by this work uses two optimization models to deal with three possible scenarios that varies the technologies and the energy resources used. The first model evaluate the technologies for transportation and the second model analyze scenarios of potential insertion of alternative energy resources in the project and assess the effectiveness of low carbon economic policies. The results show that higher demands advantage the choice of the VLT system and conclude that, according to the case study, this is the best option for values above 13 to 17 thousand passengers at peak time. Subsequently, the study makes sensitivity analyzes of the costs involved and evaluates the benefits that are not accounted in the cost, such as the reduction of emissions and the possibility of increasing the use of renewable sources in the region.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA 2

1.2 OBJETIVOS 9

1.3 JUSTIFICATIVA 9

1.4 ESTRUTURA GERAL 11

2 PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS 12

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRANSPORTE URBANO 12

2.2 REVISÃO DO PROCESSO DE ESCOLHA DAS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE COLETIVO 19

2.3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O TRANSPORTE COLETIVO 28

2.3.1 BUS RAPID TRANSIT - BRT 35

2.3.2 VEÍCULO LEVE SOBRE TRILHOS - VLT 41

2.3.3 COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS BRT E VLT 44

3 METODOLOGIA 52

3.1 MODELO DE SELEÇÃO DA TECNOLOGIA DE TRANSPORTE 53

3.1.1 PERFIL DA DEMANDA 56

3.1.2 CUSTOS E PARÂMETROS DO SISTEMA 57

3.1.3 EMISSÕES 59

3.1.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 59

3.2 HOMER 60

4 ESTUDO DE CASO 62

4.1 PANORAMA DO SETOR DE TRANSPORTES DO RIO DE JANEIRO E O MODELO DE EXPANSÃO ADOTADO 63

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA BRT 72

4.2.1 BRT TRANSOESTE 74

4.2.2 BRT TRANSCARIOCA 79

4.2.3 BRT TRANSOLÍMPICA 83

4.2.4 BRT TRANSBRASIL 84

4.3 PROPOSTA DE INSERÇÃO DE AUTOPRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTE RENOVÁVEL 85

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 91

5.1 AVALIAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS BRT E VLT PARA O ESTUDO DE CASO . 92

5.2 SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS PARA A ESCOLHA DA ALTERNATIVA DE TRANSPORTE 106

5.3 CENÁRIOS DE AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O VLT 111

5.4 O PAPEL DO SISTEMA PARA MAIOR INSERÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS 118

6 CONCLUSÃO 125

7 REFERÊNCIAS 131

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO FINAL NO SETOR DE TRANSPORTES NO MUNDO.. 3
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DA ATIVIDADE DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS. 4
FIGURA 3 – PARTICIPAÇÃO DOS SETORES MAIS EMISSORES DE GEE NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. 5
FIGURA 4 – EMISSÕES DIRETAS DE GEE PELO SETOR DE TRANSPORTE NO MUNDO. 6
FIGURA 5 – PARTICIPAÇÃO DE RENOVÁVEIS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA. 6
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA URBANIZAÇÃO NO BRASIL. 13
FIGURA 7 – EVOLUÇÃO DAS VIAGENS POR MODO. 16
FIGURA 8 – PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO. FONTE: ADAPTADO DE ITDP & SEMOB (2008). 21
FIGURA 9 – CAPACIDADE MÁXIMA DOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE. 27
FIGURA 10 – MODOS DE TRANSPORTE COLETIVO (A) ÔNIBUS (B) BRS (C) BRT (D) TREM DE SUPERFÍCIE (E) METRÔ (F) MONOTRILHO (G) TROLEBUS (H) VLT (I) BONDE (J) AGT. 30
FIGURA 11 - CAPACIDADE DE TRANSPORTE DOS DIFERENTES MODOS. FONTE: ALOUCHE (2014). 33
FIGURA 12 – GRÁFICO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS QUANTO A CAPACIDADE DE TRANSPORTE. 34
FIGURA 13 – SISTEMAS BRTS EM OPERAÇÃO PELO MUNDO. 37
FIGURA 14 – EVOLUÇÃO MUNDIAL DO BRT. 38
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS BRT NOS CONTINENTES. 39
FIGURA 16 – DADOS DOS SISTEMAS BRT POR CONTINENTE. 40
FIGURA 17 – FORMAS DE ENERGIZAÇÃO DOS VEÍCULOS. 41
FIGURA 18 – SISTEMAS VLT PELO MUNDO. 43
FIGURA 19 – ESTRUTURA DO MODELO DE COMPARAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS. 55
FIGURA 20 – PROPORÇÃO DE PESSOAS COM TEMPO MÉDIO PARA O TRAJETO CASA-TRABALHO DE ATÉ 30 MINUTOS. 65
FIGURA 21 – EVOLUÇÃO DA FROTA POR CATEGORIA. 65
FIGURA 22 – PARTICIPAÇÃO SETORIAL NO CONSUMO DE ENERGIA DO ESTADO, EM 2010 66
FIGURA 23 - PARTICIPAÇÃO DOS SETORES ECONÔMICOS NAS EMISSÕES TOTAIS DE ENERGIA DO ESTADO, EM 2010. 67

FIGURA 24 – EMISSÕES TOTAIS DE ENERGIA, POR SETOR E POR FONTE, EM GGCO2E, ANO 2010. 67
FIGURA 25 – COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PARA O MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO ENTRE 2005 E 2012. 68
FIGURA 26 - GERAÇÃO DE ENERGIA (CENTRAIS ELÉTRICAS DE SERVIÇO PÚBLICO E AUTOPRODUTORAS) POR FONTE, EM 2010. 71
FIGURA 27 – CORREDORES BRTS PLANEJADOS PARA A CIDADE DO RIO DE JANEIRO. 73
FIGURA 28 – TRAJETO DO CORREDOR BRT TRANSOESTE. 74
FIGURA 29 – PONTOS POSITIVOS DO BRT TRANSOESTE, SEGUNDO PESQUISA DE SATISFAÇÃO COM OS PASSAGEIROS. 76
FIGURA 30 – TRAJETO COM AS ESTAÇÕES EM OPERAÇÃO DO BRT TRANSOESTE. 77
FIGURA 31 – CURVA DA MÉDIA DIÁRIA DE PASSAGEIROS POR HORA NO BRT TRANSOESTE. 78
FIGURA 32 - CURVA DO PERCENTUAL DE PASSAGEIROS POR HORA NO BRT TRANSCARIOCA. 79
FIGURA 33 – TRAJETO DO BRT TRANSCARIOCA. 81
FIGURA 34 – REDUÇÃO NO TEMPO DE VIAGEM COM O BRT TRASCARIOCA. 82
FIGURA 35 – DEMANDA DIÁRIA E MÉDIA SEMANAL DO BRT TRANSCARIOCA. 82
FIGURA 36 – ESTAÇÃO TÍPICA NO BRT TRANSOESTE. 89
FIGURA 37 – IMAGENS DE SATÉLITE DOS TERMINAIS EXISTENTES NO BRT TRANSOESTE. 89
FIGURA 38 – ESTRUTURA DO MODELO. 92
FIGURA 39 – EVOLUÇÃO DOS PREÇOS DO DIESEL E ELETRICIDADE NO BRASIL. 102
FIGURA 40 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA DEMANDA MÁXIMA DE PASSAGEIROS NA RAZÃO DE CUSTOS DOS SISTEMAS. 105
FIGURA 41 – GRÁFICO DOS CUSTOS EM FUNÇÃO DA DEMANDA DE PASSAGEIROS. 106
FIGURA 42 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CUSTOS DE CAPITAL. 107
FIGURA 43 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS CUSTOS OPERACIONAIS. 108
FIGURA 44 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA AS TAXAS DE CRESCIMENTOS DOS CUSTOS. 109
FIGURA 45 – EMISSÕES DE CO_2 POR MWH GERADO, EM 2013. 110
FIGURA 46 – EMISSÕES ANUAIS DE CO_2 DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA. 111
FIGURA 47 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO INSERIDO NO HOMER. 112
FIGURA 48 – PERFIL DE DEMANDA INSERIDO NO HOMER. 112
FIGURA 49 – GRÁFICO DOS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O PROJETO. 114

FIGURA 50 – FLUXO DE CAIXA DOS CENÁRIOS ELETRIFICADOS (A) ALIMENTADO SOMENTE PELA REDE (B) ALIMENTADO PELA REDE E UMA MENOR INSERÇÃO FOTOVOLTAICA (C) ALIMENTADO PELA REDE E UMA MAIOR INSERÇÃO FOTOVOLTAICA 117
FIGURA 51 - POTÊNCIA DE SAÍDA DO PAINÉIS FOTOVOLTAICOS AO LONGO DO ANO. 119
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E A CURVA DE DEMANDA. 119
FIGURA 53 – COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA DE POTÊNCIA OBTIDA DA REDE ELÉTRICA E A CURVA DE POTÊNCIA DE SAÍDA DO INVERSOR. 120
FIGURA 54 – DIVISÃO DA MÉDIA MENSAL DE UTILIZAÇÃO DE ENERGIA POR TIPO DE FONTE. 121
FIGURA 55 – FLUXO DE ENERGIA NO SISTEMA. 121
FIGURA 56 – ANÁLISE DOS VALORES MENSAIS DE EXCESSO DE ELETRICIDADE. 122
FIGURA 57 – GRÁFICO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CUSTO DE CAPITAL DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS VERSUS O VALOR DA TARIFA DE ENERGIA. 124

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EVOLUÇÃO DOS DADOS DE MUNICÍPIOS BRASILEIROS COM MAIS DE 60MIL HABITANTES. 17

TABELA 2 – ESPAÇO OCUPADO NA VIA PELOS MODOS DE TRANSPORTE NO ESPAÇO URBANO 18

TABELA 3 – FATORES RELEVANTES AO PROCESSO DECISÓRIO 22

TABELA 4 – EXEMPLOS DE CUSTOS OPERACIONAIS DO TRANSPORTE PÚBLICO 23

TABELA 5 – PRINCIPAIS TIPOS DE TRANSPORTE COLETIVO. 29

TABELA 6 – ELEMENTOS QUE CONSTITUEM UM SISTEMA BRT. 35

TABELA 7 - CUSTOS OPERACIONAIS EM DIFERENTES BASES 48

TABELA 8 – QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS BRT E VLT 51

TABELA 9 – EMISSÕES DE GEE, PIB E POPULAÇÃO NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO ENTRE 2005 E 2012. 68

TABELA 10 – EMISSÕES DOS SUBSETORES DO USO DE ENERGIA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO PARA O ANO 2012, EM EM GGCO2E. 70

TABELA 11 - QUADRO COM OS INDICADORES DE IMPACTO DO BRT TRANSOESTE 78

TABELA 12 – ÁREA DAS ESTAÇÕES E TERMINAIS 89

TABELA 13 – DADOS DE ENTRADA PARA DEFINIR AS VARIÁVEIS DE DEMANDA. 93

TABELA 14 – DADOS DE ENTRADA PARA DEFINIR OS PARÂMETROS DO SISTEMA 94

TABELA 15 – DADOS DE ENTRADA PARA DEFINIR OS PARÂMETRO GLOBAIS E DE CUSTOS. 97

TABELA 16 – CONSUMO DE ENERGIA NOS TRANSPORTES URBANOS DE PASSAGEIROS 100

TABELA 17 – RESULTADOS DO MODELO PARA A PERFORMANCE DO SISTEMA 103

TABELA 18 – RESULTADOS DO HOMER PARA OS CENÁRIOS ELETRIFICADOS. 116

TABELA 19 – EMISSÕES EM CADA CENÁRIO 118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGT – *Automated Guideway Transit*

AHP –*Analytic Hierarchy Process*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANTP – Associação Nacional de Transporte Público

APS – Alimentação Pelo Solo

BRT – *Bus Rapid Transit*

BRS – Bus Rapid Service

CAPEX - Custo de investimento, do inglês *Capital Expenditure*

CO –Monóxido de Carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

CO_2e – Dióxido de Carbono equivalente

GEE – Gases do Efeito Estufa

Grid – Rede elétrica convencional

HOMER – *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*

HSP – Hora de Sol Pleno

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICE – Internal Combustion Engine

IEA – *International Energy Agency*

LRT – *Light Rail Transit*

MLS – *Maximum Load Section*

$PM_{2,5}$ – Material Particulado com diâmetro menor do que 2,5 micrometros

PM_{10} – Material Particulado com diâmetro menor do que 10 micrometros

N_2O – Óxido Nitroso

NOx – Óxidos de Nitrogênio

NPC – *Net Price Cost*

O&M – Operação e Manutenção

PDDU - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável

PHS – Passageiro Hora Sentido

PIB – Produto Interno Bruto

pkm – passageiro-quilômetro

Pmáx - Demanda Horária Máxima de Passageiros

PV – Fotovoltaico

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e Custódia

SMTR – Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro

SOx – Óxidos de Enxofre

sps – espaços ofertados, do inglês spaces

Tep – Tonelada equivalente de petróleo

ton - tonelada

vkm – veículo-quilômetro

VLT – Veículo Leve sobre Trilhos

VPL – Valor Presente Líquido

Wp – Watt-pico

1 INTRODUÇÃO

As características de evolução das aglomerações humanas ao longo da história são consequência de interações complexas de muitas forças, entre as quais o transporte tem grande destaque (Vuchic, 2007). Dado que os recursos materiais e humanos não se distribuem uniformemente no espaço, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos sobre os meios de deslocamento necessários para garantir o acesso a estes recursos da melhor maneira possível (Senna, 2014). Sendo assim, os serviços de transportes buscam garantir os fluxos internos das cidades e as interações do ambiente urbano, para que, assim, as melhorias do setor promovam aumento da qualidade de vida da população (Lerner, 2009).

O setor de transporte atua como um serviço intermediário que fornece a infraestrutura necessária para permitir as interações das atividades urbanas (trabalho, estudo, lazer, moradia, etc) essenciais para o desenvolvimento das cidades. Segundo Senna (2014), "a infraestrutura de transportes de uma região possui papel preponderante em seu desempenho, dado que é condição básica para a realização de trocas econômicas entre locais espacialmente dispersos".

Por esse motivo, a política de mobilidade urbana, além de tratar dos serviços de transportes, objetiva articular os deslocamentos de forma planejada para garantir o acesso universal às oportunidades e ao desenvolvimento das atividades urbanas (Gomide, 2008). A questão que se coloca é de como pôr o planejamento em prática, diante do cenário historicamente desfavorável e caótico de evolução das cidades.

O planejamento de transporte tem o papel de orientar os caminhos de expansão do setor para cada região, no curto, médio e longo prazo. Deve fazer isso, equacionando a função objetivo de projetar sistemas economicamente viáveis, condizentes com a realidade do local e que atendam aos problemas e às necessidades da sociedade e dos agentes envolvidos. Agregando complexidade ao problema, têm-se questões, como o descontrolado processo de urbanização, que originam condições críticas para a infraestrutura de transporte urbano, dada às margens de manobra cada vez menores (Lourenço, 2015).

Se por um lado, o transporte viabiliza a realização de atividades econômicas e as interações sociais, por outro lado, os efeitos colaterais indesejáveis podem gerar deseconomias irreversíveis (Senna, 2014). Sendo assim, torna-se relevante a realização de

estudos que auxiliem o planejamento de transporte na implantação de sistemas custo-efetivos, adequados às realidades de cada local e menos poluentes ao meio ambiente.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Considerando o aumento das preocupações globais com os impactos das mudanças climáticas e com a sustentabilidade do ambiente urbano, o setor de transporte torna-se um dos principais temas de debate, dada sua relação direta com questões energéticas e ambientais. Os crescentes níveis de poluição e congestionamento de tráfego nas cidades estão se tornando questões delicadas, que poderiam ser minimizadas pela adoção de sistemas de transporte público mais eficientes (Barrero, et al., 2008).

O transporte público é um serviço indispensável nas cidades, pois democratiza a mobilidade, permite a locomoção de toda população e diminui os congestionamentos, por oferecer uma alternativa ao transporte individual (Lima, 2013). Para isso, deve-se buscar a racionalização do serviço e a priorização do transporte coletivo.

Considerando as vantagens do transporte coletivo, quanto ao consumo de combustíveis, emissão de poluentes e ocupação do espaço viário, os investimentos neste segmento tornam-se plenamente justificáveis para lidar com os problemas associados ao setor (Abramovitch, 2014). Da energia total utilizada para o transporte urbano, os veículos de transporte coletivo correspondem a 24% e os de transporte individual a 76%, enquanto que, com relação aos deslocamentos motorizados, os transportes coletivos são responsáveis por cerca de 50% (Gomide, 2011). Fica claro, os ganhos de eficiência em termos energéticos e ambientais de se aprimorar a implementação dos transportes públicos.

Ainda assim, o transporte coletivo urbano é responsável por parcela significativa do consumo de energia nas grandes cidades, com impactos indiretos na qualidade do ar e na qualidade de vida dos habitantes dos grandes centros urbanos (Lima, 2013). Desde o final da década de 60, o transporte de passageiros no Brasil aumentou a uma taxa média de 6,4% ao ano, com isso, de 1970 a 2010 a atividade passou de 131,9 bilhões de passageiros-quilômetros para 1.584,5 bilhões de passageiros-quilômetros (EPE, 2012). Por isso, é importante que haja aperfeiçoamentos neste setor que garantam significativas melhorias na qualidade do serviço

prestado, tornando-os mais eficientes, atraindo mais usuários e intensificando o impacto positivo que causam.

Senna (2014), o desenvolvimento de boas ferramentas para auxiliar o planejamento de transporte permite analisar o comportamento dos sistemas em diferentes condições, e assim, antever os impactos resultantes de sua implementação. Dada a preocupação em garantir um uso mais eficiente para os recursos naturais, e no âmbito de atuação sobre o espaço urbano, é fundamental que estas ferramentas incorporem as questões energéticas e ambientais na análise do planejamento. A distribuição do consumo final no setor de transportes no mundo é apresentada na Figura 1. Segundo Abramovitch (2014), "torna-se relevante a realização de estudos e o desenvolvimento de sistemas de transporte com um menor consumo de combustível por passageiro transportado, investindo em modalidades não poluentes".

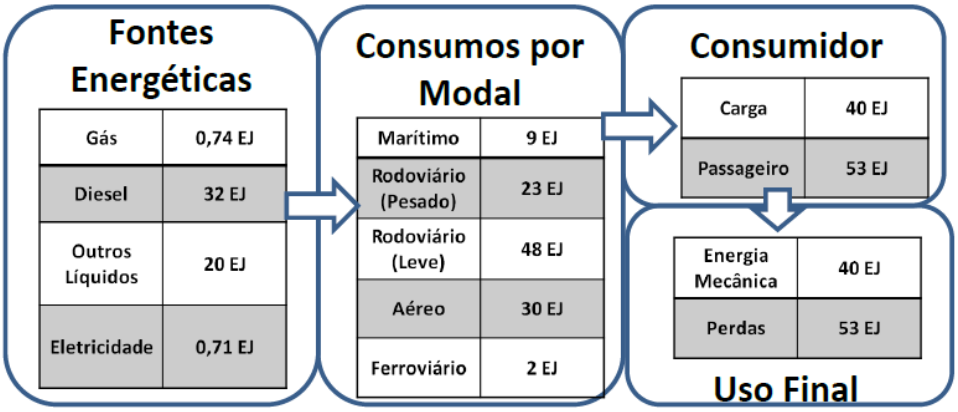


Figura 1 – Distribuição do Consumo Final no Setor de Transportes no Mundo.

Fonte: Maia (2015).

Os meios de transporte, atualmente, representam grande parcela do consumo energético mundial, sendo responsáveis por 27% do total de energia final consumida, equivalente a 2,56 Gtep (Giga-tonelada equivalente de petróleo) (IEA, 2015). Com isso, nota-se que a otimização e as melhorias no setor de transporte não só são importantes para a atividade econômica e competitividade de um país, como também merecem grande atenção para o planejamento da matriz energética.

O setor de transportes é o segundo maior usuário de energia final no Brasil, perdendo apenas para o setor industrial e a participação do setor chegou aos 32,2% no uso final de energia (EPE, 2016). Esse alto consumo energético se dá devido à sua dependência quase

total de fontes energéticas derivadas de petróleo. Mundialmente, cerca de 63,8% do consumo de óleo é dado pelo setor de transporte (IEA, 2015).

No Brasil, a participação das fontes de petróleo no setor de transportes não é tão intensa, devido ao elevado consumo de álcool etílico (anidro e hidratado), para uso direto ou para adição à gasolina. Afinal, 88% dos veículos licenciados no país são Flex[1]. Apesar disso, o consumo de derivados de petróleo representa grande parcela da matriz energética nacional, correspondendo, em 2015, a mais de 40% do consumo de energia final no país (EPE, 2016). Deste consumo final, o diesel representa 18,4%, em que se destaca o uso para o transporte rodoviário, que em 2010, representava 92,2% do transporte de passageiros, conforme apresentado na Figura 2.

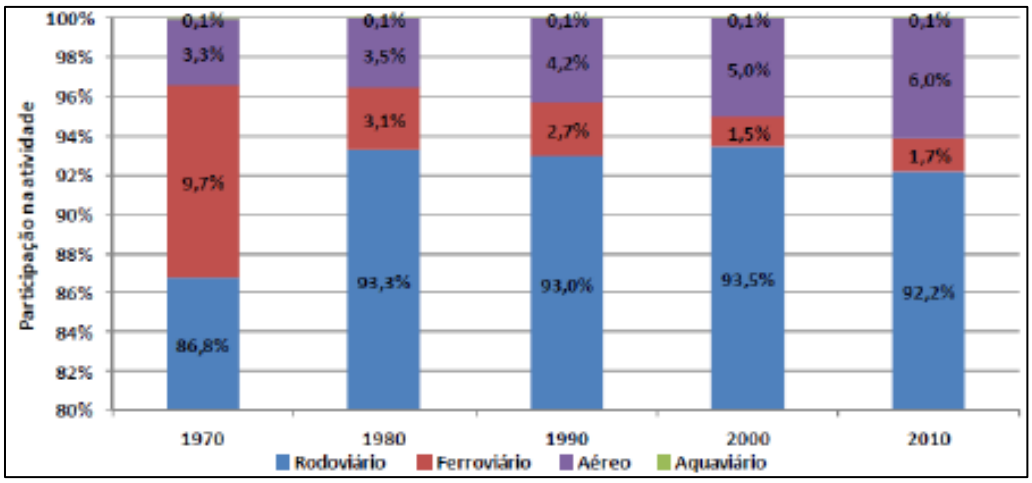


Figura 2 – Evolução da atividade de transporte de passageiros.

Fonte: EPE (2012).

O elevado consumo de combustíveis fósseis tem significativos impactos negativos para o meio ambiente. Segundo Motta (2009), ao efetuar os deslocamentos, o setor de transportes também gera externalidades indesejadas devido às emissões atmosféricas. A poluição atmosférica constitui um dos grandes problemas ambientais da atualidade, com consequências negativas na qualidade de vida e na saúde da população (Lima, 2013).

Para Lima (2013), as fontes móveis são as principais fontes de emissão de poluentes nos centros urbanos. Grandes metrópoles, como o Rio de Janeiro, são grandes responsáveis pela emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE) no país. E este município, por exemplo, tem

[1] Dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). Disponível em: <www.anfavea.com.br/docs/siteautoveiculos2016.xlsx>. Acesso em: Janeiro de 2017

o seu setor de transporte como o maior emissor pelo uso de energia, sendo responsável por 30% das suas emissões de GEE, como ilustra a Figura 3 (Centro Clima, 2013).

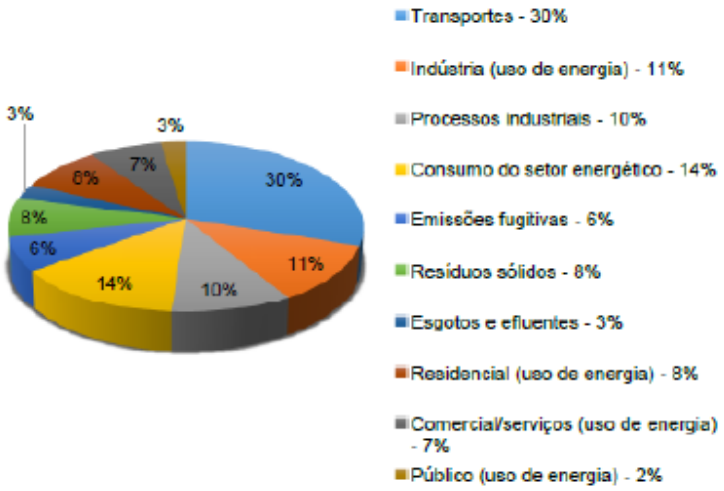


Figura 3 – Participação dos setores mais emissores de GEE na cidade do Rio de Janeiro.
Fonte: Centro Clima (2013).

No mundo, as emissões de GEE pelo setor transportes têm aumentado a um ritmo mais rápido do que qualquer outro setor da economia, chegando a 7,0 $GtonCO_2e$ (Giga-tonelada de CO_2 equivalente) em 2010, o que representa 23% das emissões de CO_2 relacionadas com o uso de energia (Maia, 2015). O destaque vai para o modal rodoviário, demonstrado na Figura 4. No Brasil, em 2015, as emissões pelo transporte corresponderam a 42% do total de emissões antrópicas geradas no país, que representam 194 milhões de toneladas de CO_2 (EPE, 2016).

Segundo Borba (2012), "uma das formas de reduzir a dependência do setor de transportes e as emissões de poluentes locais e globais é a partir do uso de novas tecnologias que permitirão a interação do setor de transportes com o sistema elétrico". De fato, para reduzir as emissões, transportes elétricos são utilizados em diversas cidades no mundo (Barrero, et al., 2008). Para o Brasil, essa alternativa merece ainda maior destaque, visto que o país possui uma matriz de energia elétrica com grande participação de fontes renováveis, o que potencializa o impacto da eletrificação do transporte para redução das emissões de GEE (Motta, 2013). A Figura 5 ilustra essa característica da matriz brasileira.

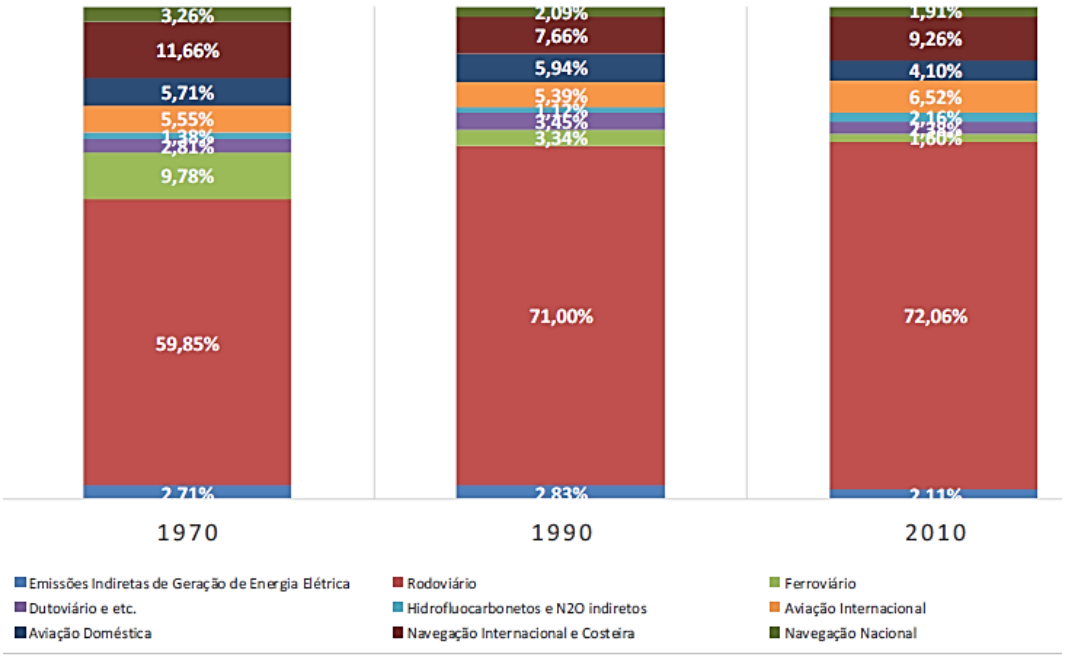


Figura 4 – Emissões Diretas de GEE pelo Setor de Transporte no Mundo.

Fonte: Maia (2015).

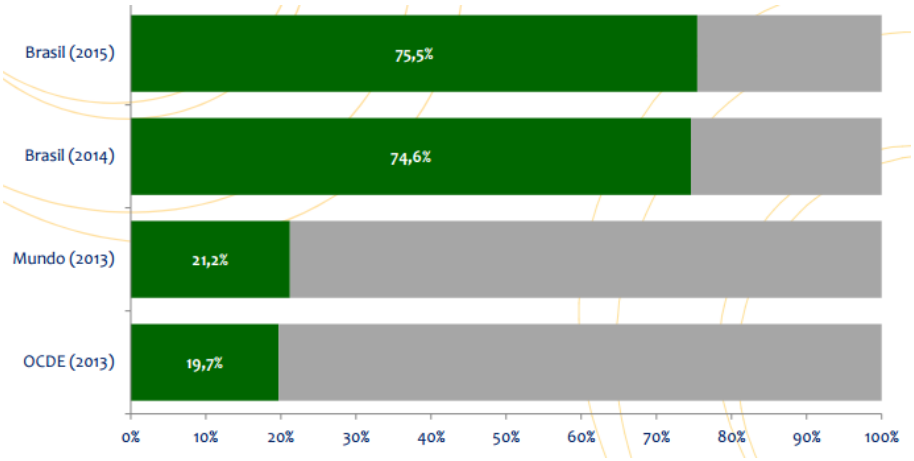


Figura 5 – Participação de Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira.

Fonte: EPE (2016).

Diferentemente das tecnologias de eletrificação do transporte individual, o transporte coletivo elétrico possui várias opções já consagradas, através do uso de sistemas sobre trilhos. No entanto, no Brasil, ainda há um grande predomínio do transporte rodoviário, e as decisões políticas para expansão do setor parecem ainda seguir essa tendência (Motta, 2013).

Observando as tendências de expansão dos sistemas de transporte coletivo, merecem destaque as tecnologias de média capacidade. Estas têm sido a principal opção devido ao fato de mostrarem ser soluções eficientes no atendimento à demanda, com custos acessíveis e viáveis em curto prazo (Lerner, 2009). Assim, os custos e o tempo de implantação se tornam mais condizentes com a curta janela de oportunidades do setor de transporte, visto que, muitas vezes, esta depende do tempo de mandato dos tomadores de decisão da política de transporte (ITDP & SeMob, 2008).

A nível nacional, as alternativas tecnológicas de média capacidade mais conhecidas são o BRT (*Bus Rapid Transit*) e o VLT (Veículo Leve sobre Trilhos). Oliveira *et al.* (2013) destaca que, devido ao foco na expansão destes sistemas, o processo de escolha entre elas é objeto de debates abrangendo interesses técnicos, econômicos e políticos de diferentes agentes da sociedade. A cidade do Rio de Janeiro, palco de eventos mundiais, nos últimos anos, evidencia esta tendência de expansão do setor, tendo adotado, recentemente, sistemas BRT e VLT.

Dado esse modelo de expansão, é importante que as características dessas alternativas sejam estudadas no curto, médio e longo prazo. Afinal, para que a escolha reflita as necessidades da sociedade, é necessário que a análise dos custos e benefícios seja feita para todo o ciclo de vida do projeto e incorpore as externalidades associadas. A estimativa de custos é um fator importante na avaliação dos sistemas de transporte e na decisão sobre qual alternativa escolher (Hsu, 2005), no entanto vale ressaltar que a questão é mais complexa do que apenas selecionar a tecnologia mais barata (Gomide, 2011).

Vuchic (2007) destaca que a tração elétrica é superior em desempenho, conforto dos passageiros e impactos externos, mas envolve um investimento inicial maior. Apesar de discutível, tipicamente, o VLT é mais caro de construir e implementar do que o BRT, mas tem custos de Operação e Manutenção (O&M) significativamente menores do que o BRT (Hsu, 2005). Por isso, Vuchic (2005) afirma que volumes pesados de passageiros favorecem a implementação do VLT em relação ao BRT. Entretanto, esta consideração não parece ter sido feita para a escolha dos sistemas aplicados na cidade do Rio de Janeiro, visto que o sistema BRT atende a demandas muito superiores às projetadas para o VLT.

Em vista disso, o presente trabalho busca preencher algumas das lacunas identificadas na literatura e criar uma ferramenta para embasar a avaliação dos modos de transporte,

abordando a temática dos transportes coletivos por meio de um estudo a respeito das tecnologias que têm sido empregadas e do processo de escolha entre elas. A finalidade é desenvolver uma metodologia prática para aprimorar o planejamento de transportes em relação à sua interação com as questões energéticas e ambientais. Assim, além do modelo de custos a ser aplicado, a proposta deste trabalho é analisar as externalidades associadas à eletrificação do transporte.

Outra contribuição deste estudo é o debate a respeito da integração dos sistemas de transporte sobre trilhos com os serviços e a infraestrutura do setor elétrico, identificando vantagens e desvantagens dessa conexão. Com isso, busca-se aplicar o planejamento energético para, através da integração do setor de transporte com o setor elétrico, propor uma mobilidade urbana menos poluente e analisar o papel que as fontes alternativas possam vir a assumir com esse sistema. Afinal, estes sistemas causam um grande aumento de carga na rede local, que pode ser visto como prejudicial para os equipamentos elétricos, por outro lado, as condições de operação previsíveis do sistema, possibilitam margens de manobra com as cargas que podem facilitar o uso de fontes alternativas de geração de energia. Assim, um benefício ancilar destes sistemas eletrificados pode ser o de assumir um papel importante para favorecer uma maior inserção de energia renovável na matriz elétrica.

Avanços em diferentes tecnologias aplicadas aos sistemas de transporte podem vir a sustentar esta hipótese. Os motores elétricos inteligentes, por exemplo, permitem o monitoramento de seu funcionamento, a simulação das condições ótimas de operação e a comunicação com os centros de controle (Lourenço, 2015). Já o desenvolvimento de supercapacitores aplicados aos veículos atende a diversos propósitos, como armazenar energia, estabilização de tensões na linha e suportar picos de potência (Barrero, et al., 2008), o que permite um controle de tensão com perdas mínimas (Vuchic, 2007).

Assim, como justificativa para esta última análise, vale citar Lourenço (2015), quando diz que:

> "Quando o conceito de *integração* é analisado no contexto de transportes, as definições de intermodalidade e multimodalidade vêm instantaneamente à mente do especialista no setor. Ambas as vertentes da integração refletem o uso de dois ou mais modos de transportes. Entretanto, o conceito pode ser empregado de uma forma mais abrangente, que envolve a operacionalização e a construção da infraestrutura de transportes em conjunto com outros serviços e infraestruturas" (Lourenço, 2015).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos nas alternativas tecnológicas para os sistemas de transporte coletivo de média capacidade e definir critérios para a tomada de decisão de investimento.

Como objetivos específicos, o estudo pretende:

- Contribuir com o planejamento de transportes, auxiliando no processo de escolha das melhores alternativas de transporte para a sociedade e todos os agentes envolvidos.
- Avaliar o sistema BRT TransOeste e compará-lo com um sistema elétrico hipotético, do tipo VLT, operando no mesmo corredor, e assim, analisar os custos e as emissões atmosféricas.
- Avaliar a integração com os serviços e infraestrutura do setor elétrico e os benefícios ancilares desta associação.
- Propor a eletrificação do BRT e trabalhar a hipótese de que as condições de operação do sistema possam favorecer a implementação de Geração Distribuída por fontes renováveis no projeto.
- Propor um cenário adicional à eletrificação, com a inserção de painéis fotovoltaicos ao longo do Corredor TransOeste.

1.3 JUSTIFICATIVA

A operação de veículos no ambiente caótico de tráfego das atuais grandes cidades exige que haja autonomia e flexibilidade na condução para permitir lidar com trajetos longos, engarrafamentos, ultrapassagens, arrancadas bruscas, mudanças de rota, etc. Dada a necessidade dessa flexibilidade operacional, a menor autonomia dos veículos elétricos pode ser vista como uma restrição para sua maior adoção (Baran, 2012).

No entanto, essa flexibilidade perde importância em sistemas de transporte com vias segregadas, que favorecem a instalação de mecanismos de alimentação contínua, possibilitam melhor controle da operação e facilitam o planejamento integrado de sistemas e setores. Com isso, as características de operação de sistemas de média capacidade de transporte são uma motivação para adoção de veículos mais eficientes e menos poluentes.

Ou seja, estes fatos encorajam a proposta de implementação de sistemas de transporte elétrico para os corredores BRTs.

Tecnicamente, uma preocupação para a ampla adoção da eletricidade no setor de transportes está associada ao aumento da demanda elétrica e à possível necessidade de aumento da capacidade de geração, além de aumentar o risco de sobrecargas em transformadores e linhas de distribuição (Simon, 2013). Por isso, é importante pesquisar e analisar esta interação do setor de transportes com o sistema elétrico, a fim de conhecer as características e peculiaridades do sistema e planejar seu desenvolvimento, a fim de que seja identificada a melhor alternativa para a evolução do setor de transportes.

Uma alternativa para lidar com esta limitação técnica está no aproveitamento de recursos energéticos disponíveis no próprio local de consumo, através da Geração Distribuída (Gilbert, et al., 2007). Além disso, a Geração Distribuída aliada ao uso direto no transporte elétrico favorece à utilização de fontes renováveis, já que um planejamento bem feito para o contínuo fluxo de cargas exigido na operação de transporte permite absorver a variabilidade de geração por estas fontes. Dessa forma, é possível reduzir os efeitos prejudiciais que poderiam ocorrer na rede elétrica.

Aliado a esta justificativa para estudos de eletrificação no setor de transporte, está o fato de países em desenvolvimento, como o Brasil, não possuírem sistemas de transportes maduros e que devem sofrer um crescimento relevante nos próximos anos (Borba, 2012). Com isso, planejar adequadamente significa uma oportunidade de realizar uma expansão com qualidade e eficiência que permita uma movimentação de pessoas e recursos menos intensiva em energia e menos poluidora.

O setor de transportes da cidade de Rio de Janeiro não foge a esta característica nacional e, atualmente, está em contínua modificação, tendo sido um dos pontos de maior preocupação na realização dos Jogos Olímpicos de 2016 (Oliveira, et al., 2013). A principal forma de expansão do setor nos últimos anos tem sido feita pelo sistema BRT, que se baseia na construção de faixas exclusivas para ônibus movidos a diesel (Cabral, et al., 2013a).

Sabendo que o setor de transportes está fortemente associado a questões de consumo energético e emissões atmosféricas, a opção de adotar este tipo de transporte movido a combustíveis fósseis vai contra o esforço global para lidar com o tema das mudanças climáticas. Com isso, são levantados os questionamentos: seria este o modelo adequado de

expansão? Quais são as outras alternativas e qual a viabilidade delas? Quais os benefícios diretos e indiretos envolvidos em cada opção? Em que situação cada alternativa é mais apropriada? E quais os critérios adequados para a tomada de decisão?

Sendo assim, cabe analisar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais do sistema atual e de cenários alternativos que poderiam ser adotados, de modo a obter maiores informações que auxiliem a tomada de decisão quanto ao caminho da expansão para o setor.

1.4 ESTRUTURA GERAL

Para desenvolver o tema, este trabalho está estruturado em seis capítulos.

Após a introdução, o segundo capítulo aborda, de forma ampla, as questões envolvidas no planejamento de transportes urbanos de passageiros. Para isso, é feita uma revisão dos conceitos importantes sobre o assunto e são apresentadas as tecnologias existentes, bem como os estudos realizados para compará-las.

O terceiro capítulo desenvolve a metodologia proposta pelo trabalho, descrevendo o processo de elaboração e os modelos utilizados.

O quarto capítulo apresenta o estudo de caso e trata de questões referentes ao sistema proposto para aplicação da metodologia. Primeiro, são debatidos os critérios escolha do projeto para estudo de caso. Depois, o projeto é descrito através de um panorama geral da região na qual está inserido e das suas características específicas.

O quinto capítulo trata da aplicação da metodologia no estudo de caso e discute os resultados obtidos pelo trabalho, que servem de base para a análise final da ferramenta desenvolvida.

O sexto capítulo disserta sobre as conclusões extraídas do estudo e indica possíveis pesquisas futuras.

2 PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS

"O transporte urbano é uma infraestrutura crítica, pois o crescimento populacional, junto à grande concentração de pessoas, aumenta o desafio dos gestores com relação ao desempenho do setor, que conta com margens de manobra cada vez menores para atuação e manutenção da fluidez do trânsito" (Lourenço, 2015). Nesse sentido, o planejamento de transporte surge como estudo essencial para garantir as interações e o acesso aos recursos nas cidades. Portanto, antes de realizar qualquer análise sobre o setor, é fundamental entender o processo de planejamento e embasar a aplicação dos estudos.

Sendo assim, o âmbito deste capítulo é tratar de maneira geral o contexto em que se insere o planejamento de transporte urbano. Para então, direcionar o estudo aos sistemas de transporte coletivo de passageiro, dada a importância destes para lidar com os problemas de trânsito das cidades. E por fim, fazer uma revisão do processo de escolha das alternativas para o setor, identificando os critérios fundamentais, e fazer uma descrição das principais tecnologias de transporte existentes, bem como, dos estudos existentes para comparação entre elas.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRANSPORTE URBANO

A evolução do espaço urbano condiciona a capacidade de circulação dos recursos necessários ao desenvolvimento e ao funcionamento das atividades urbanas (CEDES, 2015). Por definição, "a urbanização é um processo constitutivo e transformador da organização espacial e, num contexto de globalização, comporta fenômenos que dão origem a configurações espaciais distintas" (IBGE, 2015).

Historicamente, o processo de urbanização é explicado como o fenômeno de aumento da população nas cidades devido à migração da população do campo para estes centros urbanos (Baeninger, 2010). Mais do que isso, o processo de urbanização retrata a evolução do espaço urbano, atrelada à noção de cidade. Sendo, o termo "cidade" entendido como o espaço de escala definida, por sua dimensão demográfica, que propicia relações diversas de trocas e transferências materiais e imateriais em um ambiente de interações e fluxos constantes (IBGE, 2015).

Antes do século 19, a população mundial era predominante rural, com 70 a 90% das pessoas vivendo no campo (Vuchic, 2007). Essencialmente estimulado pela industrialização da economia, que intensificou esse processo migratório, e pelo aumento do crescimento vegetativo, o mundo se tornou majoritariamente urbano, com mais de 50% da sua população vivendo em cidades (Lerner, 2009).

Seguindo essa tendência mundial, a partir de 1970, o Brasil passa a ser um país com população urbana superior à rural (Brito, 2006). A taxa de urbanização do Brasil, nos anos 60, era de 44,7%, demonstrando ser um país de características agrícolas, e passou para 67,6% nos anos 80, em que a maior parte da população vivia nas cidades[2]. Os dados censitários de 2010 revelaram que 85% da população, o correspondente a 160 milhões de pessoas, viviam nos centros urbanos (CEDES, 2015). A Figura 6 ilustra essa transição, considerando no grau de urbanização 1, a definição do IBGE de população urbana e rural, e no grau de urbanização 2, a definição de população rural para habitantes de cidades com menos de 20 mil residentes.

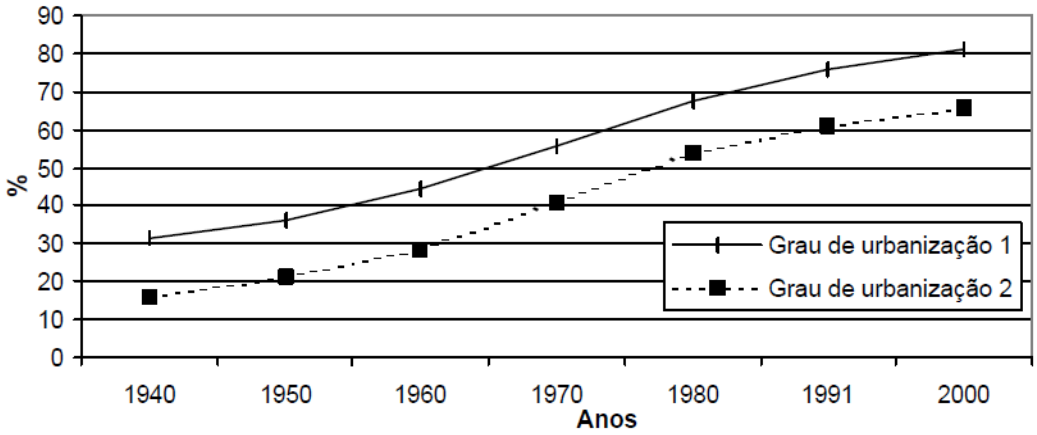


Figura 6 – Evolução da Urbanização no Brasil.

Fonte: Brito *et al.* (2002).

Essa transição na configuração populacional brasileira ocorreu de maneira abrupta e acelerada, o que proporcionou um crescimento desordenado das cidades, com consequências trágicas para sociedade, sentidas até os dias atuais (Baeninger, 2010). As sequelas da falta de planejamento e controle dessa expansão das cidades são retratadas por grandes desigualdades sociais, impactos ao meio ambiente, déficit habitacional, problemas de saneamento e saúde

[2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: Janeiro de 2017

pública, entre tantos outros desafios enfrentados nos centros urbanos. E o serviço de transporte não ficaria fora deste quadro (CEDES, 2015).

No que se refere ao transporte, foco desta dissertação, pode-se verificar um verdadeiro colapso do setor dentro dos centros urbanos. O cenário encontrado nas cidades e metrópoles brasileiras é de congestionamentos constantes, crescimento desenfreado da frota de veículos e motos, priorização do transporte individual, aumento da poluição atmosférica por emissões veiculares, transporte coletivo clandestino, violência no trânsito, entre outros problemas associados (Lima, 2013).

> "É inegável que as cidades concentram oportunidades, pela oferta de habitação, trabalho, educação, lazer e serviços em geral, cujos usufrutos sujeitam-se ao transporte, o qual, por sua vez, depende da prestação dos serviços a ele vinculados, da infraestrutura viária, de equipamentos afins, dos veículos e da gestão do trânsito. Juntos, esses aspectos configuram a mobilidade urbana, que deve assegurar o acesso de cada cidadão ao local por ele almejado. Assim, a mobilidade é suscetível ao modo como as cidades crescem e se desenvolvem, ou seja, onde e como se instalam as moradias, os locais de trabalho, os serviços, o comércio, a indústria e o lazer. Sem conseguir implementar a infraestrutura demandada pelo aumento da frota em circulação e sem privilegiar o transporte coletivo, as municipalidades vêm se deparando com os problemas decorrentes do predomínio do transporte individual motorizado nas áreas urbanas: congestionamentos, poluição do ar, demanda crescente por áreas de estacionamento, críticas à qualidade do serviço público de transporte coletivo e aumento dos acidentes de trânsito, os quais comprometem a mobilidade urbana" (CEDES, 2015).

Dada a necessidade dos serviços de transportes em garantir os fluxos internos das cidades e as interações do ambiente urbano, as melhorias do setor de transporte estarão diretamente associadas ao aumento da qualidade de vida dos seus habitantes (Lerner, 2009). De fato, por definição, "o Transporte de uma forma geral, é um meio para que outras atividades produtivas possam efetivar-se cabendo, portanto, ao poder público o dever de bem provê-lo para atender ao direito dos cidadãos de consumar os seus deslocamentos" (Oliveira, et al., 2013).

Segundo Senna (2014), "a infraestrutura de transportes de uma região possui papel preponderante em seu desempenho dado que é condição básica para a realização de trocas econômicas entre locais espacialmente dispersos" (Senna, 2014). O mesmo autor ainda cita a capacidade de prover efeitos multiplicadores positivos a partir da implementação de um sistema de transporte eficiente, ou seja, contribui muito além do emprego e valor agregado gerados pela atividade em si. O que por outro lado, mostra que as oportunidades perdidas em

sistemas de transportes ineficientes representam um custo econômico, que se soma as externalidades sociais e ambientais, e devem ser evitados.

De fato, "a deterioração do transporte urbano, tem levado ao aumento das deseconomias relacionadas ao setor, gerando significativo impacto para as economias das cidades e, consequentemente, para o desenvolvimento sustentável dos países" (CEDES, 2015). Por esse motivo, a política de mobilidade urbana objetiva, além de tratar os serviços de transportes, articular os deslocamentos de forma planejada para garantir o acesso universal às oportunidades e ao desenvolvimento das atividades urbanas (Gomide, 2008). A questão que se coloca é de como pôr o planejamento em prática, dado o cenário historicamente desfavorável e caótico de evolução das cidades brasileiras.

> "Diariamente acontecem cerca de 200 milhões de deslocamentos motorizados nas cidades brasileiras. O custo desses deslocamentos em termos de tempo, poluição, acidentes e investimento é gigantesco e, em geral, desfavorável à mobilidade da população. E este problema tende a se agravar, com reflexos negativos na produtividade, no meio ambiente urbano e na qualidade de vida. Ninguém produz bem depois de desperdiçar tempo e energia para chegar ao trabalho" (Lerner, 2009).

Não há dúvidas de que gerir o elevado número de deslocamentos em espaços concentrados e minimizando os congestionamentos de vias, não é tarefa fácil. Ainda mais, considerando a forte adoção de veículos individuais. Segundo relatório da ANTP, elaborado com dados obtidos de 2003 a 2012 pelo Sistema de Informação da Mobilidade Urbana:

> Enquanto a população aumentou em 16%, o número de viagens aumentou em 27%. Sendo que grande parte deste aumento de viagens por habitante resume-se aos modos individuais (automóvel e motocicleta). O indicador de viagens por habitante por dia do Transporte Individual aumentou em 18%, enquanto o de Transporte Coletivo aumentou 6% e o de Transporte Não Motorizado também aumentou 6%. Além disso, a quantidade de automóveis aumentou 70%. Desta forma, o período considerado viu um aumento na participação do transporte individual motorizado sobre o total de viagens (ANTP, 2014).

Em consequência, os índices relativos à quantidade de veículos particulares giram em torno de 30 automóveis para cada 100 habitantes, o que reflete o histórico de medidas de incentivo ao uso do transporte individual em detrimento de investimentos em modos coletivos (Observatório das Metrópoles, 2015). Por outro lado, não se pode esquecer o grande atrativo que é o uso do automóvel, que tem grandes vantagens para o indivíduo em relação a outros modais, como a flexibilidade de percorrer diferentes percursos, além do conforto e da sensação de status proporcionados (Motta, 2013). Conforme CEDES (2015), "a compra do

carro próprio transformou-se em símbolo de ascensão social". A Figura 7 a evolução da participação modal no número de viagens.

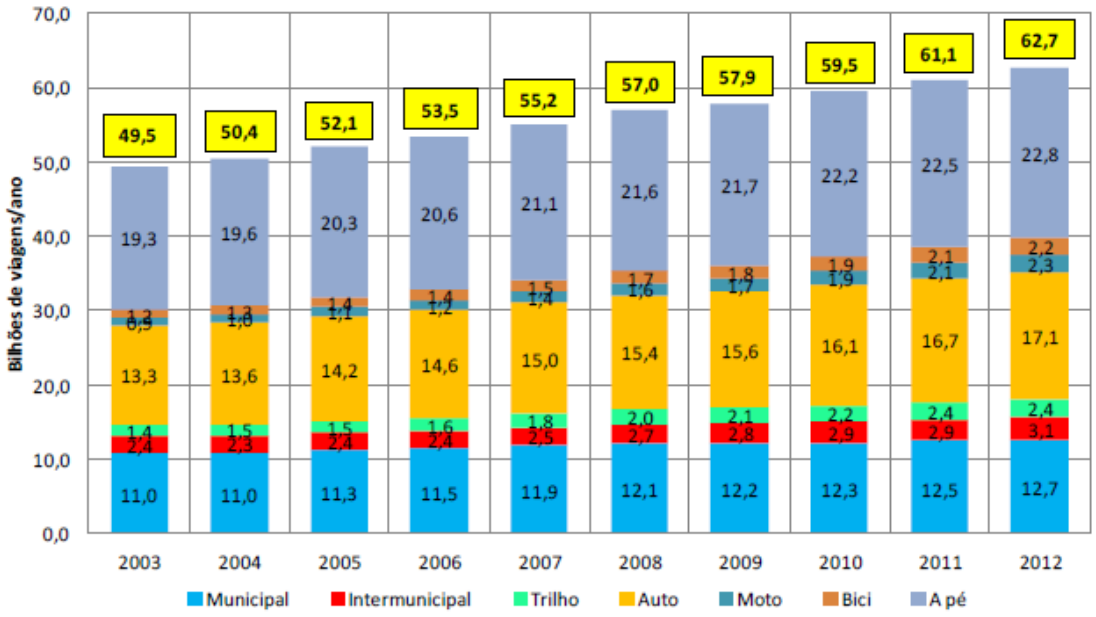


Figura 7 – Evolução das viagens por modo.

Fonte: ANTP (2014).

Não à toa, com o favorável período econômico brasileiro, a partir de 2003, constatou-se um aumento dos gastos em transporte privado por todos os grupos de renda, enquanto os gastos com transporte público aumentaram apenas entre as faixas de renda mais baixa e tem diminuído entre os rendimentos mais elevados (Ribeiro, et al., 2014). Tal fato corrobora com o padrão insustentável de consumo estimulado pelas políticas públicas do país. Afinal, o poder de compra da população incentivou não só o aumento de viagens, como também elevou a aquisição de automóveis próprios que passaram a circular nas cidades.

Verificando o tamanho da frota brasileira, dados de outubro de 2016 informam que entorno de 80% do total é formado por automóveis e motocicletas[3]. E uma análise feita com dados de 2003 a 2009, apresentada na Tabela 1, mostra que a evolução da frota, a uma taxa anual de crescimento de 7%, é superior as dos demais indicadores, como população, renda, extensão das vias e frota de veículos de transporte coletivo (Gomide, 2011). Importante

[3] Base de dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016> Acesso em: Fevereiro 2017

destacar a diferença em relação à extensão do espaço viário, que claramente aponta para a insustentabilidade deste paradigma do setor.

Tabela 1 – Evolução dos Dados de Municípios Brasileiros com mais de 60mil Habitantes.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Taxa anual de crescimento
População (milhões)	**108**	**111**	**113**	**115**	**117**	**120**	**121**	**2,5%**
Renda Chefe Família (R$)	**1034**	**1025**	**1044**	**1091**	**1128**	**1270**	**1310**	**4,0%**
Vias (mil Km)	**294**	**304**	**309**	**314**	**319**	**328**	**332**	**2,0%**
Coletivos (milhares)	**93,0**	**95,2**	**97,6**	**97,1**	**100,6**	**102,3**	**103,4**	**1,8%**
Veículos (milhões)	**18,4**	**19,3**	**20,5**	**21,2**	**24,0**	**25,9**	**28,0**	**7,2%**

Fonte: Gomide (2011)

De fato, "o atual sistema de transporte urbano demonstra a necessidade da modernização dos seus elementos, sendo a saturação das vias um dos resultados de sua desestruturação" (Oliveira, et al., 2013). Segundo Gomide (2011), enquanto levaria 35 anos para dobrar a extensão da malha viária, apenas 10 anos seriam suficientes para dobrar o número de veículos, gerando uma enorme incompatibilidade entre oferta e demanda de trafego.

Como consequência deste crescimento acelerado da frota de automóveis, têm-se excessivos prejuízos nas atividades da sociedade, provocados pelos constantes congestionamentos das vias (ANTP, 2014). "Uma das alternativas para redução dessa saturação seria transportar mais pessoas ocupando um menor espaço nas vias" (Oliveira, et al., 2013). Assim, a principal estratégia para lidar com este cenário de crescimento da demanda não poderia ser outra, que não a valorização e o incentivo ao uso do transporte público.

"O transporte público em seu sentido mais amplo se refere a serviços coletivos de passageiros" (ITDP & SeMob, 2008). Trata-se de sistemas de transporte com rotas e horários fixos, capazes de transportar um número grande de passageiros e disponíveis para uso de

todas as pessoas que pagam a tarifa estabelecida (Vuchic, 2007). Os exemplos mais comuns de transportes coletivos são os ônibus, trens e metrôs.

"O espaço *per capita* de via ocupado por cada modo de transporte, por exemplo, revela que, para os automóveis, cada passageiro chega a ocupar quase oito vezes mais espaço das vias públicas do que o passageiro de ônibus", conforme apresenta a Tabela 2 (Gomide, 2011). Um carro de dimensões médias, 1,70 metros por 3,00 metros, transporta até 5 passageiros, já um ônibus, de 2,60 metros de largura por 12,00 metros de comprimento, leva cerca de 80 pessoas (CEDES, 2015). Dada a realidade do meio urbano, em que a disputa pelo espaço físico é cada vez maior, encontrar formas de aliviar os congestionamentos pode reduzir não só o tempo de viagem, com também, os custos associados ao transporte (Lerner, 2009).

Tabela 2 – Espaço Ocupado Na Via Pelos Modos De Transporte No Espaço Urbano

	Automóvel	Motocicleta	Ônibus
Espaço na via	**21m²**	**8m²**	**54m²**
Lotação média	**1,5 passageiros**	**1,1 passageiros**	**30 passageiros**
Espaço per capita	**14,0m²**	**7,3m²**	**1,8m²'**
Proporção vs Ônibus	**7,8**	**4**	**1**

Fonte: Gomide (2011).

Desta forma, um sistema de transporte mais eficiente buscaria otimizar os deslocamentos, diminuindo os impactos nas cidades brasileira. Vale ressaltar que a opção pelos transportes coletivos não soluciona todos os problemas provocados pela ineficiência dos serviços de transporte, mas ameniza os impactos (Motta, 2013). E poderia amenizar ainda mais, caso fossem implementadas tecnologias menos poluentes ao meio ambiente e mais integradoras às necessidades da sociedade.

Por esse motivo, é essencial estudar as opções tecnológicas disponíveis para os transportes coletivos, avaliando todos os aspectos que devem estar envolvidos na escolha das melhores alternativas para a sociedade. Segundo Senna (2014), "em função da complexidade do problema, é interessante que os profissionais envolvidos no planejamento de transportes disponham de boas e eficientes ferramentas para auxiliar na avaliação do desempenho das diferentes alternativas de sistemas de transporte". Essas ferramentas devem garantir que as escolhas para o setor e transportes estejam adequadas às características da região e às

contínuas modificações da dinâmica urbana, tanto em termos quantitativos como quanto à tecnologia do veículo (Reck, 2015).

2.2 REVISÃO DO PROCESSO DE ESCOLHA DAS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE COLETIVO

O processo de planejamento e tomada de decisão deve ser pensado para que o resultado final reflita as metas e os objetivos da cidade aliado às tendências atuais e projetadas. (ITDP & SeMob, 2008). Para que este planejamento se torne efetivo, é necessário estabelecer uma base de atributos e critérios fundamentais aos sistemas de transporte coletivo, condizente com os anseios dos agentes envolvidos (Santos, 2010). Sendo assim, antes de apresentar as opções tecnológicas, é importante destacar os principais critérios para seleção que normalmente devem ser considerados.

Sob o ponto de vista operacional do sistema, as alternativas tecnologias de transporte tentam otimizar fatores como espaço viário, tempo de deslocamento, economia de combustíveis e eficiência operacional (Reck, 2015). Porém, basear a decisão apenas nestes fatores pode não refletir a complexidade do processo de escolha entre as alternativas tecnológicas, já que este processo deve incluir critérios que sejam capazes de abranger diversas questões. Assim sendo, estes critérios devem atender a: questões urbanísticas e socioambientais (evolução do urbanística, ocupação do solo, impactos ambientais, etc.); questões referentes a oferta e performance (horizonte do projeto, tempo de viagem, acessibilidade, conforto, etc.); questões tecnológicas (domínio tecnológico, cadeia de produção, adaptabilidade ao local, etc.); e questões econômico-financeiras (custos de construção, financiamento, etc.).

Segundo Alouche (2011), o entorno urbano, o contexto local, o custo de investimento, o custo operacional e, principalmente, a demanda presente e futura, influenciam a escolha do modo de transporte em um corredor específico. Nesse sentido, historicamente, resume-se que os fatores presentes no processo de decisão sobre a tecnologia de transporte a ser adotada são: custo, desempenho, condições locais e preferências pessoais (ITDP & SeMob, 2008). Já Lerner (2009) aborda de forma mais específica e compara as modalidades com base nas características de: capacidade, flexibilidade, atendimento de eventos especiais, prazos e

custos, velocidade e tempo de acesso, conforto, área de influência dos sistemas, estruturação e inserção urbana (Lerner, 2009).

A existência de diversas vertentes no processo decisório e de diversos critérios e questões a serem atendidas são evidentes e previstos, dado o impacto que a escolha tem para os diversos agentes envolvidos. A decisão irá afetar desde o tempo de viagem, despesas, conforto e segurança dos passageiros, até as finanças públicas e a eficiência da economia local. Tendo capacidade de definir não só a forma urbana da cidade, como também o próprio estilo de vida de seus habitantes. Além disso, a natureza complexa e dinâmica dos sistemas de transportes agrega elementos de incerteza e irreversibilidade, em que dedicar os esforços na fase planejamento é a única forma de lidar adequadamente com os riscos envolvidos (Ramjerdi, et al., 2014)

Como pode ser observada, a escolha do tipo de tecnologia de transporte público trata-se de um processo complexo e polêmico na definição dos critérios a serem priorizados. Além disso, "dados os vários interesses dos grupos envolvidos e a quantidade substancial de contratos em jogo com o setor privado, o processo pode ficar bastante politizado" (ITDP & SeMob, 2008). Assim, torna-se fundamental estruturar racionalmente o processo de seleção para garantir uma análise objetiva e coerente focada em cada área afetada e nas inter-relações existentes.

Tendo em vista, conhecer com clareza as propriedades de cada modal, ITDP (2008) apresenta uma abordagem bastante abrangente dos fatores envolvidos na escolha do tipo de tecnologia de transporte. Este mesmo estudo indica uma metodologia para este processo, discutindo desde o início do procedimento de definição de objetivos e metas, até o debate sobre a decisão em si, conforme apresentado na Figura 8.

Essa metodologia apresentada defende que os objetivos e metas sejam definidos a priori e busquem atender os interesses dos diversos agentes envolvidos. Após isso, é necessário estudar os cenários atuais e futuros e alinhar às tendências. Somente depois dessa etapa inicial, deve-se pensar em identificar quais alternativas tecnológicas para investir. Isso garante que o processo não se torne uma predição auto realizadora, com foco inicial em uma tecnologia em particular, ou seja, assegura-se que ao realizar a comparação entre as alternativas não haja predileções por alguma tecnologia específica (ITDP & SeMob, 2008).

Figura 8 – Processo de Tomada de Decisão. Fonte: Adaptado de ITDP & SeMob (2008).

Por isso, a escolha da tecnologia de transporte deve ser um dos últimos tópicos a serem tratados no processo decisório. Assim, conforme são identificadas as alternativas tecnológicas que satisfaçam as etapas anteriores, deve-se estruturar uma análise objetiva e multicritério entre as opções, de forma a diminuir a quantidade de alternativas à medida que se aumenta o grau de detalhamento da avaliação. Neste momento, é essencial determinar as viabilidades, os benefícios e os custos compreendidos em cada possibilidade.

Dessa forma, é necessário detalhar os fatores relevantes para o estudo, avaliando de que forma impactam no processo de escolha da tecnologia de transporte a ser aplicada. Vale ressaltar que a tecnologia selecionada não deve ser aquela apenas com o mais alto desempenho ou com os custos mais baixos, e sim, aquela em que a combinação de fatores for mais vantajosa (Vuchic, 2007). Uma abordagem possível dos fatores é apresentada na Tabela 3.

Nesse sentido, talvez o primeiro fator que venha a mente dos tomadores de decisão seja o custo. Evidentemente, o fator custo ainda pode ser dividido em custos de investimentos e custos de operação. Os custos de investimento (ou de capital) são aqueles que requeridos na construção ou para fazer modificações na estrutura física, já custos operacionais são os custos incorridos pelo funcionamento regular do sistema (Vuchic, 2007).

Tabela 3 – Fatores Relevantes ao Processo Decisório

Categoria	Fatores
Custos	• **Custos de investimento** • **Custos de operação**
Impactos	• **Econômico** • **Ambientais** • **Sociais** • **Urbanos**
Desempenho	• **Capacidade** • **Conforto** • **Frequência** • **Velocidade de operação** • **Segurança viária** • **Serviços ao usuário** • **Inserção urbana**
Gerenciamento de Projeto	• **Prazos** • **Expansibilidade** • **Flexibilidade**

Fonte: Elaboração própria com base em ITDP (2008).

A categorização dos custos consiste numa visão estrita para colocá-los em um mesmo parâmetro de comparação. Pelo mesmo motivo, o ideal é trabalhar todos os custos em base anual e a valores reais, em vez de nominais. Nesse processo, para que a comparação seja fidedigna, deve-se se ter claro a qual categoria pertence cada custo do projeto e evitar que haja dupla contagem de valores.

Os custos de investimentos retratam os valores pagos para instalação e modificações na infraestrutura local e para apropriação dos terrenos a serem ocupados. Segundo ITDP (2008), “na maioria das cidades dos países em desenvolvimento, os custos de infraestrutura serão fatores proeminentes na tomada de decisão”. Os elementos que determinam o custo de infraestrutura são relacionados às obras de construção, à aquisição de veículos e aos procedimentos para implantação do projeto. Dessa forma, influenciam diretamente neste

custo, questões como: características da indústria nacional, condições físicas locais, requerimentos regulatórios, vida útil dos equipamentos, custos de financiamento, valores dos terrenos e propriedades a serem adquiridos, entre outros elementos necessários para a instalação do sistema.

Os custos operacionais são os gastos incorridos ao longo de toda a vida útil do projeto devido ao seu funcionamento e atividade, podendo ser fixos ou variáveis. A Tabela 4 aponta quais são estes custos de acordo com esta categorização. A estimativa precisa destas despesas é fundamental para avaliar a sustentabilidade financeira de longo prazo do projeto.

Tabela 4 – Exemplos de Custos Operacionais do Transporte Público

Categoria	Elementos
Retorno (pagamento) do Capital	• **Depreciação de veículos** • **Custo de capital**
Custos fixos de operação	• **Salários de motoristas/cobradores** • **Salários de vendedores de bilhetes** • **Salários da equipe de informações** • **Salários da equipe de segurança** • **Salários de mecânicos** • **Salários de pessoal administrativo e supervisores** • **Outras despesas administrativas** • **Seguros**
Custos de operação variáveis	• **Combustível/Eletricidade** • **Peças de reposição** • **Lubrificantes e outros itens de serviço**

Fonte: ITDP (2008).

Definidos os custos do sistema de transporte, os próximos fatores relevantes no processo de decisão devem levar em conta: os impactos sociais, econômicos, ambientais e urbanos de cada possível escolha; o desempenho das alternativas tecnológicas e, por fim, mas não menos importante, as características para o gerenciamento do projeto.

No que tange aos impactos do sistema de transporte, cada tecnologia afeta de forma diferente os indicadores sociais, econômicos, ambientais e urbanos. Sendo assim, torna-se necessário uma análise desses impactos para garantir a aplicação do sistema de transporte para melhorar a qualidade de vida da população.

> Os impactos são os efeitos que o serviço de trânsito tem em seus arredores e em toda a área de influência. Eles podem ser positivos ou negativos. Impactos de curto prazo incluem redução do congestionamento das ruas, mudanças na poluição do ar, ruído e estética ao longo de uma nova linha. Os impactos de longo prazo consistem em mudanças nos valores da terra, atividade econômica e forma física da cidade (Vuchic, 2007).

Ao tratar dos impactos econômicos deve ser analisado o potencial do sistema em incentivar o crescimento econômico, auxiliar na geração de empregos e estimular investimentos (Senna, 2014). Os impactos ambientais se referem aos danos ao meio ambiente atrelado à atividade de transporte, são exemplos, a poluição atmosférica e a poluição sonora (Motta, 2009). Os impactos sociais estão relacionados ao estimulo às interações sociais, à garantia de acesso a todas as classes de renda, à melhoria da qualidade de vida, à redução de acidentes e da violência no trânsito, etc. (CEDES, 2015). Os impactos urbanos consideram a integração com o espaço urbano, o uso do solo e a interferência na forma física da cidade, podendo induzir o crescimento urbano no local (Li, et al., 2015).

Para avaliar a questão do desempenho das alternativas tecnológicas, as principais características apontadas na literatura são: capacidade, conforto, frequência, velocidade de operação, segurança viária, serviços ao usuário, inserção urbana (Lerner, 2009; ITDP & SeMob, 2008).

A característica de inserção urbana está associada à integração do transporte ao meio em que se insere, de forma a afetar a imagem do entorno e a percepção dos usuários quanto ao modal escolhido (Lerner, 2009). Já os serviços ao usuário dizem respeito a gama de comodidades e conveniências que o sistema pode oferecer, como sistemas informativos, previsibilidade de horários, mapas, instruções, além de integração com outros serviços de interesse dos usuários (ITDP & SeMob, 2008). Com relação à segurança viária, cada modal tem particularidades que podem minimizar o risco de acidentes e situações de perigo (Reck, 2015). A frequência indica o intervalo de tempo entre composições sucessivas, respeitando sempre o limite de "*headway*"[4] do sistema. Associado a frequência, tem-se a velocidade de operação do serviço que é fundamental para definir o tempo de duração de uma viagem (Vuchic, 2007). O nível de conforto proporcionado por cada modal é influenciado pela

[4] Termo utilizado para definir tempo entre a aproximação de dois veículos sucessivos na estação (ITDP & SeMob, 2008)

qualidade do veículo, e das estações, em termos de aceleração e frenagem, ruídos, acessibilidade, temperatura ambiente, segurança e paisagismos (Santos, 2010). Por fim, a capacidade do sistema, conceito que será aprofundado mais adiante no texto, corresponde à quantidade de passageiros possível de ser transportada em um período de tempo, para um mesmo sentido e dentro das condições normais de operação do sistema (Marins, 2010).

Finalmente, os fatores relevantes no processo de decisão voltados para o gerenciamento do projeto devem analisar características como a expansibilidade e a flexibilidade do sistema. Expansibilidade refere-se à capacidade de expansão do sistema, ou seja, mede a competência para adaptar o tamanho e o escopo do sistema ao ambiente urbano específico, de acordo com a economicidade do projeto (ITDP & SeMob, 2008). Já flexibilidade diz respeito à capacidade de ajustar a operação para que seu funcionamento eficiente ocorra tanto para atender ao pico da demanda, quanto atender ao vale (inclui-se também, a flexibilidade para atender a situações específicas, como grandes eventos na cidade) (Lerner, 2009).

Outra característica considerada no gerenciamento estratégico do projeto está relacionada aos prazos para implantação do sistema. A janela de oportunidades no setor de transporte é curta, visto que, muitas vezes, depende do tempo de mandato dos tomadores de decisão da política de transporte, e o período de obras pode afetar o funcionamento da cidade (ITDP & SeMob, 2008). Assim, o tempo de construção e implementação dos sistemas tem sido fator crucial na matriz de decisão das alternativas tecnológicas no setor de transporte. Nesse sentido, Lerner (2009) afirma que "uma solução de curto prazo é melhor para os passageiros do transporte público do que uma proposta 'definitiva' que nunca se materialize".

A necessidade do aumento da demanda por transportes no meio urbano que otimizem a ocupação do espaço físico, tem como solução intuitiva o aumento da oferta através de sistemas com tecnologias de alta capacidade. Porém, esta alternativa esbarra nos obstáculos do longo tempo necessário para implantação. Lidar com o "*trade-off"* entre tempos curtos de implantação e ofertar alta capacidade de transporte, é um desafio que o setor de transporte deve encarar frente ao crescimento da população.

Portanto, "cresce a busca por alternativas mais simples, eficientes e adequadas às realidades econômicas e possibilidades locais, com baixo investimento e implantação rápida, mesmo que sejam soluções 'temporárias'" (Lerner, 2009). Um caminho para isso são os

investimentos em sistemas de transporte público coletivo de média capacidade, com foco no escoamento dos eixos principais (CEDES, 2015). Porém, a definição de quais tecnologias possibilitam operar atendendo estas capacidades é complexa e o entendimento da população pode não ser tão claro quanto à aplicação correta dos investimentos no setor de transporte (Alouche, 2011).

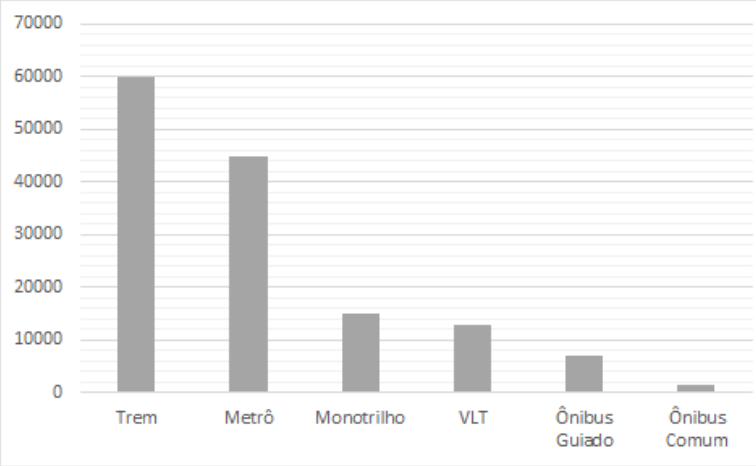
Como já destacado, o conceito de capacidade vai além da quantidade de pessoas ocupando o veículo. Para sua determinação influenciam as condições de operação da via, a topografia, os sistemas de controle e sinalização, o número de estações e paradas, além do distanciamento entre elas (Marins, 2010). Sendo assim, "a oferta de transporte é diretamente ligada à tecnologia adotada" (Alouche, 2011). E mais do que isso, não basta apenas pensar na tecnologia a ser selecionada, a forma como estiver projetada a operação do sistema será essencial para garantir que oferta do sistema cumpra com anseios da sociedade.

Para cada tecnologia adotada e sua forma de implantação (considerando: demanda, lotação do veículo, nível de segregação da via, velocidade operacional e frequência do atendimento), haverá uma faixa de classificação para a capacidade do sistema (Alouche, 2011). E, devido às várias variáveis envolvidas, não é difícil encontrar diferentes enquadramentos das tecnologias nas classes de pequena, média e alta capacidade.

Até mesmo na definição da unidade de medida comum para comparação entre as tecnologias é possível deparar com opiniões diversas. Vibhuti (2008) aponta que a unidade de parâmetro normalmente utilizada pelos especialistas é o PHS (Passageiro por Hora por Sentido), que mede a quantidade de passageiros se deslocando e passando por um determinado ponto do trajeto em um período de tempo. Porém o mesmo autor critica o uso desta unidade como critério fundamental na seleção dos sistemas de transportes a serem adotados. Ele afirma que para comparar objetivamente diferentes sistemas de transporte atendendo as perspectivas de todos os agentes envolvidos deveria ser utilizada a unidade de pkm/h (Passageiro-quilômetro por hora). Dessa forma, poderia ser medida a capacidade produtiva do sistema, avaliada pela agilidade de deslocamento dos passageiros em uma determinada distância (Vibhuti, 2008).

> Para Marins (2010), transportes de alta capacidade, em suma, abrangem os sistemas segregados sobre trilhos, como metrô subterrâneo, trens suburbanos e sistemas sobre trilhos elevados. Já os transportes de média capacidade são sistemas não necessariamente segregados, mas que permitem práticas de operação eficientes nas paradas, como Linhas de

Ônibus Rápidas (BRT) e Veículos Leves sobre Trilhos (VLT). E na categoria de transportes de baixa capacidade, se enquadram as linhas comuns de ônibus e micro-ônibus, que compartilham a via com o tráfego em geral.



Modos de Transporte	Capacidade (pessoas/hora)
Trem	acima de 50.000
Metrô	40.000 a 50.000
Monotrilho	10.000 a 20.000
VLT	6.000 a 20.000
Ônibus Guiado	3.000 a 10.000
Ônibus Comum	até 3.000

Figura 9 – Capacidade Máxima dos Diferentes Modos de Transporte.

Fonte: Marins (2010).

De forma objetiva, os estudos de Alouche (2011) utilizam uma métrica para definir as categorias de capacidade que é apresentada a seguir:

a) Transportes de pequena capacidade operam com até 10mil PHS
b) Transportes de média capacidade operam entre 10 mil e 35 mil PHS e com velocidades médias acima de 15 km/h
c) Transportes de alta capacidade operam acima de 35 mil PHS e com velocidade média acima de 30 km/h

Da mesma forma que Marins (2010), Alouche (2011) afirma que "apenas os sistemas de transporte com faixas exclusivas e rigidamente guiados conseguem garantir a oferta de transporte para a qual foram projetados". As características que os permitem chegar a esta conclusão estão associadas ao maior controle operacional do sistema, o que minimiza riscos e problemas na condução.

As informações contidas nessa seção geraram uma revisão objetiva de como se desenvolve o planejamento dos sistemas de transporte público urbano, além de permitir compreender os fatores que influenciam no processo de escolha. Cabe agora aprofundar o conhecimento sobre as alternativas tecnológicas de transportes e, com base nos fatores apresentados nesta seção, debater comparativamente as vantagens e desvantagens associadas

a cada escolha, ressaltando que nenhuma solução de transporte é a única alternativa correta para todas as cidades. Portanto, outros fatores como circunstâncias locais e políticas públicas que definiram a opção mais apropriada a cada caso (Zhang, 2009).

2.3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O TRANSPORTE COLETIVO

> "A ciência voltada para o transporte coletivo urbano avança cada vez mais e aprimora os meios de locomoção pelas cidades. Em 1662, quando surgiu o transporte de passageiros na cidade de Paris, na França, o meio utilizado para realizar as viagens eram as carruagens. Após séculos de muitos estudos, várias tecnologias surgiram e hoje vão desde a estrutura dos veículos e motores a *softwares* que administram a operação do transporte coletivo urbano. Todas buscam um denominador comum: melhorar a qualidade do serviço, com mais conforto aos passageiros, economia para as empresas e sustentabilidade para as cidades" (NTU, 2015).

O desenvolvimento dos transportes está vinculado ao desenvolvimento da sociedade, e a cada época um determinado modo de transporte se sobressai evolutivamente (Senna, 2014). Portanto, evidencia-se que, ao longo das gerações, não houve, e dificilmente haverá, um único modo de transporte capaz de solucionar todos os problemas e atender a todas as necessidades de deslocamentos da sociedade (ITDP & SeMob, 2008). Por isso, os sistemas de transporte devem ser planejados de forma a integrar diferentes tipos de modais, observando a complementariedade das características individuais de cada tipo e a forma de adaptação às particularidades do meio em que se planeja trabalhar (Reck, 2015).

Para isso, é fundamental conhecer as alternativas tecnológicas existentes e estudar as experiências acumuladas em suas aplicações pelo mundo, além de avaliar o histórico de evolução dessas tecnologias e identificar condições para sua implementação de forma eficiente. Tendo em vista essa necessidade de se analisar as características das possíveis tecnologias empregadas nos sistemas de transporte coletivo, esta seção apresenta e compara as principais alternativas existentes.

O princípio básico para efetuar os deslocamentos, qualquer que seja a tecnologia de transporte a ser utilizada, consiste na conversão de alguma forma de energia para gerar energia mecânica capaz de movimentar um determinado veículo (CEDES, 2015). Com isso, o tipo de motor de tração utilizado já fornece uma primeira classificação dos meios de

transporte público, em função do tipo de combustíveis utilizado. Mais do que isso, definido os tipos de combustíveis, diferentes formas de operar o sistema podem ser desenhadas. E assim, para cada tipo de característica dos meios de transporte, é possível definir uma forma para classificá-los.

Do ponto de vista técnico-operacional, uma forma de classificar as diversas tecnologias de transporte coletivo existentes é separar em: sistema não rigidamente guiados e sistemas rigidamente guiados. Os não rigidamente guiados são basicamente as frotas de ônibus operando de maneira convencional, em faixas exclusivas (BRS – *Bus Rapid Service*) ou em vias segregadas (BRT - *Bus Rapid Transit*). Já os rigidamente guiados são os que dependem de algum trilho ou guia para seu funcionamento, como por exemplos: trens de superfície, metrôs, monotrilho, Trólebus, VLT (Veículo Leve sobre Trilhos) e bondes.

Os diferentes tipos de tecnologias de transporte coletivo estão definidos na Tabela 5 e ilustrados na Figura 10. Porém, na prática, há uma ampla gama de variações possíveis com cada tecnologia, fazendo com que a fronteira de definição se confunda entre os sistemas (ITDP & SeMob, 2008). Logo, dependendo da forma de aplicação, as características de uma tecnologia podem se assemelhar a de outra.

Tabela 5 – Principais Tipos de Transporte Coletivo.

Modal de Transporte	Definição
(a) Sistema de Ônibus:	Corresponde ao transporte rodoviário ou sobre pneus, com veículos de variados estilos e modelos (convencional, micro-ônibus, articulado e biarticulado)
(b) BRS (*Bus Rapid Service*):	Sistema de ônibus operado em faixas da rua sinalizadas para o uso do transporte público.
(c) BRT (*Bus Rapid Transit*):	Sistema de ônibus operado em faixas segregadas fisicamente na superfície para uso exclusivo do transporte público
(d) Trens de superfícies:	Também conhecidos como trens suburbanos, por tipicamente conectar áreas metropolitanas mais afastadas. Trata-se de um sistema de alta capacidade de transporte, formado por carrocerias pesadas, composto por uma locomotiva e diversos vagões, operando em ferrovias de trilhos exclusivos construídas na superfície.

(e) Metrô:	Sistema de alta capacidade de transporte e custo elevado, similar aos trens, mas com o diferencial de operar enterrados no subsolo das cidades.
(f) Monotrilho:	Sistema ferroviário de média capacidade de transporte que utiliza um único trilho, separado em nível por estruturas elevadas em meio a cidade.
(g) Trólebus:	Ônibus convencional sobre pneus, porém movido a eletricidade fornecida através de hastes acima da carroceria que ficam em contato permanente com fiação aérea específica que acompanha o trajeto.
(h) VLT (Veículo Leve sobre Trilhos):	Em inglês, LRT (*Light Rail Transit*), tecnologia de trens leves, normalmente elétricos, com composição curta de vagões, operando em faixa exclusiva no nível da superfície.
(i) Bondes:	Considerados um tipo de VLT com carrocerias menores e sem uso de faixas exclusivas.
(j) AGT (*Automated Guided Transit*):	Em geral, são veículos de pequeno a médio porte, operados automaticamente em trilhos segregados. Essas características o fazem ser um modal de capital intensivo e, por isso, com poucas aplicações no mundo.

Fonte: Elaboração própria com base em Alouche (2011), CEDES (2015), ITDP (2008), Vuchic (2007), Sinha & Labi (2007).

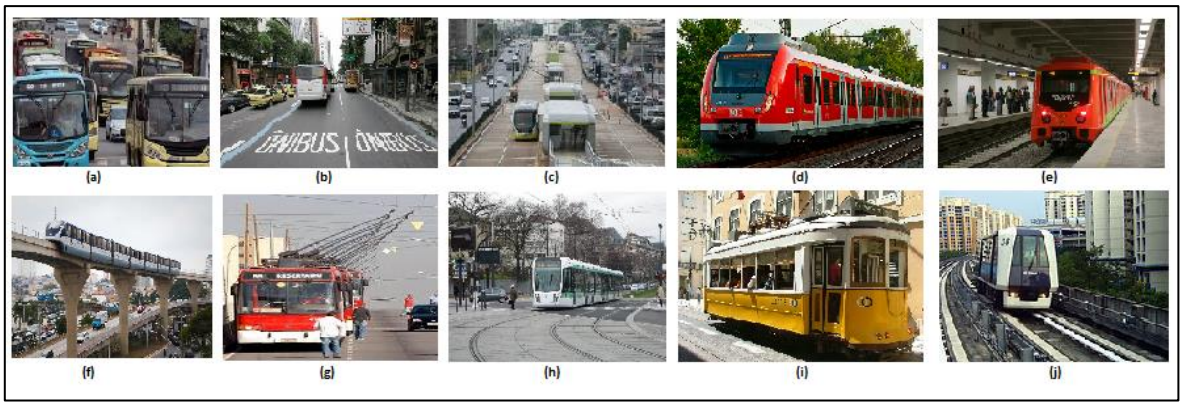


Figura 10 – Modos de Transporte Coletivo (a) ônibus (b) BRS (c) BRT (d) Trem de Superfície (e) Metrô (f) Monotrilho (g) Trolebus (h) VLT (i) Bonde (j) AGT.

Fonte: elaboração própria

Este fato agrega complexidade ao processo de escolha da tecnologia a ser adotada em determinado projeto, pois sem conhecer bem as características específicas de cada uma, o desempenho do sistema pode não ser o esperado. Assim, a escolha da tecnologia deve levar em conta a análise das opções sob uma mesma base de referência para comparação. Dessa forma, evita-se que haja confusões conceituais ao confrontar as tecnologias, que possam levar a vantagens comparativas entre as opções.

Apesar de ser o modal de menor capacidade e mais baixa velocidade, o transporte rodoviário feito em ônibus apresenta maior versatilidade operacional para adequar-se a diversas realidades urbanas e diferentes itinerários (Reck, 2015). Assim, na maioria das cidades, o setor de transporte público é baseado no uso do ônibus como principal tecnologia para o deslocamento dos habitantes (Vuchic, 2007).

Entretanto, sua ampla adoção tem se mostrado contraproducente, à medida que as linhas de ônibus foram sendo implantadas irracionalmente e sem planejamento de médio e longo prazo (Reck, 2015). Atualmente, os serviços de ônibus convencionais, em geral, são desconfortáveis, inseguros, pouco confiáveis e inadequados às necessidades da sociedade (ITDP & SeMob, 2008). O predomínio do transporte rodoviário no Brasil é consequência, principalmente, dos incentivos para instalação da indústria automotiva no país, da concepção de modernidade inserida no uso de veículos sobre pneus e da omissão das políticas públicas de mobilidade urbana (CEDES, 2015).

Em contraste com a baixa capacidade dos ônibus, surgem os sistemas de trens metropolitanos e metrôs para lidar com a alta demanda e a concentração populacional dos meios urbanos atuais. Alouche (2011) debate algumas definições de metrô e conclui como sendo “um sistema ferroviário de passageiros, em zona urbana, com unidades elétricas múltiplas que circulam com alta capacidade e frequência, e com separação total do tráfego e de outros modos de transporte” (Alouche, 2011). O trabalho realizado por CEDES (2015) contabiliza, resumidamente, a lotação média dos tipos de transporte, com ônibus nos diferentes modelos (incluindo os biarticulados), abrangendo uma faixa de 80 a 220 passageiros, e veículos metroferroviários transportando até 1500 passageiros (CEDES, 2015).

Assim, a adoção dessas alternativas de transporte de alta capacidade tem sido a principal resposta do poder público para lidar com a alta demanda das cidades. Porém, o fato

dos custos de implantação de sua infraestrutura ser extremamente elevado, faz com que apenas poucos quilômetros possam ser implementados, e como resultado o sistema não consegue atender ás necessidades da maior parte da população (Lima, 2013). Além dos custos, os tempos excessivamente longos de duração das obras de implantação do sistema vão contra a urgência das cidades em resolver seus problemas de transporte.

Segundo Lerner (2009), o fato é que, com o aumento da frota de veículos nas cidades, o senso comum tende a enxergar como solução a ampliação da infraestrutura viária e a adoção de medidas que favoreçam a maior circulação de veículos no meio urbano. E para equilibrar essa demanda e solucionar a saturação no uso do espaço viário, o planejamento de transporte vê como única saída a adoção de sistemas enterrados para o transporte público. Por isso, Lerner defende que a polarização entre a opção pelo carro ou pelo metrô é o grande equívoco na discussão dos problemas de transporte (Lerner, 2009).

Portanto, a tendência do planejamento de transporte atual deve ser voltada para alternativas que estejam entre esses extremos. Nesse sentido, surgem diversas inovações, das mais simples até as mais sofisticadas, que buscam equacionar o atendimento a demanda e a economia orçamentária. Uma delas é a operação do sistema de ônibus em faixas exclusivas.

O uso de faixas exclusivas é uma medida que através de sinalização e demarcações na pista, informa aos usuários da via quais parte das vias são de uso exclusivo do transporte público. Seus resultados não são os mais efetivos para solução dos problemas de transporte, mas, dado os custos irrisórios de sua aplicação, torna-se uma técnica de boa relação benefício e custo (ITDP & SeMob, 2008). “No entanto, a simples colocação de ônibus convencionais em faixas exclusivas pode não surtir o efeito desejado” (Lerner, 2009). Em algumas aplicações bem policiadas e com fiscalização adequada, como os casos registrados nas cidades de Ottawa, no Canadá, de Brisbane, na Austrália e Londres, na Inglaterra, as faixas exclusivas obtiveram grande sucesso. Porém, o mesmo não pode ser verificado nas cidades brasileiras de São Paulo e Porto Alegre, em que as faixas fracassaram devido a sobreutilização das vias que formavam longas filas de ônibus (CEDES, 2015; ITDP & SeMob, 2008).

Pelo fato das faixas não serem fisicamente segregadas do tráfego, é possível que haja compartilhamento do espaço viário com outros veículos, principalmente em pontos de conversão, paradas de taxi, entrada e saída de estacionamentos, espaços para carga e descarga

(Lourenço, 2015). Assim, a operação deste sistema ganha níveis de imprevisibilidade que comprometem sua eficácia. Para melhorar o fator de previsibilidade do sistema, uma solução é segregar fisicamente a pista, através da utilização de canaletas, guias, cones ou outros elementos estruturais delimitadores (ITDP & SeMob, 2008).

Essencialmente, a separação física da faixa é o elemento que diferencia sistemas de faixas exclusivas dos sistemas em vias segregadas, já que afeta diretamente o projeto e a efetividade de cada sistema (ITDP & SeMob, 2008). Esta característica de segregação das vias é fator fundamental para os sistemas poderem operar com capacidade adequada para atender a demandas médias e altas (Alouche, 2011).

> "Reservar espaço viário para o transporte público, investir em vias exclusivas, reestruturar as atuais linhas de modo a concentrar demandas em terminais de integração para, então, interligá-los através de eixos de transporte de superfície bem equipados (canaletas exclusivas, veículos maiores, integração físico-tarifária, embarque em nível pré-pago, etc.), são medidas necessárias e que se mostram eficientes e viáveis em curto prazo" (Lerner, 2009).

Baseado neste princípio, o planejamento de transporte tem desenvolvido inovações no âmbito das tecnologias de média capacidade (Oliveira, et al., 2013). Conforme já destacado na seção 2.1, a definição de pequena, média e alta capacidade, não é precisa e depende de diversos fatores que vão além de apenas escolher qual tecnologia aplicar. No entanto, é possível determinar, com base nos parâmetros de oferta e desempenho, as faixas de capacidade que cada tipo de tecnologia, teoricamente, poderia operar, conforme ilustra a Figura 11 (Alouche, 2011).

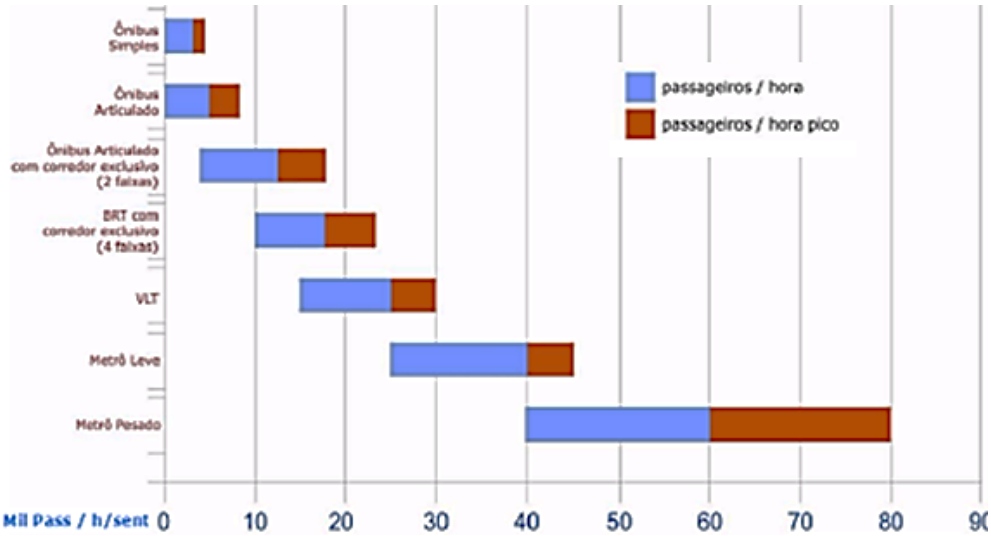


Figura 11 - Capacidade De Transporte Dos Diferentes Modos. Fonte: Alouche (2014).

Observando a Figura 12, as alternativas tecnologias que se enquadram como de média capacidade são: BRT, VLT, Monotrilho e AGT. Sendo as tecnologias mais utilizadas o BRT e o VLT, que serão foco deste trabalho. Alternativas como o Monotrilho e o AGT utilizam tecnologia bastante distinta e são operadas em estruturas elevadas, por isso são consideradas como outra categoria de transporte público e não competem diretamente com o BRT e VLT (ITDP & SeMob, 2008).

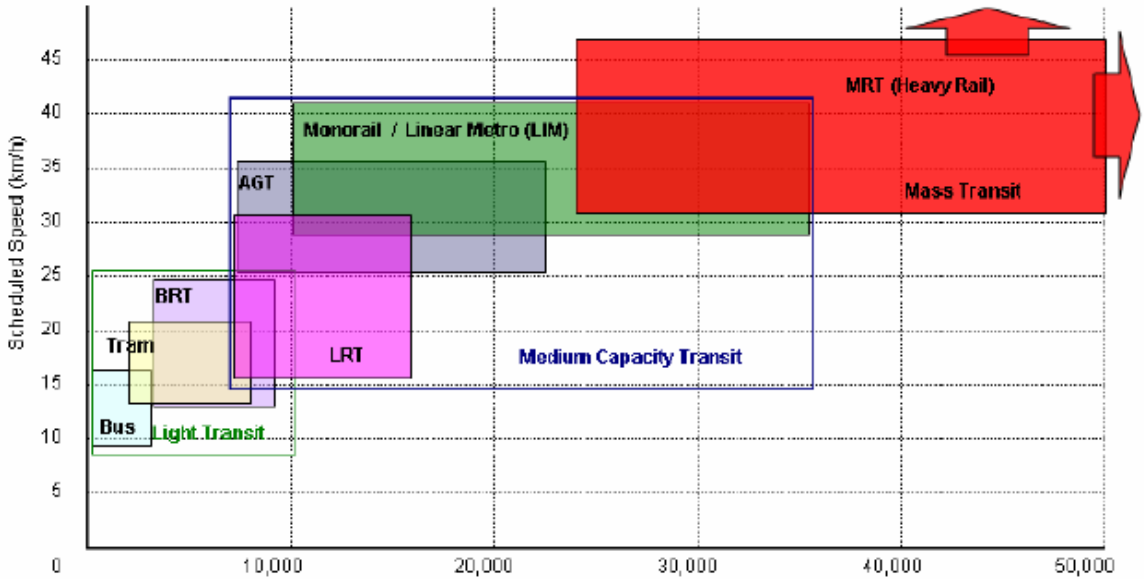


Figura 12 – Gráfico para Classificação das Tecnologias quanto a Capacidade de transporte.

Fonte: (JICA, 2010)

O foco na expansão dos sistemas de média capacidade tem feito com que o processo de escolha entre as duas principais alternativas tecnológicas, BRT e VLT, seja objeto de debates abrangendo interesses técnicos, econômicos e políticos de diferentes agentes da sociedade (Oliveira, et al., 2013). Pelo fato de possuírem características semelhantes como operação otimizada, tráfego em vias segregadas e utilização de veículos de maior capacidade, ambas as tecnologias desempenham papel semelhante na estruturação de uma rede de transportes integrada. Por outro lado, há diferenças fundamentais entre os dois sistemas que devem ser estudadas para garantir a clareza na opção selecionada.

2.3.1 Bus Rapid Transit - BRT

Nos países em desenvolvimento, como Brasil, Colômbia e México, a alternativa adotada tem sido a implantação de sistemas BRT (Lima, 2013). O termo BRT é utilizado para definir sistemas de transporte urbano com ônibus, em que são empregadas melhorias significativas de infraestrutura, modernização de veículos e medidas operacionais, visando uma qualidade de serviço mais atrativa (Lerner, 2009). Porém, Vuchic (2007) alega que existem inúmeras discussões a respeito da definição de BRT, pois há uma tendência equivocada de denominar qualquer sistema de ônibus com vias específicas e novos veículos, o que prejudica a imagem conceitual do modal BRT.

De fato, há cidades que implementaram corredores básicos de ônibus que, em certa medida, podem até melhorar questões pontuais de trânsito, mas não alcançam o padrão de desempenho e conforto de um BRT (Abramovitch, 2014). Casos na América Latina e Ásia, em que os sistemas foram dimensionados para um máximo de produtividade, tem baixa aprovação pelos usuários devido à excessiva lotação dos veículos e insuficiência no atendimento (Hickman, et al., 2015). Por isso, é essencial ter claro o conceito envolvido na aplicação de sistemas BRT e compreender os elementos fundamentais que os constituem.

Segundo Lima (2013), esses elementos são: infraestrutura de qualidade, operações eficientes, arranjos institucionais de negócios eficazes e transparentes, tecnologia sofisticada e excelência em marketing e serviço ao usuário (Lima, 2013). O mesmo autor ainda destaca o interesse de diversos organismos internacionais em divulgar informações a respeito dos sistemas BRTs, como a IEA (*International Energy Agency*), e cita os elementos fundamentais apontados por esta agência, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Elementos que Constituem um Sistema BRT.

Elementos de um Sistema BRT
• **Vias segregadas com barreiras físicas e/ou eletrônicas de outras vias de tráfego, preferencialmente com faixa para ultrapassagem nas paradas;**
• **Estações de embarque/desembarque com pagamento antecipado e áreas de espera confortáveis;**
• **Ônibus com múltiplas portas e embarque/desembarque em nível;**
• **Ônibus de alta capacidade, confortáveis e, de preferência, de baixa emissão de poluentes;**

• **Serviços de ônibus diferenciados como expressos e paradores;**
• **Prioridade para ônibus nas intersecções tanto nos semáforos quanto na via;**
• **Sistema de alimentação ao longo das estações do corredor;**
• **Sistema integrado de bilhetagem possibilitando a integração com outros ônibus, metrôs e trens;**
• **Desenho universal das estações, a fim de torná-las acessíveis às pessoas portadoras de deficiência física, pedestres, ciclistas e taxistas**
• **Encorajamento para mudança no uso do solo, promovendo o adensamento ao longo e ao redor das estações de ônibus;**
• **Facilidades para estacionamentos nas estações distantes dos centros**
• **Excelência no atendimento ao usuário, o que inclui: equipamentos urbanos limpos e confortáveis, bom sistema de informação e operadores bem treinados;**
• **Estratégia de marketing sofisticada que inclua a marca, o posicionamento e a propaganda;**
• **Regime moderno de contrato para operadores;**
• **Informação em tempo real dos ônibus nos terminais e pontos de ônibus;**
• **Uso de GPS ou outras tecnologias de localização e controle central que permita a localização dos ônibus e a rápida reação a eventuais problemas**
• **Alta confiabilidade em termos de tempos de espera e de viagem.**

Fonte: Lima (2013) *apud* IEA (2002)

Corroborando com o destacado por Vuchic (2007), por compreender tantos elementos, a abrangência do conceito dos sistemas BRT é ampla, de forma que diversas definições ocorrem na literatura para o conceito de BRT. O próprio Vuchic define como sistema de transporte por ônibus projetado com infraestrutura segregada e independente do tráfego, permitindo maior velocidade, confiabilidade e segurança. De forma geral, os aspectos que são sempre abordados nas definições explicam como sendo um modo de transporte coletivo sobre pneus, que utiliza infraestrutura segregada do tráfego e opera otimizando a capacidade de transporte do sistema, aliando conceitos de integração de

transportes, diversidade de linhas, conforto, marketing, serviços ao usuário, alto desempenho e visa combinar a qualidade dos transportes férreos e a flexibilidade dos ônibus (ITDP & SeMob, 2008; CEDES, 2015; Lourenço, 2015; Vuchic, 2007; Lima, 2013; Levinson, et al., 2002).Ou seja, a proposta do termo BRT é que a imagem do sistema esteja desassociada da ideia de transporte convencional por ônibus, e aproximar-se do desempenho de sistemas ferroviários.

Apesar do termo BRT ter sido criado nos anos 90, nos Estados Unidos, o modelo foi implantado originalmente na cidade de Curitiba, no Brasil, na década de 70, pelo ex-prefeito da cidade Jaime Lerner (CEDES, 2015). Com o sucesso, o sistema serviu de inspiração para diversos outros projetos espalhados no mundo, conforme ilustra a Figura 13. Segundo números da base de dados online BRTData[5], atualmente, são 207 cidades com sistemas BRTs em operação, 55 cidades com projetos em expansão e 121 em planejamento ou em construção. No entanto, esta estatística incorpora aqueles sistemas equivocadamente denominados BRTs, conforme já discutido.

Figura 13 – Sistemas Brts Em Operação Pelo Mundo.

Fonte: Portal BRTData.

Desde sua primeira aplicação, em Curitiba, mais de 5.000 km de corredores dedicados foram implementados no mundo, com destaque para os países da América Latina. Crescimento foi exponencial e tende a continuar, como revelam os cenários propostos em IEA (2013), ilustrados a Figura 14.

[5] Disponível em: http://brtdata.org/ (Acesso: Janeiro de 2017)

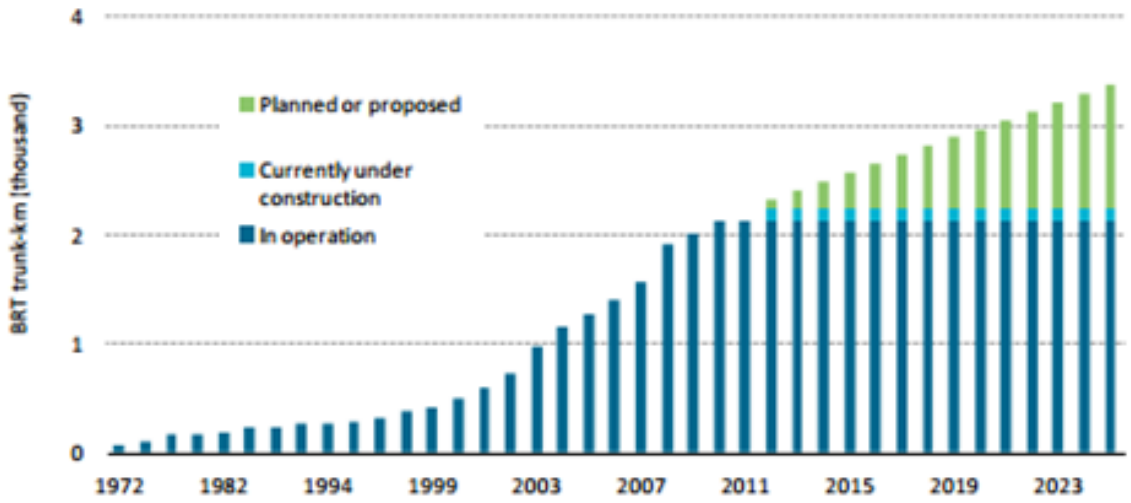


Figura 14 – Evolução Mundial do BRT.

Fonte: (Dulac, 2013)

No Brasil, adoção deste tipo de sistema também se espalhou pelos estados, já estando presente em 69 cidades, segundo o Portal BRTdata. Entre os bons exemplos brasileiros, o trabalho realizado pela Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro, em 2015, cita o sistema BRT Move, de Belo Horizonte, o Linha Verde do RIT, de Curitiba, e os corredores TransOeste e TransCarioca, do Rio de Janeiro, todos premiados com selos de qualidade do setor (FETRANSPOR, 2015). O caderno técnico, desenvolvido pela Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), faz o levantamento das características dos vários sistemas BRT no Brasil, diagnosticando o estágio de evolução dos sistemas, e conclui que a implantação dos sistemas BRT é um dos passos mais importantes para a melhoria do transporte urbano de passageiros nas cidades brasileiras (NTU, 2012).

Como exemplo de aplicação no exterior, destaca-se o caso de sucesso do sistema desenvolvido em Bogotá, na Colômbia, denominado Transmilênio, implantado pelo prefeito Enrique Penalosa no final da década de 1990 (ITDP & SeMob, 2008). O Transmilênio é um dos maiores sistemas BRT do mundo, transportando mais de 80 mil passageiros por hora e reduzindo o tempo de viagem pela metade (Motta, 2009). O sistema da capital colombiana consiste em 11 corredores prioritários de ônibus, com 133 quilômetros de extensão e operando a uma velocidade média de 27 km/h (FETRANSPOR, 2015).

Próximo à Colômbia, no Equador, também há o caso de sucesso do sistema BRT *El Trole*, de Quito. Inaugurado em 1996, este sistema utiliza de ônibus elétricos alimentados por vias aéreas com 11 km de extensão (Lima, 2013). Por utilizar a energia elétrica este sistema possibilita maior redução de emissões de gases poluentes da atmosfera. Outro exemplo relevante da América Latina, é o sistema da Cidade do México, denominado Metrobús, que possui 5 corredores, em aproximadamente 100km de extensão, melhorando a qualidade do ar na cidade, resultante da redução de 16,6% a 20,4% na concentração de CO, 12,9% a 18,1% de NOx, 20,8% a 39,0% de $PM_{2,5}$ e 9,6% a 24,4% de PM_{10} (Bel, et al., 2015).

A Figura 15 e a Figura 16 demonstram que, além da América Latina, outra região que se destaca com exemplos de aplicações de sistemas BRTs com alta demanda de passageiros e corredores de vasta extensão é o continente Asiático. O país que concentra os maiores investimentos é a China, com mais de 550 quilômetros construídos em 12 províncias, com destaque para a cidade de Guangzhou que atende a 843 mil passageiros por dia (FETRANSPOR, 2015).

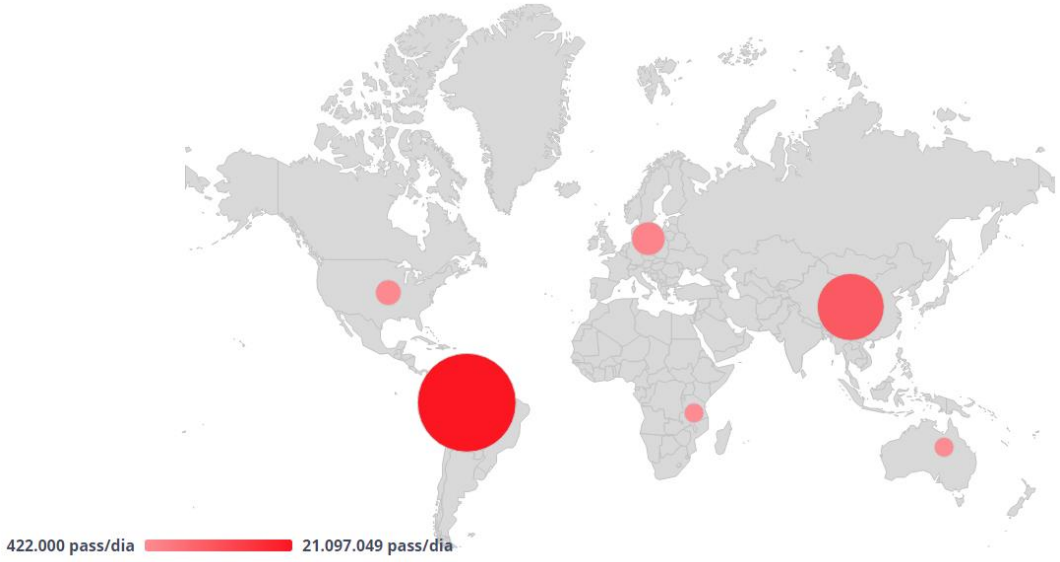


Figura 15 – Distribuição dos Sistemas BRT nos Continentes.

Fonte: site BRTData.

Regiões	Passageiros/dia	%	N° de cidades	%	Km	%
África	262.000	0,8	3	1,54	83	1,61
América do Norte	1.036.057	3,19	27	13,91	880	17,20
América Latina	19.978.275	61,64	62	31,95	1.740	34,02
Ásia	8.734.622	26,94	40	20,61	1.380	26,99
Europa	1.969.961	6,07	56	28,86	935	18,28
Oceania	430.041	1,32	6	3,09	96	1,87
Total	32.410.956	100,00	194	100,00	5.112	100,00

Figura 16 – Dados dos sistemas BRT por continente.

Fonte: CEDES (2015).

Avaliando as aplicações de sistemas BRT pelo mundo, corrobora-se a afirmação de que esta opção tem sido a principal escolha para projetos em países em desenvolvimento. Fato este, que está muito associado às questões de maior flexibilidade e menor prazo de implementação, proporcionadas por esta tecnologia, pois assim, estes sistemas permitem que sejam construídos em etapas e adaptáveis a uma variedade de condições urbanas, o que se torna mais conveniente para a realidade política e de planejamento destes países (Lima, 2013).

Entretanto, a principal característica que tem sido preponderante para o predomínio desta opção como a escolha das autoridades de governo, é o fator custo. “Um sistema BRT custa, em geral, entre 4 a 20 vezes menos que um sistema de bondes ou de VLT, ou entre 10 a 100 vezes menos que um sistema de metrô” (ITDP & SeMob, 2008). Lima (2013) defende que, dependendo dos requerimentos e complexidade do projeto, os sistemas BRT possuem custos entre 1 a 15 milhões de dólares por quilômetro, enquanto sistemas de metrô podem custar de 15 a 350 milhões de dólares por quilômetro.

“Para muitas cidades, o BRT é uma opção de custo altamente eficiente para proporcionar uma rede completa que oferece aos usuários um transporte competitivo com o automóvel” (ITDP & SeMob, 2008). Todavia, esforços para tornar o transporte por BRT mais atrativo aos usuários encarecem o projeto, alcançando valores de investimento similares aos sistemas sobre trilhos (Hodgson, et al., 2013). Assim, existem determinadas condições em que o VLT pode ser mais apropriados sob o ponto de vista dos custos e benefícios (ITDP

& SeMob, 2008). Vuchic (2007), por exemplo, ressalta que o VLT é a principal escolha para o transporte público de média capacidade em países desenvolvidos, como Alemanha, Holanda, França, que já possuíam vias implementadas.

2.3.2 Veículo Leve sobre Trilhos - VLT

O termo VLT vem da tradução do inglês de LRT (*Light Rail Transit*) e tem sido utilizado no Brasil, desde a década de 80 (Lerner, 2009). Ao redor do mundo, é referenciado de diversas formas, alguns exemplos são: Metro Ligero, em Madri (Espanha), Eléctrico, em Lisboa (Portugal), Tramway ou Tram, na França (Motta, 2013). Porém, de maneira geral, todos servem para designar uma alternativa de modal de transporte público sobre trilhos, com capacidade de média performance, pode circular em vias segregadas ou compartilhadas, e é operado em veículos tracionados, usualmente, por eletricidade (CEDES, 2015). A alimentação de energia do veículo pode ser feita por: via aérea (catenárias), via trilho, por baterias, pela energização somente nas estações ou por indução (Motta, 2013). A Figura 17 ilustra cada uma dessas formas de energização.

Figura 17 – Formas de Energização dos Veículos.

Fonte: CCR (2012).

A tecnologia VLT descende dos sistemas de bondes datados desde o início do século XX (Oliveira, et al., 2013). De fato, à primeira vista, pode haver confusões entre a atual tecnologia VLT e a já conhecida tecnologia dos bondes. Entretanto, o VLT diferencia-se dos bondes a partir de modernizações na aplicação relativas a inovações no veículo, à prioridade viária, ao design das estações, à operação e ao papel desempenhado nas cidades (Oliveira, et al., 2013).

Os bondes funcionavam em um grande número de cidades do mundo nos anos 1920 e 1930, porém muitos sistemas foram desmantelados no período pós-Segunda Guerra Mundial (UITP, 2015). Com o desenvolvimento do VLT houve uma retomada na implementação deste tipo de tecnologia. Os países que mais refletem este renascimento são os EUA (23 sistemas), a França (22 sistemas), a Espanha (16 sistemas) e a Turquia (8 sistemas) (UITP, 2015).

Esse novo ciclo tecnológico é condizente com a aplicação em corredores de média capacidade, e por isso, vem sofrendo uma evolução contínua (CCR, 2012). Na literatura, a evolução tecnológica do sistema é descrita em 5 gerações:

> A primeira geração não oferecia boa acessibilidade, devido ao piso elevado, para acessar o interior do veículo era necessária a utilização de uma escada. A segunda geração apresentava piso misto (baixo nas entradas e elevado na área dos truques). A terceira geração trouxe o piso totalmente rebaixado, conforme são os atuais. A quarta geração acrescentou a modularidade aos veículos que, através da padronização dos modelos e de diversas articulações, permitiu aumentar o comprimento do veículo e facilitar a operação em meio urbano. E a quinta geração, atualmente em desenvolvimento, trabalha o uso de supercapacitores para armazenar energia e dispensar a necessidade da infraestrutura aérea de alimentação de energia (CCR, 2012; Motta, 2013).

"Atualmente, a tecnologia VLT está em operação em cerca de 400 cidades e em implantação em cerca de 60 cidades, com projetos em torno de 200 cidades, distribuídas nos cinco continentes" (CCR, 2012). A Figura 18 apresenta como estão distribuídos estes sistemas pelo mundo.

> A maioria na Europa (206) e na Eurásia (93), seguidas da Ásia (41) e da América do Norte (36). Regiões como Oriente Médio, Norte da África e Ásia estão desenvolvendo novas infraestruturas a um ritmo acelerado, enquanto África e América do Sul estão começando a considerar VLT como solução adequada (UITP, 2015).

O estudo de Bernardes (2016) descreve algumas experiências internacionais e nacionais de aplicação dos sistemas VLT. No contexto mundial, o autor destaca os VLTs de Estrasburgo, na França, de Amsterdã, na Holanda, e de Barcelona, na Espanha.

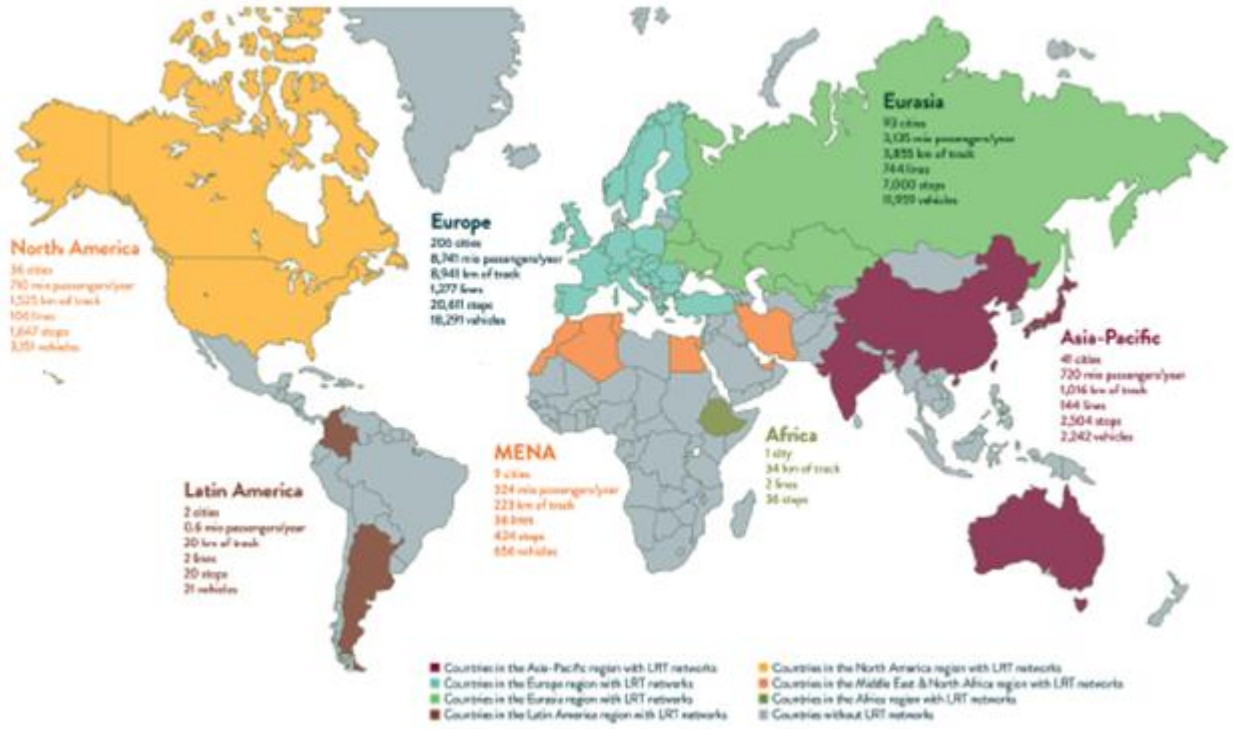


Figura 18 – Sistemas VLT pelo Mundo.

Fonte: UITP (2015).

No Brasil, o primeiro VLT foi implantado na cidade de Campinas, em 1990, seguindo o leito da estrada de ferro Sorocaba (Lerner, 2009). No entanto, o sistema não teve sucesso devido a falhas de projeto que ocasionaram baixa demanda de passageiros e sua consequente desativação em 1995 (Bernardes, 2016).

Outros projetos nacionais são descritos por Bernardes (2016), como os VLTs de Cariri, no Ceará, da Baixada Santista, em São Paulo, de Cuiabá, em Mato Grosso, de Goiânia, em Goiás, e do Rio de Janeiro capital. Dentre estes, o destaque é VLT do Porto Maravilha, no Rio de Janeiro, que utiliza tecnologia inovadora de alimentação de energia elétrica que dispensa as catenárias (CCR, 2012). O processo ocorre com a técnica de Alimentação pelo Solo (APS), em que um terceiro trilho, instalado entre os trilhos de rolamento, transfere a energia quando em contato com o veículo, assim o sistema favorece a integração urbana e preserva a paisagem do entorno.

"O projeto do VLT carioca consiste em 6 linhas com 42 paradas em 4 estações de integração (Rodoviária, Central do Brasil, Barcas e Aeroporto), com extensão de 28 km" (Bernardes, 2016). Com a implementação do VLT de alta tecnologia no Rio de Janeiro, abre-se o espaço para a inserção em maior escala desta tecnologia no Brasil. Segundo Oliveira *et al*. (2013), "a modernização e a transformação dos sistemas de transportes públicos são importantes e estão diretamente associadas ao uso e aprimoramento do conhecimento e da experiência acumulada pelo setor" (Oliveira, et al., 2013).

Dada esta experiência a nível nacional, as discussões em relação a escolha da tecnologia dos sistemas transporte do país ganham novos rumos e trazem novas perspectivas de desenvolvimento de estudos voltados para este tema. Portanto, há uma excelente oportunidade de serem feitos estudos comparativos entre as tecnologias de média capacidade, visando identificar os reais benefícios associados a cada uma.

2.3.3 Comparativo entre as tecnologias BRT e VLT

O BRT e o VLT, tecnologias já amplamente operadas no mundo, recebem crescente atenção no Brasil. (Oliveira, et al., 2013). Somente a partir de estudos mais aprofundados sobre estes sistemas de transportes que estão sendo implantados, é possível orientar esta expansão do setor para que minimize os impactos da atividade e proporcione qualidade de vida à população.

Antes de comparar o desempenho de cada tecnologia, é importante distinguir questões técnicas intrínsecas a cada alternativa. O funcionamento de qualquer tecnologia de transporte tem como princípio básico a aplicação de uma força de propulsão que faz o veículo vencer as forças de resistência e se mover (Vuchic, 2007). Esta força de propulsão é produzida pelo motor do veículo a partir de uma fonte de energia, combustível ou eletricidade. O BRT utiliza veículos sobre pneus, predominantemente, movidos a diesel. Já o VLT, utiliza veículos sobre trilhos, geralmente, movido à eletricidade.

Os motores a diesel estão entre os motores ditos de combustão interna, denominados ICE (*internal combustion engine*) (Vuchic, 2007). O princípio de funcionamento destes motores é o de uma máquina térmica que converte a energia proveniente de uma reação

química em energia mecânica. Já os motores elétricos, convertem a energia proveniente de uma fonte de eletricidade em energia mecânica.

As diferenças não ficam apenas no princípio de funcionamento, ambos motores possuem características particulares de desempenho. Os transportes que utilizam motores de combustão interna possuem custos de investimento menores, exigem menor tempo para implantação, utilizam combustível de fácil armazenamento, possuem maior autonomia e flexibilidade. Por sua vez, os transportes elétricos são silenciosos, produzem maiores acelerações, não possuem emissões diretas de poluentes atmosféricos, possuem movimentos de aceleração e frenagem mais suaves, possuem maior vida útil, são mais eficientes, possibilitam reduzir o consumo pela frenagem regenerativa[6], permitem a propulsão de unidades múltiplas, e possibilitam reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

As características técnicas de cada tecnologia são distintas e bem definidas, e o processo de escolha deverá levar em conta: o grau de maturidade da tecnologia no país, a flexibilidade para adaptação às condições locais, a capacidade de fornecer acessibilidade a todos os passageiros, e a minimização dos impactos ambientais.

Porém, "não é suficiente selecionar a tecnologia adequada, é necessário implantá-la adequadamente" (Alouche, 2014). A forma de implementação dos sistemas influencia diretamente na capacidade de serviço, conforme já debatido nesta dissertação. E, o fato do BRT e do VLT serem concorrentes está atrelado, justamente, à faixa de capacidade que podem atender e a forma de operação em vias segregadas (Hsu, 2005).

Com isso, para cada situação, com diferentes características operacionais e condições locais, os sistemas terão distintos resultados de desempenho, em que uma tecnologia pode, ou não, se mostrar mais adequada que outra. Segundo ITDP (2008), "a tecnologia mais apropriada é aquela que melhor atende às necessidades dos usuários de um determinado contexto com suas próprias condições locais".

Um dos primeiros trabalhos de análise econômica de projetos de transporte foi realizado por Meyer *et al*. (1966). Este estudo elaborou uma comparação de custos de automóveis, ônibus e tecnologias sobre trilhos para um corredor hipotético, com extensão e

[6] Estudos recentes mostram que até 40% da energia fornecida para sistemas elétricos sobre trilhos pode ser recuperada através da frenagem regenerativa (Barrero, et al., 2008)

demanda de passageiros definidas. E assim, pode calcular o custo médio de transportar um passageiro para cada modal, considerando valores médios de parâmetros, como custos de infraestrutura, de manutenção, de aquisição de veículos e de mão-de-obra (Meyer, et al., 1966).

A partir do estudo de Meyer *et al.* (1966), surgiram outros trabalhos de análise dos custos totais para avaliar as alternativas de modais de transporte. Diferentes regiões eram utilizadas como referências para estudos de caso, com isso cada estudo levou em consideração diferentes parâmetros e diferentes condições de operação. Consequentemente, os resultados foram distintos para cada projeto, o que corrobora com a afirmação de que não há uma solução única.

Para Pratelli (2014), os sistemas sobre trilhos representam a única forma de atender, satisfatoriamente, a crescente demanda por transporte, tanto no âmbito regional como dentro das metrópoles. Além disso, o autor afirma que, para determinadas situações, o VLT pode até competir com o metrô, reduzindo o custo inicial de implantação e agilizando o acesso direto na superfície (Pratelli, 2014).

Já Kain (1988) defende que o BRT seria o meio mais eficaz para proporcionar melhora no trânsito, mas admite que para quantidades acima de 7 mil passageiros por quilômetro por dia seria justificável o investimento no VLT. Para esta conclusão, o autor revisou estudos anteriores a respeito do custo efetivo dos modais BRT, VLT e Trens pesados, para as *Sunbelts Cities*[7], nos EUA (Kain, 1988). Da mesma forma, um estudo de caso, para a região metropolitana de Oslo, na Noruega, comprovou que o BRT seria o sistema mais interessante para as condições estabelecidas (Siedler, 2014).

A questão que se coloca é se o BRT consegue ter o nível de desempenho do VLT. Segundo Hodgson *et al.* (2013), o BRT pode atingir tal nível, desde que haja o compromisso com a qualidade do serviço prestado ao passageiro. Em seu estudo, aplicado para o Reino Unido, e com dados da Europa e EUA, as diferenças dos sistemas, em termos de custos e impactos ambientais, são pequenas, se forem utilizados veículos BRT com motores híbridos (Hodgson, et al., 2013).

[7] "Cidades do cinturão de sol" (traduzido para português), é o termo utilizado em referência as cidades norte-americanas sulinas de clima quente. São elas: Dallas, Phoenix, Atlanta, San Diego e outras.

Vale ressaltar que as medidas para tornar o transporte por BRT mais interessantes para a sociedade encarecem o projeto, que, assim, pode chegar a valores de investimento similares aos sistemas sobre trilhos (Hodgson, et al., 2013). Dessa forma, existem determinadas condições em que o VLT pode ser mais apropriado sob o ponto de vista dos custos e benefícios (ITDP & SeMob, 2008). Além disso, com o aumento do número de lugares ofertados e da velocidade operacional, associados à redução da mão-de-obra empregada e à produtividade do VLT, observa-se que os custos operacionais vêm reduzindo drasticamente (Vuchic, 2007)

Vuchic (2007) destaca que a tração elétrica é superior em desempenho, conforto dos passageiros e impactos externos, mas envolve um investimento inicial maior. Sendo assim, o mesmo autor conclui que sempre que o investimento possa ser justificado com base num melhor desempenho e, em muitos casos, em custos operacionais mais baixos, a tração elétrica é superior aos motores ICE.

No entanto, em muitos casos, o processo de planejamento é fortemente influenciado, apenas, pelos fatores de custos e tempo de implantação, para serem condizentes com os limites dos mandatos políticos (ITDP & SeMob, 2008). Com isso, as escolhas podem não atender a necessidade de desempenho operacional exigida pelos usuários do sistema de transporte. Por isso, o planejamento de transporte deve basear-se em análises comparativas que envolvam os custos incorridos ao longo do ciclo de vida do sistema, e não só os custos iniciais do projeto (Casello, et al., 2014). Além, de quantificar os benefícios que não são medidos nos custos e que devem ser ponderados na tomada de decisão, para proporcionar a qualidade de serviço do sistema (Zhang, 2009).

Zhang (2009) realizou uma meta-analise dos fatores de custos, capacidade de serviço e impactos de uso do solo para comparar transportes de massa com ônibus e os sobre trilhos. Sua conclusão é de que, na média, o BRT tem o potencial de superar o VLT em prover, de moderado a elevado nível de capacidade de serviço, com moderado nível de custos, em uma região com moderados níveis de ocupação populacional (Zhang, 2009).

Uma observação interessante do trabalho realizado por Zhang (2009), é a respeito da defasagem no resultado em função do uso de diferentes indicadores de base de referência para os custos operacionais. Nas primeiras análises, com base nos custos médios por unidade de veículo-quilômetro e nos custos por veículo por hora, os ônibus e BRT foram os de menor

custo. Porém, nas análises seguintes, considerando medidas de custo por espaço-quilômetro (número total de assentos mais as posições em pé a cada quilômetro) e de custo por passageiro-quilômetro, a tecnologia que se sobressaia com menor custo era o Metrô, e o saldo relativo do BRT em relação ao VLT diminuía. Este resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Custos Operacionais em diferentes bases

	Ônibus	BRT	VLT	Metro
$ por veículo-milha	**3,1**	**3,6**	**9,3**	**6,5**
$ por veículo-hora	**45,0**	**78,8**	**125,0**	**152,0**
$ por 1.000 espaços-milha	**60,0**	**72,3**	**96,0**	**49,2**
$ por 1.000 passageiros-milha	**616,4**	**496,9**	**578,0**	**282,0**

Nota: Valores em Dólares Americanos de 1990.

Fonte: Adaptado de Zhang (2009).

Além da base de referência para os custos, outra questão fundamental para a sensibilidade dos resultados são os parâmetros de entrada nos modelos. Com isso, alguns estudos focam em identificar a influência de determinados parâmetros de entrada para a escolha do modal de transporte. Tirachini (2010), por exemplo, desenvolveu um modelo microeconômico para comparar o desempenho das alternativas BRT, VLT e Trens pesados. Este modelo levou em consideração quatro elementos: tempo de acesso, tempo de espera, tempo de viagem, e os custos, de capital e operacional (Tirachini, et al., 2010). Aplicando o modelo para dados de cidades australianas, o autor conseguiu determinar a velocidade operacional na qual as alternativas têm o mesmo custo efetivo.

Brunn (2005) comparando custos operacionais do VLT e do BRT, na área de Dalas, nos EUA, concluiu que, para corredores operando com menos de 1.600 espaços por hora, a relação de custo favorece o BRT. Para sistemas acima de 2.000 espaços ofertados por hora, os *headways* do BRT ficam tão pequenos que a velocidade operacional fica prejudicada (Bruun, 2005). Isso mostra que o custo marginal da adição do serviço VLT é menor que o do BRT.

Considerando que a ocupação desses espaços pode afetar o rendimento do sistema, e consequentemente, os custos operacionais, Allport (1981) realiza seu estudo com base na demanda de passageiros. O estudo aplica modelos de cálculo de custos para um corredor radial de 8km, com dados reais de oferta e demanda, do ano de 1978 (Allport, 1981). Vuchic

(2005), também, afirma que a seleção de sistemas de ônibus e ferroviário depende da demanda de passageiros. Para ambos os autores, os custos com mão-de-obra ganham peso significativo nos custos totais, conforme se aumenta a demanda.

Sendo assim, o baixo custo com pessoal favorece o VLT, de forma que para volumes pesados de passageiros, este seja superior ao BRT (Vuchic, 2005). Já o BRT apresenta uma oportunidade investimento para cidades de pequeno a médio porte, em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, com baixo poder financeiro de investimento, em que não se justifica a introdução de tecnologia diferente (Kühn, 2002). Por esses motivos, em seu artigo, Vuchic (2005) conclui que o BRT e o VLT, se complementam, mais do que competem, uns com os outros.

Para garantir esta complementariedade, o processo de escolha entre os sistemas deve feito de forma racional e baseado em uma estrutura lógica de tomada de decisão. Nesse sentido, é fundamental definir o "*break-even point*" entre as tecnologias, com base na unidade de referência definida por projeto, como sendo, aquela que poderá compreender os desafios do local. Uma opção é trabalhar com a unidade de passageiro por hora do sistema (Moccia, et al., 2015).

Recentemente, Moccia & Laport (2016) definiram, para um suposto corredor de 10km, o "*break-even point*" entre o BRT e o VLT como sendo, cerca de 13.000 passageiros/hora, e entre o VLT e os Trens Pesados, cerca de 20.000 passageiros/hora. Em um estudo, também, bastante completo, Casello *et al.* (2014) mostra que, em um estudo de caso na Região de Waterloo, no Canadá, em uma faixa de demanda entre cerca de 1.500 a 3.000 passageiros/hora, os custos totais entre o BRT e o VLT são praticamente iguais, sendo importante avaliar a sensibilidade do projeto em relação aos parâmetros de entrada.

Dessa forma, ressalta-se que cada lugar precisa ser modelado de acordo com suas características individuais. Ambos os modelos, de Moccia & Laport (2016) e de Casello *et al.* (2014), mostram-se esta preocupação, porém o de Casello *et al.* destaca-se pela facilidade de uso. Por isso, este último foi selecionado para ser usado como referência no desenvolvimento da metodologia proposta pelo presente trabalho.

Casello *et al.* salienta a necessidade de adoção de modelos com interface de simples compreensão pelo usuário, para que os planejadores possam facilmente testar a sensibilidade dos parâmetros que são gerenciáveis pela agência de trânsito. Os modelos de Qin *et al*. (1996)

e de Hsu (2005), citados como referência em seu estudo, preocupam-se com a incorporação dos parâmetros específicos de cada contexto local, porém não têm a capacidade de testar a sensibilidade para os parâmetros incluídos no modelo de custo (Casello, et al., 2014).

De fato, o modelo informatizado de Qin *et al*. (1996) destaca-se por permitir a fácil calibração às condições locais. Denominado MODECOST, trata-se de um modelo de custos totais que inclui os custos para os usuários, empresas de trânsito, sociedade (Qin, et al., 1996). Da mesma forma, o modelo de Hsu (2005), denominado LBCostor, foi desenvolvido em linguagem Microsoft Visual Basic buscando criar uma interface amigável ao usuário, permitindo que sejam feitos ajustes de acordo com cada contexto.

A nível nacional também é possível encontrar estudos que comparam as tecnologias de transporte para média capacidade. Alguns exemplos são: Alouche (2011), CEDES (2015), ITDP (2008), Lerner (2009). Estes estudos comparam as tecnologias de transportes coletivos de forma geral e abordando aspectos teóricos de cada uma. Porém, é importante que hajam estudos empíricos com base em dados reais da operação no contexto brasileiro.

Oliveira *et al.* (2013) compara os sistemas BRT e VLT para o Corredor TransOeste, na cidade do Rio de Janeiro, através da inserção de dados reais de operação do sistema em uma metodologia de análise multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). O autor estabelece indicadores relativos à eficiência e eficácia dos sistemas, que são avaliados qualitativamente sob a ótica dos usuários e a ótica da operadora. Por fim, conclui que, dentro da perspectiva atual, o BRT demonstra vantagem de desempenho ao VLT, porém, para o cenário futuro projetado, o VLT passa a ser mais interessante, devido o fator de produção do BRT reduzir com a necessidade de aumento da frota (Oliveira, et al., 2013).

O trabalho de Oliveira *et al.* trata-se de uma ferramenta simples de auxílio a tomada de decisão, porém não realiza uma análise quantitativa completa dos custos envolvidos no ciclo de vida do sistema. Na literatura, não foram encontrados trabalhos disponíveis que aplicassem este tipo de modelagem dos custos totais ao contexto brasileiro. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva preencher esta lacuna na literatura.

Por fim, com base na revisão da literatura realizada nesta seção, fica clara a importância de ter atenção aos fatores que estão sendo considerados e aos pesos que são dados aos mesmos em cada comparação. Caso contrário, as pesquisas podem acabar favorecendo a escolha por uma determinada tecnologia, em detrimento da outra.

O desequilíbrio existente no debate entre as alternativas de transporte é apontado por Zhang (2009). O mesmo autor, ainda, afirma que faltam estudos empíricos para o desempenho dos custos dos sistemas, para o impacto nos valores das propriedades e para a relação com a densidade populacional. Além disso, as comparações devem abordar as implicações para equidade social, externalidades ambientais e consumo de energia, que muitas vezes não são consideradas na tomada de decisão. (Zhang, 2009).

De forma geral, o quadro apresentado na Tabela 8 sintetiza uma comparação entre estas duas tecnologias e, para o aprofundamento desta comparação, no próximo capítulo será desenvolvida uma metodologia capaz de abranger os diversos aspectos envolvidos.

Tabela 8 – Quadro comparativo entre as tecnologias BRT e VLT

	BRT	**VLT**
Sistema de propulsão	Motores diesel	Motores elétricos
Custo inicial	Menor	Maior
Tempo de implantação	Menor	Maior
Autonomia	Maior	Menor
Emissões atmosféricas	Maior	Menor
Ruídos	Maior	Menor
Vida útil	Menor	Maior
Eficiência energética	Menor	Maior

Fonte: Elaboração própria.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho serve de base na avaliação entre alternativas tecnológicas para o setor de transporte coletivo de passageiros. Para isso, a metodologia baseia-se na aplicação de modelos computacionais que permitam prever o comportamento do sistema quando submetido a diferentes condições. "A utilização de programas computacionais para planejar, projetar e operacionalizar sistemas de transportes de forma coesa, tem se intensificado ao longo dos anos, à medida que a tecnologia da informação vem imprimindo sofisticação à elaboração de simuladores" (Lourenço, 2015).

A proposta desta dissertação é avaliar os custos no ciclo de vida e os benefícios associados à eletrificação do transporte de média capacidade de passageiros, abordando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos ao longo da duração do projeto. Dada a abordagem de diferentes aspectos, com ampla análise dos benefícios envolvidos, duas ferramentas de modelagem fazem parte do método de análise a ser aplicado. O primeiro é o modelo desenvolvido no estudo "*A Transit Technology Selection Model*", de Casello *et al*. (2014), e o segundo é o software de aplicação livre HOMER (sigla para *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*), desenvolvido pela U. S. National Renewable Energy Laboratory. Ambos serão descritos nas próximas seções deste capítulo.

O primeiro modelo, desenvolvido por Casello *et al*. (2014), tem a função de reproduzir as características de performance do sistema e indicar em que situações o sistema elétrico seria mais adequado que o sistema a diesel, e vice-versa. Já o segundo modelo, HOMER, parte da premissa de eletrificação do sistema, para avaliar cenários de potencial inserção de fontes renováveis no projeto e analisar os impactos de políticas econômicas de baixo carbono. Dessa forma, é possível incluir os benefícios ancilares do sistema e os incentivos a sua implementação que, em um primeiro momento, não são contabilizados em uma pura análise de custos do projeto.

Como forma de validar a metodologia proposta, a mesma será aplicada em um Estudo de Caso, em que 3 cenários base deverão ser avaliados. O primeiro trata do cenário de referência com o sistema de transporte representado através da aplicação da alternativa tecnológica mais usual. O segundo cenário, apresenta uma alternativa baseada na eletrificação do sistema. E o terceiro cenário, acrescenta ao segundo cenário a inserção de fontes renováveis para compor a geração de energia a ser utilizada pelo sistema. Todos os

cenários serão analisados para um período de 30 anos, por entender que este é o prazo médio dos contratos de concessão no setor de transportes.

A escolha do estudo de caso, bem como, a construção dos cenários de acordo com as características do local será tratada adiante, no capítulo 4. No presente capítulo, o foco será descrever os modelos adotados e explicar o processo de aplicação dos mesmos. O objetivo do uso em conjunto das duas ferramentas de modelagem é ampliar a abrangência da análise e criar uma fundamentação para avaliação dos modos de transporte, que possa captar, não só o ponto de vista econômico, como também, os aspectos energéticos e ambientais envolvidos. Dessa forma, o presente trabalho preenche algumas lacunas na literatura para a avaliação das alternativas de transportes, permitindo aumentar a compreensão nesse processo para que haja o adequado planejamento do setor.

3.1 MODELO DE SELEÇÃO DA TECNOLOGIA DE TRANSPORTE

O primeiro passo para o desenvolvimento da proposta de eletrificação do transporte é entender o comportamento do sistema a longo prazo. Somente através da modelagem do desempenho do sistema durante sua vida útil, que será possível avaliar como incorrem os custos e permitirá comparar as alternativas tecnológicas recomendadas sob uma mesma base de análise.

Dos diversos trabalhos existentes na literatura para comparar os modais de transporte, o modelo desenvolvido por Casello *et al.* (2014) foi o selecionado para ser aplicado nesta dissertação. Este modelo quantifica os custos do ciclo de vida das alternativas tecnológicas para um sistema com características especificadas pelo projetista e com dados reais de operação. Além de analisar os custos em função da demanda e permitir realizar testes de sensibilidade das variáveis inseridas, ao considerar na comparação, questões técnicas de desempenho de operação e considerar aspectos energéticos, como consumo e eficiência, a opção por este modelo se mostrou bastante aderente com a proposta desta dissertação.

O desenvolvimento deste modelo é o tema do trabalho "*A Transit Technology Selection Model*", publicado em 2014. Neste artigo, o modelo em questão é aplicado comparando as tecnologias VLT e BRT no município de Waterloo, estado de Ontario, Canadá, para sua validação. Seus resultados indicam que, sob o ponto de vista econômico,

os custos anuais de ambas as tecnologias atingiram valores bastante similares. Com isso, conclui que pequenas alterações nos valores de entrada do modelo, como período de estudo, taxa de juros, custos de mão-de-obra e custos de infraestrutura, podem resultar em uma mudança na tecnologia recomendada (Casello, et al., 2014).

A formulação do modelo consiste em cinco componentes: a representação da demanda, o cálculo dos custos de investimento, o cálculo dos custos operacionais, a análise de sensibilidade, e o levantamento das emissões (Casello, et al., 2014). De forma a detalhar o processo de funcionamento do modelo, os próximos itens desta seção, abordam o procedimento de cálculo para cada componente.

Em resumo, a lógica do modelo é apresentada na Figura 19. Nela, as variáveis indicadas em linhas tracejadas amarelas são os parâmetros de entrada inseridos pelo usuário no modelo para descrever o projeto (extensão, velocidade de operação, capacidade dos veículos, local de implementação do projeto, etc.). As linhas duplas azuis também indicam variáveis de entrada, porém estas estão relacionadas às tecnologias selecionadas para a análise (eficiência energética, custo de energia, custo de mão-de-obra, custos de manutenção, preço dos veículos, etc.). As variáveis obtidas de forma endógena pelo modelo são representadas pelas linhas pontilhadas na cor azul escuro (frequência de serviço, frota, tempo de viagem, horas anuais de operação, etc.). Os resultados são os custos no ciclo de vida de cada tecnologia, bem como, a razão de custos entre elas.

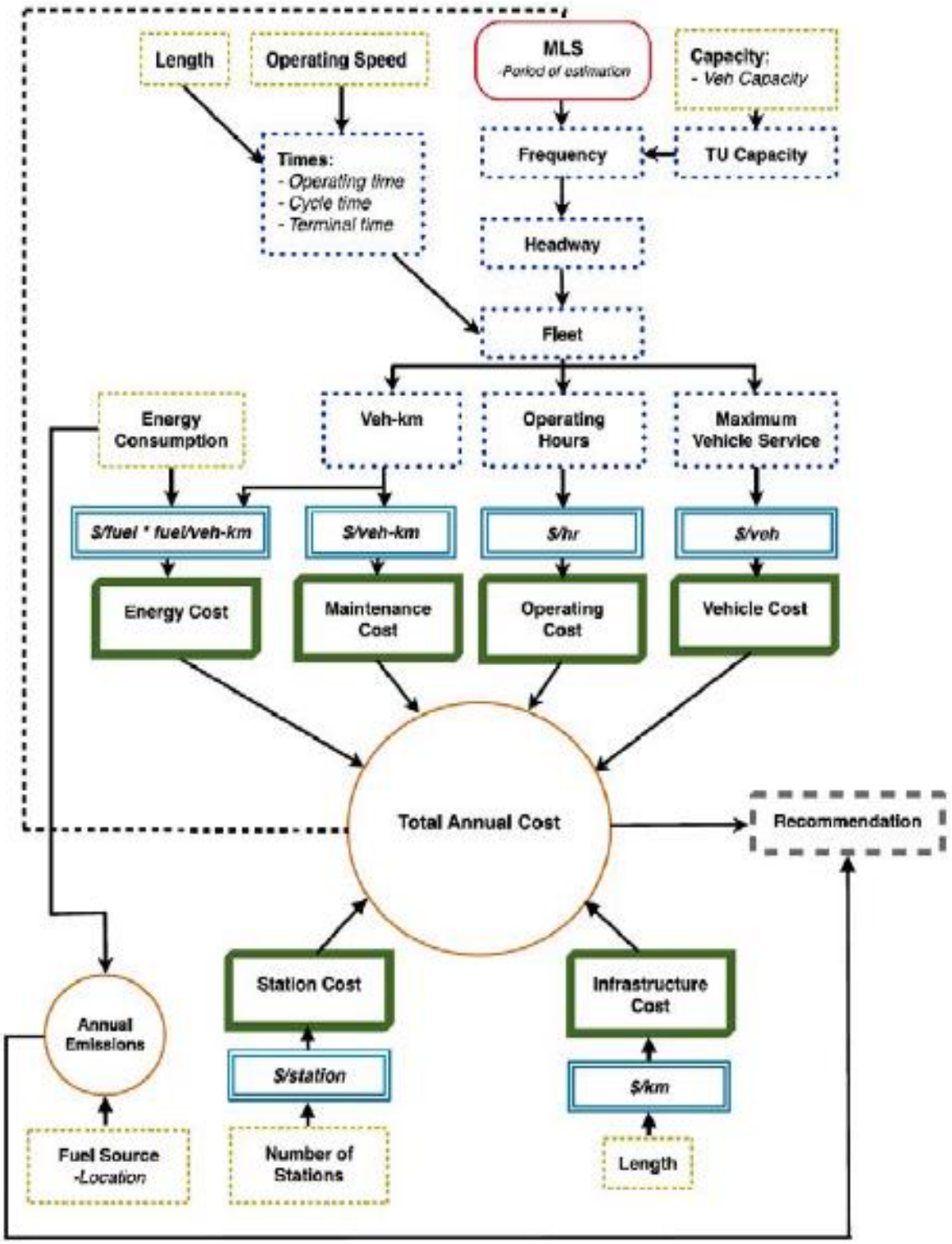


Figura 19 – Estrutura do Modelo de Comparação das Alternativas Tecnológicas.

Fonte: Casello *et al.* (2014).

3.1.1 Perfil da Demanda

Para descrever a demanda, o autor ressalta importância desta etapa:

> O sucesso deste processo depende fortemente da qualidade das previsões a partir das quais são calculados muitos dos benefícios e custos. O número projetado de passageiros é particularmente importante porque estimativas incorretas podem gerar erros significativos nos custos operacionais futuros e em menor escala dos custos iniciais de infraestrutura. Da mesma forma, suposições sobre os custos de energia e mão-de-obra podem influenciar fortemente a escolha final de alinhamento e tecnologia (Casello, et al., 2014).

Como forma de simplificar a representação da demanda, o parâmetro de partida do modelo é o valor de máximo de demanda de passageiros por hora ($P_{máx}$). Esse valor deve ser representativo para a seção de máxima quantidade de embarques do dia, ou seja, é o mesmo valor para todas as horas de pico do sistema.

Dado que a demanda máxima de passageiro varia em função da hora do dia e do dia da semana, a forma do modelo captar estas variações é definindo três períodos de análise para os dias úteis e dois períodos para os fins de semana.

a) Dias úteis:
    - Período de pico: representa o intervalo do dia em que há o maior transporte de passageiro, normalmente os horários de rush da manhã e da noite.
    - Período fora do pico: representa os intervalos com demanda moderada.
    - Período noturno: representa os horários nos dias úteis de demanda bem inferior ao restante do dia
b) Finais de semana:
    - Período diurno: representa maior demanda, baseada no valor intermediário dos dias úteis.
    - Período noturno: representa menor demanda, baseado no menor valor dos dias úteis.

Para cada período, o modelo permite definir qual a sua duração em horas. Essa abrangência dos períodos poderia ser aumentada, apontando especificamente para a demanda de cada hora do dia e em valores absolutos, mas, como simplificação, opta-se por intervalos

maiores e expressados com valores relativos, em função do valor de demanda máxima, ou seja, são múltiplos de $P_{máx}$.

3.1.2 Custos e Parâmetros do sistema

Estabelecido o comportamento da demanda, as próximas etapas servem para apresentar os custos do sistema. Para os custos de investimento, o modelo considera três categorias: custos de infraestrutura e adequação viária, custo das estações e custos de aquisição de veículos. Nos gastos de infraestrutura são considerados obras e materiais civis, construção da via, aquisição do direito de passagem, equipamentos para eletrificação, etc. Sendo assim, a consolidação destes gastos deve ser computada em relação a cada quilômetro construído. Por sua vez, os custos de estações e veículos são múltiplos diretos da quantidade que a configuração do sistema estabelece para ambos, sendo dependentes do nível de sofisticação desejado para cada.

Tanto a extensão do corredor, como o número de estações são valores definidos no modelo pelo projetista. Já a quantidade de veículos para compor a frota do sistema é calculada endogenamente pelo modelo, a partir de parâmetros do sistema estabelecidos em projeto. Sendo assim, o modelo exige a determinação de parâmetros do projeto, como velocidade de operação, tempo no terminal, capacidade do veículo, capacidade de utilização, porcentagem de frota de reserva, vida útil dos veículos, além dos já mencionados, extensão da via e número de estações.

Esta determinação da frota de veículos que deve compor o sistema é feita pelo modelo com base nos cálculos desenvolvidos em Casello e Vuchic (2009). O cálculo, primeiramente, parte da demanda para definir a frequência de veículos circulando a cada hora capaz de prover capacidade suficiente. A frequência define os *headways* de operação do sistema. Depois, o modelo calcula o tempo necessário para um veículo completar um ciclo completo de viagem, incluindo o tempo gasto no terminal. O número de veículos é determinado pelo arredondamento da relação entre o tempo do ciclo e *headway* de operação. Por fim, o cálculo da frota total acrescenta o percentual de veículos de reserva requeridos (Casello, et al., 2009)

Outra questão a ser considerada no custo de aquisição dos veículos é a taxa de renovação da frota. Os veículos podem ter o tempo de vida útil inferior ao tempo de projeto

do sistema. Assim, novos veículos devem ser adquiridos em substituição aos que não estiverem mais em condições de operar. Por simplificação, o modelo assume que todos os veículos serão substituídos em um mesmo ano.

Assim como os custos de investimento, o modelo também divide os custos de operação em três categorias: mão-de-obra, energia e manutenção. Os custos com mão-de-obra são calculados em função das horas de operação do sistema, enquanto os custos com energia e manutenção são proporcionais ao valor de veículo-quilômetro viajado (Casello, et al., 2014).

Os custos laborais, ou de mão-de-obra, são calculados no modelo em função das horas de operação dos veículos, que são estimadas com base no perfil demanda e nos tempos de percurso do sistema. O veículo-hora de operação no sistema é determinado de forma endógena pelo modelo, considerando o perfil diário de demanda e o tempo de percurso de um ciclo completo de viagem. Este período de funcionamento do sistema é definido pelo projetista, tanto para os dias úteis como para os fins de semana, e reproduzido para o restante do ano, assumindo valores padrões de um ano típico[8]. Assim, é possível converter horas do dia para horas anuais e calcular os custos laborais multiplicando pelo fator de valor do homem-hora adotado pelo projetista.

Com relação aos custos de energia, um tratamento similar é aplicado. Porém, para cada hora de operação, são associados valores de veículos-quilômetro (vkm), obtidos em função da demanda e da extensão do corredor. Esses valores de vkm por hora são multiplicados pela eficiência energética dos veículos em percorrê-los, resultando no consumo de energia do sistema.

Para os custos de manutenção, são considerados uma componente relacionada a manutenção dos veículos e outra relacionada manutenção da via. A taxa de manutenção dos veículos está em base dos vkm efetuados, enquanto que a taxa de manutenção da via é função apenas dos quilômetros percorridos.

Portanto, ao comparar diferentes tipos de sistemas de trânsito com relação aos custos, é importante manter a consistência nos relatórios de custos e examinar e comparar elementos de custo específicos sempre que houver dados disponíveis. Essas comparações discriminadas

[8] Um ano típico possui em média 260 dias úteis e 105 dias de final de semana.

permitem a identificação clara de fatores específicos que aumentam o custo de desenvolvimento do sistema.

3.1.3 Emissões

Como já debatido, o setor de transportes está diretamente associado a questões de emissões atmosféricas. Para tratar deste aspecto, o modelo desenvolve o cálculo anual dos valores emitidos com sistema. Os poluentes contabilizados são: NOx, SOx e CO_2 equivalente. E os fatores de emissão são definidos com base no tipo de combustível utilizado no transporte e, para a eletricidade, ainda devem ser consideradas as diferentes participações das fontes de energia na matriz de geração elétrica do local.

3.1.4 Análise de sensibilidade

Dois tipos de análise de sensibilidade são executados pelo modelo. O primeiro refere-se à demanda e o segundo aos parâmetros operacionais. Para a demanda, trabalha-se com a premissa de que, para alguns níveis de passageiros, uma tecnologia irá oferecer custos significativamente mais baixos e, se não houver outras motivações, será claramente a melhor escolha (Casello, et al., 2014). Outra interpretação para esta afirmação é que uma análise de sensibilidade para os valores de demanda demonstraria que há um intervalo na quantidade de projeto para passageiros transportados, em que as tecnologias comparadas teriam desempenho similar em relação aos custos anuais. Portanto, a aplicação deste modelo permite encontrar o "*Break Even Point"* das tecnologias analisadas com relação a demanda de passageiros.

Além da análise de custos, o modelo permite também avaliar a sensibilidade das variáveis relacionadas aos parâmetros operacionais. Para cada variável do sistema, o modelo realiza diversas iterações variando os valores que se quer analisar e mostrando os efeitos sobre a relação de custos entre as duas tecnologias comparadas. Dessa forma, é possível identificar medidas que viabilizariam a escolha de uma tecnologia em relação a outra.

3.2 HOMER

Além da questão dos custos, o processo de eletrificação dos transportes proporciona benefícios à sociedade que não são contabilizados pelo setor. Como forma de avaliar estes benefícios, a metodologia apresentada inclui uma análise energética das alternativas para o sistema. Para esta análise utiliza-se o *software* computacional HOMER.

O HOMER é um modelo de otimização para sistemas de geração de energia, aplicado para o dimensionamento e avaliação técnica e financeira das opções para sistemas isolados ou conectados à rede. Sua proposta é identificar o sistema de menor custo capaz de suprir a demanda de energia local, permitindo ainda a comparação de uma ampla gama de tecnologias de geração de energia com diferentes aplicações. O que simplifica a tarefa de avaliação de projetos, auxiliando a tomada de decisão quanto a configuração adequada.

> O HOMER utiliza os dados de entrada inseridos para simular diferentes configurações de sistemas ou combinações de componentes e gerar resultados que podem ser vistos como uma lista de configurações exequíveis ordenadas pelo custo. Além dessa avaliação, pode ser exibida, também, uma larga variedade de tabelas e gráficos para ajudar na comparação das configurações e avaliar cada uma delas econômica e tecnicamente (Feijó, 2009).

O sistema de cálculo dos custos engloba os custos de investimento, custos de reposição dos equipamentos, custos de combustível e custos de operação e manutenção.

Dada a incerteza de diversos parâmetros, como preço dos equipamentos, matérias-primas e manutenção, além da imprecisão relacionada a sazonalidade, intermitência e disponibilidade de recursos, o HOMER permite explorar o efeito que a mudança de algum fator tem para afetar os custos, assim pode ser verificado qual fator tem maior impacto nos projetos e operações do sistema (Feijó, 2009).

Portanto, o Homer executa três processos: simulação, otimização e analise de sensibilidade.

> Na simulação, o programa modela, hora a hora, o desempenho de uma única configuração para determinar a viabilidade técnica e o custo total do projeto. Na otimização, o programa simula todas as configurações possíveis de geração distribuída em busca da solução que possui o menor custo e que satisfaça as limitações técnicas do projeto. Na análise de sensibilidade, o programa realiza diversas otimizações, em função de uma gama de dados para uma mesma entrada e, assim, avalia os efeitos das incertezas do projeto. Dessa forma, em um único processo de análise de sensibilidade, estão inúmeros processos de otimização, assim como, dentro de cada

> processo de otimização, são realizadas inúmeras simulações (LAMBERT, et al., 2006; Behenck, 2011).

Conforme já mencionado, para iniciar a usar o HOMER devem ser fornecidos ao modelo dados de entrada que descrevam as possíveis opções tecnológicas a serem avaliadas, assim como, os custos de cada componente e a disponibilidade de recursos, de acordo com o Manual de Iniciação do Software. Portanto, é importante ter em mente que o modelo deverá solicitar os seguintes dados iniciais: Taxa de juros real anual; Tempo de vida do projeto; Custo fixo de capital; Custo fixo de O&M; Penalidade por falta de capacidade.

Posteriormente, deve-se construir o diagrama esquemático do projeto, que deverá conter todas as tecnologias que se deseja avaliar na otimização do sistema. Definido o esquema, deve-se estabelecer os dados da demanda a ser atendida. Para isso, o programa possibilita a inserção dos dados de potência em carga horária, podendo ser informados os meses e o tipo do dia (semana ou fim de semana).

Feito isso, o próximo passo deve ser a inserção dos dados referentes aos componentes constituintes das opções tecnológicas escolhidas. Esses dados de entrada descrevem as opções tecnológicas, os custos dos componentes, os tamanhos e os números de cada componente que serão utilizados nas simulações (Feijó, 2009). Nesta etapa, deve-se ter clareza e atenção para a definição de algumas variáveis, como: valor presente, valor futuro, custo de capital inicial, custo de O&M, custo de substituição e custos anualizados.

Construído o sistema, já com suas características, o passo seguinte é o de definir os detalhes dos recursos e sua disponibilidade para cada hora do ano. Para o caso da radiação solar, o programa possui uma base de dados própria, fornecida a partir da informação de latitude e longitude do projeto. Ademais desses dados, variáveis externas ao sistema, como temperatura, dados de emissão, custo de carbono e as restrições do sistema, podem ser inseridos para adequar o projeto a realidade que se procura modelar.

Por fim, os cálculos são efetuados, podendo-se ainda adicionar variáveis de sensibilidade e refinar os resultados, para compor uma análise mais completa do projeto. Desse modo, diferentes maneiras de se trabalhar a eletrificação dos transportes podem ser avaliadas. E para validação da metodologia, a mesma será aplicada a um estudo de caso a ser tratado no próximo capítulo.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso selecionado trata do Corredor BRT TransOeste da Cidade do Rio de Janeiro. A escolha deste corredor para estudo de caso se deu pelo fato de ter sido o primeiro sistema BRT a ser implementado na cidade e possuir dados de operação já consolidados. Dessa forma, esta decisão permite obter dados reais da operação para comparar e validar o modelo. Além disso, este corredor possui uma demanda de passageiros intermediária em relação aos outros corredores da cidade, gerando informações que podem presumir resultados de outros corredores maiores ou menores.

A cidade do Rio de Janeiro, localizada na Região Sudeste do Brasil, é a segunda maior metrópole do país e a terceira maior da América do Sul (SMTR, 2015a). Segundo dados do IBGE, são cerca 6,5 milhões de habitantes distribuídos numa área de mais de 1200 km² de território municipal. Esses números significativos refletem diretamente em necessidade de locomoção e expressam os grandes desafios do setor de transportes em garantir o elevado fluxo de pessoas e serviços por este território (FIRJAN, 2010).

Assim, qualquer estudo a respeito do setor de transporte da cidade do Rio de Janeiro ganha grande importância por se tratar de uma influente metrópole, recheada de problemas de tráfego e emissões de poluentes (Cabral, et al., 2013b). Dimensionar a conjuntura atual do setor de transporte da cidade e sua tendência de evolução é um exercício fundamental para a compreensão das necessidades da sociedade que deverão ser priorizadas no processo de escolha das melhores alternativas de mobilidade.

Vale ressaltar, também, que o setor de transportes da cidade do Rio de Janeiro está em contínua transformação, tendo implantado, recentemente, modernas alternativas tecnológicas para o transporte de média capacidade, o BRT e o VLT. A adoção destas alternativas contemporâneas aponta para a direção em que o modelo de expansão do sistema de transporte da cidade está priorizando. O que torna fundamentais os estudos locais de aprimoramento das ferramentas de auxílio à tomada de decisão quanto a qual tecnologia deve ser adotada.

Uma abordagem para o estudo considerando todos os projetos de corredores de transporte de média capacidade da cidade do Rio de Janeiro se tornaria muito ampla e fugiria do escopo desta dissertação. Além disso, a aplicação em um corredor já seria suficiente para

explicar e validar o método. Caso haja interesse, o mesmo pode ser facilmente reproduzido para os outros corredores, através do mesmo procedimento descrito por este trabalho.

Segundo Santos (2010), para que as escolhas sejam feitas visando a melhoria do sistema, é fundamental conhecer as deficiência e necessidades da operação. Nesse sentido, o presente capítulo apresenta o estudo de caso selecionado para a aplicação da metodologia desenvolvida. Primeiramente será descrito o panorama do setor de transporte da cidade do Rio de Janeiro, de forma a contextualizar as preocupações levantadas pela dissertação e identificar oportunidades de intervenção com base no modelo de expansão que tem sido adotado na cidade. Depois, o capítulo foca na descrição especifica dos corredores BRT Rio, destacando o BRT TransOeste, já que este é o objeto de estudo da dissertação. Nesta seção serão apresentados os parâmetros do sistema que serão utilizados na modelagem para basear o estudo em dados reais de operação. Por fim, o texto desenvolve uma proposta para integrar o uso de painéis fotovoltaicos no projeto de transporte elétrico, como forma de avaliar os benefícios do uso conjunto de tecnologias mais limpas de geração de energia e transporte coletivo.

4.1 PANORAMA DO SETOR DE TRANSPORTES DO RIO DE JANEIRO E O MODELO DE EXPANSÃO ADOTADO

O município do Rio de Janeiro possui quase 10 mil km de vias, em que se caracterizam deslocamentos pendulares e concentrados em poucos corredores (CMP, 2016). A explicação para este comportamento está na configuração radial das principais vias em direção ao centro da cidade, aliada às restrições impostas pela acentuada topografia e ao ordenamento habitacional do município (CGPU, 2009). Por esse motivo, o setor de transportes não deve ser tratado desassociado de questões de planejamento urbano e de uso do solo.

Nesse sentido, a Lei Complementar nº 16 de 1992, instituiu o Plano Diretor da Cidade como instrumento básico da política urbana de Município do Rio de Janeiro (CMRJ, 1992). Posteriormente, está lei foi revogada pela Lei Complementar nº 111 de 2011, que dispõe sobre a política urbana e ambiental e institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro (PDDU) (CMRJ, 2011a). Neste plano, são

definidas as políticas setoriais da cidade, em que "destaca-se na Política de Transporte, o planejamento voltado para a garantia da acessibilidade ao transporte público, a mobilidade e racionalização dos modais de transportes na Cidade, prevendo a gradativa redução da carga poluidora gerada pelo sistema de transportes" (CGPU, 2009).

Portanto, o Plano Diretor de Transportes é o documento de referência para orientar as ações relativas aos investimentos em infraestrutura viária e sistemas de transporte. Ao fazer isso, deve compatibilizar os projetos com a evolução do meio urbano e o desenvolvimento das necessidades da sociedade. Nesse sentido, a escolha do Rio de Janeiro para sediar grandes eventos nos últimos anos, fez intensificar a discussão a respeito do planejamento de transportes da cidade (Cabral, et al., 2013a).

Atualmente, a cidade conta com quase 3 milhões de veículos em circulação, sendo entorno de 85% referentes ao transporte individual (automóveis e motocicletas) [9]. Não bastasse isso, essa frota automotiva do Rio de Janeiro tem crescido de forma constante a uma taxa média de 5% ao ano, representando no período de 2001 a 2011 um aumento total de motorização de 61% (Hughes, *et al*., 2013). "Com o crescente número de veículos em circulação, a cidade do Rio de Janeiro enfrenta, há muito, problemas graves de congestionamentos e pouca fluidez do tráfego" (NTU, 2012). Segundo Hughes *et al*. (2013), a velocidade média para veículos particulares nas vias mais importantes era de 27 km/h em 2003, passou para 20 km/h em 2012, e deverá diminuir para 16 km/h em 2032.

Outro indicador para análise da mobilidade urbana é o tempo de deslocamento para o trabalho, medido pelo tempo perdido no trajeto casa-trabalho. "Como era de se esperar, Rio de Janeiro e São Paulo apresentam os menores percentuais de trabalhadores que realizam viagens casa-trabalho com tempos de deslocamentos curtos" (IPEA, 2013). A Figura 20 apresenta está análise com dados de 2003 e 2009 e mostra que, apesar de ter apresentado uma pequena melhora no período, a região metropolitana do Rio de Janeiro continua sendo a que possui pior resultado no Brasil (Pero, et al., 2012).

A frota fluminense soma 7% da frota do país e sua evolução pode ser observada na Figura 21, em que se nota o predomínio dos automóveis de transporte individual (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013). Entretanto, o Rio de Janeiro está entre as regiões metropolitanas

[9] Portal do Departamento de Transito do Estado do Rio de Janeiro (DETRAN). Disponível em <http://www.detran.rj.gov.br/> Acesso em: Janeiro 2017

brasileiras com maior porcentagem de habitantes utilizando o transporte público, são 70% contra 55% da média nacional (Oliveira, et al., 2015).

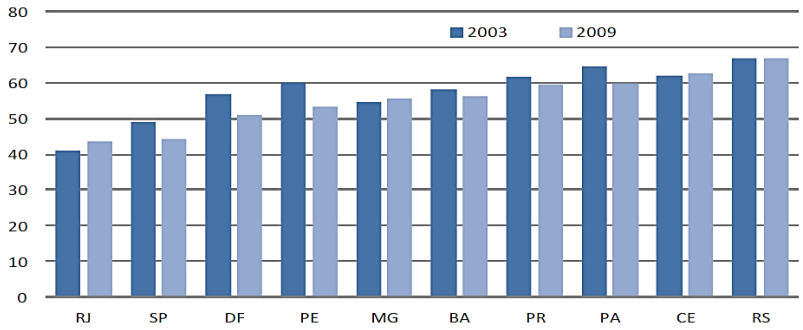


Figura 20 – Proporção de pessoas com tempo médio para o trajeto casa-trabalho de até 30 minutos.

Fonte: Pero *et al.* (2012).

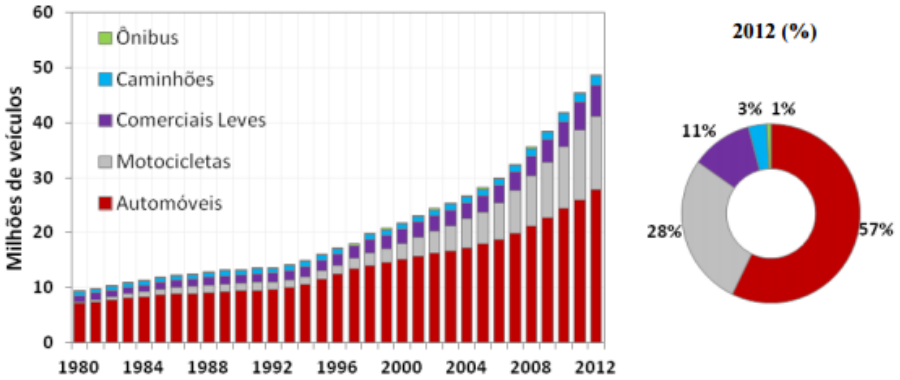


Figura 21 – Evolução da frota por categoria.

Fonte: (MMA, 2013).

Outra comparação observada em relação à média nacional está no expressivo quantitativo de ônibus que evidencia a concentração deste tipo de modal na matriz do sistema de transporte público da cidade (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013). O sistema rodoviário é composto por uma frota com cerca de 8.341 ônibus que atendem a 90% dos passageiros do transporte público da cidade (SMTR, 2015a).

De fato, os números do transporte público no Rio de Janeiro são bastante expressivos, são 6,4 milhões de pessoas se deslocando diariamente no sistema. Somente no horário de pico da manhã, são 1,25 milhão de passageiros movimentando-se a uma velocidade média de 18,7 km/h e percorrendo 14,2 milhões de quilômetros (SMTR, 2015b). Estes dados mostram a importância do setor para a cidade e seu intenso uso por seus habitantes. Além

disso, mostra que a operacionalização do sistema de transporte influencia diretamente questões sociais econômicas e ambientais, pois a movimentação de bens e pessoas tem grande impacto na sociedade, no consumo energético e no progresso de uma nação (Maia, 2015).

Sendo assim, a concentração no uso de modais rodoviários torna o sistema ineficiente, tanto pela baixa capacidade de transporte dos automóveis e ônibus, propiciando engarrafamentos, quanto pelo uso de combustíveis mais poluentes (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013). Izaga (2014) defende que o modelo de mobilidade atual deve considerar a sustentabilidade do espaço urbano, através da redução no consumo de energia e na poluição produzida. Porém, este conceito de mobilidade sustentável parece ainda estar distante da realidade do setor.

Os transportes representam o maior consumo de energia no estado do Rio de Janeiro, conforme ilustra a Figura 22. O setor representa 34,9% dos mais de 15,5 milhões tep consumidos de energia no Estado, o que reflete diretamente na participação do setor em relação às emissões de GEE do estado (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013). Com isso, nos grandes centros urbanos, as principais fontes emissoras de poluentes são as fontes móveis (Lima, 2013).

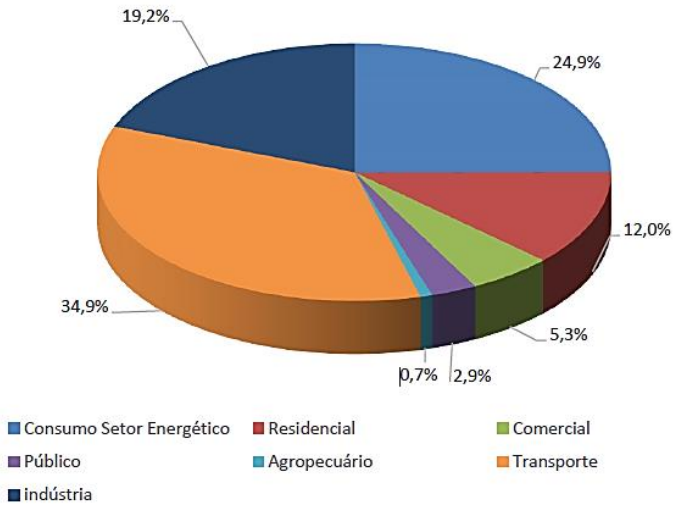


Figura 22 – Participação setorial no consumo de energia do estado, em 2010.

Fonte: SMAC & Centro Clima (2013).

As emissões totais do Estado somam 37.495,9 $GgCO_2e$ em 2010, em que 41,6% estão relacionadas ao setor de transportes (Figura 23), devido principalmente ao consumo de óleo diesel e gasolina. O óleo diesel

contribui com 6.546,2 $GgCO_2e$ (Figura 24), o que representa 42,0% do total das emissões deste setor, sendo o modal rodoviário responsável por 88,1% das emissões do uso do diesel. O modal rodoviário sozinho é responsável por 12.442,2 $GgCO_2e$ (79,9%) das emissões do setor de transporte (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013).

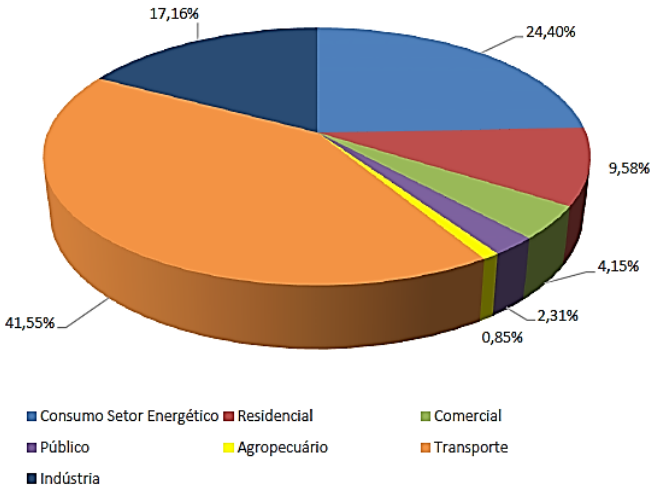


Figura 23 - Participação dos setores econômicos nas emissões totais de energia do estado, em 2010.

Fonte: SMAC & Centro Clima (2013).

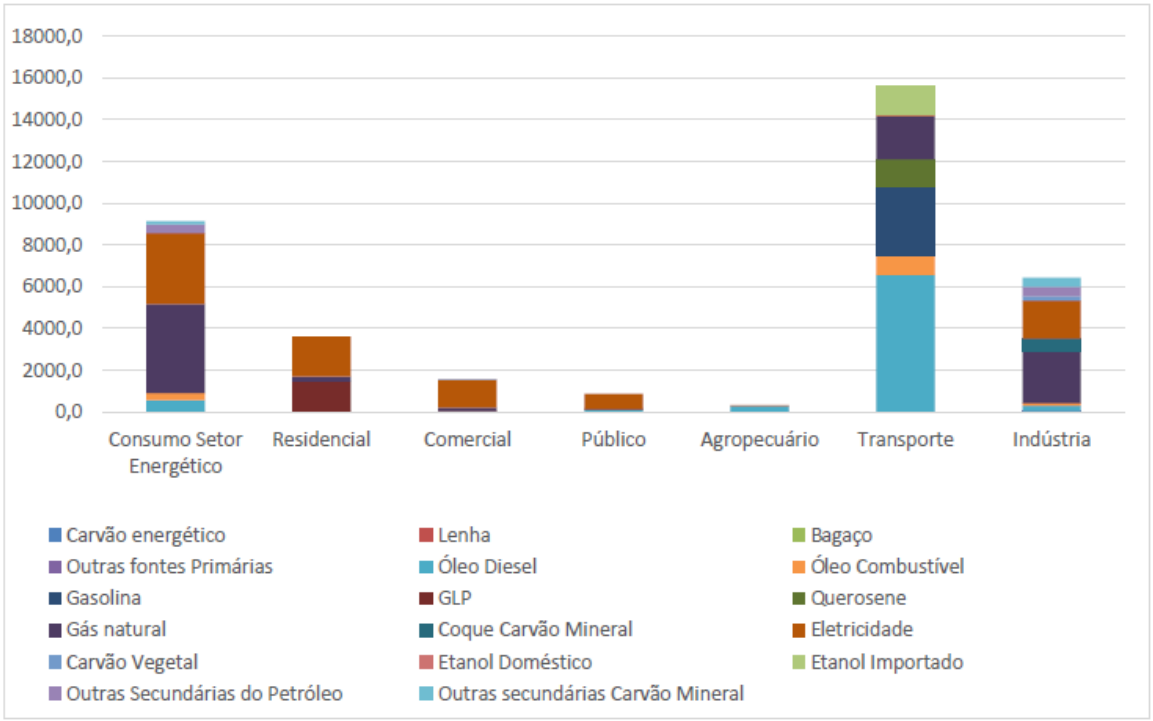


Figura 24 – Emissões totais de energia, por setor e por fonte, em GgCO2e, ano 2010.

Fonte: SMAC & Centro Clima (2013).

Especificamente para a cidade do Rio de Janeiro, a prefeitura municipal apresentou o inventário de emissões de GEE para os anos de 1990, 1996, 1998, 2005 e 2012, além de um estudo de cenários e de um plano de ação para mitigação de suas emissões. Este último relatório aponta que as emissões da cidade chegaram a 22,6 $MtonCO_2e$, em 2012, praticamente dobrando em relação ao ano de 2005, que teve 11,6 $MtonCO_2e$, conforme ilustra a Figura 25 (Centro Clima, 2013). Para 2012, "as emissões de CO_2 correspondiam a 85% deste total, enquanto que as emissões de CH_4 eram responsáveis por 13,6% e as de N_2O a apenas 1,4%" (CMP, 2016).

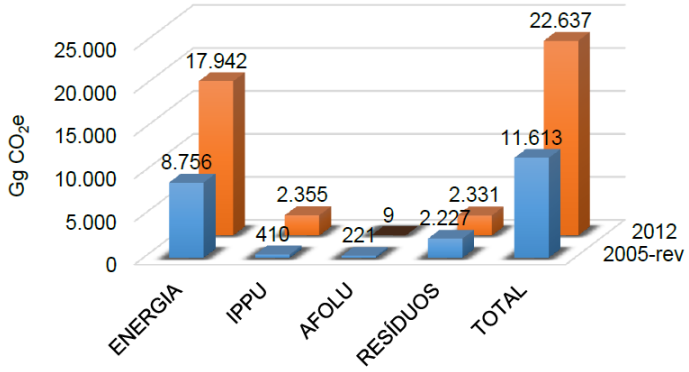


Figura 25 – Comparação das emissões de GEE para o município do Rio de Janeiro entre 2005 e 2012. Fonte: Centro Clima (2013).

Considerando a participação das emissões na atividade econômica, o inventário de 2012 realiza uma análise das emissões com base em indicadores como PIB e população. Dessa forma, afirma que o crescimento econômico a partir de 2005 foi alavancado por atividades mais intensivas no uso de energia, por isso o conteúdo de carbono do PIB Municipal aumentou em 34%, conforme demonstra a Tabela 9 (Centro Clima, 2013).

Tabela 9 – Emissões de GEE, PIB e população no Município do Rio de Janeiro entre 2005 e 2012.

	2005	2012	2012/2005 (%)
Emissões totais (milhões de toneladas de CO_2e)	11,61	22,64	95%
PIB (bilhões de Reais a preços de 2012)	167,00	242,50	45%
População (milhões de habitantes)	6,10	6,32	4%
Emissões totais/PIB (tCO_2e/milhões de Reais de 2012)	69,54	93,35	34%
Emissões totais per capita (tCO_2e/ habitante)	1,90	3,58	88%

Fonte: Centro Clima (2013).

Atendendo às preocupações ambientais e com o objetivo de apoiar e contribuir para o cumprimento dos propósitos da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de estabilizar a concentração das emissões de GEE na atmosfera, a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, promulgou a Lei 5.248 de 27 de Janeiro de 2011, denominada Lei Municipal de Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Sustentável (CMRJ, 2011b). Através desta lei, metas de redução de emissões de GEE foram definidas objetivando evitar 8% das emissões de 2005 em 2012 (0,959 MtonCO_2e), 16% em 2016 (1,9 MtonCO_2e) e 20% (2,43 MtonCO_2e) em 2020 (Centro Clima, 2013). "Essa Lei é um importante marco legal que permitirá ao município estabelecer estratégias e promover ações efetivas para a necessária proteção do sistema climático" (SMAC-RJ & Centro Clima, 2011).

O principal setor responsável pelo aumento das emissões no período de 2005 a 2012 foi o setor de energia, em que se destaca a participação do subsetor de transportes com 41% das emissões do uso de energia do município (Centro Clima, 2013). Nesse sentido, o Plano Municipal de Mudanças Climáticas indica o setor de Transportes como sendo um dos principais contribuintes na redução de emissões para a cidade (SMAC-RJ & Centro Clima, 2011).

Somando os valores apresentados na Tabela 10, ressalta-se que 74% das emissões de CO_2 equivalente no setor de transportes são causadas pelo modal rodoviário. Com isso, os transportes públicos têm importante peso, já que 70% das viagens urbanas motorizadas são realizadas em transporte coletivo (SETRANS-RJ, 2013). Para isso, a Prefeitura tem orientado esforços para a redução das emissões, através da implantação de corredores BRTs, BRSs e VLTs, além da expansão da malha cicloviária (CMP, 2016).

> O uso de corredores de média capacidade surge como alternativa ao alto investimento requerido na implantação de modais de alta capacidade. Por isso, recebem crescente atenção na cidade do Rio de Janeiro, em que políticas de promoção do transporte público vêm se concretizando sob a forma uma rede de BRTs integrando diferentes zonas da cidade e de VLTs permeando a zona central (Oliveira, et al., 2013).

Izaga (2014) e Cabral *et al.* (2013) também ressaltam essa tendência na expansão do setor de transportes da cidade do Rio de Janeiro voltada para as tecnologias de média capacidade. "Durante toda a história do Rio de Janeiro, o governo municipal nunca tinha investido na construção de corredores de transportes, porém realidade foi modificada com a implantação da atual rede de BRT´s" (SIPLAN, 2015). O sistema BRT projetado possui 4

corredores percorrendo cerca de 157 km de extensão, sendo orçados em R$ 7,5 bilhões (Lourenço, 2015). As características desse sistema parcialmente implementado na cidade do Rio Janeiro serão aprofundadas na próxima seção.

Tabela 10 – Emissões dos subsetores do uso de energia do Município do Rio de Janeiro para o ano 2012, em em GgCO2e.

Setores	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2e
Consumo do setor energético	3.169,56	0,03	0,01	3.171,93
Perdas	2.084,36			2.084,40
Produção de coque	1.085,20	0,03	0,01	1.087,53
Residencial	1.888,15	0,01		1.889,65
Comercial/serviços	1.626,88			1.626,88
Público	562,33			562,80
Agropecuário	0,68			0,68
Transportes	6.600,82	1,13	0,42	6.753,77
Rodoviário	4.847,65	1,13	0,37	4.985,51
Ferroviário	93,05			93,05
Aéreo	1.650,38		0,05	1.664,87
Hidroviário	10,34			10,34
Indústria	2.497,19	0,03	0,01	2.499,79
Extração e tratamento de minerais	2,15			2,15
Minerais não metálicos	63,60			63,66
Metalúrgico	1.621,15	0,03	0,01	1.623,48
Papel e cellulose	0,02			0,02
Química	115,01			115,12
Têxtil	0,78			0,78
Produtos alimentícios	19,55			19,55
Bebidas	19,32			19,32
Outras indústrias	39,61			39,61
Eletricidade*	616,00			616,00
Total	13.176,05	1,17	0,43	13.333,57

*Não foi possível desagregar as emissões de eletricidade entre as tipologias industriais.

Fonte (Centro Clima, 2013).

Vale destacar que as ações para implementação de sistemas BRT são válidas para o combate às emissões atmosféricas, no entanto o fato do combustível utilizado, na maioria dos casos, ser o diesel, sugere que o potencial de mitigação desses projetos não é totalmente explorado. Tomando como exemplo a tecnologia VLT, tida como concorrente ao BRT por operar de forma similar, os motores dos veículos utilizam eletricidade como fonte de energia,

sendo assim, indicam ser uma proposta mais adequada para a redução de emissões no transporte (Motta, 2013).

Além disso, o uso de eletricidade possibilita integrar formas de autoprodução por energias renováveis no projeto do sistema, e assim, potencializar os efeitos para redução de emissões e contribuir agregando fontes limpas para a matriz elétrica da região. A geração de energia elétrica total do Estado correspondeu 43 TWh, sendo cerca de 34, 5 TWh pelas centrais de serviço público e 8,5 TWh por autoprodução (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013). A maior parte desta geração é proveniente de térmicas, conforme ilustra a Figura 26. Por isso, a aplicação deste tipo de sistema possibilita melhorar a participação de fontes limpas na matriz do Estado.

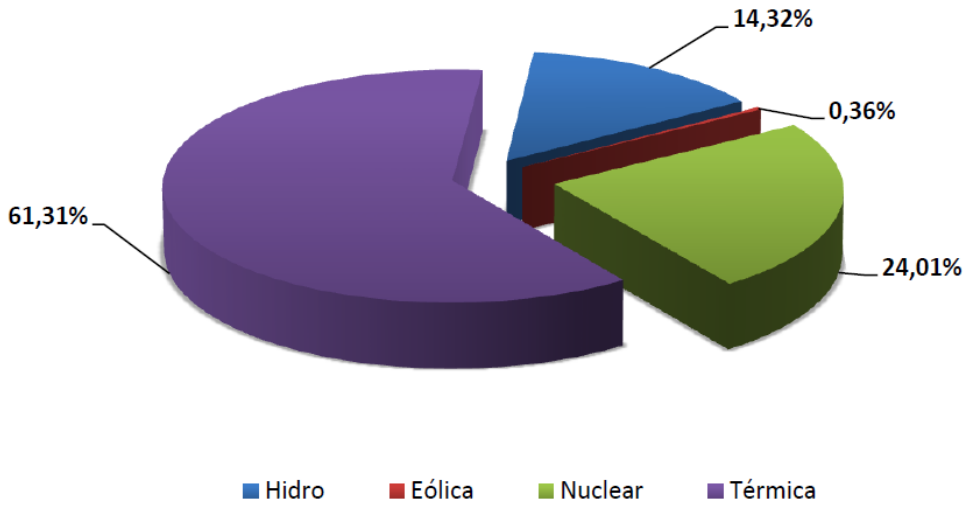


Figura 26 - Geração de energia (centrais elétricas de serviço público e autoprodutoras) por fonte, em 2010.

Fonte: (SMAC-RJ & Centro Clima, 2013)

No Rio de Janeiro, a tecnologia VLT foi implantada na região central da cidade como parte do projeto de revitalização da Zona Portuária, denominado Porto Maravilha. O projeto da rede completa ainda não foi concluído, porém o sistema já opera parcialmente desde junho de 2016. O projeto previsto conta com 28 km de extensão e 42 estações para operar em 3 eixos principais (Rodoviária-Santos Dumont/Rodoviária-Praça XV/Central-Cinelândia) utilizando veículos elétricos energizados por Alimentação pelo Solo para garantir a integração visual com o entorno (CCR, 2012). As obras começaram em agosto de 2014, com

um custo de investimento previsto R$ 1,157 bilhão, viabilizados com recursos federais do PAC da Mobilidade e uma parceria público-privada (FETRANSPOR, 2016).

Apesar do planejamento de transportes da cidade do Rio de Janeiro não priorizar a aplicação do VLT para implementações futuras (PDTU, 2016). Os estudos a respeito da tecnologia VLT, recém-implantada na cidade, são fundamentais em função dos benefícios associados a ela. Portanto, é importante modelar o comportamento que esta tecnologia teria nos corredores de transporte da cidade e analisar seus efeitos, com o objetivo de auxiliar a decisão entre essas alternativas tecnológicas para futuros projetos.

Visto que o sistema BRT já se encontra com uma ocupação acima da capacidade nominal, principalmente no corredor TransOeste (SMTR, 2015b), a escolha deste tipo de modal para a demanda da região parece ter sido equivocada. Assim, o presente estudo levanta o questionamento de qual seria o comportamento do VLT neste sistema e se ele poderia ser mais adequado para o atendimento à população. Para isso, a próxima seção irá descrever as características deste sistema de corredores no Rio de Janeiro.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA BRT

O projeto de BRT da cidade do Rio de Janeiro baseia-se na construção de faixas exclusivas para o ônibus de média capacidade a esquerda do fluxo de veículos, evitando assim, o conflito com usos da faixa da direita (conversões à direita, parada de taxis, entrada e saída de estabelecimentos comerciais e residenciais, por exemplo) (NTU, 2012). Há prioridade semafórica automatizada nos cruzamentos para os veículos do BRT e existe, ainda, um Centro de Controle e Monitoramento responsável pelo controle dos horários das viagens e pela supervisão da operação (Oliveira, et al., 2014).

Quanto ao funcionamento, o sistema dispõe da otimização da operação nos corredores, com a cobrança de tarifa antecipada, construção de estações com plataforma elevada, e adoção de uma nova logística operacional, com serviços de linhas expressas e paradoras (Lima, 2013). Nos terminais, há serviços de informação eletrônica, que auxiliam os usuários na identificação das linhas, horários e destinos.

Os corredores fazem parte dos eixos de transportes propostos no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano da cidade do Rio de Janeiro, em que o projeto prevê a implantação

de 4 (quatro) corredores de BRT: TransOeste, TransCarioca, TransBrasil e TransOlímpica. O trajeto dos corredores no território carioca é apresentado na Figura 27. Esses sistemas complementam uma brecha de performance do sistema carioca atual, em que há um sistema de ônibus de baixa capacidade e um sistema de metrôs e de trens de alta capacidade, mas abrangência limitada. (Oliveira, et al., 2014).

Para que haja esta complementação, é importante que o traçado e a implementação do sistema BRT priorizem a conexão com a rede de transporte público já existente. Quando todos os corredores forem entregues, a cidade terá uma rede de mais de 150 km de corredores de BRT de alta qualidade, integrados aos sistemas de metrô, trens urbanos e bicicleta pública, entre outros serviços de transporte (Hughes, et al., 2013).

Na sequência do texto, serão descritas as particularidades de cada um dos quatro corredores, porém com ênfase no Corredor TransOeste que será o foco deste estudo.

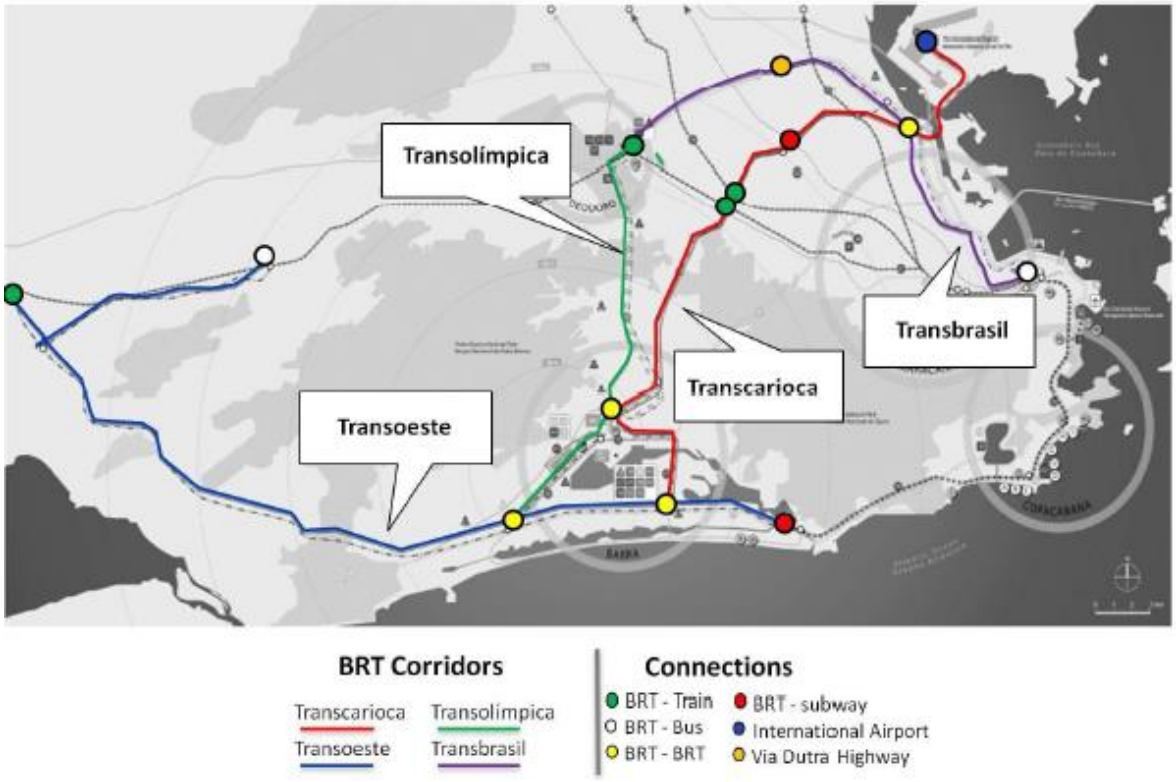


Figura 27 – Corredores BRTs planejados para a cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: Hughes *et al.* (2013).

4.2.1 BRT TransOeste

O primeiro corredor a ficar pronto, a linha de BRT TransOeste, é a principal conexão da extensa região Oeste do Rio de Janeiro e foi implementada em 2012.

> Para efeito de análise poderíamos dividir o trajeto do TransOeste em três trechos, no sentido leste-oeste: um primeiro sobre a Av. das Américas, entre o Terminal Alvorada e o Túnel da Grota Funda (Túnel vice-presidente José Alencar); um segundo, na Av. Dom João VI, que inicia em Barra de Guaratiba até o cruzamento com a Estrada do Magarça; e um terceiro trecho que se desenvolve desse entroncamento até o centro de Santa Cruz e Campo Grande. Cada um desses trechos tem uma espacialidade distinta, e envolvem questões de ocupação e uso do solo também diferenciadas, embora tenham em comum a baixa ocupação e o caráter ambiental, com forte presença da paisagem natural. O primeiro trecho, entre o mar, Lagoas e o maciço da Pedra Branca é o que possui mais estrutura urbana dos três, com maior valor da terra, cujo traçado é deduzido do Plano da Barra da Tijuca e Baixada de Jacarepaguá, elaborado por Lucio Costa. O segundo trecho, que atravessa Guaratiba, identifica-se como uma bacia hidrográfica, com solos frágeis, e ambientalmente sensível. O terceiro trecho, na Estrada da Pedra, é marcado por uma trama urbana onde bolsões de urbanização estão pendurados ao corredor, entremeados por extensas áreas desocupadas, até ganhar maior densidade quando adentra os bairros de Santa Cruz e Campo Grande, que tem estrutura urbana tradicional, pois são antigos núcleos da urbanização, que remonta às fazendas dos padres jesuítas, no século XVIII. (Izaga, 2014)

Há, ainda, um quarto trecho que se trata da extensão do sistema para conectar o Terminal Alvorada até o Jardim Oceânico, via Avenida das Américas, representado pelo traçado vermelho na Figura 28. Observando a mesma figura, a linha verde representa o trajeto em operação desde junho de 2012, que liga o Terminal Alvorada ao Terminal de Santa Cruz. E a linha amarela, representa o terceiro trecho citado, que liga a Praça Santa Cruz, no início da Avenida Cesário de Melo, ao Terminal de Campo Grande, em operação desde 2013.

Figura 28 – Trajeto do Corredor BRT TransOeste.

Fonte: Hughes et al. (2013).

Atendendo aos moradores da região, a capacidade viária da Avenida das Américas foi mantida com três faixas de rolamento em cada sentido para tráfego geral. Com isso, o BRT trafega pela pista do meio de largas avenidas, em pavimento de concreto, sendo implantado contíguo ao canteiro central.

No trecho entre o Terminal Alvorada e o Jardim Oceânico, na Barra da Tijuca, o traçado de seis quilômetros conta com sete estações e promove a integração do corredor expresso à Linha 4 do metrô. Além desta importante integração com o metro, há integração com o trem (ramal Santa Cruz) em três estações (Santa Cruz, Santa Eugenia e Campo Grande), e com linhas de ônibus alimentadoras em cinco estações (Pontal, Ilha de Guaratiba, Mato Alto, Magarça, Pingo d'agua e Cesarão 1/2/3), oferecendo boas opções para acessar a linha troncal.

A função do Corredor TransOeste é de conexão de áreas distantes da cidade, tendo caráter também social ao atender uma população historicamente com acesso limitado a linhas de transporte público de melhor performance. A arrecadação é controlada pela operadora do sistema e não há subsídio governamental na tarifa para o Corredor TransOeste. (Oliveira, et al., 2014).

No início de sua operação, em junho de 2012, a demanda era de 38.462 viagens/dia, e alguns meses depois, em agosto de 2013, já alcançava 120 mil viagens/dia, crescimento 5% superior ao previsto para o período (Izaga, 2014; Cabral, 2013). Segundo Izaga (2014):

> O sistema tem capacidade para atender até 230 mil viagens/dia, a depender da operação e da quantidade de ônibus. Entretanto, a superlotação tem sido uma queixa constante, em especial nos horários de pico, pois, devido ao percurso atravessar áreas de baixa densidade, a maior parte dos trajetos é pendular, entre as localizações extremas da linha, isto é, Barra-Santa Cruz ou Campo Grande.

Em contrapartida às críticas de superlotação, a redução no tempo de viagem foi constatada por 89% dos passageiros e eleita por 76% dos passageiros como o principal ponto positivo da implementação do sistema, de acordo com pesquisa de satisfação realizada pela Fetranspor e ilustrada na Figura 29 (FETRANSPOR, 2013). Segundo Cabral *et al.* (2013), de Santa Cruz à Barra da Tijuca, o tempo de viagem caiu de 120 minutos (com o ônibus convencional) para 60 minutos (com o BRT). Um ganho de uma hora – equivalente a 50%.

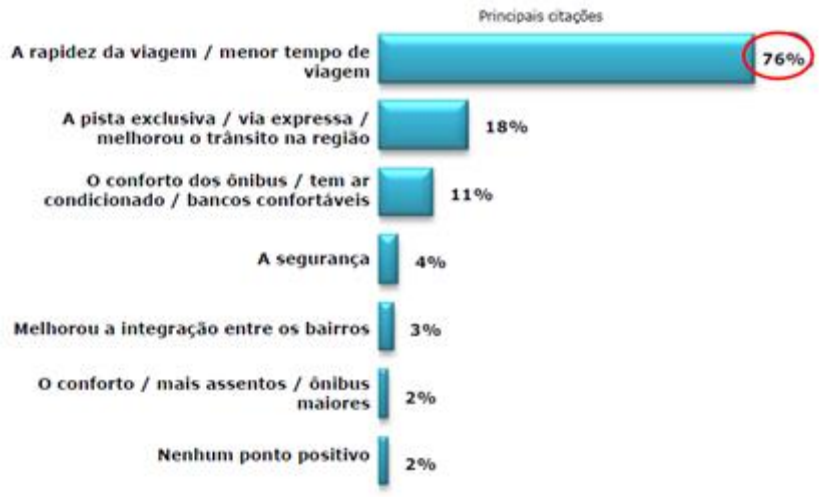


Figura 29 – Pontos positivos do BRT TransOeste, segundo pesquisa de satisfação com os passageiros. Fonte: Fetranspor (2013).

Em termos de frota, o BRT TransOeste possui 116 veículos em operação nas linhas troncais (91 ônibus articulados e 25 do tipo Padron) mais 75 ônibus convencionais com ar condicionado e catraca dupla nas linhas alimentadoras (Cabral, 2013). A racionalização das linhas de ônibus que operavam na área de abrangência fez retirar mais de 200 ônibus convencionais das ruas, correspondendo a uma redução de 70% da frota (Abramovitch, 2014).

A implantação dos corredores aumenta a velocidade operacional dos ônibus e permite trabalhar com um *headway* (intervalo entre composições seguidas) mínimo de 3 minutos (Cabral, et al., 2013a). Inicialmente, a velocidade dos ônibus que operavam no trecho da implantação do TransOeste era de 25km/h, mas havia expectativa de que o corredor passasse a operar a 34km/h. (NTU, 2012). Estudos mais recentes apontam que a velocidade média é de 47km/h no serviço expresso e de 35km/h no serviço parador e Expresso Direto 50km/h (Cabral, 2013).

O corredor TransOeste, destacado na Figura 30, conta com cerca de 60 km de infraestrutura de BRT com um total de 62 estações e 4 terminais[10]. Com a expansão à Estação Jardim Oceânico, a demanda total esperada é de 220 mil passageiros por dia com comportamento pendular, já que concentra os deslocamentos em direção à Barra pela manhã

[10] Informações encontradas no site da Concessionária BRT Rio. Disponível em: <http://www.brtrio.com/> Acesso: Janeiro de 2017

e na direção oposta à tarde. Para atender esta demanda o BRT conta com 230 ônibus articulados saindo com uma frequência de 200 veículos por hora, no horário de pico, e 100 veículos por hora, no horário entre picos (NTU, 2012). Os picos de passageiros por viagem ocorrem nos horários de 6h e 17h, de acordo com dados de embarque por hora levantados em Março de 2013 (Hughes, et al., 2013).

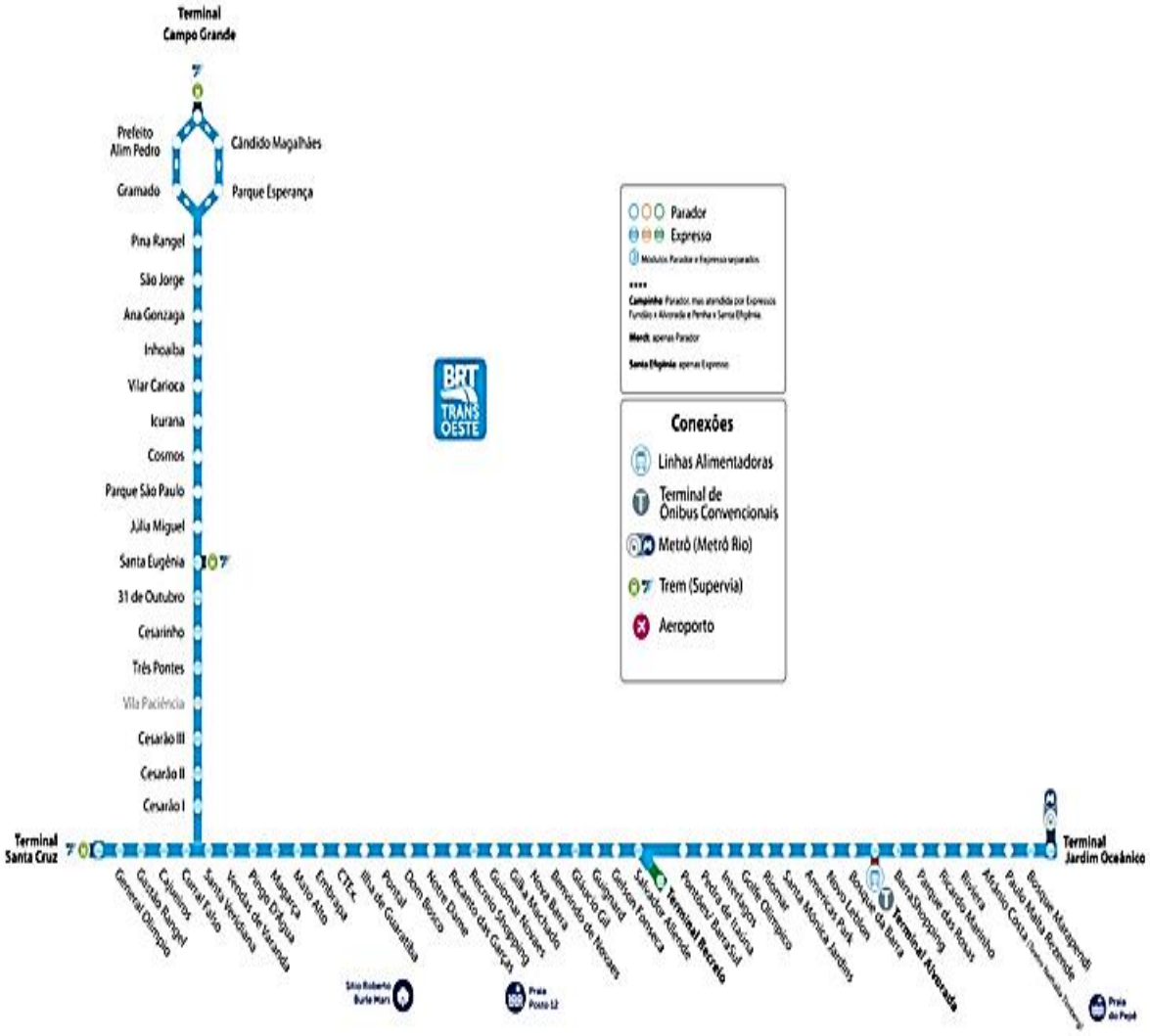


Figura 30 – Trajeto com as Estações em Operação do BRT TransOeste.

Fonte: site BRT Rio.

O gráfico apresentado na Figura 31 foi elaborado pelo ITDP (Instituto de Políticas de Transportes e Desenvolvimento) através do relatório de Análise do Impacto do Sistema BRT TransOeste no Rio de Janeiro. O objetivo desse relatório foi examinar os efeitos do BRT TransOeste em seus primeiros nove meses de operação. Como resultado, o relatório alerta

para questões críticas a serem melhoradas, como os tempos de espera dos passageiros, que ainda são significativos, devido a procedimentos de embarque ineficientes, e as frequências de ônibus, 25% mais baixas do que as planejadas (Hughes, et al., 2013). Além disso, o relatório também aponta os pontos positivos trazidos pelo sistema, como a melhora na mobilidade, nas emissões de poluentes e no nível de conforto das viagens. Em síntese, este trabalho do ITDP destaca os indicadores de impacto para o BRT TransOeste presentes na Tabela 11.

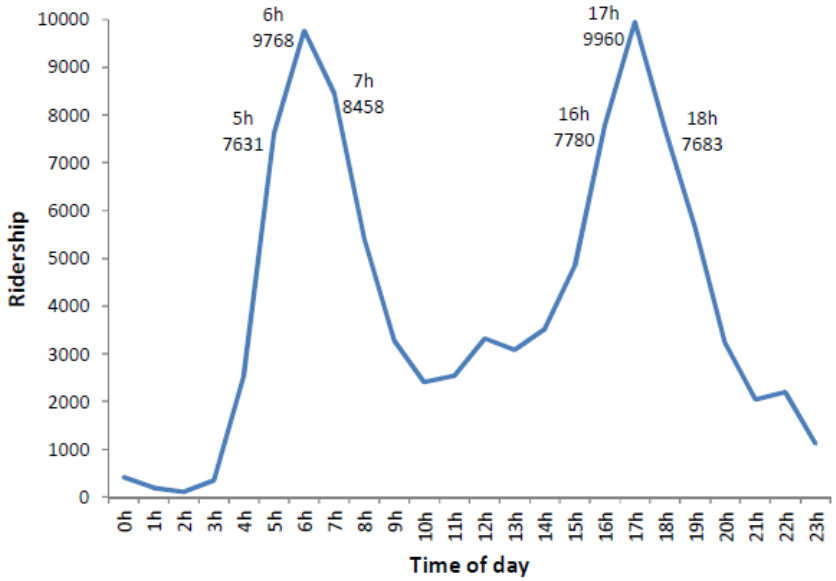


Figura 31 – Curva da Média Diária de Passageiros por Hora no BRT TransOeste.

Fonte: Hughes *et al.* (2013).

Tabela 11 - Quadro com os Indicadores de Impacto do BRT TransOeste

Média de tempo reduzido por viagem	**40 minutos/viagem**
Média de tempo reduzido de viagem por pessoa	**14 dias/pessoa/ano**
Valor de tempo reduzido para todas as viagens	**R$ 70 milhões/ano**
Redução dos quilômetros percorridos pelos veículos	**56,8 milhões km/ano***
Redução do uso de combustível	**44 milhões litros/ano***
Redução de emissões de dióxido de carbono (CO_2)	**107.000 toneladas/ano***
Redução de emissões de material particulado (PM)	**6,9 toneladas/ano***
Redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x)	**206 toneladas/ano***

***Estimativa anual considerando vinte anos**

Fonte: Hughes *et al.* (2013).

4.2.2 BRT TransCarioca

Este mesmo trabalho realizado pelo ITDP também foi feito para o sistema BRT TransCarioca e apresenta a curva de embarque diário de passageiros (Figura 32) tendo o mesmo formato com picos na parte da manhã (entre 6h e 7h) e no entardecer (entre 17h e 18h). Comportamento similar ao BRT TransOeste.

Figura 32 - Curva do Percentual de Passageiros por Hora no BRT TransCarioca.
Fonte: ITDP (2015).

O BRT TransCarioca foi o segundo BRT inaugurado na cidade e é uma das principais ligações entre o Aeroporto Internacional Tom Jobim e a Barra da Tijuca. Ele representa a primeira ligação transversal de característica integradora do Município do Rio de Janeiro (SMO, 2011). Ao contrário do corredor BRT TransOeste, que tem um traçado radial, do centro para a periferia, o trajeto do BRT TransCarioca possui um traçado circunferencial, fechando um arco pelo lado norte do Maciço da Tijuca, entrecortando diversos eixos de circulação, que irradiam a partir da área central (Izaga, 2014).

Inaugurado em 1º de junho de 2014, atende importantes bairros cariocas das Zonas Norte e Oeste como Curicica, Taquara, Tanque, Praça Seca, Campinho, Madureira, Vaz Lobo, Vicente de Carvalho, Vila da Penha, Penha, Olaria e Ramos. A densidade bruta média desses bairros somados é de 55 habitantes/hectare, que se aproxima da média de toda a cidade, que é de 52 habitante/hectare, e entre eles, há bairros onde predomina a habitação popular e favelas (Maré e Cidade de Deus) com densidades na faixa dos 300 habitante/hectare

(Izaga, 2014). Esta região abrangida pelo corredor é bastante diversa socioeconomicamente, o que influencia diretamente sua demanda diária e os padrões de mobilidade de seus usuários (Oliveira, et al., 2015).

> "O BRT-TransCarioca poderia ser compreendido em 4 grandes trechos. O primeiro que parte do Terminal Alvorada e vai até o entroncamento com a Estrada dos Bandeirantes; o segundo, segue em direção leste sobre a Estrada dos Bandeirantes, incluindo a Av. Nelson Cardoso até o Largo do Tanque; um terceiro sobre os principais corredores viários da AP3, entre eles, Rua Candido Benício, Rua Min. Edgard Romero, Av. Monsenhor Félix, Av. Brás de Pina, Rua Ibiapina, Av. Teixeira de Castro até alcançar a Av. Brasil; e o quarto da Av. Brasil até o Aeroporto Santos Dumont. O primeiro trecho tem paisagem produto da mistura de condomínios e centros comerciais característicos da urbanização da Barra da Tijuca, com torres de edifícios e grandes volumes cercados por estacionamentos. O segundo e o terceiro trechos possuem uma paisagem urbana marcada por edificações em baixa altura, com uma mistura de usos habitacionais, comerciais e de serviços, com algumas sedes de industrias, sobretudo no segundo trecho. O quarto trecho, é o das grandes infraestruturas viárias, ao que se somam novas pontes e viadutos do próprio BRT-TranCarioca, que se superpõem às já existentes" (Izaga, 2014).

O projeto inicial deste corredor, então chamado T5, previa 28 km de extensão, do Terminal Alvorada na Barra da Tijuca ao bairro da Penha (Calderón, et al., 2009). Posteriormente houve a expansão do projeto, passando a chamar-se TransCarioca (Lima, 2013). Segundo dados da Secretaria Municipal de Obras[11], a infraestrutura conta com 39 km de extensão, 10 viadutos, 9 pontes, 3 mergulhões, 47 estações, 5 terminais (Alvorada, Taquara, Tanque, Madureira e Fundão) e foi orçada em R$ 1,7 bilhão a ser compartilhado entre Governo Federal e a Prefeitura. O trajeto está ilustrado na Figura 33.

[11] Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/smo/exibeconteudo?id=1030921> Acesso em: Janeiro 2017

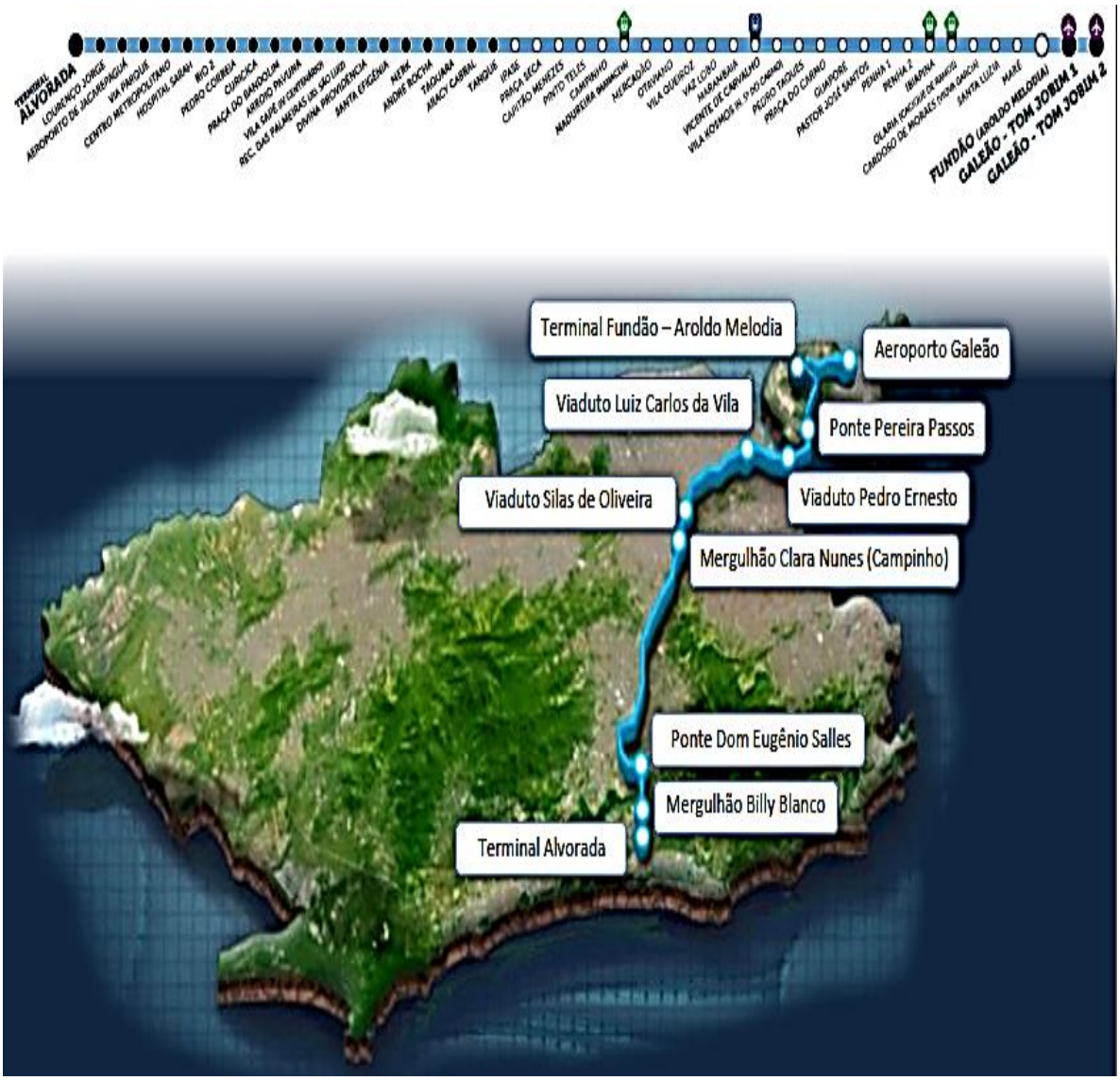


Figura 33 – Trajeto do BRT TransCarioca.

Fonte: Portal de Notícias G1 (2014)[12]

O corredor faz integração com a Estação de Metrô Vicente de Carvalho, com as estações de trem Madureira e Olaria, com o BRT TransOeste no Terminal Alvorada e com o BRT TransBrasil no Terminal Fundão. Assim, o sistema visa reduzir em mais de 60% o tempo gasto no trajeto entre a Barra da Tijuca e o Aeroporto Tom Jobim, conforme ilustra a Figura 34 (Cabral, 2013). Para isso, opera com um *headway* mínimo de 10 minutos, a

[12] Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-Janeiro/noticia/2014/05/transcarioca-tera-brt-entre-galeao-e-barra-antes-da-copa-do-mundo.html> Acesso em: Janeiro de 2017

velocidade média atual é de 30 km/h nos serviços expressos e de 25 km/h nos paradores (Oliveira, et al., 2015).

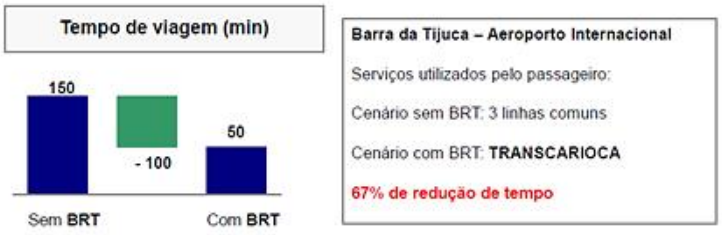


Figura 34 – Redução no Tempo de Viagem com o BRT TrasCarioca.

Fonte: Cabral (2013).

Desde sua inauguração, o BRT TransCarioca vem experimentando um crescimento de demanda a uma taxa média de 8% ao dia, atingindo em dezembro de 2014, 200 mil passageiros/dia (Figura 35), valor que se mantém até os dias atuais (SIPLAN, 2015; Izaga, 2014; ITDP, 2015; Oliveira, et al., 2015). E este fluxo ainda está abaixo do projetado inicialmente para transportar, de até 320 mil passageiros por dia (Izaga, 2014; SMO, 2011; ITDP, 2015). Porém, é provável que a demanda diária continue aumentando, tendo em vista que algumas linhas alimentadoras complementares ainda devem entrar em operação e que novos articulados devem ser incorporados à frota do corredor. Sendo assim, há previsões de que o atendimento supere os 500 mil passageiros/dia (SIPLAN, 2015; Cabral, 2013; Lima, 2013).

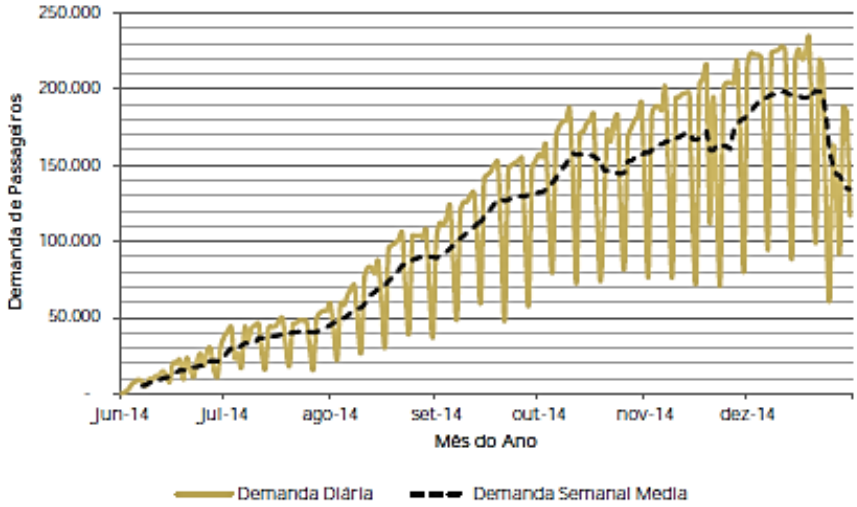


Figura 35 – Demanda Diária e Média Semanal do BRT TransCarioca.

Fonte: ITDP (2015).

A frota operante para atender essa demanda é de 148 ônibus articulados (Oliveira, et al., 2015). E para otimização das rotas dos serviços de ônibus convencionais da cidade, houve alteração de diversas linhas nas proximidades do corredor:

> Foram 12 linhas eliminadas por seus trajetos corresponderem ao trajeto do BRT; 47 linhas seccionadas, dando lugar a uma ou duas linhas alimentadoras e somando, ao todo, 52 linhas alimentadoras; 6 linhas convencionais criadas para completar a alimentação do BRT TransCarioca (ITDP, 2015).

Ressaltando a capacidade de integração entre os corredores, estudos do primeiro trimestre de 2015 mostram que a demanda diária transportada pelo BRT TransOeste cresceu mais de 27% depois da entrada em operação do corredor TransCarioca, sendo atualmente transportados cerca de 535 mil passageiros na rede integrada de BRT (Leite, et al., 2015).

4.2.3 BRT TransOlímpica

Também cortando a cidade no sentido transversal e com o intuito de intensificar a operação do sistema pela integração dos corredores, surge o Corredor BRT TransOlímpica. Este nome foi dado em função deste corredor ter sido projetado para ser uma importante conexão entre a região da Barra da Tijuca e o bairro de Deodoro, duas áreas da zona Oeste que abrigaram grande número dos complexos esportivos utilizados nos Jogos Olímpicos Rio 2016.

Com 26 km de extensão, o BRT TransOlímpica percorre ao longo de toda a via expressa denominada oficialmente Corredor Presidente Tancredo Neves. Esta via foi construída em conjunto com o corredor BRT como parte do projeto de Legado Olímpico e atravessa oito bairros da Zona Oeste, como Barra da Tijuca, Curicica e Magalhães Bastos.

A redução no tempo de viagem é estimada em 60%, beneficiando 70 mil passageiros por dia e comportando 55 mil veículos por dia. Ao todo, a TransOlímpica conta com 18 estações e três terminais, representando investimento total de R$ 2,2 bilhões[13]. O projeto

[13] Informação disponível em: <http://www.apo.gov.br/index.php/transolimpica-tem-60-dos-obras-executadas-informa-prefeitura/> Acesso em: Janeiro de 2017

incluiu a duplicação da Avenida Salvador Allende, bem como a abertura de novos caminhos pelo Maciço da Pedra Branca, através da construção de um túnel com quatro emboques.

O contrato original previa a conclusão das obras até 26 de abril de 2016, porém durante os Jogos Olímpicos o corredor funcionou apenas parcialmente com três estações, atendendo exclusivamente os atletas, colaboradores e público das competições[14]. Somente em 23 de Agosto, o corredor foi aberto para o público em geral[15].

4.2.4 BRT TransBrasil

Por fim, e ainda em construção, o último dos corredores BRTs do Rio de Janeiro, o corredor BRT TransBrasil, que ligará o Aeroporto Santos Dumont ao bairro de Deodoro e será também uma importante conexão entre a Baixada Fluminense e o centro do Rio de Janeiro. Trata-se de um corredor expresso de ônibus articulados ao longo da Avenida Brasil, desde Deodoro até o Centro da cidade, passando também pelas avenidas Presidente Vargas e Francisco Bicalho.

Este corredor terá 32 km de extensão, com quatro terminais, 28 estações, 15 passarelas e fará integração com metrô, trem e os corredores TransCarioca e TransOlímpico (NTU, 2012). Além disso, o corredor estará conectado a rodovias federais de elevadíssima demanda, como as BR-116 (Rio-São Paulo) e BR-040 (Rio-Juiz de Fora). Sendo assim, dos quatro corredores, este será o de maior demanda, com previsão de 900 mil passageiros por dia e será provavelmente um dos sistemas BRTs com maior demanda de passageiros dentre todos já projetados e implantados no mundo (Lima, 2013).

A previsão anterior de conclusão das obras da Transbrasil era para 2017 e o projeto estava com 50% concluído em Agosto de 2016[16]. No entanto, as obras que estavam paradas somente foram retomadas no dia 10 de Abril de 2017, com isso o novo prazo para conclusão

[14] Informações extraídas de notícia do Jornal O Globo online, de 16 de junho de 2016. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/transolimpica-sera-inaugurada-mas-tera-so-tres-estacoes-durante-jogos-19312040> Acesso em: Janeiro de 2017

[15] Informação obtida através do Portal de Notícias Online G1, publicada em 23 de agosto de 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-Janeiro/noticia/2016/08/brt-transolimpica-e-trecho-do-brt-transoeste-e-aberto-para-populacao.html> Acesso em: Janeiro de 2017

[16] Informação obtida através do Portal de Notícias Online G1, publicada em 24 de agosto de 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-Janeiro/noticia/2016/08/apos-jogos-rio-retoma-etapas-de-3-obras-de-mobilidade-veja-andamento.html> Acesso em: Janeiro de 2017

das obras termina em junho de 2018[17]. O investimento tem apoio do Governo Federal e está orçado em R$1,5 bilhões (Cabral, 2013). Unindo-se com a TransCarioca, TransOeste e TransOlímpica, a Transbrasil vem fechar o anel viário de mais de 150 quilômetros de corredores BRTs propostos para a cidade.

4.3 PROPOSTA DE INSERÇÃO DE AUTOPRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTE RENOVÁVEL

Um dos focos desta dissertação é avaliar benefícios que não são quantificados em simples análises de custos dos sistemas de transportes. Nesse sentido, como parte do exercício proposto para este estudo, procura-se analisar o potencial para inserção de fontes alternativas de geração de energia nesses sistemas de média capacidade.

O fato de operarem em corredores segregados garante certa previsibilidade ao sistema, que favorece a aplicação deste tipo de fontes. Afinal, esta previsibilidade operacional facilita o planejamento integrado do funcionamento do sistema com os momentos de geração dessas fontes. Por isso, a proposta deste estudo é analisar o papel que os sistemas rigidamente guiados podem assumir para promover uma maior inserção de fontes renováveis.

Além da questão da maior previsibilidade que estes sistemas proporcionam para a operação, outro fato que favorece a implantação das fontes renováveis é a possibilidade de se explorar o uso direto de energia autoproduzida. O conceito associado a questão de uso direto da energia autoproduzida confunde-se com a definição de medidas de eficiência energética, visto que faz reduzir o consumo de energia proveniente da rede elétrica. No entanto, não há uma redução no consumo total de energia, pois a energia que estava sendo consumida da rede, agora passa a ser autoproduzida no sistema.

Como tais serviços de transporte possuem um elevadíssimo e contínuo consumo energético, as tecnologias de autoprodução de energia podem ser dimensionadas com grandes potências de projeto que, ainda assim, a geração de energia estaria exclusivamente atendendo ao uso especificado para ela. Este consumo contínuo permite, ainda, que a energia gerada

[17] Informações extraídas de notícia do Jornal O Globo online, de 10 de abril de 2017. Disponível em: < http://oglobo.globo.com/rio/crivella-oficializa-retomada-de-obras-do-brt-transbrasil-21187206 > Acesso em: Abril de 2017

seja prontamente utilizada para o serviço de tração dos veículos. Assim, reduz-se perdas técnicas que ocorrem no processo, pois a geração está próxima ao consumo, e maximiza-se o aproveitamento da energia de fonte alternativa, favorecendo ainda mais sua aplicação.

Está característica de geração próxima aos pontos de consumo, define o conceito de geração distribuída (Rodrigues, 2002). A implantação de geração distribuída visa lidar com as preocupações do setor elétrico quanto ao aumento da demanda elétrica e a possível necessidade de aumento da capacidade de geração (Gilbert, et al., 2007). Integrar este tipo de geração com propostas de eletrificação do transporte torna-se bastante interessante e pode ser uma forma de fomentar seu crescimento no Brasil.

O presente estudo trata-se, portanto, de um sistema de geração distribuída com baixa interação com a rede, pois, mesmo em momento de máxima geração de energia, dificilmente haveria excesso de energia. O que se mostra adequado para o caso brasileiro, no qual a exportação de energia para rede não representa ganhos financeiros ao gerador, conforme as condições estabelecidas na Normativa nº482/12 da ANEEL para sistemas de geração distribuída, atualizada em 2015, para Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015). Dessa forma, a interação com a rede se dá apenas nos momentos em que o recurso energético local não for suficiente para gerar a quantidade de energia demandada pelo sistema.

Neste momento, é importante debater-se a questão da variabilidade das fontes renováveis, que exigiriam um grande esforço da rede elétrica local para compensar situações repentinas de queda na autoprodução do sistema. No entanto, vale lembrar que os veículos VLT propostos possuem pequenos sistemas de armazenamento de energia (em geral, por supercapacitores) para garantir a operação dos mesmos em curtas distâncias, caso seja interrompido o fornecimento de eletricidade no sistema. Com esta característica, minimizam-se os impactos que a intermitência e a variabilidade dessas fontes possam causar na rede pública de distribuição.

Sendo assim, adicionalmente a análise de eletrificação do transporte no corredor, o presente trabalho propõe ainda um cenário com a implementação de painéis fotovoltaicos para autoprodução de energia elétrica no sistema, e assim, reduzir a demanda de eletricidade da rede convencional. Para este cenário de eletrificação do transporte alimentado pela rede elétrica mais o conjunto fotovoltaico, serão avaliados dois subcenários considerando duas formas de dimensionamento do arranjo fotovoltaico, a serem tratadas adiante nesta seção.

Com isso, busca-se abranger uma oportunidade vislumbrada para o sistema, de se tornar referência em sustentabilidade e ser um empreendimento capaz de evitar ainda mais emissões.

A qualidade ambiental da geração fotovoltaica tem atraído o interesse da sociedade, promovendo um enorme crescimento na quantidade de instalações ao redor do mundo nos últimos anos, principalmente aplicadas para a geração distribuída (EPE, 2014). Inclusive, para sistemas BRT, já existem projetos de implantação de painéis fotovoltaicos sobre as estações de passageiros a nível nacional, como no Rio de Janeiro[18] e em Belo Horizonte (Biague, 2011). Porém, tais projetos objetivam utilizar a energia gerada apenas para atender o consumo de eletricidade das estações, o que mantem a originalidade do presente estudo, que busca avaliar o uso direto da energia para mover os veículos do sistema.

Em comum com os projetos mencionados, está a ideia de aproveitar a característica de modularidade dos painéis fotovoltaicos, que permite que os mesmos sejam instalados no telhado das estações e nos terminais de passageiros do corredor. Assim, sua conexão direta com o sistema se dá ao longo do trecho de percurso, favorecendo a energia ser consumida instantaneamente ao momento em que é gerada, pois os veículos estarão espalhados pela extensão do corredor.

O gerador fotovoltaico é formado por módulos que captam a energia provinda da incidência de raio solares e a convertem em energia elétrica na forma de corrente contínua (Silva, 2015). Assim sendo, a disponibilidade de recurso solar no local do projeto é um fator preponderante para viabilizar a implementação deste tipo de geração.

Um breve reconhecimento do local já permite observar o potencial de incidência de radiação solar no percurso. No corredor BRT TransOeste, as 62 estações de passageiros possuem excelente área livre de telhado para inserção dos painéis, e estão distribuídas em largas avenidas com trajeto predominantemente na direção Leste-Oeste, o que garante um bom aproveitamento das horas de Sol ao longo de um dia e são dificilmente afetadas por sombreamento de edifícios.

[18] Sistema instalado na estação Bosque da Barra, do Corredor TransOeste, para atender a iluminação, catracas e portas automáticas da estação. Disponível em**:** <http://www.brtrio.com/noticia/brt-rio-realiza-testes-com-energia-solar-na-estacao-bosque-da-barra> Acesso em: Janeiro de 2017

Levando em consideração estas informações do recurso disponível e dado o elevado e constante consumo de energia elétrica que o sistema elétrico iria requerer, surge a hipótese de que estas características poderiam viabilizar a implantação dos painéis fotovoltaicos conectados à rede. Dessa forma, o sistema continuaria tendo a confiabilidade de fornecimento da rede elétrica, mas não necessitaria consumir tanta energia da mesma. Além disso, o aproveitamento da geração solar seria máximo, dado que praticamente todo o tempo de geração estaria havendo consumo dessa energia, e o fato do pico de geração solar não acompanhar o pico de consumo do sistema, não se torna um impeditivo.

Além do que, o excedente de energia pode ser exportado para a rede elétrica que atende a região, pois embora as concessionárias não sejam obrigadas a pagar um valor monetário pela energia excedente de geradores distribuídos, a regulamentação estabelece que serão gerados créditos de energia para que possam ser utilizados nos meses subsequentes pelos consumidores/geradores distribuídos. A compensação é realizada a partir da energia ativa injetada pelo micro ou minigerador, a qual gera créditos de energia equivalentes para serem consumidos em um período de até 36 meses. Além disso, de acordo com o art. 2º, é possível que o crédito gerado seja utilizado por outra unidade consumidora, desde que esta esteja relacionada ao mesmo CPF (Cadastro de pessoa Física) ou CNPJ (Cadastro de Pessoa Jurídica) da unidade consumidora responsável pela geração dos créditos (ANEEL, 2012).

Com relação ao dimensionamento do sistema, o primeiro subcenário levou em consideração a área disponível nas estações e nos terminais para instalação dos painéis. Para as estações foram verificados padrões construtivos na literatura, que puderam ser usados, por simplificação, como referência para definir a área de telhado de cada. Adotado, portanto, o padrão apontado por Lima (2013), em que as estações são constituídas por uma plataforma central de 5m de largura e 48,00m de comprimento (240m²), possibilitando o embarque e desembarque simultâneo de dois ônibus articulados por sentido. A Figura 36 ilustra um exemplo de estação típica do BRT TransOeste. Já para os terminais, por serem apenas quatro, o método para determinação da área disponível foi por medição das dimensões através de imagens de satélites do software Google Earth (Figura 37). O resultado das medições é apresentado na Tabela 12.

Figura 36 – Estação Típica no BRT TransOeste.

Fonte: Lima (2013).

Figura 37 – Imagens de Satélite dos Terminais Existentes no BRT TransOeste.

Fonte: Obtidas através do software Google Earth

Tabela 12 – Área das Estações e Terminais

Nº de Estações	Área (m²)					
	Alvorada	Campo Grande	Santa Cruz	Jardim Oceanico	Estações	Total
62	16500	7500	1500	900	14880	41280

Fonte: Elaboração própria

O custo do módulo fotovoltaico é função da sua potência, e não da sua área. Portanto, a partir de uma relação de potência instalada por metro quadrado, é dimensionada a potência total do sistema fotovoltaico proposto. Supondo a instalação de módulos de Silício Monocristalino (junto com os módulos de Silício Policristalino, representam 85% do mercado e são consideradas tecnologias consolidadas, confiáveis e de melhor eficiência comercialmente disponível), tem-se que a área ocupada por estes módulos é 1m² para cada 150Wp de potência (CRESESB, 2014). Sendo assim, bastou multiplicar este valor pelas áreas definidas para encontrar a potência que pode ser instalada.

Ampliando a abrangência do estudo, outro cenário com uso de geração fotovoltaica foi imaginado para o sistema, podendo ser entendido como um segundo subcenário do cenário de implantação de painéis fotovoltaicos. Neste segundo subcenário, a área para instalação dos painéis não é limitada e o arranjo fotovoltaico é dimensionado com potência capaz de atender a demanda diária de energia. O objetivo é avaliar o comportamento do sistema fotovoltaico em um dimensionamento que maximize a geração solar de acordo com o consumo. A potência de um sistema fotovoltaico com essa capacidade é dada pela equação 1 (CRESESB, 2014).

$$P = \frac{E}{HSPm.TD} \tag{1}$$

Sendo:

- P = potência nominal do sistema fotovoltaico (Wp)
- E = consumo diário médio anual (Wh/dia)
- HSPm = Valor médio anual de Horas de Sol Pleno incidente sobre a superfície dos painéis (h)
- TD = taxa de desempenho ou rendimento global do sistema (adimensional)

Com isso, o estudo de caso para o BRT TransOeste, analisa não só, o cenário de referência e o cenário de eletrificação, como também, dois cenários de eletrificação com implementação de autoprodução de energia através de geração fotovoltaica. Os resultados desta análise completa, considerando os quatro cenários, bem como o detalhamento das discussões para cada caso, serão apresentados na próxima seção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para o estudo de caso pela aplicação da metodologia descrita. Os aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos em cada alternativa proposta para o sistema são avaliados e discutidos tanto em um âmbito especifico para o estudo de caso do BRT TransOeste, como em um âmbito geral do planejamento de transportes. Assim, além de avaliar as melhores soluções para o corredor selecionado, o trabalho expande a análise dos resultados para definir critérios que auxiliem no planejamento de transportes como um todo. Para isso, é fundamental ter clareza na compreensão das especificidades do projeto e de como afetam aos resultados.

A descrição do estudo de caso, abordada no capítulo 4 deste documento, serve de fonte para os dados iniciais a serem inseridos nos modelos computacionais apresentados na metodologia. Tais modelos são úteis para conjecturar o comportamento do sistema quando submetido a diferentes condições e avaliar a sensibilidade dos resultados para cada parâmetro. O estudo de caso apresenta quatro cenários possíveis para o sistema em análise, visando comparar os impactos de cada alternativa de projeto e avaliar se os resultados atendem as necessidades da sociedade.

O Corredor TransOeste já possui um sistema de BRT implementado. Sendo assim, o primeiro cenário considera o sistema BRT a diesel, portanto, trata-se do cenário de referência. Trabalhar com os dados do sistema BRT TransOeste possibilitou modelar o contexto local do projeto, para assim, embasar a discussão quanto às alternativas propostas. De acordo com os dados reais de operação deste sistema, foram definidos os parâmetros característicos do projeto, que serviram de base para todos os cenários.

Na construção do segundo cenário, foram mantidos os mesmos parâmetros de operação do projeto para garantir isonomia na comparação das alternativas. Assim, a modificação está, apenas, na tecnologia de propulsão do sistema, que passa a considerar veículos elétricos do tipo VLT, ou seja, este cenário substitui o sistema BRT no Corredor TransOeste por um sistema VLT no mesmo corredor.

O terceiro e quarto cenários representam uma análise adicional ao segundo cenário, pois se baseiam nas mesmas características de performance do projeto eletrificado. Porém, estes cenários alteram as formas de alimentação de eletricidade no sistema para abordar a questão da inserção de fontes renováveis. Dessa forma, podem ser entendidos como dois

subcenários do cenário de eletrificação com inserção de fontes renováveis para autoprodução. Por dependerem da construção do segundo cenário, serão discutidos mais à frente neste capítulo.

5.1 AVALIAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS BRT E VLT PARA O ESTUDO DE CASO

Dado o alto custo com combustível que a frota a diesel exige, a troca por um sistema elétrico, como uma opção mais barata no longo prazo, merece ser avaliada. Além do que, a troca tende a proporcionar um serviço de maior qualidade, melhor desempenho e menos poluente para o meio ambiente. Para esta análise completa dos sistemas, o trabalho busca, ainda, quantificar as emissões associadas à operação de cada alternativa.

Assim, a primeira parte do estudo fica definida como a comparação entre as alternativas de transporte, através da avaliação dos dois primeiros cenários. Esta fase é realizada no modelo computacional desenvolvido pelo estudo "*A Transit Technology Selection Model*", de Casello *et al*. (2014). Nesta ferramenta, os dados de entrada para caracterizar o projeto são inseridos em três categorias: 1-Variáveis de Demanda, 2-Parâmetros do Sistema, e 3-Parâmetros de Custo, conforme indica a Figura 38.

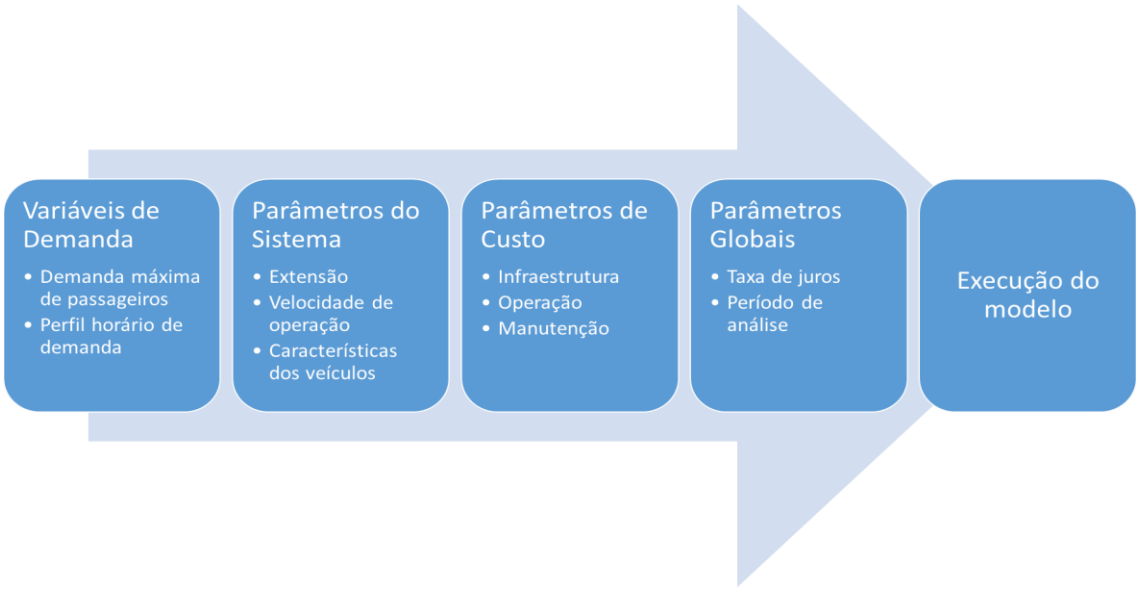


Figura 38 – Estrutura do modelo.

Fonte: Elaboração própria.

O primeiro passo para construção do cenário é definir a demanda a ser atendida, que deverá ser a mesma para todos os cenários. Portanto, os inputs do modelo nesta primeira categoria serão os mesmos e são apresentados na Tabela 13. Como os fluxos de demanda variam ao longo do dia, a forma do modelo captar estas variações é definindo três períodos de análise para os dias úteis e dois períodos para os fins de semana, conforme descrito na metodologia.

Tabela 13 – Dados de entrada para definir as variáveis de demanda.

Demand Variables	LRT	BRT
Max Demand - Peak Period (pass/hr)	**15000**	**15000**
Demand - Non-Peak Period (% of Peak)	**50%**	**50%**
Demand - Late Evening (% of Peak)	**10%**	**10%**
Duration of AM Peak Period (hrs)	**3**	**3**
Duration of PM Peak Period (hrs)	**3**	**3**
Duration of Non-Peak Demand (hrs)	**13**	**13**
Duration of Late Evening (hrs)	**5**	**5**
Duration of Weekend Daytime (hrs)	**16**	**16**
Duration of Weekend Morn/Eve (hrs)	**8**	**8**

Fonte: Elaboração própria.

A carga de embarques em cada hora é estabelecida como percentuais em relação a Demanda Horária Máxima de Passageiros ($P_{máx}$) estabelecida para as horas do período de pico. Sendo este, portanto, o parâmetro de partida do modelo. A definição deste valor, com base nos valores reais de operação do BRT TransOeste, obtidos junto à Secretaria Municipal de Transportes (SMTR), estabeleceu a quantidade de 15 mil passageiros por hora como sendo o valor representativo para cada hora do período de pico.

Este valor foi determinado a partir da análise dos dados disponibilizados pela SMTR, referentes à quantidade de embarques de passageiros por hora para cada dia, com base no ano de 2015. Para estes dados, os maiores valores verificados em dias normais podem superar a 20 mil passageiros em determinadas horas de pico. No entanto, realizando uma análise estatística para os valores das horas de pico dos dias úteis, encontra-se um valor médio entre 14mil e 15mil passageiros.

Realizando o mesmo procedimento de análise para determinar as cargas de passageiros representativas dos períodos fora do pico e noturno, bem como, dos períodos de fins de semana, permite-se estabelecer demandas entorno de 50% e 10% de $P_{máx}$, como representativas dos períodos de atendimento intermediário e de menor atendimento do sistema.

Para cada período, o modelo permite definir qual a sua duração em horas. Assim, também com base na análise dos dados de embarque fornecidos pela SMTR, foi possível identificar o comportamento médio a cada hora no sistema e estabelecer a duração dos períodos. Os horários de pico ficaram definidos como: de 5h às 8h (3 horas de duração) e de 16h às 19h (3 horas de duração). Os períodos noturnos, dos dias úteis e dos fins de semana, foram estabelecidos, respectivamente, como: de 23h às 4h (5 horas de duração) e de 21h às 5h (8 horas de duração). Para os períodos de demanda intermediária, ficaram sendo: de 4h às 5h, de 8h às 16h e de 19h às 23h, total de 13 horas de duração nos dias úteis, e de 5h às 21h, total de 16 horas de duração nos fins de semana.

O passo seguinte à definição do perfil de demanda é a inserção dos dados referentes aos parâmetros do sistema, apresentados na Tabela 14. Apesar das características do projeto, como extensão e número de estações, serem as mesmas para ambas as alternativas, nem todos os dados inseridos nesta etapa serão iguais, como ocorreu na etapa anterior. Alguns parâmetros dependem de certas particularidades atrelada às características do tipo de tecnologia empregada.

Tabela 14 – Dados de entrada para definir os parâmetros do sistema

System Parameters	LRT	BRT
System Length (km)	**60**	**60**
Operating Speed (km/h)	**35**	**35**
Terminal Time (min)	**10**	**10**
Vehicle Capacity (sps /veh)	**400**	**145**
Capacity Utilization (pass/sps)	**0.85**	**0.85**
Vehicle Spare Ratio (%)	**15%**	**15%**
Number of Stations	**62**	**62**
Vehicle Service Life (years)	**30**	**10**
Coupling Threshold (min)	**1**	**-**

Fonte: Elaboração própria

Primeiro, são definidos os parâmetros comuns a ambas tecnologias, o Corredor TransOeste conta com uma infraestrutura de 60 km de extensão, 62 estações e 4 terminais. Dado que ambos os sistemas devem ser projetados para a mesma capacidade de atendimento, a velocidade operacional ofertada pelo sistema deve ser a mesma. Não há nenhuma limitação técnica que impeça qualquer uma das duas de operar na velocidade estabelecida pelo sistema e abordada na Seção 4.2 do capítulo de Estudo de Caso. Sendo adotada a velocidade do serviço parador (35 km/h) como base para o estudo.

Com relação ao tempo de percurso, além do tempo para percorrer os 60 km de extensão, deve-se incluir o tempo gasto pelos veículos nos terminais antes de iniciarem a próxima viagem. Assim como a velocidade de operação, também não há nenhuma limitação para que o tempo no terminal considerado seja o mesmo para ambas alternativas. Casello *et al*. (2014) adota o tempo de 5 min, porém para o presente estudo optou-se por utilizar o tempo de 10 min, visando ser mais conservador com relação a este fator.

Para finalizar os parâmetros do sistema, faltam os parâmetros relativos as características dos veículos de cada alternativa. Nestes, as particularidades de cada tecnologia são destacadas e devem ser inseridas com imparcialidade para não favorecer alguma das opções no resultado final. A questão da capacidade de lotação dos veículos, por exemplo, é bastante sensível e podem ser encontradas referências com diferenças significativas, conforme já citado.

O fato dos corredores BRTs, normalmente, operarem com ônibus de diferentes dimensões, já insere incerteza ao fixar um valor exato de passageiros por veículo. Os ônibus de diferentes modelos, incluindo comuns, articulados e biarticulados, podem carregar no total de 80 a 220 passageiros por unidade (CEDES, 2015). O valor adotado neste trabalho é o mesmo de Oliveira et al. (2013), 145 passageiros por veículo.

Para o VLT, o Estudo Preliminar de Implementação do VLT no Rio de Janeiro (CCR, 2012) adota no projeto um veículo com largura de 2,40 metros e capacidade de 400 passageiros/unidade (valor a ser adotado para o presente estudo). Este valor é condizente com outras referências como Pratelli (2014) e Vuchic (2007). No entanto, é possível encontrar autores que indicam valores maiores, como em Alouche (2014), e trabalhos que adotam valores menores, como em Casello *et al*. (2014) e Fundo Verde (2014).

Idealmente, os veículos não devem trabalhar no seu limite da capacidade, tanto por questões de conforto dos passageiros como por evitar desgastes na operação. Assim, o modelo compreende que deve haver um percentual limite para definir a capacidade de ocupação do veículo a ser considerada no projeto. Portanto, assume-se que com 15% a menos do total de espaços ofertados, o projeto estaria garantindo o conforto para os passageiros e estaria adequado para lidar com a elevada demanda do local.

Além da capacidade em si dos veículos VLTs, o modelo permite ainda considerar o acoplamento de unidades em momentos que o sistema esteja sobrecarregado. Para isso, o preenchimento do parâmetro de limiar de acoplamento deve considerar o tempo, em minutos, ao qual o *headway* do sistema se torna tão pequeno que seria mais interessante utilizar unidades de veículos acopladas. Considerou-se como critério para justificar o uso de veículos acoplados, tempos entre as composições iguais ou menores que 1 minuto.

A partir dos dados inseridos até o momento, o modelo calcula o tamanho da frota de veículos adequado para atender a demanda do sistema. Entretanto, este valor deve considerar ainda uma quantidade de veículos extra para estar à disposição em caso de eventualidades. Esta quantidade de reserva representa de 10 a 20% da quantidade máxima de veículos circulando no horário de maior frequência, sendo este o padrão encontrado nos sistemas brasileiros (Casello, et al., 2014; NTU, 2012). Portanto, o presente estudo adotou o valor de 15% para ambas as alternativas. Quanto ao tempo de vida útil dessa frota, foram adotados os mesmos valores de Casello *et al*. (2014), 30 anos para o VLT e 10 anos para o BRT.

Finalmente, o terceiro passo de caracterização do projeto trata-se dos parâmetros de custos, apresentados na Tabela 15, juntamente com os parâmetros globais. Realizar decisões adequadas em qualquer etapa do processo de desenvolvimento dos projetos de transportes exige informações confiáveis referentes aos custos de cada alternativa (Sinha, et al., 2007). Evidentemente que, para os custos, cada alternativa tem seus valores específicos, a começar pelo custo dos veículos.

Segundo Vuchic (2007), o custo de aquisição dos veículos depende de características particulares, tais como design do veículo, ar-condicionado, quantidade de assentos, tamanho, tecnologia de propulsão, entre outros elementos. O preço dos ônibus padrão diesel ficam na faixa de US$ 0,3 a 0,5 milhões (ITDP & SeMob, 2008; Vuchic, 2007; Sinha, et al., 2007), porém veículos maiores e mais modernos custariam cerca de US$ 1,4 milhões (Zhang, 2009;

Pratelli, 2014). O estudo de Casello *et al*. (2014) considera o valor de US$ 0,75 milhões, e trabalhos mais recentes, como em Moccia *et al*. (2015) utilizam o valor de US$ 0,62 milhões. Para os veículos VLT, a faixa de abrangência dos estudos é ainda maior, variando de US$ 2,3 milhões, em Zhang (2009), a US$ 4,5 milhões, em Casello *et al*. (2014). Para o presente estudo, optou-se por utilizar os valores apresentados em Moccia *et al*. (2015), em que pressupondo serem referentes ao início do ano de 2015 e incidindo a inflação acumulada até esta data, assumem os valores de US$ 0,65 milhões para o BRT e US$ 3,58 milhões para o VLT.

Tabela 15 – Dados de entrada para definir os parâmetro globais e de custos.

Cost Parameters	LRT	BRT
Vehicle Capital Cost ($/veh)	**$3,580,000**	**$650,000**
Infrastructure Construction Cost ($/km)	**$17,300,000**	**$6,300,000**
Station Construction Cost ($/sta)	**$800,000**	**$800,000**
Labour Cost ($/hr)	**$30.00**	**$15.00**
Labour Cost Growth Rate (%)	**7.50%**	**7.50%**
Energy Consumption (kWh or L / veh-km)	**5.00**	**1.00**
Energy Cost ($/kWh or L)	**$0.11**	**$1.00**
Energy Cost Growth Rate (%)	**6.90%**	**1.45%**
Vehicle Maintenance Cost ($/veh-km)	**$0.50**	**$0.30**
Infrastructure Maintenance Cost ($/km)	**$120,000.00**	**$50,000.00**
Maintenance Cost Growth Rate (%)	**5.00%**	**5.00%**
Global Parameters	**All**	
Interest Rate (%)	**7.0%**	
Study Period (yrs)	**30**	

Fonte: Elaboração própria

Em geral, todos os custos terão grande variabilidade de acordo com o grau de sofisticação admitido para o sistema (Zhang, 2009). Os custos de infraestrutura, por exemplo, são referentes aos gastos com obras civis para implantação do corredor e variam significativamente para cada região e projeto. Lerner (2009) indica custos variando entre US$ 30 e 50 milhões/km para o sistema VLT e entre US$ 5 e 12 milhões/km para o sistema BRT. No entanto, os custos apresentados por Lerner para o VLT estão acima do verificado em

trabalhos mais recentes como Moccia *et al*. (2015), Hodgson *et al*. (2013), CEDES (2015), Zhang (2009) e Motta (2013), demonstrando que a tecnologia tem ficado mais barata.

As obras dos corredores BRTs do Rio de Janeiro foram executadas pela prefeitura da cidade, através da Secretaria Municipal de Obras, sendo o Consórcio BRT, que opera o sistema, responsável apenas pela instalação dos sistemas e equipamentos. Os custos de implantação incluíram, também, obras de urbanização do entorno, túneis e obras de tráfego geral, sendo orçado um custo de R$ 7,5 bilhões para os 157 km dos 4 corredores projetados (Lourenço, 2015). Para o corredor TransOeste, o gasto estimado pela NTU (2012) era de R$ 770 milhões, porém após a conclusão de sua primeira fase em 2014, o custo era de cerca de R$ 900 milhões, segundo Lourenço (2015). Conclui-se, com estas informações, que é possível definir um valor de R$ 16,7 milhões/km para os gastos de implantação da infraestrutura do BRT TransOeste. Aplicando as taxas para converter o valor em dólar americano de janeiro de 2017, tem-se a quantia de US$ 5 milhões.

Para o custo de infraestrutura do sistema VLT, toma-se como base, o sistema implementado na zona portuária da cidade do Rio de Janeiro. Apesar de ser em uma região distinta do corredor TransOeste e possuir características de projetos diferentes, identificar o preço por quilômetro aplicado para cidade permite captar a formação do preço local para o sistema. Além disso, a tecnologia que se propõe para o sistema VLT no corredor TransOeste é similar a aplicada no VLT do Porto Maravilha.

As obras começaram em agosto de 2014, com um custo de investimento previsto de R$ 1,157 bilhão, viabilizados com recursos federais do PAC da Mobilidade e uma parceria público-privada (FETRANSPOR, 2016). Este valor previsto ficou muito próximo do valor informado pela empresa responsável pelo sistema de R$1,164 bilhão para realizar todo os investimentos contratados, incluindo via permanente, centro de operação e manutenção, subestações e todos os sistemas. Sendo assim, pode-se assumir um custo atual por quilômetro da infraestrutura de R$ 57,8 milhões, ou US$ 17,3 milhões/km (cotação: Janeiro de 2017)

A diferença significativa de custos de obra entre os sistemas VLT e BRT está na infraestrutura necessária para os trilhos e a energização dos veículos. Em relação ao custo de construção das estações esta diferença não é tão significativa, mas o custo das mesmas pode representar uma parcela significativas do custo total de capital do projeto (Sinha, et al., 2007). Casello *et al*. (2014) aponta valores, referentes ao ano de 2011, variando entre US$ 0,5 a 9

milhões e, em seu estudo, estima o custo de US$ 2,2 milhões/estação para o VLT. Já para o BRT, o autor alega não estarem disponíveis informações para estimar os valores, mas assume que custariam 30% do valor das estações do VLT.

No entanto, no caso do Rio de Janeiro, através de contato com as empresas responsáveis pelos sistemas, contataram-se custos próximos para as alternativas. Os dados informados a respeito das estações do Corredor TransCarioca estabelecem o custo de R$ 2,6 milhões para estações simples e R$ 4,5 milhões para estações duplas. Já para o sistema VLT, os dados informados revelam um valor menor para as estações do projeto, custando R$ 2,4 milhões cada e R$ 0,35 milhões para os pontos de parada. Estes dados contrariam a suposição de Casello *et al*. (2014) e demonstram que o custo das estações é função da sofisticação do projeto e podem assumir o mesmo valor independentemente para qual alternativa. Portanto, será assumido o mesmo valor de US$ 0,8 milhões/estação para ambos os sistemas.

Com isso, ficam definidos os custos de investimento em infraestrutura, construção das estações e aquisição de veículos abrangendo todas as variáveis do custo de capital do projeto, restando agora inserir os parâmetros relativos aos custos operacionais. O modelo divide os custos de operação em três categorias: mão-de-obra, energia e manutenção. Nestas categorias estão incluídos os custos com combustível, salário dos operadores, manutenção da via e dos veículos, custos administrativos, impostos, entre outros do empreendimento.

Vuchic (2007) relata que, nos países industrializados, principalmente devido à mão-de-obra mais cara, estes custos tendem a ser maiores e representavam US$ 80 a 120 por veículo-hora, em 2005. Tendo em conta o transporte público por ônibus, por exemplo, a mão-de-obra representa cerca de 41% dos custos operacionais do setor (NTU, 2016). Para quantificar estes valores, referentes aos sistemas BRT ou VLT, devem ser vistos não só os salários, como também, os encargos sociais atrelados as atividades.

Casello *et al*. (2014) utiliza o mesmo valor, US$ 40/hora, para o custo unitário de trabalho em ambos os sistemas, entretanto Moccia *et al*. (2015) estima o custo operacional relacionado a equipe de trabalho em US$ 42/hora para o sistema BRT e US$ 73/hora para o sistema VLT, uma diferença quase 75% maior. A nível nacional, o Plano de Mobilidade da Cidade de Florianópolis, ao realizar análises das alternativas entre alternativas de transporte, utiliza os valores que corresponderiam, atualmente, a US$ 30/hora para o VLT e a US$ 15/hora para o BRT (Governo de Santa Catarina, 2015).

Em relação ao consumo de energia para cada alternativa tecnológica, os custos são uma função da eficiência energética para percorrer uma distância com os veículos a cada hora. A Tabela 16 apresenta exemplos de consumo médio de energia dos transportes urbanos de passageiros, a partir de uma amostragem global de cidades elaborada por Marins (2010). Os valores em função dos veículo-quilômetro foram adotados de acordo com Sinha & Labi (2007), sendo o VLT com 5,0 kWh/vkm e o BRT com 1,0 litro de diesel/vkm.

Tabela 16 – Consumo de energia nos transportes urbanos de passageiros

Modo de Transporte	MJ / pkm	Ocupação Média
Automóvel	**2,91**	**1,52**
Ônibus	**1,56**	**13,83**
Trem elétrico	**0,44**	**30,96**
Trem a diesel	**1,44**	**27,97**
VLT	**0,79**	**29,73**

Fonte: Marins (2010).

Para cada unidade de energia consumida, há um custo associado que deve ser inserido nos dados de entrada do modelo. O combustível utilizado no sistema BRT TransOeste da cidade do Rio de Janeiro é o Diesel S10 (10 ppm de teor de enxofre). Segundo dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis)[19], o litro deste combustível custa entorno de R$ 3,00 (US$ 0,9 em janeiro de 2017), no Estado do Rio de Janeiro.

A respeito da energia que alimentaria o VLT, buscou-se informações da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e da concessionária de energia elétrica local, Light, para entender as normas de conexão à rede. O alto consumo do sistema permite que o empreendimento possa adquirir sua energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL), porém para fins de simplificação de cálculo, assume-se como premissa que a energia contratada terá o valor de R$ 386,17/MWh (US$ 0,11/kWh). Este valor é fornecido para serviços públicos de tração elétrica na região Sudeste pelo banco de dados de Tarifa Média por Classe de Consumo e por Região, elaborado pela ANEEL[20].

Quanto aos custos de manutenção, são considerados: uma componente referente à manutenção dos veículos ($/vkm) e outra relacionada à manutenção da infraestrutura ($/km).

[19] Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/> Acesso em: Janeiro de 2017
[20] Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550> Acesso em: Janeiro de 2017

No BRT Rio, a manutenção das vias é responsabilidade da Prefeitura, por meio da Secretaria Municipal de Conservação, enquanto que a manutenção dos veículos, estações e terminais é dever do Consórcio BRT e das empresas operadoras. Por esse motivo, é difícil separar os custos e ter uma análise consolidada dos gastos reais para o sistema BRT TransOeste. Tomando o VLT do Porto Maravilha do Rio de Janeiro como referência para identificar os custos de manutenção desta alternativa, através do contato com a empresa responsável, obteve-se o valor R$ 11,7 milhões de gasto anual com serviços de manutenção, referente aos anos de operação plena do sistema.

Dada a dificuldade de separar os custos de operação dos sistemas, optou-se por utilizar fontes bibliográficas para a especificação destes custos. No estudo de Casello *et al*. (2014), são utilizados os valores de US$ 0,12 milhões e US$ 0,05 milhões para os custos de manutenção por quilometro de infraestrutura dos sistemas VLT e BRT, respectivamente. Segundo o autor estes custos foram obtidos pela média de dados analisados em alguns sistemas dos EUA, durante 3 anos.

Os custos manutenção dos veículos são incorridos na reparação, substituição ou reposição de peças com defeito ou desgastadas pelo intenso uso. Alguns dos fatores que influenciam a reparação e a manutenção dos veículos são as condições de pavimento, curvatura, velocidade de operação e aceleração (Sinha, et al., 2007). Casello *et al*. (2014) indica valores por veículo-quilometro nas faixas de US$ 0,4 a 0,6 para o VLT e US$ 0,1 a 0,5 para o BRT. Com base nesta informação, o presente estudo adotou o valor de US$ 0,5/vkm, referente ao VLT, e US$ 0,3/vkm, referente ao BRT.

Durante o período de análise de 30 anos (considerado como tempo médio dos contratos no setor de transportes público), os custos apresentados sofrerão alterações que precisam ser medidas pelo fluxo de caixa do modelo. Nesse sentido, os custos operacionais que incorrem no projeto ao longo de sua vida útil são ajustados a cada ano por taxas de crescimento especificas informadas pelo projetista.

A taxa de crescimento dos custos laborais tem como base de referência os aumentos nos salários-mínimos nacionais. O ano de 2017 iniciou-se com o reajuste do salário-mínimo para R$ 937,00, o correspondente a um aumento de 7,5%[21]. Os reajustes de salário buscam

[21] Disponível em: <http://salariominimo2017.net.br/> Acesso em: Janeiro de 2017

compensar as perdas do trabalhador com a inflação, que costuma ser a base de cálculo do mínimo nacional.

Também com base na inflação, foi calculada a taxa de crescimento dos custos de manutenção. O ano de 2016 fechou com uma taxa de inflação entorno de 6,5% e as projeções do Banco Central admite para o cenário de referência taxas de 4,4% em 2017 e 3,6% em 2018 (BACEN, 2016). Utilizando os valores mencionados como base, o presente trabalho assumiu o valor de 5% de taxa de crescimento dos custos de manutenção e de 7,5% para a taxa de crescimento dos custos laborais.

Em relação aos custos de energia, a taxa de crescimento afeta diferentemente cada alternativa tecnológica, visto que utilizam fontes de energia com evoluções de custos distintas. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2016, o preço da energia elétrica evoluiu, desde 2006, a uma taxa média de 7,9% ao ano, para setor industrial, e 6,8% ao ano, para o setor residencial. No entanto, As projeções realizadas pelo Banco Central indicam uma taxa de 6,9% nos preços de energia elétrica para 2017 e de 5,2% para 2018 (BACEN, 2016). Em relação ao preço do diesel, os dados do Balanço Energético Nacional mostram um crescimento de 0,58% ao ano, conforme podem ser verificados na Figura 39. Contudo, para os próximos anos, os cenários de referência indicam um crescimento 1,45% (Rodrigues, et al., 2015).

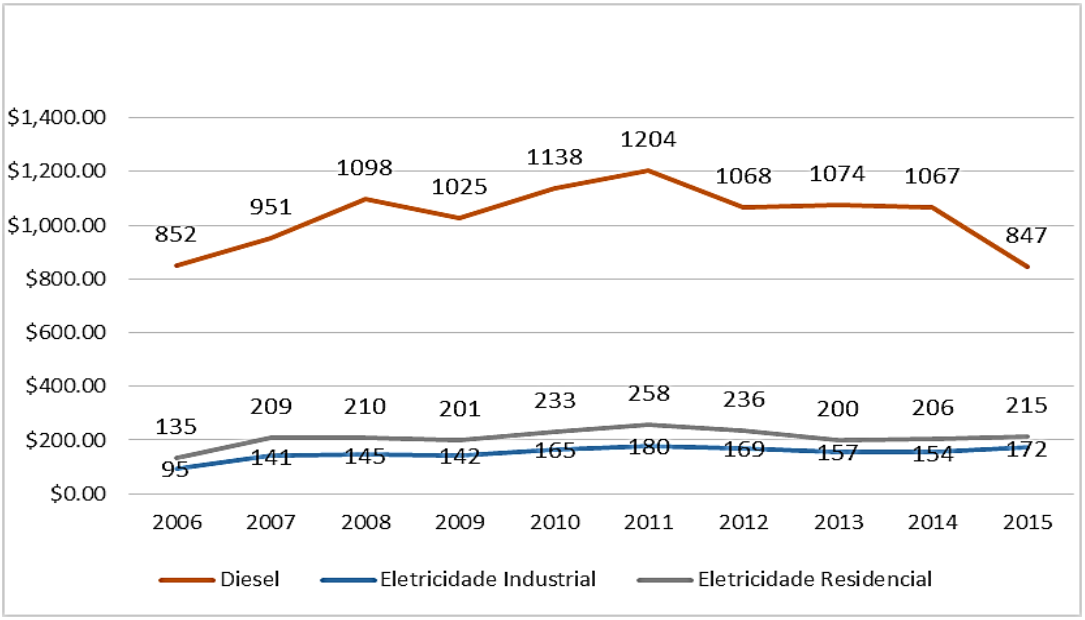


Figura 39 – Evolução dos preços do diesel e eletricidade no Brasil.

Fonte: EPE (2016).

Por fim, é de suma importância a definição da taxa real de juros estimada para o projeto, trata-se da taxa mínima de retorno esperada para o investimento. A taxa SELIC (sigla para Sistema Especial de Liquidação e Custódia) publicada pelo Banco Central é comumente utilizada de parâmetro para os projetos por ser considerada a taxa básica usada nas operações entre bancos, e consequentemente, tendo influência sobre os juros de toda a economia do país. A última publicação periódica da taxa Selic revela que o ano de 2016 fechou com 13,65% e a meta inicial para 2017 é de 13%[22], mostrando a tendência de queda que deverá ser evidenciada nos próximos anos. Neste cenário e com base nos índices de inflação, a taxa real de juros a ser adotada no projeto foi e 7%.

Através das iterações de cálculos do modelo, os custos dos sistemas para o período de estudo de projeto são determinados. Além dos custos, o resultado do modelo apresenta as características de performance de cada sistema, conforme apresenta a Tabela 17. Em decorrência do perfil de demanda estipulado para o Corredor TransOeste, demonstra-se que nos períodos de pico, o sistema VLT consegue ofertar a mesma capacidade de serviço com menos veículos. A frequência por sentido nessas horas mais intensas de serviço do VLT é até 45 composições por hora, enquanto que o BRT exige um mínimo de 120 veículos por hora. Esta frota operante tão alta para o BRT tende a impactar na velocidade operacional do sistema, visto que os *headways* se tornariam mínimos.

Tabela 17 – Resultados do modelo para a performance do sistema

	BRT	VLT
Frequência no período de pico (veículos/hora)	120	45
Frota (veículos)	520	190
Km viajados por ano (milhões de km)	16,96	44,85
Horas anuais de trabalho (mil horas)	1.864,6	712,9
Consumo Energético Anual (GWh)	485,0	84,8
Custo anual total (US$)	231,51	242,60

Fonte: elaboração própria.

[22] Publicação de 11/01/2017, disponível em: <https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>. Acesso em: Janeiro de 2017

Com isso, a frota estimada para o sistema VLT é significativamente menor do que a necessária para o sistema BRT. Segundo o modelo, o VLT contaria com uma frota total de 190 veículos contra cerca de 520 ônibus estipulado para o sistema BRT (valor bastante superior ao observado, o que corrobora com as evidencias de superlotação apresentadas no item 4.2.1). Este resultado revela que carga de operação sobre o Corredor TransOeste é bem mais intensa se efetuada pelo BRT. Os cálculos mostram que, anualmente, são quase 28 milhões de veículos-quilômetros viajados de diferença entre os sistemas.

De acordo com o prognóstico da performance dos sistemas, ambos deverão atender aos passageiros ofertando o mesmo tempo de percurso. O tempo para realizar um ciclo completo no sistema ficou estabelecido em 3h45min, ou seja, esse é o tempo que um veículo levaria para realizar uma viagem, de ida e volta, e estar pronto para iniciar a próxima. Com isso, a quantidade de horas anuais de trabalho para cada alternativa é contabilizada como 713 mil horas e 1865 mil horas, respectivamente aos sistemas VLT e BRT.

Evidentemente, a maior intensidade na operação pelo sistema BRT reflete em um maior consumo energético por esta alternativa. Anualmente, o consumo deste sistema seria o equivalente a cerca de 45 milhões de litros de combustível, enquanto que o sistema VLT utiliza 85 milhões de kWh. Comparando em uma mesma base, a diferença é de quase 400 milhões de kWh a mais consumidos pelo sistema BRT a cada ano, comprovando que a tecnologia VLT é consideravelmente mais eficiente em termos energéticos.

O que se questiona é se essa eficiência energética é capaz de ocasionar uma redução nos custos suficiente para viabilizar tal tecnologia em relação a outra. Considerando todos os gastos envolvidos em cada alternativa, a análise financeira do modelo mostra que o total de custos anualizados para o VLT seria de US$ 242,60 milhões e para BRT seria de US$ 231,51 milhões. Assim, a relação entre os custos do ciclo de vida do sistema VLT sobre os do sistema BRT assume o valor de 1,05, mostrando que, apesar de estarem bem próximos, o sistema VLT ainda seria mais caro para Corredor TransOeste do que o sistema BRT implantado.

No entanto, o fato deste valor tão próximo mostra que apesar do alto custo de investimento inicial do VLT, a economia gerada nos custos operacionais compensa a longo prazo. Esta característica comprova que o sistema é mais adequado para projeto em que exigem uma elevada demanda de energia. Sendo assim, conforme já destacado, o nível de demanda de passageiros influencia fortemente na escolha da alterativa tecnológica adequada

para o sistema de transporte. A Figura 40 comprova esta afirmação, demonstrando os efeitos que variações percentuais no valor de demanda da hora de pico causam na relação entre os custos das alternativas propostas.

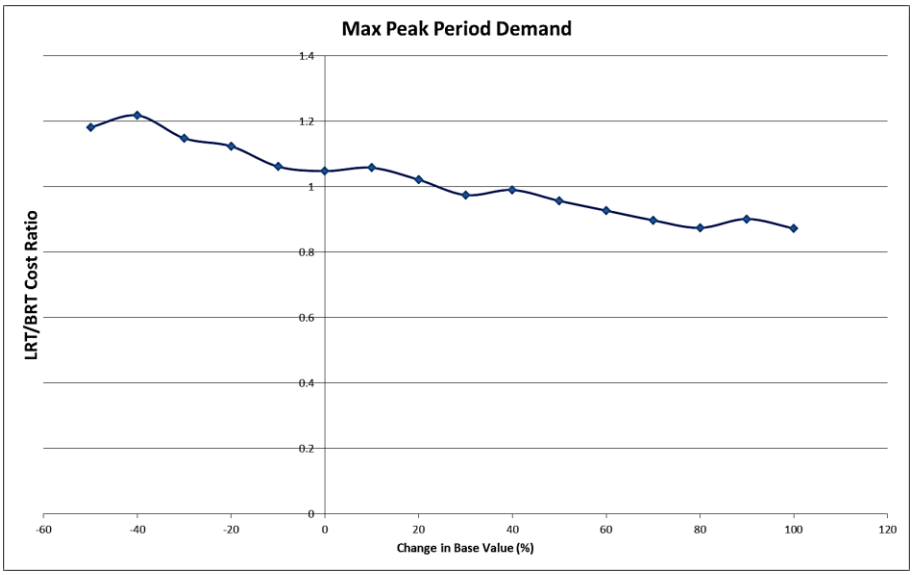


Figura 40 – Efeito da variação da Demanda Máxima de passageiros na razão de custos dos sistemas.

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, o aumento de demanda de passageiros favorece a opção pelo sistema elétrico e mais eficiente. Assim, traçando um gráfico para o projeto, relacionando os custos anuais em função da demanda, foi possível definir a quantidade de passageiros atendidos na qual o sistema VLT passa a ser financeiramente mais interessante do que o sistema BRT. Este "*break even point*" para o Corredor TransOeste pode ser observado na Figura 41.

Os valores entre 13 mil e 17 mil passageiros na hora de pico definem uma região de transição, na qual as tecnologias são equivalentes. Dado o corredor TransOeste atender a demanda estimada de 15 mil passageiros, pode-se dizer que ambas as alternativas são interessantes para o sistema. Este fato explica a relação entre os custos anualizados ter resultado em um valor próximo a 1.

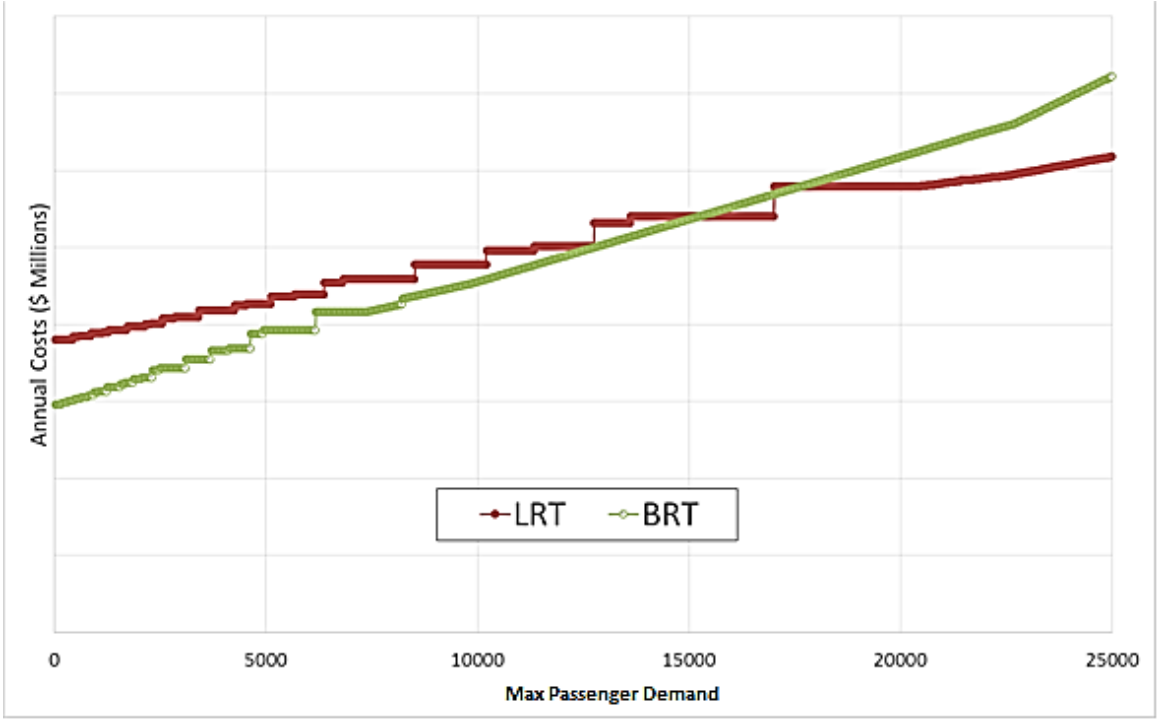


Figura 41 – Gráfico dos Custos em função da demanda de passageiros.

Fonte: Elaboração própria.

5.2 SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS PARA A ESCOLHA DA ALTERNATIVA DE TRANSPORTE

A região de transição define os valores de demanda máxima, em que pequenas alterações nos parâmetros do projeto fazem com que alguma das alternativas se sobressaia em relação a outra. Sendo assim, torna-se importante avaliar a sensibilidade dos resultados em relação a cada parâmetro para entender os efeitos na razão de custos e poder identificar formas de viabilizar a tecnologia que for capaz de trazer maiores benefícios à sociedade.

Por exemplo, para os custos de capital do projeto, ao realizar a análise de sensibilidade dos gastos com aquisição de veículos e de construção da infraestrutura, nota-se que os resultados são substancialmente mais sensíveis ao custo com infraestrutura. Inclusive, o gráfico da Figura 42 mostra que uma redução superior a 20% neste custo tornaria o VLT financeiramente mais interessante do que o BRT. Nesse sentido, uma política para incentivar o VLT, tendo como premissa, reduzir os custos nas obras de infraestrutura (por exemplo,

minimizando os gastos com desapropriações) seria mais efetiva do que reduzir o preço dos veículos.

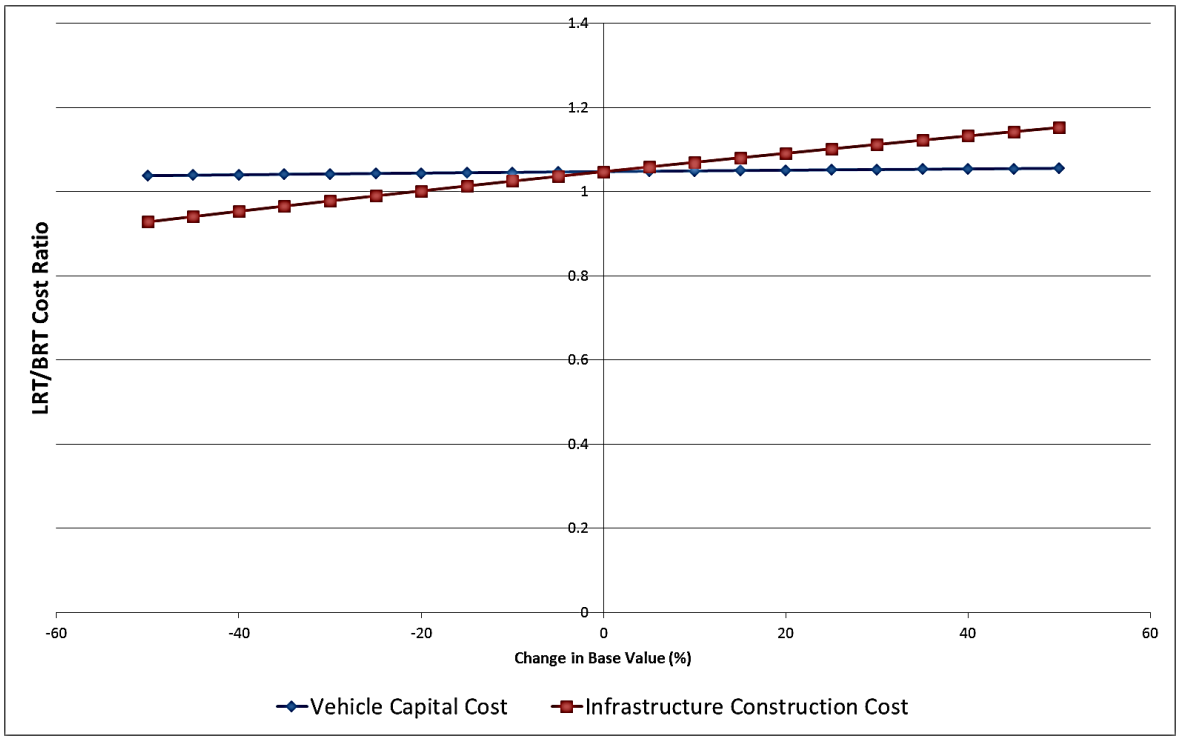


Figura 42 – Análise de sensibilidade dos custos de capital.

Fonte: Elaboração própria.

Com relação aos custos operacionais, os efeitos são menos impactantes para a razão de custos. Dentro do intervalo estudado, de 50% para mais e para menos, somente as alterações no custo de energia seriam capazes de modificar a tomada de decisão. Para isso, seria necessário um aumento de 35%, conforme ilustra a Figura 43. Por outro lado, a análise é suficiente para revelar que variações nos custos de manutenção da infraestrutura tem efeito inverso aos demais custos operacionais. Dado que a manutenção da infraestrutura é o único custo operacional mais custoso para o sistema VLT do que para o sistema BRT, variações positivas neste parâmetro tendem a aumentar essa diferença relativa entre as alternativas, e assim, favorecer ao sistema BRT.

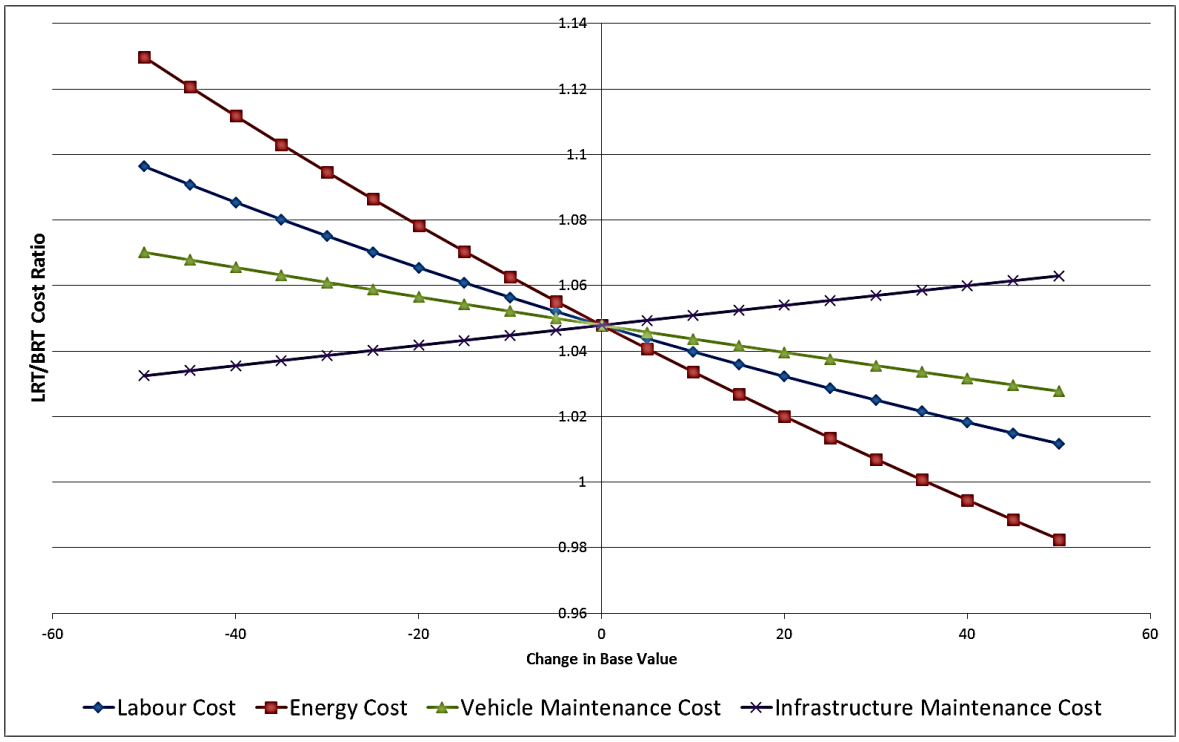


Figura 43 – Análise de sensibilidade para os custos operacionais.

Fonte: Elaboração própria.

Apesar do aumento no custo de energia incentivar ao sistema VLT, o aumento nas taxas de crescimento desse custo é fortemente favorável ao sistema BRT, conforme ilustra a Figura 44. A causa disso está atrelada ao fato da taxa indicada para o aumento no custo da energia elétrica dos próximos anos ser consideravelmente maior do que a do litro de diesel. Assim, a instabilidade atual do setor elétrico brasileiro, tendendo ao aumento no preço das tarifas de energia, bem como a queda no preço do barril de petróleo, indicam cenários favoráveis ao sistema BRT. No entanto, a definição desta tendência para estes cenários de preços engloba muitas incertezas, aumentando o grau de complexidade na escolha das alternativas, já que uma conjuntura futura diferente da prevista inverteria o resultado desta análise.

Observando as Figura 43 e Figura 44, vale ressaltar a influência dos custos laborais no resultado final, que mostra-se mais sensível a esta variável do que em relação as outras taxas. Como o sistema VLT apresenta uma proposta mais eficiente em relação carga horária de trabalho total do projeto, políticas trabalhistas que aumentem os gastos com a mão-de-obra (por exemplo, aumento do salário mínimo) favoreceriam a opção pelo VLT.

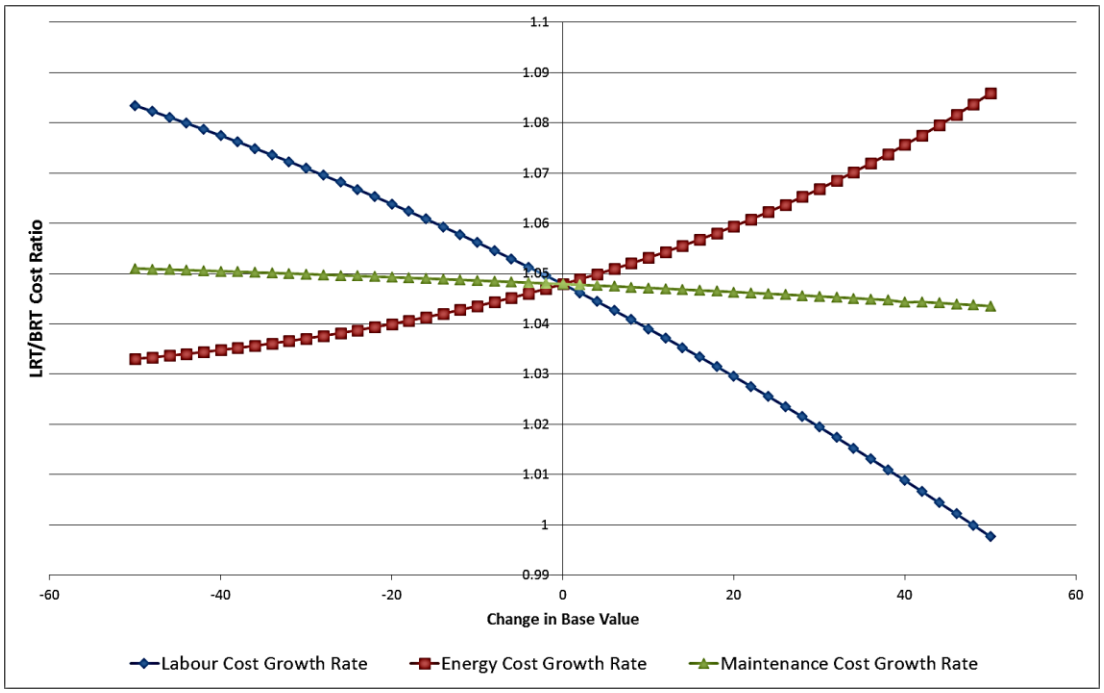


Figura 44 - Análise de sensibilidade para as taxas de crescimentos dos custos.

Fonte: Elaboração própria.

Conclui-se, para esta análise preliminar das alternativas, que ambos as tecnologias, BRT e VLT, são adequadas para o Corredor TransOeste, sendo a escolha entre elas determinada pelos prognósticos políticos e macroeconômicos estabelecidos pelo projetista. No entanto, esta pura análise de custos não quantifica as externalidades e benefícios associados a cada alternativa. Sob o ponto de vista do usuário de transporte público, o VLT oferece um maior conforto em suas viagens, tendo potencial de atrair mais passageiros e, assim, aumentar a renda do empreendimento. Enquanto que o BRT possibilita uma construção em menor tempo, permitindo iniciar as operações antes e garantindo retorno inicial mais rápido para o empreendimento.

Para os aspectos ambientais, primeiramente, vale destacar a questão dos ruídos, em que, notoriamente, a tração elétrica tem um melhor desempenho para a sociedade. Entretanto, a principal questão ambiental está relacionada a poluição atmosférica associada a este serviço. Neste ponto, é importante identificar a abrangência dos passivos ambientais e destacar a diferença entre impactos locais e globais, para garantir uma análise consistente.

A queima de combustíveis durante a operação dos veículos, evidentemente, causa uma maior emissão local de poluentes atmosféricos. No entanto, se a geração de energia

elétrica do sistema que abastece a rede elétrica local utilizar usinas altamente poluentes, os impactos a nível global não estarão sendo minimizados. Esta análise ampla dos impactos evita que as ações não reflitam apenas em uma transferência de local a ser afetado pela poluição do meio ambiente.

No Brasil, o uso predominante de fontes renováveis em sua matriz elétrica permite que propostas de eletrificação dos transportes remetam a significativas reduções de emissões atmosféricas. Mesmo com o período hidrológico desfavorável dos últimos anos, que contribuiu para um maior despacho de usinas termelétricas de alta emissão de poluentes, o setor elétrico destaca-se mundialmente pela baixa intensidade de carbono de sua geração elétrica. Em 2013, as emissões por MWh gerados no setor elétrico brasileiro representaram valores 3, 4 e 6 vezes menores que os fatores europeus, americanos e chineses, respectivamente (Figura 45).

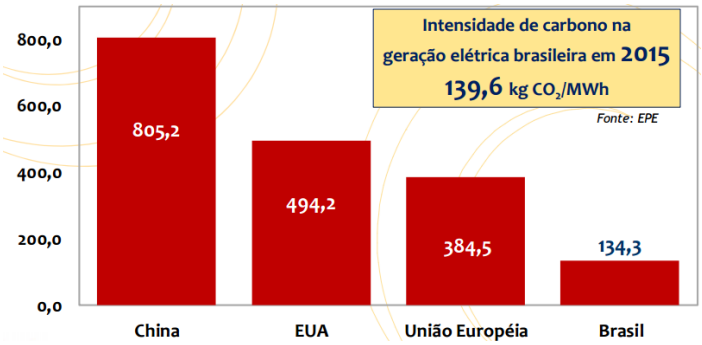


Figura 45 – Emissões de CO_2 por MWh gerado, em 2013.

Fonte: EPE (2016).

Em 2015, o fator de emissão do setor atingiu o valor de 139,6 $kgCO_2e/MWh$, e em 2016, esse fator caiu para 79,72 $kgCO_2e/MWh$, correspondente a uma emissão total de 42,8 $MtonO_2e$ no ano, conforme ilustra a Figura 46. Utilizando uma média dos últimos cinco anos, o fator de emissão considerado no estudo para a geração de energia elétrica foi de 96,7 $kgCO_2e/MWh$[23]. Para o sistema a diesel, foi utilizado um fator de emissão de 2,67 $kgCO_2$/litro de diesel (MMA, 2011).

Com isso, o resultado do modelo revela que a implantação do sistema VLT traria uma redução anual de 111,6 $GgCO_2e$ em relação às emissões do sistema com o BRT. Essa redução

[23] Dados do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases do Efeito Estufa (SEEG). Disponível em <http://monitoreletrico.seeg.eco.br/> Acesso: Janeiro de 2017

representaria 1,7% em relação as emissões do setor de transporte da cidade em 2012, o que ajudaria a cidade a atingir as metas de emissões de GEE estabelecidas pela Prefeitura.

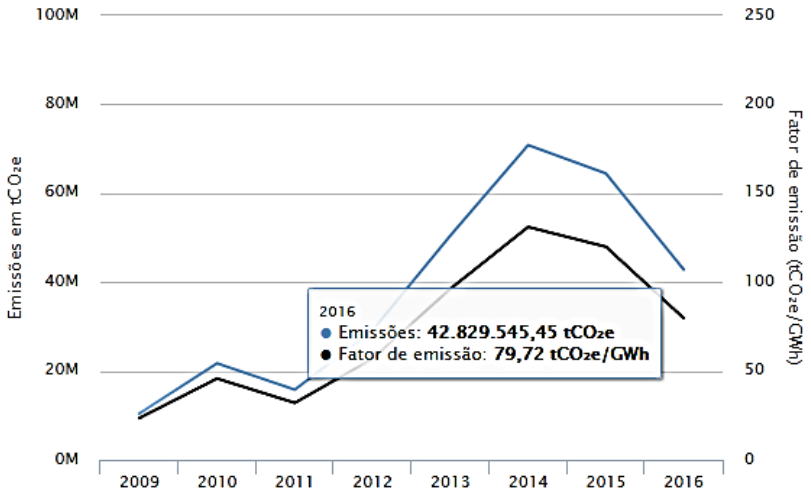


Figura 46 – Emissões anuais de CO_2 da matriz elétrica brasileira.

Fonte: SEEG (2017)

5.3 CENÁRIOS DE AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O VLT

De forma a ampliar o impacto dessa alternativa na redução de emissões, o estudo realizou uma análise adicional, considerando a inserção de fontes renováveis de energia para autoprodução de energia no sistema, através da implantação de painéis fotovoltaicos. Para este cenário foram considerados dois subcenários: o primeiro com a instalação de painéis limitada pela área de telhado das estações e terminais, e o segundo desconsiderando essa limitação de área.

Nesta etapa da análise, a ferramenta computacional utilizada para modelar as alternativas foi o software HOMER, um modelo de otimização para sistemas de geração de energia capaz de auxiliar na avaliação técnico-econômica de projetos, conforme descrito no capítulo de metodologia. Ao iniciar a modelagem no HOMER, a primeira preocupação é apresentar ao programa, a combinação de tecnologias com que se pretende trabalhar. A construção do diagrama esquemático do sistema é dada por uma carga primaria representando a demanda de energia elétrica por corrente alternada do VLT operando no

corredor TransOeste, podendo ser atendida pela rede ou por um conjunto de painéis fotovoltaicos combinados a um inversor. A Figura 47 ilustra esta representação esquemática das alternativas propostas.

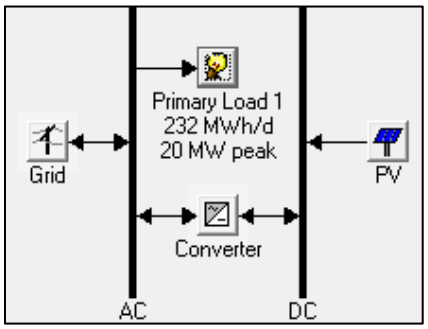


Figura 47 – Diagrama esquemático inserido no HOMER.

Fonte: Elaboração própria.

A carga do sistema demanda uma quantidade de energia de 232 MWh/dia, com pico de potência de quase 20 MW. A definição desta curva de carga a ser atendida é dada pela eficiência energética da tecnologia multiplicada pelos veículo-quilômetros transportados a cada hora. Como vários veículos estão circulando em pontos diferentes do mesmo trajeto, o cálculo do VKM por hora é efetuado com base na quantidade de veículos circulando a cada hora e a velocidade operacional dos mesmos, que define os quilômetros rodados a cada hora. Dessa forma, foi possível traça o perfil de demanda diário, apresentado na Figura 48. Por simplificação, foi estabelecido o mesmo comportamento ao longo do ano, variando apenas entre dias da semana e finais de semana.

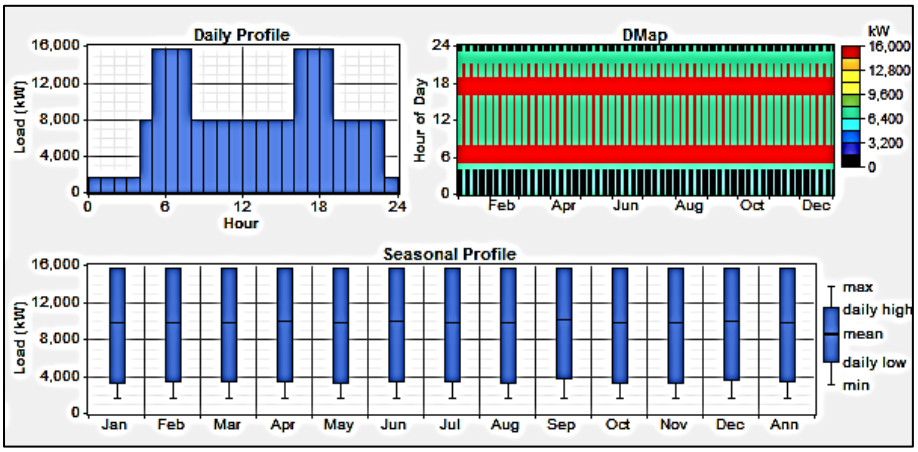


Figura 48 – Perfil de demanda inserido no HOMER.

Fonte: Elaboração própria.

O próximo passo foi definir as características técnicas e econômicas dos componentes do sistema. Iniciando-se com os dados relativos à conexão com a rede elétrica convencional, a tarifa é fixada no valor já mencionado de US$ 0,11/kWh. Complementando as informações da rede, foi inserido o fator de emissão de CO_2 de 96,7 g/kWh, conforme também mencionado.

Com relação aos sistemas fotovoltaicos dimensionados, foram estabelecidos dois subcenários de acordo com a área disponível para implantação. O primeiro, limitado pela área de telhado disponível no corredor, realiza o dimensionamento com base no fator de ocupação dos painéis selecionados para o projeto. O segundo, de área ilimitada, utiliza como base a equação 1 para determinar a potência do sistema fotovoltaico.

As medidas de área disponível para o sistema fotovoltaico do primeiro subcenário são apresentadas na Tabela 12, presente no capítulo de estudo de caso. Com a multiplicação pela razão de potência por metro quadrado dos módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, obteve-se o dimensionamento de 6,2 MW de potência de pico para o sistema. Este valor de potência nominal supera a capacidade da maior usina fotovoltaica em operação no país, a Usina Solar Cidade Azul em Tubarão, Santa Catarina, que possui mais de 3MW de potência.

Apesar de ser um alto valor de potência nominal, nota-se que este valor está abaixo do que o sistema demanda. Logo, este primeiro subcenário subdimensiona o conjunto fotovoltaico em relação ao consumo energético do corredor TransOeste. Ou seja, o número de painéis pode ser aumentado para garantir uma maior participação solar na energia utilizada pelo sistema.

Devido a energia gerada pelos painéis ser comercializada com a rede na forma de créditos, as configurações do sistema em que hajam excessos de energia não são financeiramente interessantes. Assim, a potência dimensionada deve ser projetada para ser capaz de atender a média anual de energia requerida pelo sistema, maximizando a geração solar e minimizando os excessos de energia para a rede pública. A fórmula para determinar este valor de potência foi apresentada na equação 1.

Ao inserir os dados de latitude e longitude do local (escolhido o Terminal Alvorada como ponto de referência), a partir de sua base de dados, automaticamente o HOMER apresenta os dados de radiação incidente (Figura 49) que indicam um valor de média anual

de Horas da Sol Pleno (HSP) de 4,5h. Este valor é essencial para preencher a equação 1, e junto com o valor padrão de 0,8 para a taxa de desempenho (TD), a potência requerida fica sendo de 64 MW, muito superior, inclusive, ao que o Brasil tem instalado hoje de geração fotovoltaica, cerca de 23MW[24].

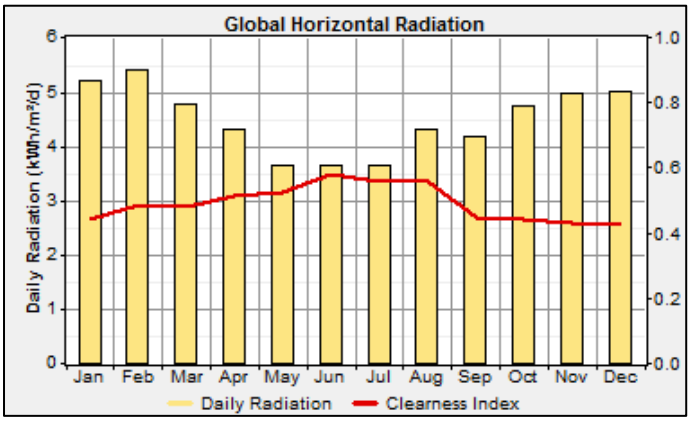


Figura 49 – Gráfico dos dados de radiação solar para o projeto.

Fonte: Elaboração própria.

Mesmo o potencial técnico para geração de energia solar no país, incluindo centralizada e distribuída, indicar para valores entorno de 30 mil GW (Sauaia, 2016), a capacidade atual da fonte fotovoltaica é baixa. Os valores existentes para geração distribuída no país são da ordem 13 MW (EPE, 2016). Por isso, propor um sistema com estas dimensões é inadequado para a atual situação econômica do país. Assim, este sistema fica inserido no modelo apenas para avaliar o comportamento da energia solar no sistema, pois estão claros a sua complexidade e os obstáculos para se tornar viável tamanha instalação.

Ambos os sistemas fotovoltaicos dimensionados para cada subcenário utilizam os mesmos parâmetros de projeto, como por exemplo, os ângulos de posicionamento dos módulos. Os painéis são instalados com o ângulo de inclinação igual aos graus de latitude do local (23º). O azimute define a orientação dos módulos para o Norte, portanto assume o valor de 180º. Além dos ângulos, o fator de albedo, definido como o grau de refletância das superfícies ao redor, assume o valor de 0,2, por esta ser uma medida padrão média para construções urbanas (CRESESB, 2014).

[24] Dado do Banco de Informações da Geração elaborado pela Aneel, disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp> Acesso em: Janeiro 2017

Quanto às propriedades tecnológicas, vida útil de sistemas fotovoltaicos indicada na literatura é de 25 a 30 anos e a perda de eficiência dos módulos é de 0,75% ao ano (ABINEE, 2012). A eficiência de conversão dos módulos monocristalinos atinge 25% nas condições padrão de teste. Como normalmente operam fora destas condições, é importante considerar o efeito da temperatura no desempenho do sistema.

A influência da temperatura prejudica o funcionamento da célula fotovoltaica reduzindo a potência extraída em uma taxa média de -0,4% para cada grau Celsius de temperatura, sendo assumida uma temperatura nominal de operação da célula de 45ºC (CRESESB, 2014). Por considerar os efeitos da temperatura, o programa passa a exigir os dados de temperatura. Para o local em estudo foram inseridos os dados de temperatura média mensal da cidade do Rio de Janeiro, resultando numa média anual de 27,5ºC[25].

Em relação aos os custos do sistema, ABINEE (2012) aponta um valor de R$6,27/Wp instalado, já Groth (2013) aponta um valor de R$6,51/Wp, porém há estudos que mostram valores chegando a R$5,6/Wp, ou inferiores (Nakabayashi, 2015; Scheidt, et al., 2014; IEA & NEA, 2015; EPE, 2014; Dowling, et al., 2016). A tendência destes preços, atualmente, corrobora com estes patamares inferiores verificados, optou-se por adotar o valor de R$4,5/Wp (equivalente a US$1400/kWp), e ao final será realizada uma análise de sensibilidade para valores entre R$5,5 e R$3,5. Os custos de O&M são dados como 1%CAPEX/ano e o custo de substituição é de 80% do valor inicial (ABINEE, 2012).

Dado que o sistema consome energia em corrente alternada e a geração fotovoltaica é intrinsecamente por corrente contínua, faz-se necessário a instalação de um inversor, que é inserido como um componente independente pelo modelo do HOMER. A eficiência usual dos inversores é de 90% e a operação, geralmente, não apresenta falhas até 10 a 12 anos de utilização, ou seja, a vida útil não acompanha a dos módulos fotovoltaicos (Groth, 2013).

O inversor deve estar dimensionado de maneira que ele não trabalhe por muito tempo em potências demasiadamente abaixo da nominal nem seja sobrecarregado (CRESESB, 2014). O dimensionamento do inversor depende, fundamentalmente, da potência do gerador fotovoltaico. De forma conservadora, a potência do inversor pode ser igual à potência

[25] Dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/> Acesso em: Janeiro 2017

nominal da geração (CRESESB, 2014). Contudo, a fim de otimizar a geração de energia elétrica, o inversor pode ser selecionado com capacidade de converter até 10% inferior a capacidade de geração do sistema (Groth, 2013). Com isso, permite-se reduzir os gastos com este equipamento.

Quanto ao custo, assim como os preços de instalação fotovoltaica, há diversos estudos apontando diferentes preços, mas para o presente trabalho optou-se por adotar o valor de R$1/W, ou US$ 320/kW (cotação de janeiro de 2017) (Behenck, 2011; ABINEE, 2012). Da mesma forma para o sistema fotovoltaico, utilizou-se custos de O&M dados como 1%CAPEX/ano e o custo de substituição é de 80% do valor inicial. Além disso, considerando os ganhos de escala no uso de um sistema maior, maiores potências beneficiam-se de custos por quilowatts menores para os inversores.

Definido todos os aspectos técnicos e econômicos das tecnologias empregadas, a última parte trata da inserção das variáveis econômicas que descrevem o ambiente em que está inserido o sistema. Foram utilizados os mesmos valores adotados anteriormente na análise das alternativas de modos de transportes, sendo a taxa real de juros de 7% e o tempo de duração da avaliação do projeto de 30 anos.

Com todas as informações inseridas, executa-se o modelo para analisar apenas os cenários eletrificados do Corredor TransOeste, considerando os investimentos de capital e de O&M das tecnologias de autoprodução de energia no sistema e os gastos com consumo de energia. Os resultados são apresentados na Tabela 18, na qual observa-se a preferência do modelo em ter toda a energia sendo provida somente pela rede elétrica, optando por não usar os painéis fotovoltaicos. Mesmo na categoria em que utiliza os painéis, a ordem de classificação, com base nos custos a valor presente líquido (em inglês, NPC – *Net Price Cost*), sempre prioriza a menor quantidade de painéis instalados.

Tabela 18 – Resultados do HOMER para os cenários eletrificados.

PV (kW)	Converter (kW)	Total NPC	Initial capital	Operating cost ($/yr)	Cost of Energy ($/kWh)	Renewable fraction
-	-	**$ 252,077,776**	**$ 0**	**20,341,042**	**0.240**	**0**
6200	**6000**	**$ 254,865,920**	**$ 10,314,526**	**19,707,518**	**0.243**	**0.09**
64000	**58000**	**$ 328,743,488**	**$ 105,400,000**	**17,998,448**	**0.313**	**0.61**

Fonte: Elaboração própria.

Este resultado mostra que a proposta de instalação de sistemas fotovoltaicos ainda não é financeiramente interessante para o negócio. Os motivos para isso podem estar atrelados ao considerável custo de instalação, que não é compensado pelos créditos gerados em energia, dado o valor de tarifa relativamente baixo do qual se beneficia este serviço público. Os fluxos de caixa para os três cenários da proposta de eletrificação são apresentados na Figura 50, na qual fica evidenciado elevado custo inicial do cenário com alta inserção de geração fotovoltaica.

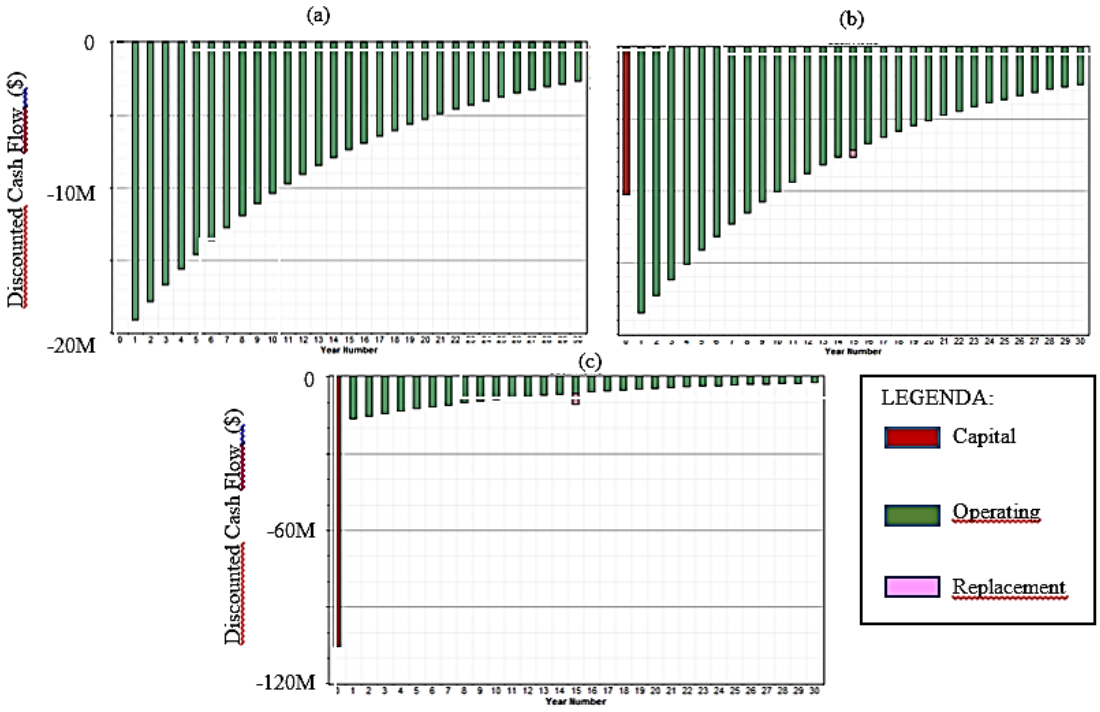


Figura 50 – Fluxo de caixa dos cenários eletrificados (a) alimentado somente pela rede (b) alimentado pela rede e uma menor inserção fotovoltaica (c) alimentado pela rede e uma maior inserção fotovoltaica

Fonte: Elaboração própria.

Mesmo rodando o modelo com uma taxação de carbono de US$50/tonCO2, ainda assim, os painéis não se tornam a primeira opção. O preço de "*break-even*" que tornaria preferível a adoção das placas está na ordem de US$340/tonCO2, valor inimaginável em qualquer negociação para uma Economia de Baixo Carbono. A explicação para este efeito é o já baixo fator de emissão da matriz elétrica brasileira, que faz com que a adoção da energia solar no sistema não seja tão significativa na redução das emissões em relação aos custos de investimento no sistema. A Tabela 19 apresenta as emissões em todos cenários e mostra que

poderiam ser reduzidas em 96% em relação ao cenário de referência, caso seja adotado o cenário de forte inserção de fontes renováveis no sistema.

Tabela 19 – Emissões em cada cenário

Fonte	PV (MW)	Emissões (tonCO_2e)
Diesel	-	**119.760,72**
Grid	-	**8.202,22**
Grid+PV	**6,2**	**7.525,11**
Grid+PV	**64,0**	**4.845,92**

Fonte: Elaboração própria.

5.4 O PAPEL DO SISTEMA PARA MAIOR INSERÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS

O resultado para o uso de painéis fotovoltaico comprova que a redução de emissões pela adoção de sistema de transporte elétrico pode ser potencializada, caso sejam integradas formas de autoprodução de energia por fontes renováveis. Apesar do alto custo, a inserção de geração fotovoltaica atrai grande interesse da sociedade em virtude dos benefícios ambientais associados. Assim, o incentivo a maior participação desta fonte na matriz energética é um compromisso que as políticas públicas devem assumir para atender a necessidade de uma geração de energia mais limpa e diversificada para a sociedade.

Conforme destacado na seção 4.1 do capítulo de descrição do estudo de caso, em 2010, a geração de energia elétrica total do Estado do Rio de Janeiro correspondeu 43 TWh com predomínio de fontes térmicas. Os sistemas propostos para implantação de geração fotovoltaica reduziriam esta estatística, direcionando para o caminho de uma matriz elétrica mais limpa. Vale ressaltar que o cenário com menor penetração de geração fotovoltaica, contribui com apenas 9% da energia consumida pelo projeto de VLT para o Corredor TransOeste (Tabela 18), no entanto a capacidade já é duas vezes maior que do que a maior usina fotovoltaica do país.

Neste cenário de menor penetração, seriam gerados 7,6GWh/ano, a um custo nivelado de US$ 104/MWh. Esta energia gerada corresponde a um fator de capacidade de 14%, considerando todas as horas do dia, sendo que se for considerado apenas as 4.387 horas/ano

em que os painéis estão operando, este fator subiria para 28%. A representação desta operação, ao longo do ano e das horas do dia, é apresentada na Figura 51.

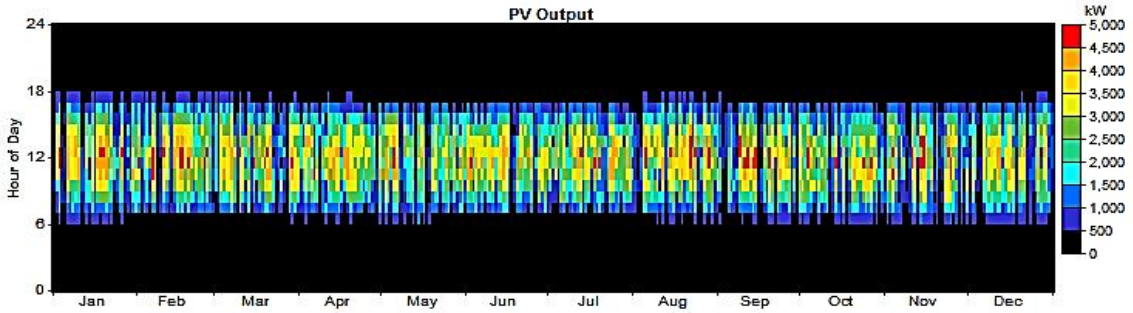


Figura 51 - Potência de saída do painéis fotovoltaicos ao longo do ano.

Fonte: Elaboração própria.

Como esperado os períodos de maior potência do sistema ocorrem ao meio-dia, quando há a maior incidência solar global, sendo a maior potência de saída do sistema chegando próximo ao valor de 5,0 MW. Entretanto, este pico de potência não corresponde ao pico de demanda do sistema, conforme ilustra a Figura 52. A sobreposição da curva da potência solar incidente no local com o perfil de demanda revela este descasamento dos picos entre elas.

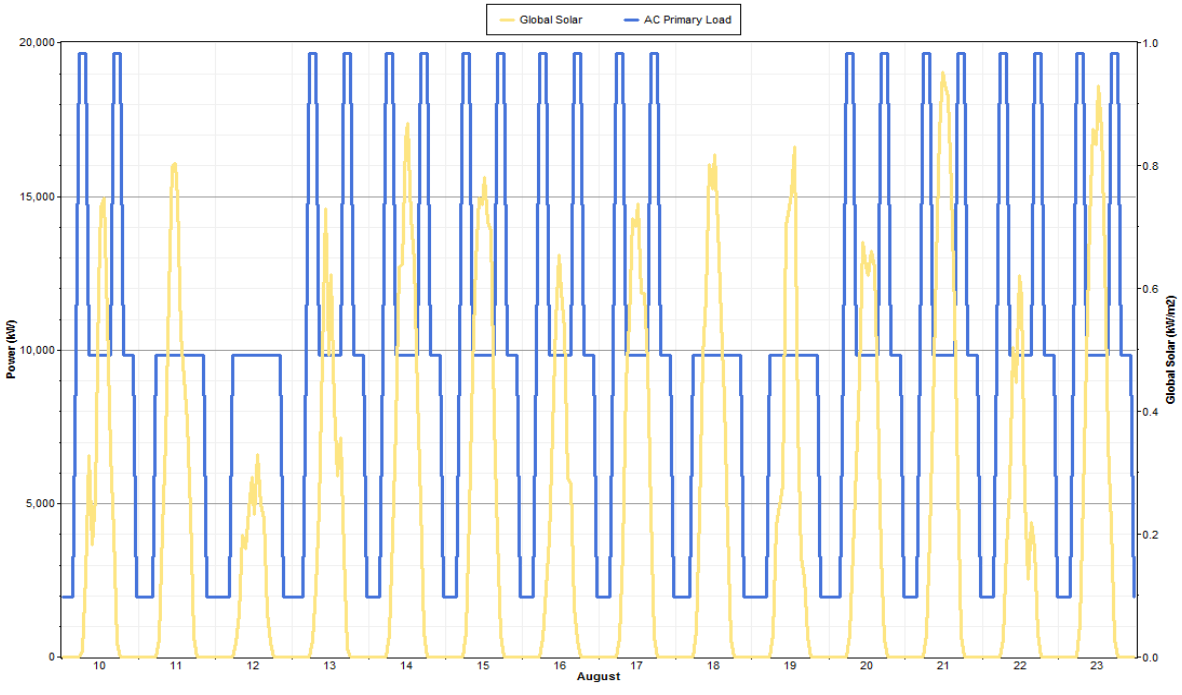


Figura 52 – Comparação entre a potência de radiação solar incidente e a curva de demanda.

Fonte: Elaboração própria.

Esta diferença no perfil de geração e consumo gera pequenos excessos de energia para serem exportados a rede. Segundo o modelo, este excesso seria cerca de 0,6 kWh/ano, com os picos de potência não ultrapassando 1,2W, ou seja, trata-se de uma interação de exportação insignificante para a rede convencional. Ao sobrepor a curva de energia extraída do conversor com a curva de energia obtida da rede elétrica (Figura 53), observa-se que a geração fotovoltaica atua bem abaixo da energia consumida pelo sistema, assim essa autoprodução atua apenas de forma a abater demanda energética da rede.

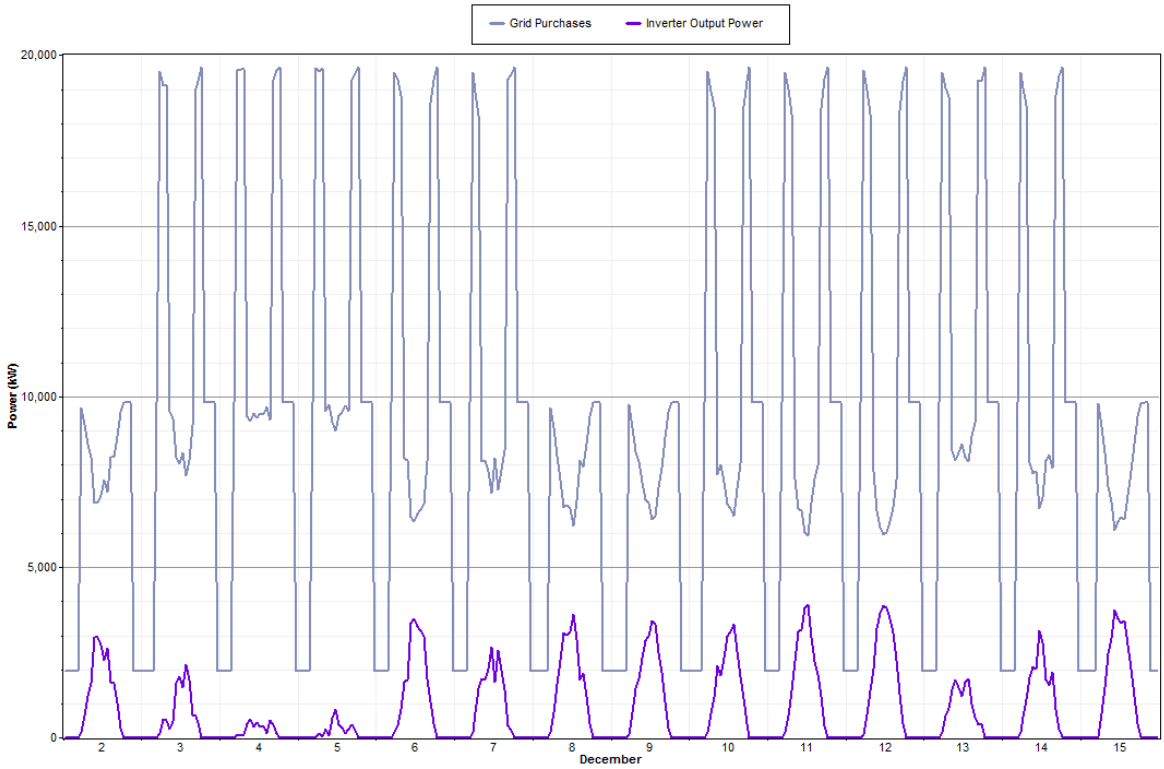


Figura 53 – Comparação entre a curva de potência obtida da rede elétrica e a curva de potência de saída do inversor.

Fonte: Elaboração própria.

Já para o cenário de maior inserção da geração fotovoltaica, está defasagem nos picos de geração e consumo de energia passa a ter impactos significativos. Neste cenário, a participação da fonte fotovoltaica chega a 61%, conforme apresentado na Figura 54. A energia gerada chegaria a 78,6 GWh/ano, mantendo o mesmo fator de capacidade do cenário anterior e com a maior potência extraída do gerador superando 50 MW.

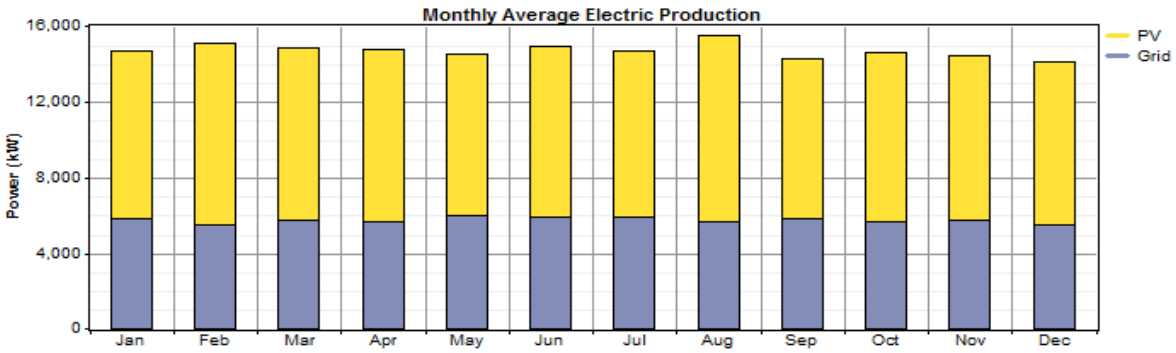


Figura 54 – Divisão da média mensal de utilização de energia por tipo de fonte.

Fonte: Elaboração própria.

Realizando a mesma análise feita para o cenário de menor penetração fotovoltaica, nota-se que, mesmo nos meses de menor incidência de radiação solar, o sistema de transporte fica totalmente abastecido, em determinadas horas dos dias, pela geração fotovoltaica. Na Figura 55, a linha em amarelo representa a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico e a linha em vermelho representa a saída do inversor. É possível observar que a energia extraída do inversor para o sistema é limitada pela demanda e, neste caso, não representa toda a energia possível de ser obtida com os painéis fotovoltaicos.

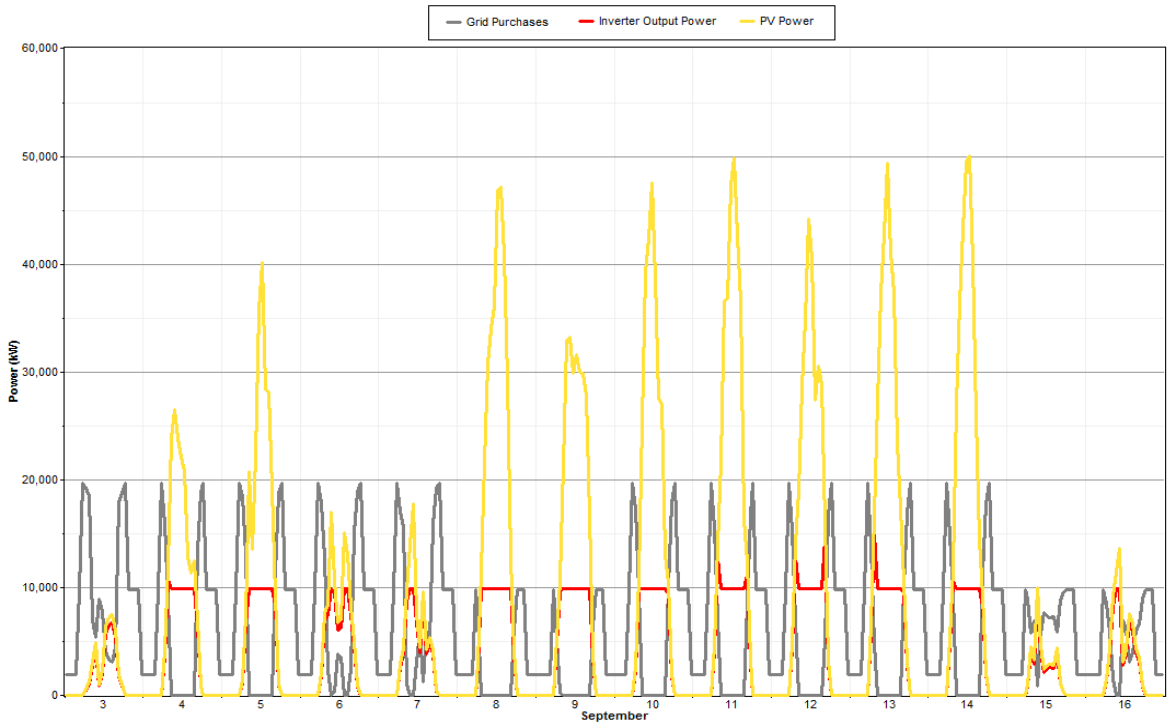


Figura 55 – Fluxo de energia no sistema.

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, esta diferença entre a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e a energia de saída do inversor para alimentar os veículos, representa o excesso de energia que estaria sendo exportada para a rede elétrica convencional. Nota-se que para este cenário, os excessos de energia seriam bastante superiores aos do cenário de menor inserção de renováveis. Segundo o modelo, 31% da energia gerada estaria sendo exportada para a rede pública em troca de créditos de consumo, reduzindo significativamente os gastos operacionais com consumo de eletricidade.

Devido a esta forte exportação de energia, o potencial impacto para a rede deve ser avaliado. Anualmente, a expressiva quantidade de energia enviada para rede, correspondente a 40,2 GWh/ano, pode vir a ajudar o abastecimento de energia da rede local e com uma energia limpa. No entanto, a variabilidade da fonte requer atenção com os equipamentos elétricos e com os ajustes de tensão da rede.

A Figura 56 mostra que a média anual de potência exportada é de 5MW, com picos de até 40 MW. Tamanha variabilidade e atuando com valores tão expressivos exigem equipamentos robustos para minimizar os impactos na rede. Vale ressaltar, que por restrição de tempo, o presente estudo não irá quantificar a atenuação destes impactos pelos sistemas de armazenamento presentes nos veículos, bem como, pelas possíveis medidas operacionais de controle de carga do sistema, ficando como objetivo para estudos futuros.

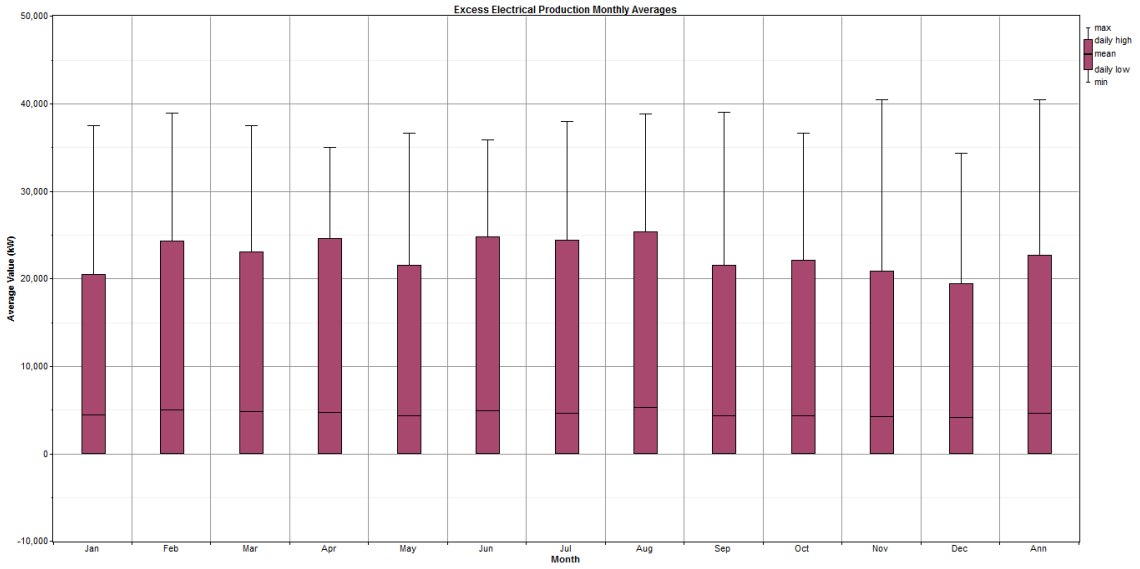


Figura 56 – Análise dos valores mensais de excesso de eletricidade.

Fonte: Elaboração própria.

Mesmo sem esta avaliação, a modelagem do sistema comprovou que os sistemas eletrificados de média capacidade de transporte podem assumir um importante papel para a maior inserção de fontes renováveis na matriz elétrica. Apesar de ser o cenário com menor penetração fotovoltaica proposta para o sistema, a capacidade fotovoltaica projetada de 6,2 MW é bastante significativa, até mesmo a nível nacional, e evidenciou-se que os impactos para rede elétrica local tendem a ser mínimos, caso seja integrada ao sistema VLT apresentado.

Tal benefício não é quantificado nos custos, visto que a análise econômica não opta por este sistema integrado de transporte elétrico e autoprodução fotovoltaica. Entretanto, ao analisar o VPL dos cenários eletrificados (Tabela 18), destaca-se que para a ordem de grandeza dos custos, o cenário com menor inserção de painéis pouco encarece o investimento. Além disso, o espaço proposto para a instalação dos painéis é de áreas inutilizadas nos telhados das estações e que não agregam valor ao empreendimento. Dessa forma, se houver algum incentivo para promoção do uso desta fonte ou por motivos de marketing em sustentabilidade, pode tornar-se interessante sua implementação.

Uma forma de nortear as ações ou políticas para promover a inserção da fonte solar é estudar a sensibilidade dos resultados a determinados parâmetros inseridos no modelo. Este procedimento foi executado no HOMER para lidar com as previsões de aumento no preço da tarifa da rede elétrica e de redução do custo dos sistemas fotovoltaicos. Dessa forma, constatou-se que, mesmo reduzindo bastante o custo de capital dos painéis fotovoltaico, a instalação de placas solares ainda não é financeiramente interessante em função da baixa tarifa de energia estipulada para o serviço.

A Figura 57 representa graficamente a escolha ótima do sistema em função da variação nos parâmetros de tarifa de energia elétrica da rede e de custos dos componentes da geração fotovoltaica, incluindo o inversor. Cenários com aumento superiores a cerca de 29% na tarifa de energia (valores acima de US$ 0,142 /kWh) tornam a opção com inserção dos painéis fotovoltaicos a mais atrativa. Em relação aos custos do sistema fotovoltaico, valores entorno de 73% do valor considerado pelo modelo indicariam a escolha pela integração da geração solar no sistema.

Este resultado mostra que o processo de escolha é igualmente sensível a variações em ambos os parâmetros, tarifa de energia e custo do sistema fotovoltaico. No entanto, vale ressaltar que aumentos na tarifa de energia incentivam a instalação de sistemas fotovoltaicos, por outro lado, desestimulam a adoção de sistema elétricos de transporte. Assim, medidas nesse sentido não trariam os resultados adequados e outras formas de incentivar o uso da fonte solar, como a redução dos custos dos equipamentos e instalação, devem ser consideradas para viabilizar sua implementação integrada aos sistemas de transporte elétricos.

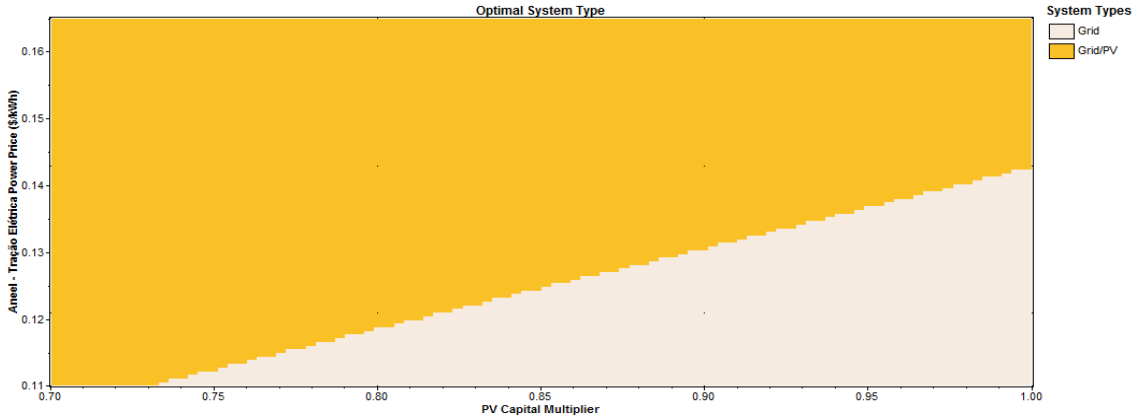


Figura 57 – Gráfico da análise de sensibilidade para o custo de capital dos painéis fotovoltaicos versus o valor da tarifa de energia.

Fonte: Elaboração própria.

Finalizada esta análise, os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida comprovam a capacidade da mesma em abranger a todos os objetivos estabelecidos para esta dissertação. Com isso, conclui-se que a proposta de integrar sistemas de transportes de média capacidade e tecnologias de autoprodução de energia pode não ser financeiramente interessante, mas os benefícios associados merecem a atenção dos planejadores. Afinal, medidas como esta, além de integrar diferentes setores, proporciona benefícios mútuos a ambos. Portanto, cabe aos tomadores de decisão do setor considerar os aspectos apresentados e ponderar o valor destas informações para definir a melhor alternativa sob ponto de vista técnico, econômico, político e ambiental.

6 CONCLUSÃO

Motivada pelo o aumento das preocupações globais com os impactos das mudanças climáticas e com a sustentabilidade do ambiente urbano, a presente dissertação levantou o debate a respeito dos aspectos energéticos e ambientais associados ao setor de transportes. Nesse sentido, comprovou-se que o planejamento de expansão do setor transporte deve incorporar metodologias que aprimorem o processo de escolha das alternativas mais eficientes no consumo de combustíveis e menos poluentes.

A aplicação da metodologia desenvolvida trouxe resultados relevantes na comparação entre alternativas de transporte e permitiu modelar, para um período de 30 anos, 3 cenários base para análise dos tomadores de decisão. Como se esperava, os resultados comprovaram que, apesar dos altos custos de investimento, os menores custos de operação do sistema VLT fazem com que esta seja a melhor escolha para corredores com maiores demandas. De acordo com o estudo de caso, a faixa de demanda entre 13 a 17 mil passageiros na hora de pico, representa a zona de transição em que o sistema BRT passa a ser menos interessante que o VLT. Este resultado permite intuir a respeito de qual a melhor alternativa para outros corredores BRT de características similares, como o TransCarioca (maior demanda) e o TransOlímpica (menor demanda).

Uma vez que o BRT TransOeste possui uma demanda estimada de 15 mil passageiros na hora pico, este corredor fica exatamente no meio desta faixa de transição. Este resultado revela que o sistema com o BRT TransOeste se encontra no limite de desempenho e momentos de demanda superior a estimada expõe os passageiros a situações de superlotação dos veículos, conforme destacado no diagnóstico do sistema. O cálculo da frota pelo modelo, indicando valores bastante superiores aos verificados na prática por este diagnóstico, também corroboram com esta evidencia de superlotação. Em virtude da maior capacidade dos veículos VLT, a opção por esta alternativa seria uma solução custo-efetiva para este problema.

No entanto, o fato do corredor estar dentro desta faixa de transição indica que pequenas variações nos parâmetros considerados podem ser significativas para a escolha da melhor alternativa. Portanto, como parte do estudo, foram realizadas análises de sensibilidade para as principais variáveis de entrada do modelo. Nestas análises, os resultados mostraram-se mais sensíveis aos custos de investimentos, indicando que políticas no intuito de reduzir

os gastos na construção das vias teriam efeitos bastante positivos no incentivo ao transporte elétrico. Segundo o estudo, uma redução entorno de 20% dos custos com a infraestrutura seria suficiente para viabilizar o VLT.

Em relação aos custos operacionais, o efeito é oposto para a maioria dos parâmetros, ou seja, gastos menores favorecem a opção pelo BRT. Para valores maiores nestes custos, a menor intensidade na operação do VLT faz com que esta alternativa se torne mais barata em relação ao BRT. A exceção está no custo de manutenção da infraestrutura, no qual variações positivas favorecem ao BRT, já o tratamento dos trilhos e dos equipamentos elétricos é mais complexo e custoso.

Como a variação em um determinado custo para o BRT não implica, necessariamente, em uma variação igual no mesmo custo para o VLT, uma limitação encontrada no modelo utilizado para realizar estas análises de sensibilidade é a impossibilidade de aplicar as variações em uma análise separada de cada tecnologia. O cálculo do modelo incide sobre ambas as alternativas os percentuais de variação, consequentemente, as diferenças entre os valores de entrada são ampliadas, favorecendo àquele que tinha menor valor.

Após esta primeira etapa de análise completa dos custos, concluiu-se que a escolha entre as alternativas BRT e VLT para o Corredor TransOeste é indiferente, ou seja, as opções apresentam custos totais bastante próximos. Por outro lado, esta pura análise de custos não quantifica as externalidades e benefícios associados a cada alternativa. Por exemplo, sob o ponto de vista do usuário de transporte público, o VLT oferece um maior conforto em suas viagens, tendo potencial de atrair mais passageiros e, assim, aumentar a renda do empreendimento. Enquanto, que o BRT possibilita uma construção em menor tempo, permitindo iniciar as operações antes e garantindo retorno inicial mais rápido para o empreendimento.

Abrangendo uma dessas externalidades não quantificadas pelos custos, a metodologia aplicada permitiu calcular as emissões associadas a cada alternativa. A redução anual proporcionada pela adoção sistema elétrico seria de 111,6 $GgCO_2e$, que representaria 1,7% em relação às emissões do setor de transporte da cidade em 2012. Esta contribuição pode ainda ser intensificada caso sejam inseridas no sistema formas de autoprodução de energia por fontes renováveis.

Buscando quantificar esta contribuição da integração de outras fontes, o estudo utilizou o software HOMER para modelar dois subcenários do sistema elétrico, nos quais painéis fotovoltaicos associados ao sistema auxiliariam o fornecimento de eletricidade.

O primeiro subcenário considerou a instalação de painéis limitada pela área de telhado das estações e terminais, o que resultou em um sistema fotovoltaico de 6,2 MW de potência de pico. Vale destacar que este valor de potência nominal supera a capacidade da maior usina fotovoltaica em operação no país, porém, está abaixo do que o sistema demanda. Dessa forma, o número de painéis pode ser aumentado para garantir uma maior participação solar na energia utilizada pelo sistema.

Baseado nisso, o segundo desconsiderou essa limitação de área, o que permitiu dimensionar um gerador fotovoltaico de 64MW (muito superior, inclusive, ao que o Brasil tem instalado hoje de geração fotovoltaica, cerca de 23MW). Assim, este sistema foi inserido no modelo apenas em caráter de pesquisa, para avaliar o comportamento da energia solar no sistema, pois estão claros a sua complexidade e os obstáculos para se tornar viável tamanha instalação.

Após executar o modelo com estes cenários, fica claro que a proposta de instalação de sistemas fotovoltaicos ainda não é viável para o negócio. Os motivos para isso podem estar atrelados ao considerável custo inicial de instalação, que não é compensado pelos créditos gerados em energia, dado o valor de tarifa relativamente baixo do qual se beneficia este serviço público.

Considerando um possível cenário de taxação de carbono, mesmo a um custo de US\$50/tonCO_2, ainda assim, os painéis não se tornam a primeira opção. O preço de "*break-even*" que tornaria preferível a adoção das placas está na ordem de US\$340/tonCO_2, valor inimaginável em qualquer negociação para uma Economia de Baixo Carbono. A explicação para este efeito é o já baixo fator de emissão da matriz elétrica brasileira, que faz com que a adoção da energia solar no sistema não seja tão significativa na redução das emissões em relação aos custos de investimento no sistema. De fato, verifica-se a cada cenário com menor emissões, maiores são os esforços para reduzi-las, refletindo em custos maiores por toneladas de CO_2 evitadas. Afinal, já no primeiro cenário de eletrificação, a redução em relação ao cenário de referência é superior a 90%, restando uma margem pequena para medidas adicionais de redução nas emissões.

Por outro lado, apesar do alto custo, a inserção de geração fotovoltaica atrai grande interesse da sociedade em virtude dos benefícios ambientais associados. É importante que as autoridades locais busquem incentivar a maior participação de fontes limpas, como a fotovoltaica, na matriz energética da região. Nesse sentido, os cenários com inserção de fontes renováveis contribuem significativamente pois, mesmo o cenário de menor penetração fotovoltaica, conta com uma capacidade duas vezes superior à atual maior usina fotovoltaica em operação do país. Neste cenário, seriam gerados 7,6GWh/ano, a um custo nivelado de US$ 104/MWh.

Uma das hipóteses iniciais desta dissertação era de que as características de operação dos sistemas de média capacidade propiciariam boas condições para lidar com esta geração intermitente. De fato, a operação em vias segregadas, com maior previsibilidade, contínuo consumo de energia e veículos dotados de dispositivos de armazenamento de energia elétrica, permitem administrar as cargas do sistema para minimizar os impactos na rede. Além disso, o elevadíssimo consumo exigido pela operação de transporte, permite que as tecnologias de autoprodução de energia possam ser dimensionadas com grandes potências de projeto que, ainda assim, a geração de energia estaria exclusivamente atendendo ao uso especificado para ela.

Os resultados no cenário de menor penetração fotovoltaica apresentam excessos de energia de 0,6 kWh/ano, com os picos de potência não ultrapassando 1,2W. A exportação para a rede torna-se uma interação insignificante para ser considerado qualquer impacto elétrico. Ademais, a instantânea utilização da energia gerada reduz perdas e maximiza o aproveitamento da energia limpa. Com isso, comprova-se que o sistema proposto é uma boa aplicação de uso direto da energia, podendo assumir um papel importante para a maior participação de fontes alternativas.

Portanto, fica claro que a escolha baseada puramente nos custos não é capaz de captar benefícios como este. Vale ressaltar que a inserção dos painéis, relativamente, não encarece tanto o custo total do projeto, além da instalação agregar valor a áreas inutilizadas pelo empreendimento. Dessa forma, é importante que sejam desenvolvidos incentivos para promoção do uso desta fonte.

Com o intuito de orientar o planejamento de medidas nesse sentido, o estudo realizou uma análise de sensibilidade para os parâmetros: tarifa de energia elétrica e custos do sistema

fotovoltaico. Constatou-se que opção pela implantação dos painéis fotovoltaicos torna-se viável em cenários com aumentos superiores a cerca de 29% na tarifa de energia ou com redução entorno de 27% no custo do sistema fotovoltaico. No entanto, deve-se ter atenção ao fato de que aumentos na tarifa de energia podem inviabilizar a adoção de sistema de transporte elétrico. Portanto, para o sistema proposto ações nesse sentido não trariam o resultado esperado.

Por fim, conclui-se que, de maneira geral, todos os objetivos estabelecidos nesta dissertação foram tratados e o estudo apresentou avanços para o planejamento do setor de transportes associado a questões energéticas e ambientais. Por outro lado, ao longo do texto, foram tratadas limitações encontradas, no intuito de que sirvam de base para aprimoramento em estudos posteriores. Assim, para o fechamento do trabalho, são apresentadas a seguir propostas de trabalhos futuros:

- De início, já é possível apontar para a possibilidade da metodologia desenvolvida ser aplicada incluindo outras alternativas de sistemas de média capacidade e outros corredores, bem como, considerando inovações tecnológicas, veículos mais modernos e combustíveis alternativos.
- Da mesma forma, os princípios do modelo servem de base para a incorporação de uma análise considerando todos os tipos de modais de transporte.
- No modelo de escolha das alternativas de transporte, novos estudos podem buscar aprimorar a forma do modelo captar o perfil de demanda. Assim como, sua análise de sensibilidade que também carece de aperfeiçoamentos, no sentido de permitir a variação dos parâmetros de forma separada para cada tecnologia.
- Além de variar as tecnologias de transporte, há também a possibilidade de que estudos futuros incluam outras fontes para autoprodução de energia no sistema e as comparem. Avaliando o potencial efeito na matriz elétrica da região e a contribuição na redução de emissões.
- Em relação ao papel que o sistema proposto pode assumir para maior inserção de fontes alternativas, uma proposta é dimensionar os sistemas de armazenamento presente nos veículos avaliar como auxiliam na integração

com o setor elétrico e na absorção de intermitência das fontes alternativas. Quantificando a atenuação dos impactos efetuada por eles, bem como, pelas possíveis medidas operacionais de controle de carga do sistema

- Outra questão possível de ser abordada é a valoração das externalidades apontadas na dissertação, para serem inseridas na análise de custos.
- Por fim, é fundamental o desenvolvimento de incentivos adequados ao sistema proposto, assim como, o estudo de políticas públicas que promovam sua implantação.

7 REFERÊNCIAS

ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira.** [s.l] Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos/Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). Junho de 2012.

ABRAMOVITCH, F. **Avaliação dos impactos ambientais da operação do sistema Bus Rapid Transit (BRT) no município do rio de Janeiro, o caso da TransOeste**. Monografia de graduação, Escola Politécnica/UFRJ. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009384.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

ALLPORT, R. J. "The costing of bus, light rail transit, and metro public transport systems.", **Traffic Engineering and Control,** n. 22, pp. 633–639. 1981.

ALOUCHE, P., "Metrô: Definindo os Termos". **Revista Engenharia**, v. 69, ed. 607, pp.103-110. São Paulo, 2011.

ALOUCHE, P., "Sistemas Estruturais de Transporte: Alta e Média Capacidade". **Transpo Quip Latin America.** São Paulo, 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012.** Brasil : Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Brasil : Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Comparativo 2003-2012.** Associação Nacional de Transporte Público (ANTP). Julho de 2014. Disponível em: <http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/userFiles/SIMOB/Comp_Sum%20Exe_03_12_V1.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

BACEN. **Relatório de Inflação**. v. 18, nº 4. Banco Central do Brasil (BACEN). Dezembro de 2016. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/htms/relinf/port/2016/12/ri201612P.pdf>, Acesso em: Março de 2017.

BAENINGER, R., **População e Cidades: subsídios para o planejamento e para as políticas sociais.** Campinas : Núcleo de Estudos de População-Nepo/Unicamp; Brasília: UNFPA, 2010.

BARAN, R., **A introdução de veículos elétricos no brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.** Tese de D.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

BARRERO, R., VAN MIERLO, J., TACKOEN, X., "Energy Savings in Public Transport.", **IEEE Vehicular Technology Magazine**. Vol. 3, Issue 3, pp. 26-36. Setembro de 2008.

BEHENCK, I., **Estudo comparativo da viabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, através do software HOMER**. Monografia de Graduação. Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

BEL, G. & HOLST, M., **Evaluation of the Impact of Bus Rapid Transit on Air Pollution**. Research Institute of Applied Economics (IREA), Barcelona, 2015.

BERNARDES, F. F., **Mobilidade Urbana Sustentável e Inclusiva: proposta de implantação de VLT.** Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

BIAGUE, K. L. "Mini usinas solares fotovoltaicas em sistemas de transporte rápido por ônibus – BRT (Bus Rapid Transit)." **XXV Prêmio Jovem Cientista – Cidades Sustentáveis**. Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix (IMIH), Belo Horizonte, 2011.

BORBA, B., **Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro**. Tese de D.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

BRITO, F., "O deslocamento da população brasileira para as metrópoles." **Estudos Avançados**, v. 20, n.57, pp. 221-236. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142006000200017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2017.

BRITO, F., HORTA, C. e AMARAL, E. "A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas." **International Union for the Scientific Study of Population.** Campinas, 2002. Disponível em: http://www.abep.nepo.unicamp.br/iussp2001/cd/GT_Migr_Brito_ Horta _Amaral_Text.pdf . Acesso em: Março de 2017.

BRUUN, E. "Bus Rapid Transit and Light Rail: Comparing Operating Costs with a Parametric Cost Model." **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1927, pp. 11–21. 2005.

CABRAL, R. "Operando sistemas BRT com qualidade no Rio de Janeiro"**. Seminário Nacional NTU**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://novoportal.ntu.org.br/novo/upload/evento/Apresentacao635091309308206680.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

CABRAL, R., et al. "BRT Transoeste: transformando o conceito de transporte público no Rio de Janeiro**." 19° Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito.** Brasília, 2013a. Disponível em: <http://www.fetranspordocs.com.br/downloads/13BRTTransoeste.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

CABRAL, R., et al.; "Transporte público no Rio de Janeiro: encontrando soluções para uma mobilidade sustentável". **19° Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito.** Brasília, 2013b. Disponível em: <http://www.fetranspordocs.com.br/downloads/17Transporte publicoRio.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017.

CALDERÓN, P. e HAGEN, J. **Recomendações para Integração do Transporte Não-Motorizado no Corredor T5, na Cidade do Rio de Janeiro**. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP), Novembro, 2009. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/T5_NMT_ITDP.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017.

CASELLO, J.; VUCHIC, V., "Urban transit". In: Meyer, M. (ed), **Transportation Planning Handbook.** 3ª ed., Chapter 16. Washington, DC, Institute of Transportation Engineers, 2009.

CASELLO, J., LEWIS, G., YE, K., "A Transit Technology Selection Model.". **Journal of Public Transportation**, Vol. 17, No. 4, 2014.

CCR. **Estudo Preliminar e Provisório de Implementação do Veículo Leve Sobre Trilhos na Região Portuária e Centro do Rio de Janeiro**. Companhia de Concessões Rodoviárias (CCR). Projeto do Porto Maravilha. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.portomaravilha.com.br/conteudo/estudos/estudo_tecnico_preliminar_vlt_ccr.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

CEDES. "O Desafio da Mobilidade Urbana". **Série Estudos Estratégicos**. n.7. Brasília : Câmara dos Deputados : Centro de Estudos e Debates Estratégicos (CEDES), 2015.

Centro Clima. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa da cidade do Rio de Janeiro em 2012 e atualização do plano de ação municipal para redução das emissões**: Resumo Técnico. Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2013.

CGPU. **Relatório do Plano Diretor da Cidade do Rio de Janeiro**. Proposta de Política Urbana. Rio de Janeiro : Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (PCRJ) : Secretaria Municipal de Urbanismo : Coordenadoria Geral de Planejamento Urbano (CGPU), 2009.

CMP. **Diagnóstico Urbano-Ambiental da Cidade do Rio de Janeiro - 2015**. Sistema Integrado de Planejamento e Gestão Urbana. Versão 25. Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Urbanismo : Coordenadoria de Macro Planejamento (CMP), 2016.

CMRJ. **Lei Complementar nº 111, de 1º de fevereiro de 2011.** Rio de Janeiro : Câmara Municipal do Rio de Janeiro (CMRJ), 2011a. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4600307/4117400/lei_compl_111.pdf>. Acesso em: Março de 2017

CMRJ. **Lei Complementar nº 16, de 4 de Junho de 1992.** Rio de Janeiro : Câmara Municipal do Rio de Janeiro (CMRJ), 1992. Disponível em: <http://mail.camara.rj.gov.br/APL/Legislativos/contlei.nsf/573ad0b372ea8c96032564ff00629eae/758414dfee085d47032577220075c7e4?OpenDocument>. Acesso em: Março de 2017

CMRJ. **Lei Municipal de Mudanças Climáticas (Lei nº 5.248, de 27 de Janeiro de 2011**). Rio de Janeiro : Câmara Municipal do Rio de Janeiro (CMRJ), 2011b. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/148105/DLFE-260353.pdf/LEIMUN5.2.4.8.2.0.1.1.GEE.pdf>. Acesso em: Março de 2017

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro : Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) : Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), 2014.

DOWLING, P. e GRAY, M. **End of the load for coal and gas? Challenging power technology assumptions**. Carbon Tracker : September, 2016. Disponível em: <http://www.carbontracker.org/wp-content/uploads/2016/09/LCOE-report-v7.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017

DULAC, J. "Estimating road and railway infrastructure capacity and costs to 2050". **Global land transport infrastructure requirements**. OECD/IEA - International Energy Agency, Paris, França, 2013.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015**. Rio de Janeiro : Ministério de Minas e Energia (MME) : Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

EPE. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos.** Rio de Janeiro : Ministério de Minas e Energia (MME) : Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014.

EPE. "Consolidação de Bases de Dados do Setor Transporte: 1970-2010". **Estudos Associados ao Plano Decenal de Energia PDE 2021**. Nota Técnica SDB-Abast nº 1. Rio de Janeiro : Ministério de Minas e Energia (MME) : Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28/

Consolida%C3%A7%C3%A3o%20de%20Bases%20de%20Dados%20do%20Setor%20Transporte%201970-2010%20-%20PDE%202021.pdf>. Acesso em: Fevereiro de 2017.

FEIJÓ, C. **Fontes renováveis de energia para a Estação Antártica Comandante Ferraz da Marinha do Brasil**. Dissertação de M.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

FETRANSPOR. **Avaliação do BRT TransOeste**. Federação das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Rio de Janeiro (FETRANSPOR). Abril de 2013.

FETRANSPOR. "BRT pelo Mundo". **Revista Ônibus**. Ed. 89, ano XV. Rio de Janeiro, Maio/Junho de 2015.

FETRANSPOR. "VLT Carioca: mais um passo em favor da mobilidade urbana." **Revista Ônibus**. Ed. 95, ano XVI. Rio de Janeiro, Junho/Julho 2016.

FIRJAN. **Desafios do Rio de Janeiro para a Copa do Mundo de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016: transporte**. Nota Técnica Nº 1. Rio de Janeiro : Gerência de Infraestrutura e Novos Investimentos/ Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN), Fevereiro de 2010.

FUNDO VERDE. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica - Linha circular de veículo leve sobre trilho (VLT) na Ilha do Fundão com conexão com a região do Porto Maravilha e da Ligação Aquaviária entre a Ilha do Fundão, Praça XV e Praia Vermelha.** Rio de Janeiro : Fundo Verde/COPPE/UFRJ, 2014.

GILBERT, R.; PERL, A.; "Grid-connected vehicles as the core of future land-based transport systems." **Energy Policy**, Vol. 35, pp.3053–3060. 2007.

GOMIDE, A. "A. Agenda governamental e o processo de políticas públicas - o projeto de lei de diretrizes da política nacional de mobilidade urbana". **Texto para discussão nº 1334**. Brasília : Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2008.

GOMIDE, A. A. "Instrumentos de desestímulo ao uso do transporte individual motorizado: lições e recomendações". In: Gomide, A. & MORATO, R., **Série Temas em Debate**. São Paulo : Instituto Energia e Meio Ambiente, 2011.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis – PLAMUS**. Logit Engenharia Consultiva, Strategy&; Machado Meyer Sendacz e Opice Advogados. Florianópolis, Outubro, 2015.

GROTH, J. A. **Usina De Geração Fotovoltaica**. Monografia de graduação, Escola de Engenharia/UFRS. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96209/000915411.pdf?sequence=1>. Acesso em: Março de 2017.

HICKMAN, R.; GIVONI, M.; BONILLA, D.; BANISTER, D.; **Handbook on Transport and Development**. 1ª ed. Cheltenham, UK : Edward Elgar, 2015.

HODGSON, PAUL; POTTER, STEPHEN; WARREN, JAMES; GILLINGWATER, DAVID., "Can bus really be the new tram?". **Research in Transportation Economics**, No. 39(1) pp. 158–166, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.retrec.2012.06.009>. Acesso em: Janeiro de 2017.

HSU, L. R., **Capacity-based cost modeling for light rail and bus rapid transit systems**. Dissertation M.Sc. Florida International University, Miami, 2005.

HUGHES, C.; LESHNER, E., **Impact Analysis of Transoeste Bus Rapid Transit System in Rio de Janeiro**. Institute for Transportation & Development Policy (ITDP), Abril de 2013. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/Transoeste_Analysis_FINAL.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017.

IBGE. **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil**. 2ª edição. Rio de Janeiro : Coordenação de Geografia/ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2015. Disponível em: <www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015>. Acesso em: Janeiro de 2017

IEA & NEA. **Projeted Costs of Generating Electricity**. France : Organization For Economic Co-Operation And Development/ International Energy Agency (IEA) & Nuclear Energy Agency (NEA), 2015.

IEA. **Key World Energy Statistics**. Paris : International Energy Agency (IEA), 2015.

IPEA. “Indicadores de mobilidade urbana da PNAD 2012”. **Comunicados do IPEA Nº 161**. Brasília :Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Outubro de 2013.

ITDP & SeMob. **Manual do BRT: Guia de Planejamento**. Brasília : Ministério das Cidades : Secretaria Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana (SeMob) & Institute for Transportation and Development Policy (ITDP), Dezembro de 2008.

ITDP. **Análise de Impacto do BRT TransCarioca na Mobilidade Urbana do Rio de Janeiro**. Institute for Transportation & Development Policy (ITDP), Março de 2015. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2015/04/ITDP-Brasil_An%C3%A1lise-Impacto-BRT-TransCarioca_em-PT_vers%C3%A3o-WEB-para-site.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017

IZAGA, F., “BRT no Rio de Janeiro – transformações e mobilidade urbana”. **III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.** São Paulo, 2014

JICA. **The Preparatory Survey for Urban Transport Development Project in São Paulo**. Japan International Cooperation Agency (JICA), Maio de 2010. Disponível em: <http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12079588_01.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017

KAIN, J. F. “Choosing the Wrong Technology: Or How to Spend Billions and Reduce Transit Use”, **Journal of Advanced Transportation,** Vol. 21, Issue 3, pp. 197-213. 1988.

KÜHN, F., “Bus Rapid or Light Rail Transit for Intermediate Cities?”. **X International Codatu Conference**. Lisse, 2002. Disponível em: <http://www.codatu.org/wp-content/uploads/Bus-rapid-or-light-rail-transit-for-intermediate-cities-F.-KUHN.pdf>. Acesso: Março de 2017

LAMBERT, T.; LILIENTHAL, P.; GILMAN, P., “Micropower System Modeling With Homer”. In: Marcelo Godoy Simões e Felix A. Farret (eds). **Integration of Alternative Sources of Energy**, Chapter 15, New Jersey, USA : Wiley-IEEE Press, 2006.

LEITE, A.; LEITE, C; SILVA, D. M.; HORÁRIO, E; BASTOS, J. T.; BRIZON, L.; PIRES, L.; MANCINI, M.; LEOPOLDINO, P.; CABRAL, R; “O TransCarioca modificando o

sistema de BRT do Rio". **20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito**. Santos, 2015. Disponível em: <http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2015/06/17/8F3B86F4-A768-4B70-98A3-5EE63556DAB4.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

LERNER, J. **Avaliação Comparativas da Modalidades de Transporte Público Urbano**. Curitiba : Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), 2009. Disponível em: <http://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub635109537433018893.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017

LEVINSON, H. S.; ZIMMERMAN, S.; CLINGER, J.; RUTHERFORD, C. S., "Bus Rapid Transit: An Overview", **Journal of Public Transportation**. Vol. 5, No. 2. 2002.

LI, Z.; GUO, Q; LAM, W., "Transit technology investment and selection under urban population volatility: A real option perspective", **Transportation Research Part B**, Vol. 78, pp. 318-340. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.006>. Acesso em: Março de 2017.

LIMA, G., **Metodologia de Avaliação Econômico-Ambiental das Emissões Veiculares na Implantação de um Sistema BRT**. Dissertação M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

LOURENÇO, R., "Rio de Janeiro Além de 2016: um Projeto para a Nova Geração de Infraestrutura em Transportes". **Textos para Discussão**. Brasília : Instituto de Pesquisa Econômica Aplicadas (IPEA), 2015.

MAIA, V. C., **Análise do Potencial de Eficiência Energética no Setor de Transporte Rodoviário de Cargas Brasileiro**. Dissertação M.Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

MARINS, K., **Proposta Metodológica para Planejamento Energético no Desenvolvimento de Áreas Urbanas**. Tese D.Sc., USP, São Paulo, 2010.

MEYER J. R.; KAIN, J. F.; WOHL, M.; **The Urban Transportation Problem**. 1ª ed. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1966.

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

MMA. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: ano base 2012**. Brasília : Ministério do Meio Ambiente, 2013.

MOCCIA, L.; LAPORTE, G.; "Improved Models for Technology Choice in a Transit Corridor with Fixed Demand". **Transportation Research Part B**.Vol. 83, pp. 245–270. 2015

MOTTA, M. W. V.; **O Veículo Leve Sobre Trilhos: Considerações sobre os seus atributos como justificativa para a sua implantação**. Dissertação de M.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

MOTTA, R. A.; **Benefícios Ambientais em Decorrência da Implantação de Sistemas de Transporte Rápido e de Alta Capacidade de Ônibus – O Caso do Transmilênio**. Dissertação de M.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica.** Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). São Paulo : Instituto de Energia e Ambiente da USP : Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, 2015.

NTU. **Anuário NTU: 2015-2016.** Brasília : Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), 2016.

NTU. "Avanço tecnológico contribui para melhorar gestão e serviço de empresas de ônibus urbanos no Brasil". **Revista NTU Urbano**, Ano III, Número 15. Brasília : Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), 2015.

NTU. **Estudo de BRTs do Brasil**. 2ª ed. Brasília : Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), 2012.

OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES. **Estado da motorização individual no Brasil – Relatório 2015**. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional – IPPUR, 2015.

OLIVEIRA, G. T.; MOURA, I. B.; ROCHA, J. P.; "Análise da Equidade de Impactos do BRT TransCarioca". **XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET**. Ouro Preto, 2015. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/xxixanpet/anais/documents/AC979.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

OLIVEIRA, G. T.; ANDRADE, C. E. S.; LEAL JUNIOR, I. C.; NASSI, C. D.; LINKE, C. C.; "Redução de Emissões de Dióxido de Carbono com a Implementação do BRT Transoeste na Cidade do Rio de Janeiro". **XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**. Curitiba, 2014. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/xxviiianpet/anais/documents/AC129.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

OLIVEIRA, G. T.; ROSA, B.; "Comparativo de Desempenho de Sistemas de Transporte Público de Média Capacidade Via AHP - Estudo BRT x VLT no Rio de Janeiro". **XXVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. Belém, 2013. Disponível em: <www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/375_AC.pdf>. Acesso em: Outubro de 2016.

PDTU. **Plano Diretor de Transporte Metropolitano do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro : Governo do Estado do Rio de Janeiro : Secretaria de Estado de Transportes (SETRANS) e Companhia Estadual de Transportes e Logística (CENTRAL), 2016.

PERO, V.; MIHESSEN, V.; "Mobilidade Urbana e Pobreza no Rio de Janeiro". **Série Working Paper BNDES/ANPEC**, No. 46, Setembro de 2012.

PRATELLI, A., **Public Mobility Systems**. 1ª ed. Southampton, Boston, WIT Press, 2014

QIN, J.; WEISSMANN, J.; EURITT, M. A.; MARTELLO. M; "Evaluating the Full Costs of Urban Passenger Transportation". **Transportation Research Record**, nº 8, issue 1518, pp. 57 – 64. 1996

RAMJERDI, F.; FEARNLEY, N.; "Risk and Irreversibility of Transport Interventions". **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. Vol. 60, pp. 31–39. 2014

RECK, G. **Apostila de Transporte Público Oferecida pelo Departamento de Transporte da Universidade Federal do Paraná.** 2015. Disponível em: < http://www.dtt.ufpr.br/Transporte%20Publico/Arquivos/TT057_Apostila.pdf>. Acesso em: Março de 2017

RIBEIRO, G. R.; MAGRINYÀ, F.; ORRICO FILHO, D. R.; "Study of the changes in urban mobility of the Brazilian middle class, brought about by the population's increased income, and the ensuing impact on urban mass transit". **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. Vol. 160, pp. 294 – 303. 2014.

RODRIGUES, C. R. C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Dissertação de M.Sc. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RODRIGUES, N.; LOSEKANN, L. D.; "Análise da demanda por óleo diesel no Brasil". In: **5th Latin American Energy Economics Meeting**, Medellín, Colômbia, 2015.

SANTOS, P. M., **A percepção da Importância dos Atributos do Transporte Coletivo**. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SAUAIA, R. L. "Energia Solar Fotovoltaica: Potencial, Oportunidades e Desafios". **Audiência Pública da Comissão Mista Permanente sobre Mudanças Climáticas**. Brasília : Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), 2016.

SCHEIDT, P.; KONZEN, G**.; O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica em 2013**. Florianópolis : Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL), Novembro de 2014.

SENNA, L. A. S., **Economia e Planejamento dos Transportes**. 1ª ed. Rio de Janeiro : Elsevier, 2014.

SETRANS. **Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro : Governo do Estado do Rio de Janeiro : Secretaria de Transportes (SETRANS), 2013.

SIEDLER, C. E., “Can bus rapid transit be a sustainable means of public transport in fast growing cities? Empirical evidence in the case of Oslo”. **Transportation Research Procedia**. Vol. 1, issue 1, pp. 109 – 120. 2014

SILVA, R. M., **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Textos para Discussão nº 166. Brasília : Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado Federal, Fevereiro de 2015.

SIMON, E. C., **Avaliação de Impactos da Recarga de Veículos Elétricos em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de M.Sc. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SINHA, K. C.; LABI, S., **Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming**. 1º ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007.

SIPLAN. **Relatório Anual de Acompanhamento do Plano Diretor**. Rio de Janeiro : Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (PCRJ) : Coordenadoria de Macroplanejamento (CMP) : Sistema Integrado de Planejamento e Gestão Urbana (SIPLAN), 2015.

SMAC-RJ & Centro Clima. “Plano de ação para redução de emissões de gases de efeito estufa da Cidade do Rio de Janeiro”. **Coleção Estudos Cariocas**. Nº 20110302. Rio de Janeiro: Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC-RJ)/Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro & Centro Clima/COPPE/UFRJ, Março de 2011.

SMAC-RJ & Centro Clima. “Apoio ao Governo do Estado do Rio De Janeiro para O Monitoramento das Emissões de Gases de Efeito Estufa”. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Rio de Janeiro – 2010**. Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC-RJ)/Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro & Centro Clima/COPPE/UFRJ, Setembro de 2013.

SMAC-RJ & COPPE. **Inventário e Cenário de Emissões dos Gases de Efeito Estufa da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC-RJ)/Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro & COPPE/UFRJ, 2011.

SMO. **Relatório Ambiental Simplificado - Corredor Viário TransCarioca**. Rio de Janeiro : Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Obras (SMO), Junho de 2011.

SMTR. "Produto 3: Diagnóstico. Volume I: Contextualização". **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável - PMUS**. Rio de Janeiro : Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Transportes (SMTR), 2015a.

SMTR. "Produto 3: Diagnóstico. Volume II: Caracterização dos Deslocamentos e Componentes do Sistema de Mobilidade". **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável - PMUS**. Rio de Janeiro : Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro : Secretaria Municipal de Transportes (SMTR), 2015b.

TIRACHINI, ALEJANDRO, HENSHER, DAVID A. E JARA-DÍAZ, SERGIO R., "Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transport network." In: **Transportation Economics** 29, Issue 1, pp. 231-242, 2010.

UITP. "Light rail in Figures - Statistics Brief." **Worldwide outlook.** International Association of Public Transport (UITP), October, 2015. Disponível em: <http://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP_Statistic_Brief_4p-Light%20rail-Web.pdf>. Acesso em: Março de 2017

VIBHUTI, A. "Concept of 'Mass' in Mass Public Transit Systems". **International Conference Transportation Planning and Implementation Methodologies For Developing Countries (TPMDC).** Mumbai, 2008. Disponível em: <http://www.worxpace.net/resource/Concept%20of%20%27mass%27%20in%20mass%20transit%20systems%20-%20TPMDC%202008-%20F.pdf>. Acesso em: Março de 2017.

VUCHIC, V. R. "Light Rail and BRT: Competitive or complementary?", **Public Transport International.** Vol. 5, pp. 10-13. 2005.

VUCHIC, V. R., **Urban Transit Systems and Technology.** New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ZHANG, M. “Meta-Analysis of Cost Characteristics, Carrying Capacities and Land Use Impacts”. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2110, pp. 87–95. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2009.