



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**VANESSA VIEIRA DE SOUSA**

**USO DA SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA PARA A AVALIAÇÃO DO TEMPO DE  
VIAGEM DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS EM  
CORREDORES DE TRÁFEGO MISTO**

**FORTALEZA**

**2016**

VANESSA VIEIRA DE SOUSA

USO DA SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA PARA A AVALIAÇÃO DO TEMPO DE  
VIAGEM DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS EM  
CORREDORES DE TRÁFEGO MISTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre (M. Sc.) em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S698u Sousa, Vanessa Vieira de.  
Uso da Simulação Microscópica para a Avaliação do Tempo de Viagem de Sistemas de Transporte Público por Ônibus em Corredores de Tráfego Misto / Vanessa Vieira de Sousa. – 2016.  
107 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho.  
Coorientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.
1. Microssimulação do Tráfego. 2. Transporte Público por Ônibus. 3. Vissim. I. Título.
- CDD 388
-

VANESSA VIEIRA DE SOUSA

USO DA SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA PARA A AVALIAÇÃO DO TEMPO DE  
VIAGEM DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS EM  
CORREDORES DE TRÁFEGO MISTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre (M.Sc.) em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 31/10/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. PhD. Flávio José Craveiro Cunto (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Leise Kelli de Oliveira (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Aos meus pais, Norma e Ivan, que sempre investiram na minha formação pessoal e acadêmica.

Ao Helry, por estar sempre ao meu lado em todos esses anos.

A todos que contribuíram de alguma forma nesta intensa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, saúde e determinação necessários para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor e esforço despendido para me proporcionar todas as ferramentas em minha caminhada acadêmica.

Ao Helry, pelo amor e por estar ao meu lado em todos esses anos, acreditando e lutando, em busca de nossos sonhos.

Ao meu orientador Mário Azevedo, pelo conhecimento transmitido, paciência, incentivo e exemplo de ser humano.

Ao meu coorientador Flávio Cunto, por acreditar neste trabalho, por todo conhecimento transmitido e todas as injeções de ânimo.

Ao professor Bruno Bertocini, por contribuir tão significativamente no planejamento desta pesquisa e por ser uma figura tão inspiradora aos que passam pelo PETRAN.

A todo o CTAFOR, pelo apoio técnico, logístico e motivacional.

Aos pesquisadores e funcionários do Grupo de Pesquisa em Transportes, Trânsito e Meio Ambiente – GTTEMA, pelas contribuições na elaboração deste trabalho.

A todos os colegas de curso – em especial, Lisel e Ximena – pelo apoio na coleta de dados e pela presença nos bons momentos vividos nesta caminhada.

Aos amigos Lara e Bruno, pelo incentivo e auxílio nas coletas de dados.

Ao SINDIÔNIBUS e ETUFOR, por disponibilizarem todos os dados solicitados.

À PTV, desenvolvedora do simulador VISSIM, por disponibilizar a licença-tese com o modelo VISWALK.

A todos que, de alguma forma, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Atualmente, a microssimulação apresenta-se como uma das principais ferramentas de análise de sistemas de transportes. O potencial para a utilização da mesma em análises de aspectos relacionados à operação dos sistemas de transporte público urbano ainda não foi analisado de forma aprofundada, mais especificamente, no que diz respeito à representação adequada de atributos geométricos e operacionais, da movimentação dos veículos e sua interação com o tráfego misto. Os estudos realizados com esta ferramenta para modelagem do transporte público por ônibus têm sido voltados para a análise do impacto deste modo na fluidez do tráfego. A partir deste contexto, este trabalho tem como principal objetivo avaliar a utilização da microssimulação na modelagem do transporte público por ônibus em áreas urbanas brasileiras. Foram identificados os principais elementos presentes em tais sistemas para se compreender como estes influenciam em seu desempenho operacional e como devem ser representados nos microssimuladores do tráfego, já que a simulação microscópica é a ferramenta ideal para analisar tais componentes e as interações entre veículos e passageiros. As ferramentas para modelagem do transporte público por ônibus de dois dos microssimuladores mais usados na atualidade, nos meios técnico e acadêmico, foram estudadas e as vantagens e desvantagens presentes em Aimsun e Vissim foram identificadas. Um corredor de ônibus da cidade de Fortaleza foi utilizado como estudo de caso, em que foram analisadas com mais profundidade as funcionalidades do Vissim, simulador que se mostrou o mais completo em simulações de sistema de transporte público por ônibus, e o esforço necessário para calibrar seu modelo carro seguidor. Os resultados obtidos mostram a importância da coleta de dados nos pontos de parada, pois a eficaz codificação deste componente influencia fortemente nos tempos de viagem dos ônibus e facilita o processo de calibração. Também foi possível concluir que, apesar de algumas limitações, a microssimulação consiste em uma ferramenta eficaz em estudos de transporte público, mas é fundamental a obtenção dos valores de campo da maior quantidade possível dos parâmetros de entrada. Estes valores podem variar significativamente de acordo com a área de estudo ou tipo de operação de transporte público. Além do alcance do principal objetivo deste trabalho, espera-se facilitar aos analistas a escolha de um simulador para seus estudos específicos e mostrar quais e se é possível contornar certas limitações dos microssimuladores.

**Palavras-chave:** Microssimulação do Tráfego. Transporte Público por Ônibus. Vissim

## **ABSTRACT**

Currently, the microsimulation is presented as one of the main tools of transportation system analysis. The potential of its use in related aspect analysis to operation of urban public transport systems has not been reviewed in detail, specifically in regard to the proper representation of geometrical and operational attributes, vehicle movement and their mixed traffic interaction. Studies with this tool for public transportation modeling by bus have been focused on impact analysis of this mode on traffic flow. From this context, this research aims to evaluate the use of microsimulation of public transport modeling by bus in Brazilian urban areas. The main elements present in such systems were observed to understand their influence on its operational performance and how they should be represented in traffic microsimulators, since the microscopic simulation is the ideal tool for analyzing such components and the interactions between vehicles and passengers. The operational performance modeling of public transportation by bus of two microsimulators most used today in technical and academic means was investigated and found advantages and disadvantages in AIMSUN and Vissim. A bus lane in the city of Fortaleza was used as a case study, which were analyzed more deeply the functionalities of Vissim, simulator that showed the most complete in public transportation system by bus simulations, and the effort needed to calibrate your car following model. The results show the importance of collecting data on breakpoints, because the effective coding of this component strongly influences on the bus travel times and make the calibration process easier. It was also concluded that, in spite of some limitations, the microsimulation consists in an effective tool for public transportation studies, but obtaining from the field values of the largest possible quantity of input parameters is crucial. These values can vary significantly depending on the area of study or type of public transport operation. Beyond the reach of the main objective of this work, is expected to ease to analysts the choice of a simulator for their specific studies and show which limitations and that you can overcome these microsimulators limitations.

**Keywords:** Traffic Microsimulation. Bus. Vissim

## LISTAS DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Crescimento percentual da frota de automóveis nas 15 principais metrópoles brasileiras, entre os anos de 2001 e 2012..... | 13 |
| Figura 2.1 - Espaço ocupado na via no deslocamento de aproximadamente 70 pessoas nos modos automóvel e ônibus.....                     | 18 |
| Figura 2.2 - Número de passageiros transportados por mês no modo ônibus urbano, em nove capitais brasileiras .....                     | 20 |
| Figura 2.3 - Paradas de ônibus dos tipos (a) plataforma e (b) placa.....   | 21 |
| Figura 2.4 - Tipos de ponto de parada em relação à posição da guia .....   | 22 |
| Figura 2.5 - Recomendação de projeto de pontos de parada para ônibus com 12m de comprimento .....                                      | 23 |
| Figura 2.6 - Parada posicionada antes do cruzamento.....   | 23 |
| Figura 2.7 - Distância mínima ideal entre pontos de parada em lados opostos de via estreita. ....                                      | 23 |
| Figura 2.8 - Ponto de parada e seus elementos.....   | 24 |
| Figura 2.9 - Terminal aberto (a) e terminal fechado (b) na cidade de Fortaleza .....   | 26 |
| Figura 2.10 - Tipos de baias empregadas em terminais de ônibus urbanos .....   | 27 |
| Figura 2.11 - Terminal composto por diferentes áreas .....   | 28 |
| Figura 2.12 - Ônibus articulado (a), convencional (b) e micro-ônibus (c), utilizados em Fortaleza.....                                 | 29 |
| Figura 2.13 - Função do tempo de parada em relação ao número de passageiros que embarcam .....   | 30 |
| Figura 2.14 - Corredor BRT na cidade de Fortaleza.....   | 35 |
| Figura 2.15 - Faixas exclusivas da cidade de Fortaleza, no sentido do fluxo (a) e no contrafluxo (b), respectivamente .....            | 35 |
| Figura 2.16 - TSP no corredor Portland Highway Valley, EUA .....   | 36 |
| Figura 2.17 - Relação entre os tipos de modelos, tamanho da rede e nível de detalhes .....   | 43 |
| Figura 3.1 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa. ....   | 52 |
| Figura 4.1 - Tipos de parada convencional (a), baia (b) e terminal (c) no Aimsun.....  | 59 |
| Figura 4.2 - Parâmetros para definição do quadro de horários das linhas no AIMSUN .....  | 62 |
| Figura 4.3 - Alguns parâmetros atrelados ao ônibus no AIMSUN.....  | 62 |
| Figura 4.4 - Modelo carro seguidor do AIMSUN .....   | 65 |
| Figura 4.5 - Rede hipotética construída no AIMSUN .....  | 66 |
| Figura 4.6 - Parâmetros necessários para codificar as linhas no VISSIM.....  | 68 |
| Figura 4.7 - Limites de percepção do modelo <i>car-following</i> de Wiedemann e Reiter (1992) .....                                    | 69 |
| Figura 4.8 - Rede hipotética construída no VISSIM .....  | 71 |
| Figura 4.9 - Área selecionada para o estudo de caso .....  | 74 |
| Figura 4.10 - Filmagem de um dos pontos de parada da área de estudo .....  | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.11 - Primeiro (a) e último (b) pontos de parada da área de estudo.....            | 77 |
| Figura 4.12 - Corredor representado no VISSIM com imagem do Google Earth de fundo..        | 81 |
| Figura 4.13 - Corredor representado no VISSIM sem imagem de fundo.....                     | 81 |
| Figura 4.14 - Itinerário das linhas 028, 098 e 816 .....                                   | 82 |
| Figura 4.15 - Itinerário da linha 701 .....  | 82 |
| Figura 4.16 - Passageiros embarcando no veículo.....                                       | 83 |
| Figura 4.17 - Função da aceleração máxima em relação à velocidade no Vissim .....          | 84 |
| Figura 4.18 - Área de espera utilizada pelos passageiros no ponto de parada 2 (tipo placa) | 88 |
| Figura 4.19 - Passageiros em pontos de parada no VISSIM .....                              | 88 |

## LISTAS DE TABELAS

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Tabela 2.1 -  | Divisão modal das viagens realizadas nas cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes, em 2012 .....  | 18 |
| Tabela 2.2 -  | Dados dos efeitos da mobilidade (por habitante, por dia) em municípios brasileiros com mais de 60 mil habitantes .....                                   | 19 |
| Tabela 2.3 -  | Efetividade dos berços de acordo com a quantidade no ponto de parada.....  | 25 |
| Tabela 2.4 -  | Características técnicas do ônibus no sistema de transporte público.....   | 29 |
| Tabela 2.5 -  | Níveis de segregação e tipos de tratamento da via .....  | 34 |
| Tabela 2.6 -  | Indicadores de qualidade do sistema de transporte público por ônibus.....  | 37 |
| Tabela 2.7 -  | Análise do potencial de modelagem de microssimuladores de tráfego realizada por Burgos (2004) .....  | 51 |
| Tabela 3.1 -  | Funcionalidades desejáveis nos microssimuladores na modelagem de sistemas de transporte público por ônibus.....  | 53 |
| Tabela 4.1 -  | Análise das funcionalidades dos microssimuladores AIMSUN e VISSIM.....   | 73 |
| Tabela 4.2 -  | Características operacionais das linhas presentes na área de estudo .....  | 74 |
| Tabela 4.3 -  | Especificações dos veículos empregados nas linhas da área de estudo .....  | 75 |
| Tabela 4.4 -  | Tempo total de viagem dos ônibus .....   | 78 |
| Tabela 4.5 -  | Influência do tempo de parada no tempo de viagem dos ônibus para cada linha .....  | 80 |
| Tabela 4.6 -  | Média de tempos de parada em segundos .....  | 85 |
| Tabela 4.7 -  | Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação com o método de distribuição.....   | 85 |
| Tabela 4.8 -  | Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação com o método de distribuição.....   | 86 |
| Tabela 4.9 -  | Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo avançado de pedestre, com os valores coletados em campo.....                        | 87 |
| Tabela 4.10 - | Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo avançado de pedestre, com os valores coletados em campo.....                        | 87 |
| Tabela 4.11 - | Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo Viswalk .....   | 89 |
| Tabela 4.12 - | Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo Viswalk .....   | 89 |
| Tabela 4.13 - | Resumo dos resultados das simulações com os respectivos tipos de modelagem do tempo de parada dos ônibus .....   | 90 |
| Tabela 4.14 - | Resumo do processo de calibração da medida de desempenho tempo de viagem para as quatro linhas presentes na rede, com os valores ótimos em destaque..... | 92 |
| Tabela 4.15 - | Resumo do processo de calibração da medida de desempenho tempo de parada para as quatro linhas presentes na rede, com os valores ótimos em destaque ..   | 93 |
| Tabela 4.16 - | Comparação dos erros antes e depois da calibração .....  | 94 |
| Tabela 4.17 - | Influência do tempo de parada no tempo de viagem dos ônibus .....  | 97 |

## SUMÁRIO

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>12</b>  |
| <b>1.1</b>   | <b>Problema e Questões de Pesquisa .....</b>   | <b>15</b>  |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos .....</b>   | <b>16</b>  |
| <b>1.3</b>   | <b>Estrutura de Dissertação .....</b>  | <b>16</b>  |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>17</b>  |
| <b>2.1</b>   | <b>Transporte Público por Ônibus .....</b>   | <b>17</b>  |
| <b>2.1.1</b> | <i>Componentes dos Sistemas de Transporte Público por Ônibus .....</i>               | <i>19</i>  |
| <b>2.1.2</b> | <i>Qualidade do Transporte Público por Ônibus .....</i>                              | <i>36</i>  |
| <b>2.2</b>   | <b>Simulação do Tráfego .....</b>  | <b>38</b>  |
| <b>2.2.1</b> | <i>Níveis de Agregação dos Modelos de Simulação de Tráfego .....</i>                 | <i>42</i>  |
| <b>2.2.2</b> | <i>Microsimulação do Tráfego .....</i>   | <i>45</i>  |
| <b>2.2.3</b> | <i>Aplicação da Microsimulação do Tráfego em Estudos de Transporte Público .....</i> | <i>48</i>  |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA .....</b>   | <b>52</b>  |
| <b>3.1</b>   | <b>Análise das Funcionalidades dos Microsimuladores .....</b>                        | <b>52</b>  |
| <b>3.2</b>   | <b>Construção e Análise do Experimento de Microsimulação .....</b>                   | <b>53</b>  |
| <b>3.2.1</b> | <i>Escolha da Área de estudo .....</i>   | <i>54</i>  |
| <b>3.2.2</b> | <i>Coleta de Dados de Fluxo de Veículos .....</i>                                    | <i>54</i>  |
| <b>3.2.3</b> | <i>Coleta de Dados de Fluxo de Passageiros .....</i>                                 | <i>55</i>  |
| <b>3.2.4</b> | <i>Codificação da Rede.....</i>  | <i>55</i>  |
| <b>3.3</b>   | <b>Calibração da Rede de Tráfego.....</b>  | <b>56</b>  |
| <b>4</b>     | <b>ESTUDO DE CASO.....</b>   | <b>58</b>  |
| <b>4.1</b>   | <b>Análise das Funcionalidades dos Microsimuladores .....</b>                        | <b>58</b>  |
| <b>4.1.1</b> | <i>AIMSUN .....</i>  | <i>58</i>  |
| <b>4.1.2</b> | <i>VISSIM .....</i>  | <i>66</i>  |
| <b>4.1.3</b> | <i>Vantagens e Desvantagens.....</i>   | <i>71</i>  |
| <b>4.2</b>   | <b>Construção e Análise do Experimento de Microsimulação .....</b>                   | <b>72</b>  |
| <b>4.2.1</b> | <i>Definição da Área de Estudo .....</i>   | <i>72</i>  |
| <b>4.2.2</b> | <i>Coleta de Dados .....</i>   | <i>75</i>  |
| <b>4.2.3</b> | <i>Codificação da Rede.....</i>  | <i>80</i>  |
| <b>4.3</b>   | <b>Calibração da Rede .....</b>  | <b>89</b>  |
| <b>4.4</b>   | <b>Análise dos Resultados.....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>98</b>  |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>100</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados nos centros urbanos brasileiros é o da mobilidade urbana. De acordo com um estudo do IPEA (2013), que analisou o tempo de viagem da população das grandes metrópoles urbanas nos percursos casa-trabalho, houve um aumento gradual da proporção de viagens longas, com duração acima de uma hora, no período de 1992 até 2009. O aumento da demanda pode desencadear redução da velocidade média das viagens. Segundo um levantamento realizado pela CET (2013), a velocidade média no pico da tarde nos principais corredores da cidade de São Paulo, de 2008 a 2012, reduziu-se de 20,6 km/h para 18,5 km/h. No pico da manhã, a principal cidade brasileira teve redução de 23,3 km/h para 22,1 km/h.

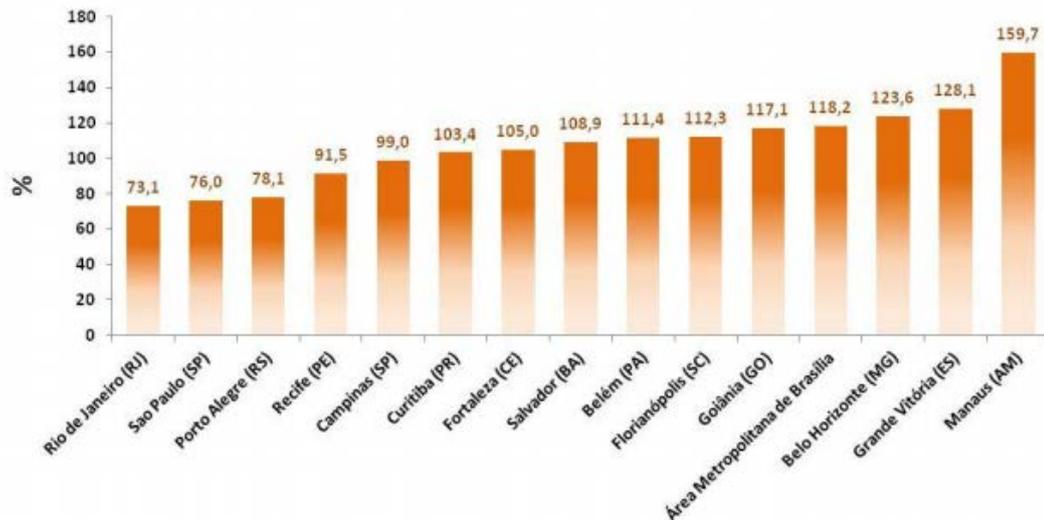
Este cenário de congestionamentos estimula o aumento de emissão de poluentes atmosféricos e de ruídos pelos veículos. MMA (2011) mostra que, entre 1980 e 2009, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aumentaram a uma taxa de 3,6% ao ano. A previsão é de que esta taxa seja de 4,7% ao ano, entre 2009 e 2020. Os dados também são preocupantes em termos de segurança do tráfego. De acordo com ONSV (2014), entre os anos de 2001 e 2012, o número de mortes em acidentes de trânsito aumentou quase 50%, totalizando mais de 453 mil vítimas neste período.

Conforme DENATRAN (2015), a frota brasileira de automóveis (emplacados) no ano de 2005 consistia em mais de 26 milhões. Em 2015, este valor subiu para mais de 49 milhões, ou seja, a frota de automóveis no Brasil aumentou consideravelmente em dez anos. No caso das motocicletas, este número subiu de aproximadamente 7 milhões em 2005 para mais de 20 milhões em 2015. INCT (2013) aborda o crescimento da frota de automóveis em 15 metrópoles brasileiras, entre os anos de 2001 e 2012, apresentando aumentos de até 159%, como visto na Figura 1.1. No estado de São Paulo, segundo a STM (2013), entre os anos de 2007 e 2012, as viagens realizadas por modo individual aumentaram 21%, ao mesmo tempo em que as viagens por modo coletivo cresceram 16%. Estes dados reforçam um cenário de aumento na busca de viagens utilizando transporte particular, o que implica em um aumento desproporcional de suas externalidades quando comparadas ao transporte público de alta capacidade.

O transporte público consiste em um dos serviços mais importantes para a eficácia e eficiência da mobilidade, pois se apresenta como alternativa aos problemas citados anteriormente. Um estudo publicado por CNI (2015) indica que a maioria dos brasileiros

(24%) utiliza o ônibus como principal modo de transporte nos percursos onde o destino consiste no local de trabalho ou estudo.

Figura 1.1 - Crescimento percentual da frota de automóveis nas 15 principais metrópoles brasileiras, entre os anos de 2001 e 2012



Fonte: INCT (2013).

Para Ferraz e Torres (2004), além de garantir à população acesso aos destinos desejados, um sistema de transporte público eficaz diminui a necessidade de altos custos em projetos de vias e estacionamentos para veículos particulares, reduz a ocorrência de congestionamentos e acidentes de trânsito e reduz os impactos ambientais negativos causados pela alta demanda de automóveis. O uso do transporte público em uma maior escala desencadeia ainda uma ocupação mais racional do solo urbano.

Atrair usuários do veículo particular, que é um modo mais confortável, para o transporte público é uma tarefa difícil, ainda mais quando o sistema de transporte público não se mostra eficiente. Segundo NTU (2013), entre os anos de 1994 e 2013, houve redução de 30% dos usuários pagantes do transporte público por ônibus. Os principais problemas encontrados pelos usuários do transporte coletivo urbano são:

- Altos tempos de viagem e baixas velocidades operacionais: Em uma pesquisa de 2002, foi medida a velocidade média dos ônibus em alguns corredores de grandes cidades brasileiras, no pico da tarde. O valor atingido foi de apenas 14,7 km/h. A velocidade do transporte público é sempre menor do que a do automóvel, já que sempre ocorrem as paradas para embarque e desembarque de passageiros (ANTP, 2002);

- Aumento do preço da passagem: Na maioria das cidades do Brasil, os custos operacionais são totalmente incorporados nos preços das tarifas. Assim, quanto maiores os custos operacionais com o transporte coletivo, mais os usuários gastarão com o serviço (IPEA, 2013);
- Maior irregularidade no atendimento: Devido a possíveis congestionamentos, o serviço pode se tornar irregular e não cumprir os horários planejados. Isto desencadeia maior tempo de espera nas paradas (NTU, 2002).

Conforme pesquisa de CNI (2015), em 2011, 28% dos usuários brasileiros classificaram o transporte público como ruim ou péssimo. Em 2014, este percentual subiu para 36%. A avaliação do transporte público como ótimo ou bom caiu de 39% em 2011 para 24% em 2014.

Para aumentar a atratividade do sistema de transporte público por ônibus, algumas estratégias apresentam-se como alternativa, em que se destacam as alterações na operação, como uso bilhetes únicos e integração temporal, e alterações na infraestrutura viária, como criação de faixas ou corredores preferenciais (*Bus Rapid Service*) e exclusivos (*Bus Rapid Transit*) e preferência ao transporte público em interseções semaforizadas (*Transit Signal Priority*). Tomando como exemplo a implantação de faixas exclusivas ou preferenciais, no Brasil, foram obtidos resultados positivos com a adoção destas estratégias. De acordo com NTU (2013), com a faixa exclusiva em um corredor de Goiânia, houve aumento de 30% na velocidade do transporte por ônibus. No caso do BRS Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro, houve redução de 50% no tempo médio de viagem.

As alterações necessárias à infraestrutura existente e a necessidade de mudanças na interação com outros veículos em pontos importantes do sistema torna a avaliação de estratégias uma tarefa não trivial. Para avaliar alternativas de melhoria em determinado sistema, podem ser utilizadas ferramentas como a simulação computacional do tráfego. Tal ferramenta permite a modelagem dos deslocamentos de pessoas e de cargas sem a necessidade de intervenção direta no sistema em estudo. De acordo com Barceló (2010), a simulação possui a vantagem de permitir experimentos controlados envolvendo as diversas variáveis que descrevem o fenômeno do tráfego, nos diversos níveis de agregação, o que fornece uma poderosa ferramenta de caracterização, diagnóstico e avaliação de alternativas. Assim, a simulação apresenta-se como uma ferramenta que oferece eficiência e custo relativamente baixo ao modelador. No caso de estudos de sistemas de transporte público, com esta ferramenta, podem ser analisadas questões como configurações das estações, embarque e

desembarque de passageiros, *headway* entre os veículos, operação de estratégias de prioridade, dentre outros.

Para alguns estudiosos, como por exemplo, Hourdakis (2003) e Jayakrishnan *et al* (2003), modelos de simulação de tráfego podem ser classificados quanto ao nível de agregação em três grupos: microscópico, mesoscópico e macroscópico. Os modelos microscópicos descrevem o veículo e suas interações de forma individualizada e seus resultados são bastante detalhados. Já os modelos macroscópicos abordam as interações do tráfego com um menor nível de detalhamento, sendo a descrição do tráfego do sistema baseada nas relações entre velocidade, fluxo e densidade da corrente. Os modelos mesoscópicos apresentam aspectos comuns aos modelos macro e microscópicos e seu nível de agregação é classificado como intermediário. No caso específico do transporte público, a microssimulação é uma ferramenta de análise com potencial para analisar diferentes estratégias operacionais e alterações em sua infraestrutura permitindo a geração de indicadores de qualidade deste modo de transporte, considerando sua interação com o transporte motorizado individual.

Os estudos realizados com esta ferramenta para modelagem do transporte público por ônibus têm sido voltados para a análise do impacto deste modo na fluidez do tráfego. Estudos feitos para analisar questões de qualidade do transporte público ou questões específicas da operação deste modo não são encontrados com facilidade na literatura.

### **1.1 Problema e Questões de Pesquisa**

Atualmente, a microssimulação apresenta-se como uma das principais ferramentas de análise de sistemas de transportes. O potencial para a utilização desta ferramenta de análise de aspectos relacionados à operação dos sistemas de transporte público urbano ainda não foi analisado de forma aprofundada, mais especificamente, no que diz respeito à representação adequada de atributos geométricos e operacionais da movimentação dos ônibus e sua interação com o tráfego misto.

A partir da contextualização da problemática, questiona-se como a microssimulação pode apoiar as análises de planejamento e operação de sistema de transporte público por ônibus em cidades brasileiras.

- a. Como as principais plataformas de microssimulação de tráfego modelam os componentes dos sistemas de transporte público urbano por ônibus?

- b. Qual o impacto das interações entre veículos e passageiros nos pontos de parada, na modelagem do tempo de viagem dos ônibus?
- c. Em relação ao procedimento de calibração, há diferença entre as redes em que há representação dos pontos de parada de ônibus e as redes que não os representam?

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa de mestrado é avaliar a utilização da microsimulação na modelagem do transporte público por ônibus em áreas urbanas brasileiras. Para atender a este objetivo geral, o estudo compreende os seguintes objetivos específicos:

- a. Analisar como as principais plataformas de microsimulação de tráfego modelam os componentes dos sistemas de transporte público por ônibus;
- b. Avaliar o impacto das interações entre veículos de transporte público e passageiros nos pontos de parada, na modelagem do tempo de viagem dos ônibus;
- c. Calibrar uma rede de simulação como estudo de caso de um corredor com diferentes linhas de ônibus.

## **1.3 Estrutura de Dissertação**

A presente dissertação está estruturada em 5 capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução que contextualiza o assunto desta pesquisa, determina o problema e apresenta os objetivos e a estrutura desta dissertação.

O Capítulo 2 abrange a revisão bibliográfica referente aos sistemas de transporte público em áreas urbanas, dando ênfase ao modo por ônibus. Em seguida, discorre-se sobre a microsimulação e a aplicação da mesma como ferramenta na modelagem do transporte público por ônibus em áreas urbanas.

No Capítulo 3, são descritas todas as etapas da metodologia deste trabalho. O Capítulo 4, por sua vez, apresenta a aplicação da metodologia adotada e os resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 traz as principais conclusões da presente pesquisa, as considerações finais a respeito de seu objetivo e as recomendações para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo refere-se à importância do transporte público urbano por ônibus, aos elementos que compõem este tipo de sistema de transporte, ao desempenho operacional de tal sistema em cidades urbanas brasileiras, incluindo as estratégias de priorização do modo em questão, e aos indicadores que representam o nível de qualidade deste modo. Em seguida, apresenta-se uma introdução à modelagem do tráfego, as vantagens e desvantagens da simulação e os níveis de agregação dos modelos de simulação. Por fim, serão abordados os conceitos da microssimulação, seus modelos comportamentais e suas aplicações em estudos de sistemas de transporte público.

### **2.1 Transporte Público por Ônibus**

Os sistemas de transportes possuem importância incontestável para o bom desenvolvimento das cidades. São eles que permitem o deslocamento de pessoas e de cargas, possibilitando o acesso a serviços de saúde, educação, dentre outros. De acordo com Ferraz e Torres (2004), o adequado funcionamento deste sistema está associado à qualidade de vida dos indivíduos desta cidade e ao nível de desenvolvimento econômico e social.

Segundo Ferraz e Torres (2004), o transporte de pessoas é classificado em dois modos: o transporte privado ou individual, caracterizado por ser dirigido por um dos usuários e por haver flexibilidade em seu uso, em termos de horários e distâncias; e o público ou coletivo, que é caracterizado por atuar em rotas e horários predefinidos.

Além de ser bastante utilizado pela população em geral, o transporte público também se destaca como a melhor alternativa de deslocamento para indivíduos de baixa renda, que apresentam limitações para dirigir ou que preferem não utilizar o transporte individual.

De acordo com o Relatório Geral 2012 da ANTP (2014), dentre os modos de transporte público, o ônibus ainda pode ser considerado o modo mais utilizado nas cidades brasileiras. Na soma de todas as viagens realizadas nas cidades com mais de 60 mil habitantes, constatou-se que 20,2% dos deslocamentos são feitos por meio do ônibus municipal, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Mesmo diante das conhecidas vantagens do uso massivo do transporte público, a procura pelo transporte individual continua crescendo. Lacerda (2006) afirma que a predominância dos automóveis nas vias gera um cenário em que uma pequena quantidade de usuários de transporte privado atrasa o deslocamento de uma grande quantidade de usuários

de transporte público urbano por ônibus. De acordo com *Internacional Energy Agency* (2002 *apud* Lacerda, 2006), o espaço ocupado na via urbana por um carro capaz de comportar cinco passageiros corresponde a 62% do espaço preenchido por um ônibus com capacidade para quarenta passageiros. BHTRANS (2013) também aborda esta questão, comparando a ocupação do espaço em deslocamentos por automóvel e por ônibus, como pode ser visto na Figura 2.1.

Tabela 2.1 - Divisão modal das viagens realizadas nas cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes, em 2012

| Sistema                              | Divisão modal (%) |
|--------------------------------------|-------------------|
| Ônibus Municipal                     | 20,2              |
| Ônibus Metropolitano                 | 4,9               |
| Trilhos                              | 3,9               |
| <b>Transporte Coletivo – Total</b>   | <b>29,0</b>       |
| Automóvel                            | 27,3              |
| Motocicleta                          | 3,6               |
| <b>Transporte Individual - Total</b> | <b>31,0</b>       |
| Bicicleta                            | 3,6               |
| À pé                                 | 36,4              |
| <b>Não Motorizado - Total</b>        | <b>40,0</b>       |
| <b>Total</b>                         | <b>100</b>        |

Fonte: ANTP (2014).

Figura 2.1 - Espaço ocupado na via no deslocamento de aproximadamente 70 pessoas nos modos automóvel e ônibus



Fonte: BHTRANS (2013).

O relatório geral 2012 de ANTP (2014) traz um quadro comparativo dos efeitos da mobilidade gerados pelo uso do transporte público e do transporte individual, apresentado

na Tabela 2.2. A comparação foi realizada através de dados sobre a utilização dos dois modos de transporte por usuários de cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes. Os indicadores adotados foram o consumo de energia, poluição e custo da mobilidade e outros custos.

Tabela 2.2 - Dados dos efeitos da mobilidade (por habitante, por dia) em municípios brasileiros com mais de 60 mil habitantes

| <b>Modo</b>           | <b>Energia<br/>(GEP/hab./dia)</b> | <b>Poluição<br/>(grama/hab./dia)</b> | <b>Custo<br/>mobilidade<br/>(R\$/hab./dia)</b> | <b>Custo<br/>externalidades<br/>(R\$/hab./dia)</b> |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Transporte Coletivo   | 94                                | 294                                  | 1,01   | 0,12   |
| Transporte Individual | 288                               | 543                                  | 3,87   | 0,48   |
| Total                 | 382                               | 838                                  | 4,88   | 0,60   |

Fonte: ANTP (2014).

Já o estudo de NTU (2013) aborda a queda da quantidade de passageiros transportados em ônibus urbanos no Brasil. Na Figura 2.2, é possível observar que, em 1995, cerca de 473 milhões de passageiro/mês realizaram seus deslocamentos por meio do ônibus. Em 2012, este número caiu para aproximadamente 335 milhões. A pesquisa foi feita no período de 1994 a 2012, nos meses de abril e outubro, nas capitais brasileiras a seguir: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Porto Alegre, Salvador, Fortaleza, Curitiba e Goiânia.

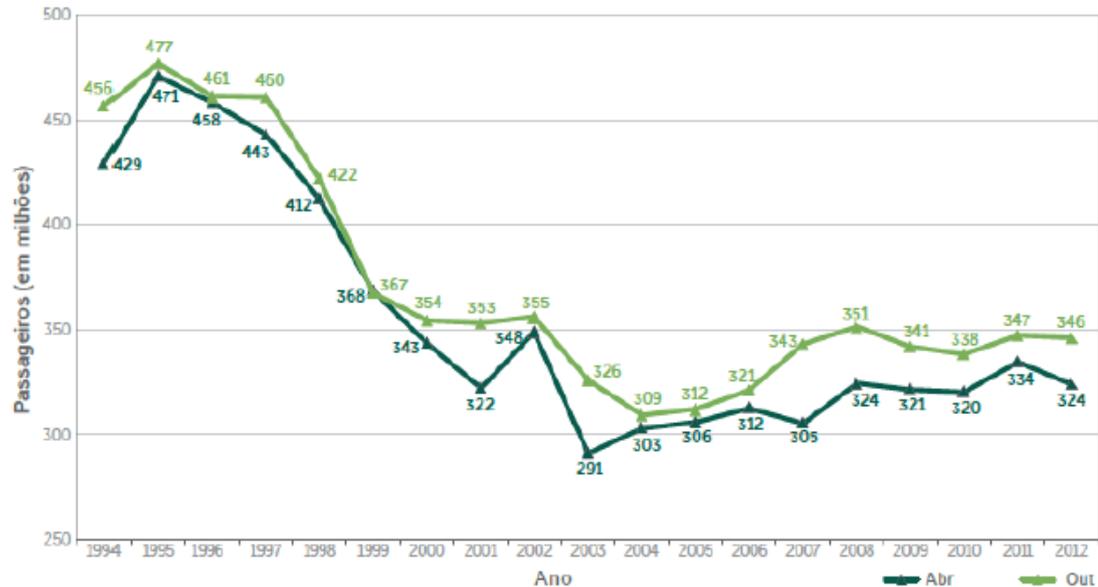
### ***2.1.1 Componentes dos Sistemas de Transporte Público por Ônibus***

O sistema de transporte público por ônibus consiste em uma série de serviços de transporte de pessoas por meio do modo ônibus, com o objetivo de atender à demanda de viagens da população de forma eficaz e com menor custo possível.

Estes serviços podem ser administrados por operadores públicos ou privados em determinada região urbana (SILVA e FERRAZ, 1991). A seguir, serão apresentados os principais componentes do sistema de transporte público por ônibus.

Vuchic (1999) compreende os sistemas de transporte público a partir de três vertentes: tipo e categoria da via, tecnologia veicular do sistema e o tipo de operação. Neste trabalho, os componentes serão classificados quanto a: infraestrutura, veículo e operação.

Figura 2.2 - Número de passageiros transportados por mês no modo ônibus urbano, em nove capitais brasileiras



Fonte: NTU (2013).

### 2.1.1.1 Infraestrutura

#### Pontos de Parada

ANTP (2002) define o ponto de parada como um espaço estabelecido na via pública onde ocorre a parada do veículo a fim de realizar o embarque e o desembarque dos passageiros. Este componente mostra-se com bastante influência no desempenho dos sistemas de transporte público por ônibus. Chapman (1975) afirma que o ônibus depende em torno de um quinto de seu tempo total de viagem nos pontos de parada, em operações onde o mesmo possui preferência na via. Em operações com tráfego compartilhado, o impacto do tempo perdido nos pontos de parada tende a diminuir, pois os ônibus estão submetidos a outras impedâncias, como por exemplo, interações com outros tipos de veículos e atrasos por mudança de faixa.

Segundo Wright e Hook (2008), o desempenho de um sistema de transporte público pode ser afetado por três impedâncias: atraso em embarques e desembarques de passageiros, congestionamento nos pontos de parada e congestionamento nas interseções, ou seja, gargalos relacionados aos pontos de parada.

Os pontos de parada podem ser classificados como simples (todos os ônibus fazem embarque e desembarque) ou seletivos (quando o embarque e desembarque são feitos somente por linhas pré-definidas). Devem ser identificados através de placas localizadas em postes de energia ou de telefonia ou por meio da implantação de abrigos, (SCHEIN, 2003; FERRAZ e TORRES, 2004), como apresentados nas Figuras 2.3a e 2.3b, respectivamente.

Figura 2.3 - Paradas de ônibus dos tipos (a) plataforma e (b) placa



Fonte: disponível em [www.fortalbus.com](http://www.fortalbus.com).

Ferraz e Torres (2004) classificam os pontos de parada de acordo com a posição em relação à guia. Os tipos estabelecidos pelos autores, vistos na tabela 2.4, são: guia em posição normal, guia recuada e guia avançada. A parada de ônibus do tipo guia em posição normal é a mais empregada nas grandes cidades brasileiras.

Segundo TCRP (2013), a quantidade e a localização dos pontos de parada podem interferir significativamente no tempo de viagem do veículo de transporte público e na confiabilidade de tal sistema. Gardner *et al* (1991) também acreditam que a alocação das paradas influencia na eficiência das mesmas e, conseqüentemente, na capacidade e velocidade operacional dos sistemas.

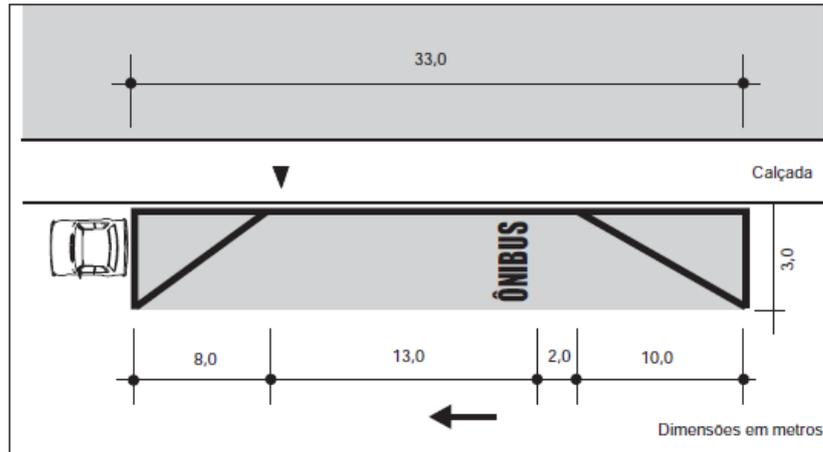
Na recomendação de Ferraz e Torres (2004), um ponto de parada de ônibus convencional, localizado em meio de quadra, deve ter as medidas mínimas representadas nas Figuras 2.5 e 2.6, com 8m para a área de acomodação de entrada, 6m na área de saída e 12m no centro. Além disso, precisa estar a uma distância mínima de 10m do alinhamento predial do cruzamento mais próximo. Se a via for estreita e possuir duas faixas de sentido duplo, deve haver distância de, no mínimo, 40m entre os pontos de parada que estiverem em lados opostos da via. Desta forma, garante-se que os ônibus que param em seus respectivos pontos, mesmo que estejam parados ao mesmo tempo na via, não obstruam o fluxo dos demais veículos, como apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.4 - Tipos de ponto de parada em relação à posição da guia

| Situação   | Croqui  | Comparação  |
|--|---|---|
| <p>Guia em posição normal</p> <p>Estacionamento do lado direito</p>  | <p>Faixa sempre livre</p> <p>Faixa impedida nas manobras dos carros</p> <p>Passageiros Pedestres</p>                      | <p>Fluidez do trânsito: A</p> <p>Estacionamento de veículos: C</p> <p>Conforto dos pedestres e usuários: B</p> <p>Retorno dos ônibus ao fluxo de tráfego: B</p> |
| <p>Guia em posição normal</p> <p>Estacionamento do lado esquerdo</p> | <p>Faixa impedida nas manobras dos carros</p> <p>Faixa impedida na parada dos ônibus</p> <p>Passageiros Pedestres</p>     | <p>Fluidez do trânsito: C</p> <p>Estacionamento de veículos: A</p> <p>Conforto dos pedestres e usuários: B</p> <p>Retorno dos ônibus ao fluxo de tráfego: A</p> |
| <p>Guia recuada</p> <p>Estacionamento do lado esquerdo</p>           | <p>Faixa impedida nas manobras dos carros</p> <p>Faixa sempre livre</p> <p>Passageiros Pedestres</p>                      | <p>Fluidez do trânsito: A</p> <p>Estacionamento de veículos: A</p> <p>Conforto dos pedestres e usuários: C</p> <p>Retorno dos ônibus ao fluxo de tráfego: C</p> |
| <p>Guia avançada</p> <p>Estacionamento do lado direito</p>           | <p>Faixa sempre livre</p> <p>Faixa impedidas nas manobras dos carros e parada dos ônibus</p> <p>Passageiros Pedestres</p> | <p>Fluidez do trânsito: B</p> <p>Estacionamento de veículos: B</p> <p>Conforto dos pedestres e usuários: A</p> <p>Retorno dos ônibus ao fluxo de tráfego: A</p> |

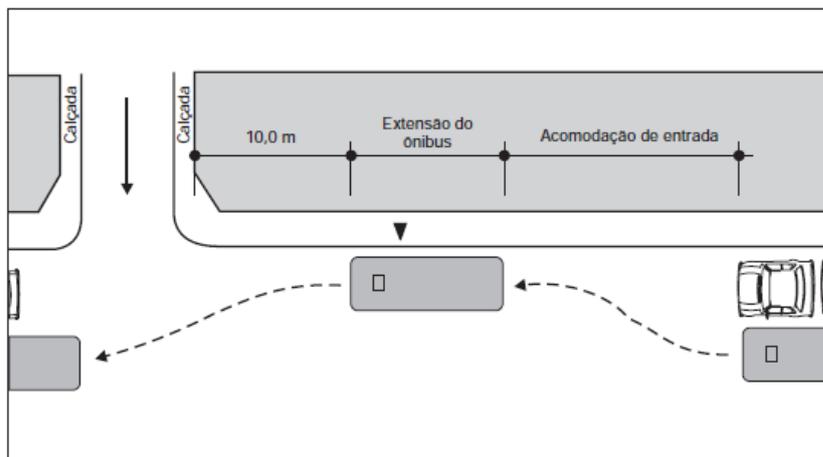
Fonte: Ferraz e Torres (2004).

Figura 2.5 - Recomendação de projeto de pontos de parada para ônibus com 12m de comprimento



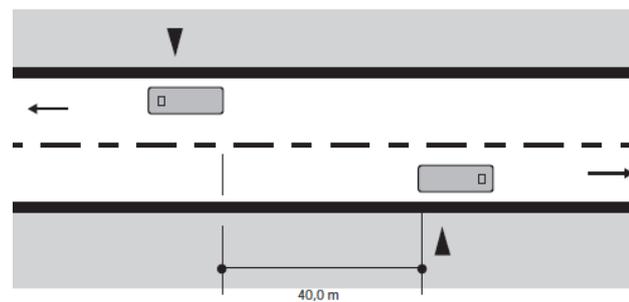
Fonte: MBB (1987, *apud* Ferraz e Torres, 2004).

Figura 2.6 - Parada posicionada antes do cruzamento



Fonte: MBB (1987, *apud* Ferraz e Torres, 2004).

Figura 2.7 - Distância mínima ideal entre pontos de parada em lados opostos de via estreita



Fonte: MBB (1987, *apud* Ferraz e Torres, 2004).

Gibson e Fernández (1994) abordam a relação entre a distância entre os pontos de parada, a demanda de passageiros e a quantidade de ônibus no sistema e suas taxas de ocupação, através da equação 2.1:

$$D = 43,8 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot q \cdot LT}{DS + DB}} \cdot (103 + d_T \cdot TO) \quad (2.1)$$

Em que:

D = Distância entre os pontos de parada (m);

$\lambda$  = Percentual de ônibus que realiza embarque e/ou desembarque nas paradas;

q = Fluxo total de ônibus (ônibus/hora);

LT = Extensão do trecho estudado (Km);

DS = Fluxo de passageiros que embarca em todo o trecho (passageiros/hora);

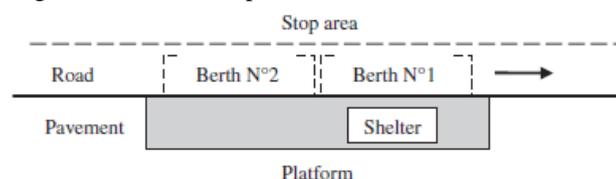
DB = Fluxo de passageiros que desembarca em todo o trecho (passageiros/hora);

$d_T$  = Tempo médio de parada dos ônibus nos pontos (s);

TO = Taxa média de ocupação dos ônibus (passageiros/ônibus).

Quanto à capacidade dos pontos de parada, é necessário compreender os elementos presentes, em termos de geometria, neste componente do sistema de transporte público. Fernández (2010) traz uma abordagem, baseada na metodologia de Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCRP, 2013), onde o ponto de parada como um todo é composto pela área de parada (em que o ônibus para ao final de sua desaceleração) e pela plataforma (local adjacente à área de parada em que os passageiros aguardam pelo ônibus e realizam embarque e desembarque). A área de parada possui uma ou mais subáreas de carregamento denominadas berços, onde cada um deve ter o comprimento igual ou maior que o comprimento do ônibus, como apresentado na Figura 2.8. A plataforma pode consistir em uma parcela do pavimento ou em uma ilha própria para abrigar os passageiros.

Figura 2.8 - Ponto de parada e seus elementos



Fonte: Fernández (2010).

TCRP (2013) quantifica a capacidade do berço de um ponto de parada através da expressão 2.2. Já a capacidade da plataforma é dada pela capacidade da área de parada mais carregada.

$$B = \frac{3600 \cdot (g/C)}{t_c + t_d \cdot (g/C) + Z \cdot c_v \cdot t_d} \quad (2.2)$$

Em que:

B = Capacidade do berço (ônibus/hora);

3600 = segundos em 1 hora;

g/C = fração de verde efetivo disponível para o ônibus em um ciclo do semafórico (se g/C = 1, não há semáforo nas proximidades);

$t_c$  = tempo para o ônibus desocupar o berço (s);

$t_d$  = tempo médio de parada do ônibus (s);

Z = variável normal que corresponde à probabilidade do ônibus encontrar o berço já ocupado;

$c_v$  = coeficiente de variação que representa a variabilidade dos tempos de parada.

TCRP (2013) ressalta a importância da quantidade de berços no ponto de parada como um todo, pois à medida que são adicionados mais berços a eficiência total dos mesmos é reduzida, como visto na Tabela 2.3. Ocorre que os demais berços são usados com menos frequência que o berço posicionado mais à frente. Os ônibus que estão no berço de trás podem ter que aguardar o veículo da frente concluir seu embarque e/ou desembarque. Além disso, como o passageiro não tem certeza do berço em que o ônibus parará, o tempo de parada do veículo no ponto pode aumentar, pois terá que aguardar os passageiros caminharem até a porta de embarque.

Tabela 2.3 - Efetividade dos berços de acordo com a quantidade no ponto de parada

| Quantidade de berços | Eficiência (%) | Número efetivo de berços |
|----------------------|----------------|--------------------------|
| 1                    | 100            | 1                        |
| 2                    | 85             | 1.85                     |
| 3                    | 75             | 2.60                     |
| 4                    | 65             | 3.25                     |
| 5                    | 50             | 3.75                     |

Adaptado de TCRP (2013).

A capacidade da parada é modelada pela Equação 2.3, em que se observa a influência da quantidade efetiva de berços.

$$B_S = N_{el} \cdot f_{tb} \cdot \frac{3600 \cdot (g/C)}{t_c + t_d \cdot (g/C) + Z \cdot c_v \cdot t_d} \quad (2.3)$$

Em que:

$B_S$  = Capacidade da parada (ônibus/hora);

$N_{el}$  = número efetivo de berços;

$f_{tb}$  = fator de ajuste que corresponde a obstruções no tráfego relacionadas a volume, capacidade e permissões de trânsito na faixa da direita.

### Terminais

Terminais são componentes fundamentais no sistema, pois proporcionam a conexão entre áreas vizinhas e com outros modos de transporte. As estações podem ser abertas, quando há somente a integração física, ou fechadas, quando há integração física e tarifária (FERRAZ E TORRES, 2004). As Figuras 2.9a e 2.9b retratam, respectivamente, um terminal aberto e um terminal fechado da cidade de Fortaleza.

Figura 2.9 - Terminal aberto (a) e terminal fechado (b) na cidade de Fortaleza



(a)



(b)

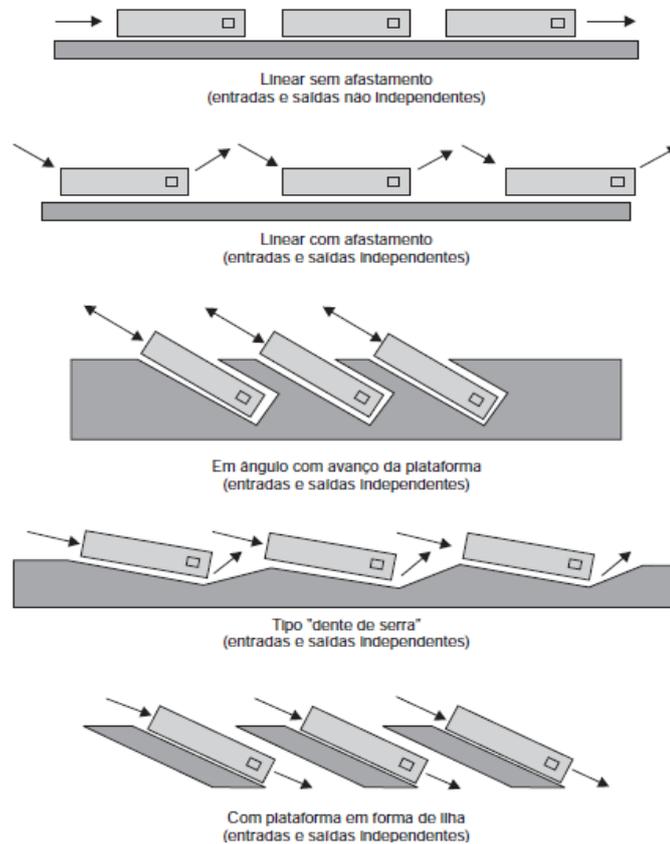
Fonte: disponível em <http://www.fortaleza.ce.gov.br>.

Vuchic (2005) define os terminais de transporte público como uma estrutura restrita a embarque, desembarque, espera e transferência de passageiros. Os terminais ou estações de transferência consistem em estações onde duas ou mais linhas podem se interligar, oferecendo aos passageiros a possibilidade de deslocar-se de uma para outra, mesmo que estas sejam de diferentes tipos.

Quanto aos tipos de baias presentes nos terminais, estes estão relacionados ao tipo de operação e das dimensões do terminal e da posição dos portões de entrada e saída de

veículos. Na Figura 2.10, são apresentados os tipos de baias mais utilizados nos terminais urbanos de ônibus (FERRAZ E TORRES, 2004).

Figura 2.10 - Tipos de baias empregadas em terminais de ônibus urbanos

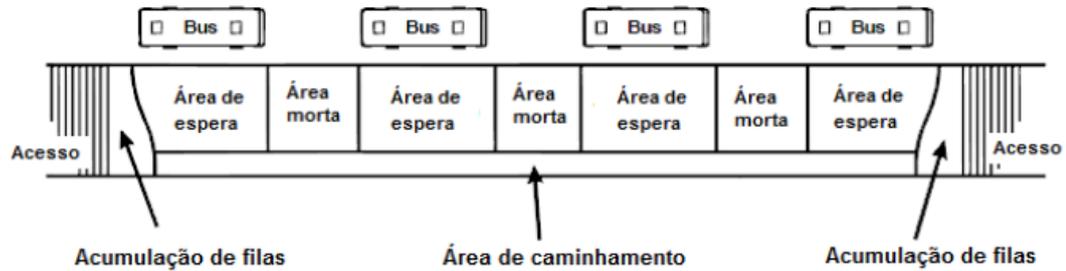


Fonte: Ferraz e Torres (2004).

A capacidade dos terminais foi abordada na seção anterior, onde são apresentadas expressões que quantificam a capacidade dos pontos de parada, que são elementos presentes em estações ou terminais.

Quanto aos passageiros que circulam nos terminais, as plataformas devem manter um adequado nível de serviço, oferecendo espaço não só para acomodá-los durante o período de espera do veículo, mas também para permitir livre circulação no local. O comprimento da plataforma é definido pelo comprimento do ônibus e pela quantidade de veículos que utilizam o terminal simultaneamente. Já a largura está ligada a circulação e tamanho de fila dos passageiros e posicionamentos dos acessos. As plataformas são segmentadas em seis áreas – área de circulação, área de espera, área de segurança (próxima à borda da plataforma e às áreas de espera), área ocupada por assentos e outros obstáculos, áreas mortas (pouco usadas pelos passageiros) e área de acumulação de filas –, como visto na Figura 2.11. (TCRP, 2013)

Figura 2.11 - Terminal composto por diferentes áreas



Fonte: TCRP (2013).

O Wright e Hook (2008) propõe o cálculo da área mínima de espera do terminal através da Equação 2.4 e da largura da plataforma necessária para a circulação adequada dos passageiros por meio da Equação 2.5.

$$A_{minesp} = \frac{F_{max}}{C_{apax}} \quad (2.4)$$

Em que:

$A_{minesp}$  = área mínima suficiente para acomodar os passageiros que esperam;

$F_{max}$  = Quantidade máxima prevista de passageiros em espera;

$C_{apax}$  = Quantidade máxima de passageiros por m<sup>2</sup>.

$$L_{plat} = 1 + L_{esp} + \frac{Pph}{2000} + L_{espop} \quad (2.5)$$

Em que:

$L_{plat}$  = Largura da plataforma;

$L_{esp}$  = Largura necessária para acomodar passageiros que aguardam em somente uma direção;

$Pph$  = Número de passageiros por hora que circulam na área;

$L_{espop}$  = Largura necessária para acomodar passageiros que aguardam em sentidos contrários da via (caso de estações que estejam localizadas no centro da via, havendo paradas nos dois sentidos).

#### 2.1.1.1. Veículo

Schein (2003) afirma que o ônibus é sinônimo de transporte público urbano e que esta consiste na tecnologia mais empregada em tais sistemas, pois são mais flexíveis, adequam-se com mais facilidade a diferentes demandas, possuem tecnologias mais simples e

custos mais baixos em relação a outros modos de transporte público. A Tabela 2.4 apresenta as características técnicas relacionadas ao ônibus em diferentes tipos de operação.

Tabela 2.4 - Características técnicas do ônibus no sistema de transporte público

| Características             | Valores para ônibus   |
|-----------------------------|-----------------------|
| Largura (m)                 | 2,4 – 2,6             |
| Comprimento (m)             | 10 – 24               |
| Capacidade (passageiros)    | 70 – 240              |
| Unidades de comboio         | 1 – 4 (independentes) |
| Velocidade (km/h)           | 10 – 20               |
| Capacidade (passageiros/h)  | 5.000 – 20.000        |
| Distância entre paradas (m) | 200 – 400             |

Fonte: Schein (2003).

Segundo NTU (2002), entre os veículos empregados em sistemas de transporte coletivo por ônibus, destacam-se a *Van* (muito utilizada no transporte complementar), o micro-ônibus, o ônibus convencional, o padron, o articulado (muito utilizado em operações do tipo BRT) e o biarticulado (utilizado em operações do tipo BRT). Também se destaca o trólebus que, diferente dos demais veículos, utiliza a eletricidade como energia. As Figuras 2.12a, 2.12b e 2.12c apresentam os veículos utilizados na cidade de Fortaleza, com os tipos articulado, convencional e micro-ônibus, respectivamente.

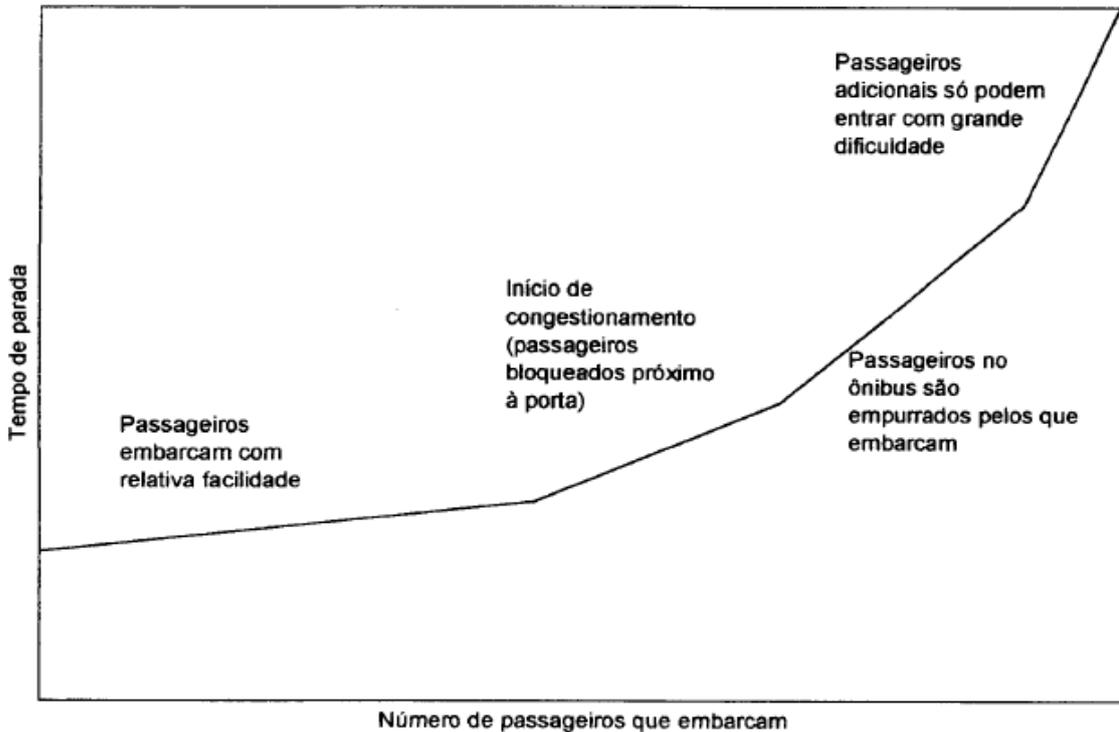
Figura 2.12 - Ônibus articulado (a), convencional (b) e micro-ônibus (c), utilizados em Fortaleza



Fonte: disponível em [www.fortaleza.ce.gov.br](http://www.fortaleza.ce.gov.br).

Castilho (1997) ressalta a capacidade do ônibus como uma variável muito ligada ao desempenho do sistema de transporte público, onde os ônibus articulados utilizam a via de forma mais eficiente que o ônibus padrão e estes utilizam o espaço com mais eficiência que o automóvel. O autor enfatiza que, ao longo do carregamento do veículo, a capacidade de transferência de passageiros passa a ser prejudicada e o tempo de parada do ônibus no ponto, em relação à quantidade de passageiro que embarca, deixa de ser uma função linear. A Figura 2.13 mostra relação entre as duas variáveis.

Figura 2.13 - Função do tempo de parada em relação ao número de passageiros que embarcam



Fonte: TRL/ODA (1993), apud Castilho (1997).

Fernández (1999) aborda a velocidade comercial do ônibus como variável para avaliação do desempenho do veículo. O modelo descritivo apresentado pelo autor representa velocidade média entre origem e destino, incluindo todas as paragens intermédias. A Equação 2.4 mostra a relação entre a velocidade comercial e a frequência de paradas ao longo da viagem.

$$V_C = V_0 \cdot e^{-\alpha \cdot f_d} \quad (2.4)$$

Em que:

$V_C$  = Velocidade comercial do ônibus (Km/h);

$V_0$  = Velocidade de deslocamento do ônibus (Km/h);

$\alpha$  = Parâmetro que representa o efeito marginal estatístico de cada parada no tráfego;

$f_d$  = Frequência de paradas por qualquer interferência (paradas/Km).

Fernández (1999) também se refere ao tempo de viagem total do ônibus como o resultado da soma entre o tempo de viagem do veículo em movimento, o tempo perdido em interseções e o tempo perdido em pontos de parada.

As características físicas do veículo influenciam consideravelmente no desempenho do sistema. Dentre parâmetros do veículo como localização das portas, comprimento e largura do ônibus e altura dos degraus, Castilho (1997) afirma que a capacidade de transferência de passageiros do ônibus para a parada ou estação é mais significativo para o desempenho do que suas dimensões.

Wright e Hook (2008) também destacam a importância do arranjo físico das portas, ressaltando que, se as portas do veículo não oferecerem a transferência de passageiros adequada, a operação da estação fica comprometida, mesmo que as outras variáveis do projeto estejam bem dimensionadas.

Vuchic (2007) evidencia a influência das características do veículo nos tempos de embarque e desembarque de passageiros, onde o número e dimensões das portas, o tipo de pagamento da tarifa, a altura do degrau em relação à plataforma e sentido do fluxo de passageiros pelas portas (o embarque e o desembarque podem ser realizados pela mesma porta ou por portas diferentes).

TCRP (2013) aborda a relação entre o tempo total de parada do ônibus – que consiste nos tempos efetivos de embarque e desembarque somados ao tempo morto (tempos de abertura e fechamento das portas, tempo de desaceleração até parar no ponto e tempo de aceleração até o alcance da velocidade de cruzeiro) (TCRP, 2013; WRIGHT E HOOK, 2008) – e as características dos veículos e outros parâmetros. A demanda de passageiros, o tipo de pagamento da tarifa, as dimensões e configurações do ônibus, o carregamento do veículo (passageiros em pé e próximos às portas podem dificultar embarque e desembarque), configuração do uso das portas pelos passageiros e configuração da plataforma.

### *2.1.1.2 Operação*

#### Linhas de ônibus

As linhas de transporte público devem atender nos principais polos geradores de viagens nas regiões em que são destinadas a trafegar, assim como garantir que áreas habitadas sejam adequadamente cobertas (Ferraz, 1990). As linhas de ônibus são classificadas por Schein (2003) e Ferraz e Torres (2004) quanto ao traçado e à função destas:

Quanto ao traçado:

- Radial: Liga a região central aos bairros. A maioria das linhas existentes encaixa-se nesta classificação e passam pelos principais corredores das áreas urbanas;
- Diametral: Conecta duas regiões percorrendo a região central;
- Circular: Conecta várias áreas da cidade, com seu trajeto formando um círculo;
- Perimetral ou interbairros: Interliga bairros da cidade sem trafegar pelo centro;
- Local: Trafega somente dentro de uma região da cidade.

Quanto à função:

- Convencional: Esta linha tem as funções de recolher os passageiros na região de origem, conduzi-los da origem até o destino e distribuí-los na região de destino;
- Troncal: Atua em determinado corredor com alta demanda de viagens, conduzindo os passageiros de uma região a outra da cidade;
- Alimentadora: Opera captando os passageiros sem alguma região da cidade e conduzindo-os a uma estação ou terminal de alguma linha troncal, assim como o inverso.
- Expressa: Trata-se de uma linha com maior velocidade operacional, pois opera realizando poucas, ou nenhuma, paradas intermediárias;
- Especial: Opera somente em certos horários ou em casos onde acontecem eventos especiais;
- Seletiva: Este tipo de linha executa um serviço que complementa a operação do transporte coletivo convencional, operando com menor preço e mais qualidade.

Vuchic (2007) aborda a capacidade de uma linha como o valor máximo de veículos e passageiros que pode ser transportado pela mesma por um ponto fixo, no intervalo de tempo de uma hora. O autor ressalta que há uma propensão na literatura a simplificar o conceito de capacidade de uma linha e a expressá-la quantitativamente de forma simples, o que resulta em decisões frequentemente equivocadas. São apresentados cinco pontos a serem considerados a fim de entender a capacidade das linhas de forma mais realista:

- A capacidade de uma linha não pode ser refletida em um valor fixo e absoluto, pois a mesma está ligada a outros parâmetros como nível de serviço, confiabilidade e conforto;
- Um sistema de transporte público não operar no limite de sua capacidade. O ideal é que operação vigore com volumes menores que 80% da capacidade máxima do sistema;
- É necessário considerar possíveis flutuações na demanda de passageiros, pois a capacidade da linha estimada no projeto é diferente do número real de passageiros transportados no período de uma hora;
- Com exceção das linhas expressas, a capacidade da linha sempre dependerá diretamente da capacidade das estações.
- As capacidades dimensionadas em projetos, em geral, não coincidem com as capacidades dos sistemas em campo reais, por conta da dificuldade em prever todas as impedâncias atuantes no desempenho de um sistema.

#### Estratégias de Priorização do Transporte Público por Ônibus

É importante destacar os problemas que os usuários do transporte público por ônibus vivenciam no dia a dia, como por exemplo, tempos de viagem relativamente longos, irregularidade no atendimento, insegurança nos pontos de parada, dentre outros.

Conforme NTU (2002), as medidas de prioridade para o transporte coletivo no sistema viário urbano têm se mostrado eficazes para resolver estes e outros problemas. Ao investir-se em infraestruturas viárias restritas à circulação do transporte público, aumenta-se a velocidade operacional dos ônibus, proporcionando menores tempos de viagem, conforto aos usuários, redução dos custos operacionais e das tarifas e maior regularidade dos serviços.

Antes de explanar as estratégias de priorização, é importante entender os níveis de segregação da via, apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Níveis de segregação e tipos de tratamento da via

| Nível de Agregação | Tipo de tratamento / Operação      | Variações                                 | Características  |
|--------------------|------------------------------------|---|--|
| 1                  | Tráfego misto                      |   | Veículos de transporte coletivo circulam junto com o tráfego geral, sofrendo grandes interferências longitudinais e transversais. Cruzamentos em nível frequentes.   |
| 2                  | Faixa exclusiva                    | No fluxo<br>No contra fluxo               | Veículos do transporte coletivo trafegam em faixa exclusiva, mas sem elemento de separação física do tráfego geral. A faixa exclusiva costuma estar na lateral da via (embora possa estar também no centro) e ter ou não faixa dupla para ultrapassagem junto aos pontos de parada. Número considerável de cruzamentos em nível. |
| 3                  | Pista exclusiva (canaleta, busway) | Em via de múltiplos usos<br>Via exclusiva | Veículos do transporte coletivo trafegam em faixa exclusiva com elemento de separação física do tráfego geral. A faixa pode estar no centro ou nas laterais da via e ser ou não duplicada para ultrapassagem (especialmente junto aos pontos de parada). Poucos cruzamentos em nível.  |
| 4                  | Via segregada                      |   | Veículos do transporte coletivo trafegam em via totalmente segregada, não sofrendo interferências longitudinais ou transversais de qualquer tipo. Não há cruzamentos em nível.   |

Fonte: NTU (2002).

De acordo com Wright e Hook (2008),

BRT (*Bus Rapid Transit*) é um sistema de transporte de ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com custo eficiente através da provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, operação rápida e frequente e excelência em marketing e serviço ao usuário.

Os principais diferenciais, em geral, do sistema BRT em relação ao sistema de transporte com tráfego compartilhado são (MILLER et al., 2004):

- Faixas exclusivas para os ônibus;
- Alta frequência de atendimento;
- Nivelamento entre a plataforma de embarque e desembarque dos passageiros e o piso dos ônibus;
- Presença de bilhetagem eletrônica nos pontos de parada;
- Prioridade para os ônibus nos cruzamentos;
- Presença de sistemas de informação aos usuários;
- Veículos com maior capacidade de passageiros e do tipo articulado ou biarticulado;
- Presença de sistemas ITS;
- Controle dos horários e do *headway* entre os ônibus;

- Ergonomia diferenciada nos pontos de parada e nos veículos.

A Figura 2.14 mostra um corredor BRT da cidade de Fortaleza.

Figura 2.14 - Corredor BRT na cidade de Fortaleza



Fonte: disponível em [www.fortalbus.com](http://www.fortalbus.com).

Outra estratégia de prioridade são as faixas exclusivas para ônibus. Segundo NTU (2002), consistem em faixas de tráfego destinadas ao uso restrito de tal veículo, segregadas das demais faixas de tráfego. Esta segregação é feita através de pintura e/ou tachões no pavimento. Como a separação não isola totalmente a faixa das demais faixas de tráfego, outros veículos podem trafegar temporariamente pela mesma, seja para acessar lotes lindeiros ou para realizar conversões. A Figura 2.15a e 2.15b apresentam dois tipos de faixa exclusiva, a implantada no mesmo sentido do fluxo geral e a implantada no contrafluxo.

Figura 2.15 - Faixas exclusivas da cidade de Fortaleza, no sentido do fluxo (a) e no contrafluxo (b), respectivamente



(a)



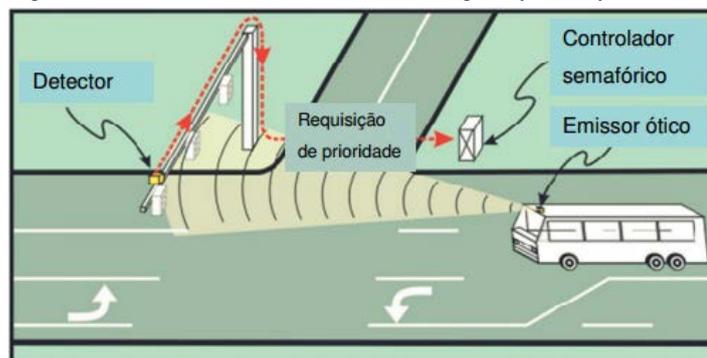
(b)

Fonte: disponível em [www.fortalbus.com](http://www.fortalbus.com).

Como já mencionado nesta revisão, o tempo total de viagem dos ônibus depende diretamente do tempo perdido nas paradas em semáforos. Logo, é importante destacar um dos

tipos de estratégias de priorização em que ocorrem adaptações nos tempos dos semáforos de um corredor. De acordo com APTA (2010), o TSP (*Transit Signal Priority*) consiste em um tipo de sistema inteligente de transporte (ITS) no qual a programação semafórica sofre variações de ciclo. A principal forma de privilegiar a fluidez do ônibus é a extensão do tempo de verde ou a interrupção do tempo de vermelho para o veículo em questão. Esta estratégia pode ser empregada na forma condicional – onde ocorre a priorização do veículo somente quando houver certas condições, como por exemplo, lotação ou atraso – ou não condicional – onde a priorização na interseção ocorre para qualquer veículo de transporte público. A Figura 2.16 mostra a arquitetura do TSP empregado em um corredor de ônibus dos Estados Unidos.

Figura 2.16 - TSP no corredor Portland Highway Valley, EUA



Fonte: Gardner *et al* (1991, *apud* Peron, 2015).

### 2.1.2 *Qualidade do Transporte Público por Ônibus*

Para Antunes (2009), uma viagem em um sistema de transporte público por ônibus é composta pelas seguintes etapas: caminhada até o ponto de parada, espera pelo ônibus, embarque, espera pela chegada de seu ponto de parada de destino e desembarque do veículo. Como essas etapas levam tempo até serem concluídas e os passageiros interagem com alguns ambientes, é fundamental que a viagem esteja dentro de padrões adequados.

A qualidade de um serviço pode ser avaliada através de indicadores. Ferraz e Torres (2004) abordam, basicamente, doze indicadores que interferem na qualidade do transporte público urbano. Na Tabela 2.6, é possível observar cada indicador e os atributos que caracterizam o nível de serviço como bom, regular ou ruim. Farias (1985) estabelece outros fatores para como indicadores de qualidade do transporte público:

- Disponibilidade de ônibus reserva: para casos em que ocorrem falhas mecânicas;

- Regularidade dos horários: pode ser comparado ao indicador confiabilidade da proposta de (Ferraz e Torres, 2004);
- Características relacionadas ao conforto: abrange parâmetros como iluminação, capacidade e comportamento do condutor na direção do veículo.

No caso da avaliação da qualidade de um sistema com foco em priorização do transporte público urbano, Oliveira Neto (2004) cita como indicadores de desempenho para avaliar prioridade: os tempos de percurso do ônibus do carro, o atraso em cruzamentos, comprimento de fila e regularidade da linha (baseada na variabilidade dos tempos de viagem do ônibus).

Tabela 2.6 - Indicadores de qualidade do sistema de transporte público por ônibus

(continua)

| Fatores                              | Parâmetros de Avaliação   |
|--------------------------------------|---|
| Acessibilidade                       | Distância de caminhada no início e no fim da viagem<br>Declividade dos percursos não exagerada por grandes distâncias, passeios revestidos e em bom estado, segurança na travessia das ruas, iluminação noturna, etc. |
| Frequência de atendimento            | Intervalo entre atendimentos  |
| Tempo de viagem                      | Relação entre o tempo de viagem por ônibus e por carro  |
| Lotação                              | Taxa de passageiros em pé   |
| Confiabilidade                       | Viagens não realizadas ou realizadas com adiantamento maior que 3 min. ou atraso acima de 5 min.  |
| Segurança                            | Índice de acidentes   |
| Características dos ônibus           | Idade e estado de conservação<br>Número de portas e largura do corredor<br>Altura dos degraus, sobretudo do primeiro<br>Aparência   |
| Características dos locais de parada | Sinalização<br>Cobertura<br>Banco para sentar<br>Aparência  |

Tabela 2.6 - Indicadores de qualidade do sistema de transporte público por ônibus

(conclusão)

| Fatores                      | Parâmetros de Avaliação  |
|------------------------------|--|
| Sistema de informações       | Folhetos com itinerários e horários disponíveis                                |
|                              | Informações adequadas nas paradas  |
|                              | Informações e reclamações  |
| Conectividade                | Transbordos  |
|                              | Integração física  |
|                              | Integração tarifária   |
|                              | Tempo de espera nos transbordos  |
| Comportamento dos operadores | Motoristas dirigindo com habilidade e cuidado                                  |
|                              | Motoristas e cobradores prestativos e educados                                 |
| Estado das vias              | Vias pavimentadas e sem buracos, lombadas e valetas e com sinalização adequada |

Fonte: Ferraz e Torres (2004).

## 2.2 Simulação do Tráfego

Antes de abordar as questões sobre modelagem e simulação, é importante que se compreenda o que é um modelo. Owen *et al.* (1996) acreditam que modelo é o mesmo que uma aproximação, representação ou idealização de determinados atributos da estrutura, comportamento, ou outros aspectos de um processo, conceito ou sistema real. Os autores destacam que um modelo pode ter outro(s) modelo(s) como parte(s) do mesmo.

Especificando esta abordagem para o tráfego veicular, a seguir, são apresentados três tipos de modelos computacionais de tráfego difundidos pela comunidade de engenharia de tráfego. Estes podem ser observados no estudo de Owen *et al.* (1996):

- a. Modelos de otimização semafórica: buscam diminuir medidas como atrasos e paradas;
- b. Modelos de alocação de tráfego: representam o processo de escolha de rotas dos usuários em uma rede viária;
- c. Modelos de simulação de tráfego: representam sistemas com um maior número de entidades. São modelos mais adequados para avaliações que exigem maior nível de detalhamento.

Diante dos modelos de tráfego apontados anteriormente, a partir deste ponto, a presente fundamentação teórica restringe-se aos temas referentes aos modelos de simulação de tráfego.

Em avaliações do desempenho de novas estratégias e/ou planejamento do controle do tráfego, existe a incerteza de qual técnica de análise deve-se ser utilizada. Isto ocorre

porque há muitos fatores a serem considerados, como por exemplo, as características e qualidade das vias, o comportamento dos usuários e questões ambientais. De acordo com Barceló (2010), a simulação é uma ferramenta que possui a vantagem de permitir experimentos controlados abrangendo as diferentes variáveis que descrevem o desempenho do tráfego, nos diversos níveis de agregação.

A simulação de tráfego demonstra eficiência ao ser aplicada em análises de vários tipos de problemas, cuja análise por alternativas diferentes mostra-se difícil. Considerando que processos complexos caracterizam estes problemas, entende-se que as interações simultâneas dos componentes destes processos não podem ser bem expressas analiticamente. Porém, a atuação de cada entidade ou a interação de uma quantidade restrita de elementos pode ser bem entendida através de representações matemáticas ou lógicas, com bons níveis de confiança. (LIEBERMAN e RATHI, 1997).

Para May (1990), a simulação consiste em uma técnica numérica que controla experimentos em um computador, que pode conter características estocásticas, ser de natureza macroscópica ou microscópica e abrangem modelos matemáticos que explicam o comportamento de um sistema. Em outras palavras, é uma técnica capaz de representar sistemas viários em um computador, representando a sequência de prováveis eventos que ocorrem no sistema analisado, ao longo do tempo. Os veículos podem ser abordados de maneira individualizada ou agregada.

Porém, em análises de tráfego, a simulação computacional nem sempre é a melhor ferramenta a ser utilizada. De acordo com McLean (1989), existe sempre a desconfiança de que o modelo obtido não representa adequadamente o sistema real escolhido para ser modelado. Portanto, há necessidade de cuidadosos esforços de calibração e validação, o que pode não ser viável. A seguir, são apresentadas as vantagens do uso de modelos de simulação apontadas por May (1990):

- Adequados em avaliações em que haja novas situações;
- Possibilitam a análise da relevância relativa das variáveis no processo e da forma que as mesmas se relacionam;
- Possibilitam avaliações de estratégias no modo “*off-line*” (fora do mundo real), em vez da prática de tentativa e erro “*on-line*” (no mundo real);
- Oferecem resultados de saída desagregados (com sequência temporal e espacial), não apenas resultados agregados (valores médios e variâncias);

- Possibilitam a análise do sistema em tempo real, em tempo estendido ou em tempo reduzido;
- Permitem que sistemas inseguros sejam avaliados sem que os usuários do sistema real corram riscos;
- Em casos de comparação de cenários alternativos, é possível representar as condições do cenário padrão (base da comparação);
- Permitem analisar as consequências de mudanças operacionais em um sistema.

May (1990) também ressalta as possíveis desvantagens observadas na modelagem por meio da simulação:

- Outras opções de análise podem apresentar-se como mais fáceis para a resolução de determinado problema;
- A simulação consome muito tempo e recursos;
- Requer grande quantidade de dados de entrada e, além disso, a coleta destes dados pode se mostrar difícil;
- A credibilidade do modelo de simulação é avaliada através da calibração e da validação e, se estas etapas não forem bem realizadas, o modelo é considerado ineficaz;
- O uso da simulação exige conhecimentos em muitas áreas de estudo, como por exemplo, teoria de fluxo, programação e computação, probabilidade, estatística e tomada de decisão;
- O uso da simulação só é proveitoso se houver considerável compreensão do sistema estudado;
- Usuários que não criaram o modelo de simulação podem ter dificuldades em utilizá-lo. Portanto, uma documentação clara e um bom suporte computacional são necessários;
- Exige a compreensão dos dados de saída, das limitações e das hipóteses dos modelos.

Maia (2007) acredita que a grande vantagem da simulação em relação a outras ferramentas de análise do tráfego é o fato dos modelos de simulação possuírem a capacidade de incorporar as variações de espaço e de tempo dos elementos inerentes ao sistema estudado. Assim, a simulação apresenta-se como uma ferramenta que apresenta maior poder de representatividade.

Chatterjee (2008) também evidencia uma grande vantagem da simulação em relação a outras ferramentas analíticas. O autor afirma que ferramentas de simulação de tráfego, por solucionarem problemas ligados ao tráfego de maneira mais eficiente, estão sendo cada vez mais empregadas em operações de tráfego em estudos variados.

Ainda sobre a utilização de modelos de simulação, Gomes (2004) afirma que os primeiros modelos despontaram na década de 1950, caracterizando um grande desenvolvimento da simulação do fluxo do tráfego. O mesmo autor ressalta que um dos primeiros simuladores produzidos foi o de Lighthill e Whitham (1955), que compararam o fluxo dos veículos no tráfego com o comportamento de partículas de um fluido. Para Lacalle (2003), além dos simuladores contemporâneos englobarem evoluções das teorias de Engenharia de Tráfego, estes também incluem conceitos da área de Psicologia, com o objetivo de representar o comportamento dos condutores.

Sobre as formas de classificação de modelos de simulação de tráfego, a bibliografia mostra que estes podem ser classificados de acordo com diferentes aspectos. A seguir, são apresentados os critérios de classificação abordados por Araújo (2003), que também são amplamente reportados na literatura:

- a. **Lógica Estrutural:** Descreve a forma como os modelos estimam o comportamento do sistema. Este critério é dividido em duas categorias, modelos empíricos (fundamentam-se matematicamente, através de análises estatísticas) e modelos analíticos (utilizam as relações entre componentes do sistema estudado através de conceitos teóricos, como teoria de filas determinísticas ou probabilísticas);
- b. **Nível de Agregação:** Consiste no nível de detalhamento com o qual os modelos representam o sistema. Estes modelos podem ser microscópicos (cada entidade e suas interações são representadas), macroscópicos (o tráfego é simulado como uma só entidade) ou mesoscópicos (possuem características mistas dos modelos mencionados anteriormente);
- c. **Escala Temporal:** Demonstra como os eventos modelados são ligados ao tempo. Os modelos podem ser estáticos (não simulam os variados estados do sistema ao longo do tempo. Representam um instante específico ou comportamento médio) ou dinâmicos (representam as mudanças que o sistema sofre ao longo do tempo).

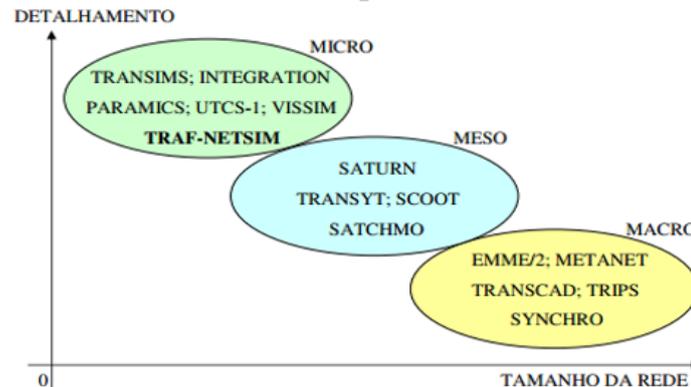
- d. **Mudança de Estado:** Esta classificação só é aplicada aos modelos dinâmicos e descreve como as mudanças do sistema estão ligadas à variável independente “tempo”. Os modelos podem ser discretos (simulam as variações do sistema em instantes isolados) ou contínuos (as mudanças do sistema são assumidas como um evento contínuo, ao longo do tempo);
- e. **Flexibilidade do Tráfego:** Demonstram o tipo de flexibilidade do tráfego adotado na modelagem. Neste critério, encaixam-se os modelos de fluxo ininterrupto (admitem que não existem obstáculos fixos na corrente do tráfego) e os modelos de fluxo interrompido (ponderam a presença de obstáculos fixos na corrente do tráfego);
- f. **Variabilidade Aleatória:** Descreve a relevância de variáveis aleatórias nos modelos. Os modelos podem ser classificados como determinísticos (não consideram a variabilidade aleatória, os dados de entrada e de saída sempre assumem valores agregados) ou estocásticos (os resultados são avaliados através de variáveis aleatórias).

A seguir, é abordada de forma mais detalhada a classificação dos modelos de simulação de tráfego segundo o nível de agregação, apresentada na seção 3.3.

### ***2.2.1 Níveis de Agregação dos Modelos de Simulação de Tráfego***

Para estudiosos como Hourdakakis (2003) e Jayakrishnan *et al.* (2003), modelos de simulação de tráfego são classificados quanto ao nível de agregação em três grupos: Microscópico, Mesoscópico e Macroscópico. Maia (2007) comenta que esta classificação é definida pela forma como os modelos representam o fluxo do tráfego ou segundo o tipo de sistema que os mesmos buscam representar. A modelagem microscópica é mais recomendada na representação de redes de menor tamanho. Na simulação de rede de maior tamanho, a melhor alternativa é a modelagem macroscópica. A Figura 2.17 demonstra a relação entre os níveis de agregação dos modelos, o nível de detalhamento exigido no estudo e o tamanho da rede a ser simulada.

Figura 2.17 - Relação entre os tipos de modelos, tamanho da rede e nível de detalhes



Fonte: Sousa e Ribeiro (2003)

### 2.2.1.1 Modelos Macroscópicos

Os modelos macroscópicos abordam as interações do tráfego com um baixo nível de detalhamento, a descrição do tráfego do sistema é baseada nas relações entre velocidade, fluxo e densidade. Por utilizar somente variáveis agregadas, este tipo de modelo não consegue representar as interações entre os veículos, fornecendo uma representação com menos precisão em comparação aos modelos meso e microscópicos.

Araújo (2003) ressalta que os modelos macroscópicos possuem relações diretas entre seus dados de entrada e seus dados de saída, proporcionando ao usuário maior domínio sobre os resultados obtidos. Assim, observa-se maior simplicidade nas práticas de calibração de modelos macroscópicos, em comparação aos modelos microscópicos.

Quanto à aplicação da modelagem macroscópica, (Lieberman e Rathi, 1997) apontam que o uso deste tipo de modelagem é indicado quando:

- Não há a necessidade de análise das interações entre os veículos ou quando os elementos em estudo não são expressivamente sensíveis;
- A rede analisada é extensa o suficiente para a não utilização da modelagem microscópica;
- Há restrições de tempo e recursos para a realização da modelagem.

Como exemplos de modelos macroscópicos, pode-se mencionar TransCAD EMME/2, TRIPS, TRANSPLAN e PASSER.

### 2.2.1.2 Modelos Microscópicos

Os modelos microscópicos descrevem os veículos e suas interações de forma individualizada e seus resultados de saída mais detalhados, em comparação aos modelos meso

e macroscópicos. Este tipo de modelo, por oferecer um nível mais alto de detalhamento, exige maior número de dados de entrada em relação aos outros modelos, maior aparato computacional e mais tempo para a realização da simulação.

De acordo com Maia (2007), neste tipo de modelagem, as variáveis relevantes na estimação das medidas de desempenho da rede simulada, são registradas de forma desagregada para cada veículo. Cada veículo da simulação é rastreado, desde o momento que ele aparece na rede até o momento de chegada em seu destino. Assim, a modelagem macroscópica consegue proporcionar resultados mais precisos.

Segundo Astarita *et al* (2001), na modelagem microscópica, o tráfego dos veículos ao longo dos *links* da rede é controlado basicamente por três submodelos: perseguição veicular (*car-following*), mudança de faixa (*lane-changing*) e aceitação de brechas (*gap-acceptance*). Todos estes submodelos possuem parâmetros que os descrevem e que precisam ser calibrados. Portanto, o procedimento de calibração deste tipo de modelo demonstra mais complexidade. Na seção 2.4, estes submodelos são abordados mais detalhadamente. Podem ser citados como modelos microscópicos, VISSIM, AIMSUN, INTEGRATION, PARAMICS, NETSIM, DRACULA, CORSIM E TRANSMODELER.

### 2.2.1.3 Modelos Mesoscópicos

Os modelos mesoscópicos apresentam aspectos comuns aos modelos macro e microscópicos, seu nível de agregação é classificado como intermediário. Eles conservam certo nível de desagregação na representação do sistema, em comparação aos modelos microscópicos. Por exemplo, no caso da representação de mudanças de faixas, elas podem ser simuladas para cada veículo, mas a decisão baseia-se, de forma agregada, em densidades de faixa, e não nas relações individuais entre os veículos (Lieberman e Rathi, 1997).

Portugal (2005) afirma que a simulação mesoscópica proporciona uma modelagem onde os veículos são reunidos em pelotões de tráfego. A abordagem dos veículos é realizada desta maneira quanto a tamanho, localização, velocidade e aceleração. Por apresentar estas características, os modelos mesoscópicos, geralmente, são empregados em redes semaforicas com o objetivo de representar o comportamento destes pelotões de tráfego ao longo do tempo e do espaço (TRB, 2010).

Como exemplos de modelos mesoscópicos, pode-se citar TRANSYT, SCOOT, Trans CAD, SATURN e AIMSUN.

### 2.2.2 *Microsimulação do Tráfego*

A microsimulação do tráfego veicular, em comparação às simulações macroscópica e mesoscópica, apresenta-se mais complexa, exige melhor desempenho computacional e maior quantidade de dados. Porém, este nível de simulação é capaz de oferecer valores de diversas variáveis, de maneira completamente desagregada, em qualquer intervalo de tempo da simulação. Portanto, a microsimulação tem sido cada vez mais empregada na análise de problemas de tráfego para os quais não existe a possibilidade de solucioná-los de forma analítica.

Nos modelos microscópicos, a trajetória tempo-espaço dos veículos é simulada com a utilização de equações que representam, com alto nível de detalhamento, as ações observadas no tráfego dos veículos. O nível de agregação apresentado nestes modelos oferece a possibilidade de acrescentar vários ambientes de simulação e de escolhas de cenários (RAKHA, 2002).

Coelho (2009) afirma que a modelagem microscópica se baseia nas interações dos veículos, considerando as manobras individuais. Estas interações são abordadas através de modelos determinísticos e estocásticos e são determinadas pelo estímulo e pela reação de condutores de veículos consecutivos. Como mencionado anteriormente, o tráfego dos veículos é regido basicamente por três submodelos: perseguição veicular (*car-following*), mudança de faixa (*lane-changing*) e aceitação de brechas (*gap-acceptance*).

#### 2.2.2.1 *Modelos de Car-Following*

O modelo de *car-following* representa um dos principais modelos comportamentais na microsimulação. De acordo com May (1990), teorias que abordam como um veículo segue outro foram aperfeiçoadas, inicialmente, nos anos 1950 e 1960. Este cenário estabeleceu-se depois das pioneiras pesquisas sobre teorias de *car-following* realizadas por Reuschel (1950a, b) e Pipes (1953).

Segundo Simões (2005), o principal conceito na teoria de *car-following* é que os movimentos de um veículo na via são controlados pelos movimentos do veículo consecutivo. Certas variáveis de fluxo, tais como distância entre veículos, velocidade e aceleração para um veículo seguidor são respostas dos estímulos causados pelo movimento do veículo líder. Estas variáveis também influenciam as características de reação ou sensibilidade dos condutores precedentes.

De Oliveira e Cybis (2008) afirmam que a simulação do movimento do tráfego em microssimuladores é realizada através do processamento de algoritmos. Estes possuem o objetivo de estimar a disposição dos veículos no *link*, fundamentando seus cálculos em preceitos pré-determinados. Os autores ainda destacam que um dos algoritmos que mais influenciam nas capacidades viárias na rede é o algoritmo de *car-following*.

De acordo com Olstam e Tapani (2004), os modelos de *car-following* são comumente classificados em três classes, dependendo da lógica utilizada. As classes do modelo incluem:

- Modelos Gazis-Herman-Rothery (GHR): Estes modelos exprimem que a aceleração do veículo precedente é proporcional à velocidade do veículo seguidor, à diferença de velocidade entre o seguidor e líder e o espaço de *headway* entre o seguidor e o líder;
- Modelos Distância-Segurança: baseiam-se na hipótese de que o veículo seguidor sempre mantém uma distância segura em relação ao veículo líder;
- Modelos Psicofísicos: Utilizam limiares, como por exemplo, a diferença de velocidade mínima (percebida pelo seguidor) entre o seguidor e o líder. O estímulo é baseado na percepção que o motorista do veículo seguidor tem da velocidade da mudança da área formada pela traseira do veículo líder.

#### 2.2.2.2 Modelos de Lane-Change

Para Araújo (2003), os modelos de *lane-change* analisam os movimentos transversais dos veículos ao longo do *link*, acompanhados das mudanças de faixas. Basicamente, este modelo comportamental detecta um estímulo para mudança de faixa, identifica a faixa alvo e analisa se as condições são favoráveis para a mudança de faixas na faixa alvo. Os estímulos para a mudança de faixa ocorrem por diversos motivos (obrigatórios ou não), como por exemplo, ultrapassagem com intuito de aumentar a velocidade, procura pela faixa com objetivo de fazer conversões pela interseção ou fazer o contorno de alguma barreira como faixa bloqueada.

Conforme Liu (1994), quando o condutor pensa em realizar a mudança de faixa, o mesmo precisa saber a velocidade e a posição dos veículos que estão próximos. É importante destacar que a mudança de faixa só ocorre quando há espaço suficiente para o movimento na faixa que se deseja chegar. Assim, o condutor pode executar a troca de faixa com segurança.

### 2.2.2.3 Modelos de Gap-Acceptance

Maia (2007) afirma que, por volta dos anos 1960, pesquisadores iniciaram o desenvolvimento de modelos de aceitação de brechas (*gap-acceptance*). Nos primeiros modelos, a distribuição das brechas era feita através de curvas de probabilidade. Em 1961, Herman e Weiss desenvolveram um modelo que adotava distribuição exponencial para a brecha crítica. Já Miller (1972) adotou a distribuição normal.

De acordo com Vilarinho (2008), este modelo comportamental representa o comportamento do condutor em situações onde este deseje trocar de direção ou de faixa e precise aguardar até que surja uma brecha entre veículos aceitável para a execução apropriada do movimento. O tempo mínimo necessário para que o motorista realize este movimento é chamado de brecha crítica. O modelo de aceitação de brechas considera a distância entre veículos capaz de gerar uma hipotética colisão, suas velocidades e acelerações.

Segundo a mesma autora, os parâmetros dos veículos que mais interferem no desempenho deste modelo comportamental são:

- Aceleração: a aceleração do veículo interfere no tamanho da brecha crítica necessária para a execução segura do movimento;
- Brecha crítica máxima: intervalo de tempo a partir do qual o motorista torna-se inquieto pelo fato de não conseguir achar uma brecha crítica. Caso o condutor aguarde durante um intervalo de tempo superior ao crítico, a margem de segurança diminui pela metade;
- Distância necessária para visibilidade.

### 2.2.2.4 Calibração de Simuladores Microscópicos

Os microsimuladores possuem vários parâmetros que representam aspectos do fluxo veicular, do comportamento dos motoristas e das operações de controle de tráfego. Os parâmetros dos modelos desses simuladores possuem respectivos valores *default*. (HOURDAKIS *et al.*, 2003). Estes valores foram obtidos através da análise de condições genéricas do tráfego ou por coleta de dados que representam as características de tráfego do local onde os simuladores foram desenvolvidos. Para que o usuário do software extraia resultados adequados à realidade do tráfego de sua área de estudo, é indispensável a calibração de tais parâmetros (SANTOS, 2013).

Devido à grande quantidade de parâmetros (inerentes ao veículo, ao desempenho da via, aos modelos comportamentais) presentes nos simuladores, o analista precisa escolher

os parâmetros que mais influenciam na medida de desempenho a ser estudada. Segundo Wang e Prevedouros (1998), a calibração dos parâmetros consiste em um processo longo e trabalhoso, até que se conclua o ajuste dos parâmetros com o objetivo de atingir o nível de confiabilidade desejável da modelagem.

É importante ressaltar a diferença entre o parâmetro de entrada e o parâmetro de calibração. O primeiro consiste em um dado que será inserido no simulador durante o processo de codificação e, portanto, antes do processo de calibração. O segundo trata-se do parâmetro a ser ajustado, através de um processo manual (tentativa e erro) ou de uma ferramenta de automatização desse processo (por exemplo, algoritmos genéticos) até que os dados de saída correspondam o máximo possível aos dados de campo. Assim, se o parâmetro foi medido em campo e usado na codificação, o mesmo configura-se como dado de entrada e não como parâmetro de calibração.

### **2.2.3 Aplicação da Microsimulação do Tráfego em Estudos de Transporte Público**

De acordo com Liu *et al* (2000), a maioria dos microsimuladores de tráfego são ferramentas voltadas para a modelagem do comportamento do carro. Fernández e Burgos (2004) afirmam que, em geral, os ônibus são considerados como carros mais compridos, que param em estações e seguem rotas fixas, provocando as mesmas interferências que um carro causaria no tráfego.

Silva (2001) aborda a questão dos pontos de parada, afirmando que estes são componentes representados de forma pouco detalhada, com o ônibus ficando parado nos pontos durante tempos fixos ou aleatórios, não havendo relação entre o tempo de parada e a demanda e características dos passageiros.

Estas são limitações observadas nas versões anteriores dos simuladores. A literatura mais atual mostra o quanto os microsimuladores evoluíram na modelagem de sistemas de transporte público ao longo dos anos. É possível analisar o comportamento dos passageiros nos pontos de parada, simular estratégias de prioridade para ônibus, estudar indicadores inerentes ao transporte público (*headways*, tempo de viagem, confiabilidade etc.), entre outras possibilidades. A seguir, são apresentados estudos com aplicações da microsimulação em diferentes análises de tais sistemas.

Existem publicações internacionais de estudos com aplicações da simulação em análises de sistemas de transporte público por ônibus. No âmbito nacional, o número de trabalhos publicados é reduzido. Dentre eles, tem-se o trabalho de Faggioni e Serratini (2008), que avaliou confiabilidade do transporte por ônibus, através dos simuladores SATURN

(Atkins e ITS, 2015) e DRACULA (ITS, 2015), em um corredor da cidade de Uberlândia. Ainda avaliando confiabilidade, pode-se citar o trabalho de Sorratini *et al.* (2008), que estudaram variáveis como *headway*, excesso de tempo de espera do passageiro, regularidade do serviço e o tempo de reinserção do veículo no fluxo do tráfego de uma rede urbana, utilizando o DRACULA.

Dentre os estudos nacionais, destaca-se ainda o trabalho de Chagas (2014), que utilizou o microssimulador VISSIM (PTV, 2014) para representar o projeto da estação de um corredor de ônibus em Belo Horizonte. O objetivo foi determinar critérios para definir elementos de projeto operacional de estações de corredores de BRT. O autor descreveu sua experiência na codificação e calibração de uma rede representando uma estação de BRT e abordou as vantagens e limitações do microssimulador.

Peron (2015) analisou a velocidade e o tempo de viagem do transporte público em um corredor onde foi implantada a prioridade do tipo TSP. O autor usou o VISSIM para observar os impactos desta estratégia de priorização no transporte público e em outros modos de transporte. Foi utilizado o controlador de lógica externo VISVAP para programar as condições de prioridade a serem representadas no simulador.

Santos (2013) elaborou um método de calibração do modelo *car-following* de Gipps na microssimulação de sistemas de transporte público por ônibus. A autora coletou várias medidas de aceleração e desaceleração dos ônibus em um corredor BRT da cidade de Curitiba através de filmagens e reconhecimento de imagens da operação. No estudo de caso, constata-se a grande influência da lotação do veículo nas acelerações atingidas por este.

No âmbito internacional, pode-se destacar o trabalho de Fernández e Burgos (2004), que analisam a diferença de comportamento no tráfego dos veículos de transporte coletivo em relação a outros tipos de veículos. Os autores estudaram a representação do ônibus e pontos de paradas nos microssimuladores AIMSUN (TSS, 2013), CORSIM (McTrans, 2015), DRACULA (ITS, 2015), PARAMICS (Quadstone, 2015) e VISSIM.

Raj G *et al.* (2013) avaliaram, quantitativamente, o desempenho operacional de um sistema BRT em Nova Deli (Índia), focando na variável velocidade média. Os autores simularam um corredor de 5,8 km utilizando o *software* VISSIM. Hidas *et al.* (2009) abordam o desempenho operacional do ônibus em um corredor de Sydney (Austrália) e avaliam estratégias operacionais de tráfego através de diferentes cenários, com o objetivo de atender à demanda prevista para o sistema de ônibus estudado. O AIMSUN foi o microssimulador utilizado neste estudo.

Tu *et al.* (2009) analisaram variações no tempo de viagem de um corredor em diferentes estratégias de operação. Em alguns dos cenários, os autores variaram o percentual de prioridade para o ônibus ao sair de uma baía e reinserir-se no fluxo, utilizando o PARAMICS.

Ahmed (2014) analisou diferentes estratégias de prioridade para ônibus em cruzamentos semaforizados, observando o tempo de viagem do ônibus e o impacto destas estratégias na fluidez do modo particular. O autor traz uma resumida comparação entre os simuladores AIMSUN, VISSIM e PARAMICS, baseada em revisão bibliográfica, e escolheu o VISSIM como ferramenta mais adequada para o estudo desse tipo de estratégia de prioridade, aplicando o software na simulação dos diferentes cenários da pesquisa.

Zhang *et al.* (2012) propuseram um método de calibração de parâmetros de desempenho da operação de transporte público por ônibus, através da análise do modelo carro seguidor *Gipps*. Os autores estudaram o impacto da prioridade semafórica para ônibus como estratégias de prioridade e utilizaram velocidade máxima, aceleração e desaceleração como parâmetros de calibração. O *software* Aimsun foi empregado no estudo.

Alarcón (2010) comparou as funcionalidades dos simuladores Aimsun e Paramics. O autor simulou diferentes cenários na cidade de Santiago para estudar aspectos como características físicas do sistema, impactos de intervenções na operação do trânsito e estratégias de controle do tráfego. Além disso, foi realizada análise dos parâmetros de calibração dos modelos comportamentais básicos dos simuladores e comparados os esforços de calibração no uso dos mesmos.

Burgos (2004) realizou análise e crítica sobre a modelagem de sistemas de transporte público em modelos de microsimulação do tráfego. A autora apresenta uma revisão bibliográfica a respeito da modelagem do desempenho de operações de tais sistemas nos microsimuladores Aimsun, Corsim, Dracula, Paramics e Vissim. A Tabela 2.7 mostra um resumo da análise dos simuladores para diferentes características do sistema. É importante ressaltar que a pesquisa foi realizada em 2004 e, portanto, não representam necessariamente o potencial de modelagem atual de cada *software*.

Tabela 2.7 - Análise do potencial de modelagem de microssimuladores de tráfego realizada por Burgos (2004)

| Característica   | AIMSUN  | CORSIM                                     | DRACULA                                    | PARAMICS  | VISSIM  |
|--|---|--|--|---|---|
| Atribuição de veículos na rede                         | Opção 1:<br>Frequência seguindo distribuição normal<br>Opção 2:<br>Horários de entrada na rede predefinidos | Frequência fixa                            | Frequência fixa                            | Opção 1:<br>Frequência fixa<br>Opção 2:<br>Horários de entrada na rede predefinidos | Frequência fixa                                   |
| Codificação de arcos e linhas                          | Sequência de seções, nós e pontos de parada   | Sequência de arcos, nós e pontos de parada | Sequência de arcos, nós e pontos de parada | Sequência de arcos, nós e pontos de parada  | Sequência de arcos, conectores e pontos de parada |
| Definição de prioridades nas vias                      | Vias e faixas de uso exclusivo  | Vias e faixas de uso exclusivo             | Vias e faixas de uso exclusivo             | Vias e faixas de uso exclusivo  | Vias e faixas de uso exclusivo                    |
| Definição de prioridades nas interseções               | Semáforos atuados   | Semáforos atuados                          | Semáforos atuados                          | Semáforos atuados   | Semáforos atuados                                 |
| Tipos de pontos de parada de transporte público        | Tradicionais, do tipo baía e terminais  | Tradicionais                               | Tradicionais e do tipo baía                | Tradicionais  | Tradicionais e do tipo baía                       |
| Modelos de chegada de passageiros nos pontos de parada | Sem modelo implementado   | Segue distribuição definida pelo usuário   | Taxa média de chegada passageiros / hora   | Taxa média de chegada passageiros / hora  | Taxa média de chegada passageiros / hora          |
| Passageiros especificados por linha ser utilizada      | Sem implementação   | Informação não disponível                  | Não é possível especificar                 | Sim   | Sim   |

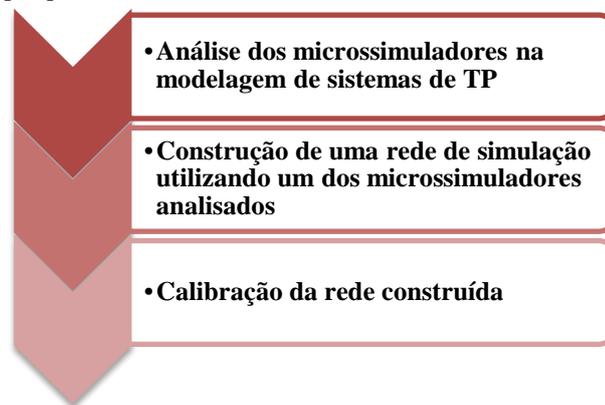
Fonte: Adaptado de Burgos (2004).

A revisão mostra que infraestrutura de corredores, *headway*, confiabilidade e tempo de viagem nos sistemas de transporte público urbano por ônibus são as questões mais abordadas nos estudos. Os microssimuladores AIMSUN, PARAMICS e VISSIM são os mais utilizados em pesquisas atuais.

### 3 METODOLOGIA

As etapas metodológicas da presente pesquisa consistem em: i) análise das funcionalidades das plataformas de microsimulação de tráfego Aimsun e Vissim na representação dos principais componentes dos sistemas de transporte público por ônibus e seleção do simulador a ser empregado no estudo de caso; ii) construção de uma rede de simulação como estudo de caso, utilizando um dos simuladores analisados na etapa anterior e iii) calibração da rede. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas estabelecidas neste trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 3.1 Análise das Funcionalidades dos Microsimuladores

Baseado na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 – em que foram abordados, de forma geral, como os microsimuladores encontrados na literatura representam os principais componentes dos sistemas de transporte público por ônibus: pontos de parada, linhas de ônibus e ônibus – serão analisados, de maneira mais aprofundada, os microsimuladores que mais se destacaram na revisão: Aimsun e Vissim. As principais vantagens e desvantagens de cada *software* serão investigadas através do estudo de seus respectivos manuais e das experiências de aplicação desses simuladores na simulação de uma rede hipotética. Outro simulador, que não está presente na revisão, mas vem sendo usado nos meios técnico e científico e aparece como nova opção de simuladores modernos é o TransModeler (versão 4.0). Porém, em uma análise prévia de seu manual, verificou-se que não é possível realizar a simulação de pedestres nos pontos de parada. Como um dos objetivos deste trabalho é verificar o impacto do comportamento das paradas no tempo de viagem do

ônibus, considera-se que esta limitação é uma grande desvantagem em relação ao Aimsun e ao Vissim.

A análise será dividida em três seções, que correspondem aos segmentos presentes em qualquer procedimento de simulação: dados de entrada, modelagem e dados de saída. A seguir, a Tabela 3.1 mostra as funcionalidades desejáveis em um *software*, na modelagem de sistemas de transporte público, relacionadas aos segmentos em questão. A lista foi elaborada com base na identificação das características operacionais desse tipo de sistema e na experiência dos autores, citados na revisão bibliográfica, na aplicação da microssimulação em diferentes análises de tais sistemas, abordados no Capítulo 2.

Tabela 3.1 - Funcionalidades desejáveis nos microssimuladores na modelagem de sistemas de transporte público por ônibus

| Segmento da Simulação | Funcionalidades  |
|-----------------------|--|
| Dados de Entrada      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Recursos que facilitam a criação e edição de pontos de parada, linhas de ônibus e veículos de transporte público;</li> <li>Representação dos diferentes tipos de pontos de parada, linhas de ônibus e veículos de transporte público.</li> </ul>          |
| Modelagem             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Modelagem do comportamento do condutor do veículo de transporte público;</li> <li>Modelagem do comportamento dos passageiros nos pontos de parada;</li> <li>Modelagem das interações entre os passageiros e os veículos de transporte público.</li> </ul> |
| Dados de saída        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Quantidade de dados de saída diretamente relacionados ao transporte público.</li> </ul>   |

Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, serão estudados os manuais de cada simulador, considerando-se as funcionalidades supracitadas. Os manuais utilizados correspondem às respectivas versões dos microssimuladores que serão utilizados na simulação da rede hipotética: Aimsun 8 e Vissim 7. Todas são versões atualizadas.

A rede hipotética, que será representada nos dois simuladores, deverá englobar os componentes do sistema de transporte público por ônibus mais estudados na literatura: pontos de parada, linhas e ônibus. A rede de tráfego deverá comportar características operacionais de tais sistemas, pois é a partir dela que será adquirida a experiência necessária no uso dos microssimuladores para uma análise pertinente de suas funcionalidades.

### 3.2 Construção e Análise do Experimento de Microssimulação

Após a etapa de análise das funcionalidades dos microssimuladores que se destacaram na revisão, será selecionado o *software* que apresenta mais e/ou melhores funcionalidades para a modelagem de sistemas de transporte público. Este simulador será

utilizado em um estudo de caso, em que será investigado com mais profundidade o potencial da microssimulação como ferramenta de análise de aspectos operacionais de tais sistemas.

A operação atual de um corredor de ônibus urbano da cidade de Fortaleza será utilizada como estudo de caso.

### **3.2.1 Escolha da Área de estudo**

De acordo com Coelho (2009), a área de estudo deve representar as características do sistema de tráfego a ser analisado, com aspectos físicos, financeiros, sociais, ambientais e de demanda. O sistema de transporte a ser representado neste trabalho deve comportar características operacionais encontradas nos sistemas de transporte público por ônibus presentes em áreas urbanas e que permita o estudo das variáveis relacionadas à operação destes sistemas, tais como: i) demanda considerável de veículos e de passageiros; ii) quantidade de linhas de ônibus significativa; iii) linhas com veículos de diferentes dimensões; iv) pontos de parada com geometrias que permitam a acomodação adequada de pesquisadores e possíveis equipamentos para a realização da coleta de dados; v) extensão que permita a análise das interações entre os ônibus e os outros veículos da rede e vi) presença de laços detectores de veículos, a fim de facilitar a coleta de dados e realizar uma possível análise prévia da demanda veicular na área.

### **3.2.2 Coleta de Dados de Fluxo de Veículos**

Como mencionado na seção anterior, um dos critérios para escolha da área de estudo é a presença de laços detectores de veículos nas vias. Os dados de volume veiculares serão coletados através destes laços, em que a manutenção e a validação dos mesmos são realizadas pelo órgão responsável CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza).

Inicialmente, será analisado o perfil de fluxo veicular das vias da área selecionada, verificando-se em que dias da semana e horários são observados maior volume de veículos. Esta análise será realizada com dados de um mês considerado típico e, a partir de seus resultados, serão escolhidos o dia e o horário em que será realizada a coleta de dados de veículos.

As programações semafóricas de cada semáforo da área foram obtidas diretamente através o CTAFOR, que forneceu ciclos, partições de verde, entreverdes, defasagens e planos estabelecidos para cada horário. Ao escolher-se o horário da coleta de

dados, o plano semafórico a ser usado na simulação deverá ser o mesmo que vigora nos semáforos em campo no horário em questão.

### **3.2.3 Coleta de Dados de Fluxo de Passageiros**

Considerando um dos objetivos deste trabalho, que consiste em avaliar o impacto das interações entre veículos e passageiros nos pontos de parada, na modelagem do tempo de viagem dos ônibus, será necessário coletar dados do comportamento nas paradas. Estes consistirão nos dados de entrada para a codificação dos pontos de parada no simulador. Com o simulador já escolhido para a realização do estudo de caso, será analisado quais dados de entrada, especificamente, serão necessários para a codificação de toda a rede.

Em seguida, será analisado o perfil de fluxo de passageiros das linhas de ônibus presentes na área selecionada, verificando-se em que dias da semana e horários são observados maior volume de passageiros. Esta análise será realizada com dados de um mês considerado típico e, a partir de seus resultados, serão escolhidos o dia e o horário em que será realizada a coleta de dados dos pontos de parada, que deverão coincidir com o dia e o horário da coleta de fluxo veicular.

### **3.2.4 Codificação da Rede**

Nesta etapa, serão testadas, de forma mais aprofundada, as funcionalidades relativas à codificação de redes de transporte público presentes no simulador a ser usado no estudo de caso. Serão inseridas as características físicas (dimensões das vias, cruzamentos semaforizados e não semaforizados, dimensões dos pontos de parada e da área de embarque e desembarque e dimensões dos veículos), operacionais (tipo de operação do tráfego, permissões de trânsito, velocidades desejadas, fluxos veiculares e de passageiros, operação semafórica e tipo de operação nos pontos de parada) e comportamentais (gênero, idade e capacidade de locomoção dos passageiros e nível de agressividade na condução dos motoristas) da área de estudo.

Além da inserção dos dados de entrada necessários para representar a área de estudo, serão aplicadas algumas variações na rede – como, por exemplo, aumento significativo da quantidade de passageiros nos pontos de parada, variações no tipo de passageiro (homem, mulher, cadeirante etc.) e variações nas especificações do veículo de transporte público e no comportamento do condutor – a fim de testar a sensibilidade do

simulador, observando-se o quanto os dados de saída são alterados com a variação de alguns parâmetros.

### 3.3 Calibração da Rede de Tráfego

O procedimento de calibração a ser seguido neste trabalho será a adaptação do método proposto por Hellinga (1998), onde as etapas consistem em: i) definição dos objetivos do estudo, ii) determinação das medidas de desempenho, iii) coleta de dados em campo das medidas de desempenho escolhidas, iv) definição dos parâmetros de calibração e v) avaliação dos dados de saída da rede.

De acordo com Rakha e Gao (2010), o núcleo do simulador microscópico é o modelo *car-following*. Dentre os modelos comportamentais, este é o que representa o tipo de movimento mais presente na área do estudo de caso, os movimentos longitudinais. A via estudada possui operação com tráfego compartilhado, onde os veículos de transporte público podem utilizar as duas faixas sem restrições de preferência, porém, observa-se que os mesmos não realizam a mudança de faixa com muita frequência, pois preferem manter-se na faixa em que efetuam embarque e desembarque de passageiros. Além disso, em todos os cruzamentos do trecho em questão, a via mantém-se como preferencial, onde os ônibus que trafegam na mesma não se submetem a interações de aceitação de brechas em cruzamentos não semaforizados. Assim, este trabalho restringe-se à calibração do modelo *car-following* do simulador a ser usado no estudo de caso, com foco nos condutores dos veículos de transporte público por ônibus.

As medidas de desempenho escolhidas para o procedimento de calibração são: tempo de viagem dos ônibus para cada linha simulada e tempo de parada dos ônibus em cada ponto (para cada linha). Como visto na revisão bibliográfica, o tempo de viagem do ônibus consiste em uma das variáveis mais estudadas e está diretamente relacionada ao nível de confiabilidade do sistema de transporte público, que consiste em um dos principais indicadores de qualidade de tais sistemas. Assim como o tempo de parada dos ônibus, que consiste em um indicador de desempenho do transporte público e influencia diretamente no tempo de viagem total dos ônibus.

Os parâmetros de calibração do modelo *car-following* serão ajustados manualmente, através de tentativa e erro, até que os valores de tempo de viagem e tempo de parada dos ônibus simulados aproximem-se ao máximo dos valores coletados em campo. O indicador estatístico utilizado para medir o quanto os valores coletados e simulados estão

próximos será o erro percentual absoluto médio (EPAM). Abordado por Hollander & Liu (2008) como uma das medidas de ajuste (*Goodness-of-fit*) mais usadas nos procedimentos de calibração e que pondera desvios relativos percentuais em tal cálculo, o EPAM é calculado de acordo com a Equação 3.1:

$$\frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \quad (3.1)$$

Em que:

N = número de observações;

$x_i$  = valor observado em campo;

$y_i$  = valor simulado.

## 4 ESTUDO DE CASO

No presente capítulo apresenta-se o estudo de caso, com a aplicação da metodologia estabelecida, com os detalhes e resultados, de cada uma de suas etapas. Inicialmente, é realizada a análise dos microssimuladores que se destacaram na revisão. Em seguida, são descritos o estudo de caso e a calibração da rede usada neste.

### 4.1 Análise das Funcionalidades dos Microssimuladores

Nesta etapa, é explanado como os dois microssimuladores de tráfego representam os componentes: ponto de parada, linha de ônibus e ônibus. A análise é baseada no estudo dos manuais e do manuseio de cada *software*, com o objetivo de identificar e explorar suas funcionalidades.

#### 4.1.1 AIMSUN

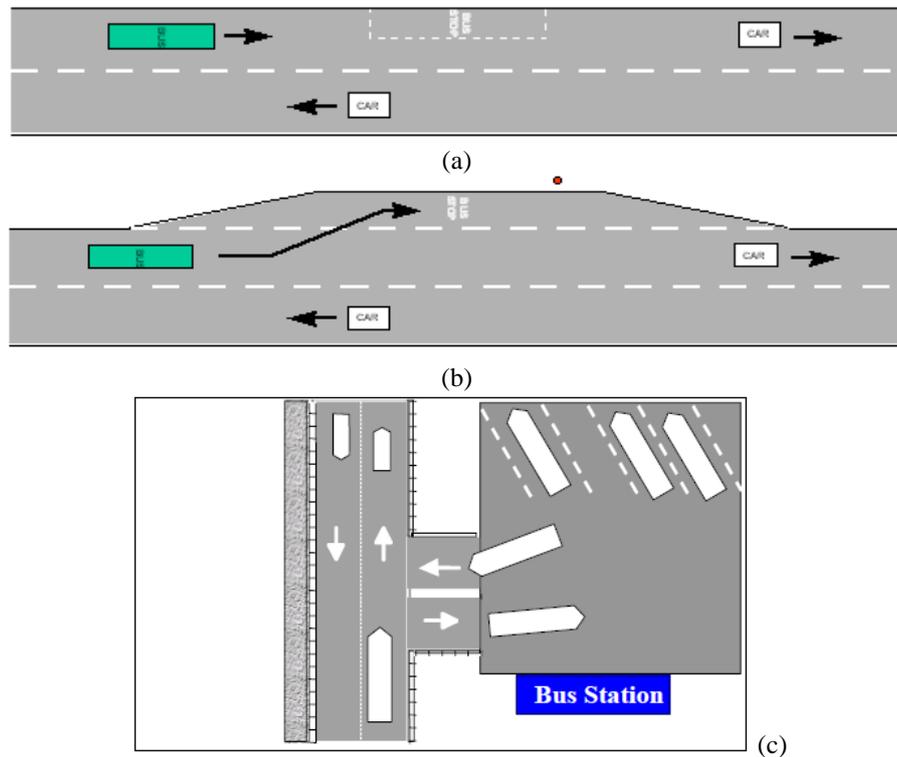
Os dados de entrada necessários para a construção de uma rede básica de transporte público por ônibus no Aimsun são: linhas de ônibus, com as vias por onde os veículos percorrerão suas rotas específicas; corredores ou faixas reservadas para ônibus, caso o tipo de operação de tráfego exija; pontos de para de ônibus, com localização, dimensões e tipos; atribuição dos pontos de parada para as respectivas linhas que passarão pelas mesmas e a tabela horária, com a programação das saídas da origem, o tipo de veículo da linha e tempos de parada para cada parada de ônibus (TSS, 2013).

##### 4.1.1.1 Pontos de Parada

No simulador, os pontos de parada são desenhados e incorporados às vias (seções) ocupando uma de suas faixas, podendo ser representados por três tipos, apresentados na Figura 4.1: baia (os veículos param fora da seção), convencional (os veículos para na própria via) e terminal (a parada possui maior capacidade de veículos). Depois de codificada, a parada pode ser deslocada para qualquer ponto ao longo da seção, assim como seu comprimento.

Na operação com paradas do tipo baia, observou-se que, quando a baia já está ocupada por um ônibus e não há espaço para um segundo veículo inserir-se, o ônibus que chega posteriormente aguarda na faixa de tráfego até que o primeiro desocupe a parada, representando a realidade observada em operações de campo.

Figura 4.1 - Tipos de parada convencional (a), baía (b) e terminal (c) no Aimsun



Fonte: TSS (2013).

Ao codificarem-se os pontos de parada no Aimsun, verificou-se que são exigidos os valores dos parâmetros de tipo de parada, comprimento, capacidade e distância de visibilidade da parada (com valor *default* de 200 metros). Este último consiste na distância do ponto da via onde o ônibus visualiza a parada de ônibus até o próprio ponto de parada. Consiste em um importante parâmetro a ser considerado, pois influencia na desaceleração do veículo até parar por completo no ponto de parada. Além destes, também são exigidos atributos relacionados ao comportamento em si nas paradas. São eles: *Wait For Pedestrians To Board* – quando este atributo está habilitado, os ônibus sempre esperam pelo passageiro até o mesmo chegar à área de embarque/desembarque; *Road side*, que consiste no lado da via onde os passageiros devem embarcar ou desembarcar; *Boarding Time*, que é o tempo de embarque de cada passageiro e *Alighting Time*, que consiste no tempo de desembarque de cada passageiro. Os valores *default* dos dois últimos atributos no Aimsun são, em segundos, 1,20 e 0,90, respectivamente.

Os veículos de transporte público param em pontos fixos ao longo da rota para embarcar e desembarcar passageiros. A quantidade de tempo gasto pelo ônibus na parada é determinada pelo parâmetro *Stop Time*. Seus valores são estabelecidos através de distribuição normal, indicando-se o tempo de parada médio e o desvio padrão.

No Aimsun, é possível simular o embarque e desembarque nos passageiros nos pontos de parada e visualizá-los em 2D ou 3D. Para isso é necessário criar a área de espera, as rotas que orientam para onde o passageiro deve ir ao descer no ônibus e a quantidade de passageiros que embarca e desembarca. É possível extrair dados de saída relacionados ao comportamento nas paradas. São eles: *Count*, que é a quantidade de pedestres que usou o veículo de transporte público; *Waiting Time*, que consiste no tempo de espera médio no ponto de parada e *Total Waiting Time*, que se trata da soma dos tempos de espera de todos os passageiros da parada.

#### 4.1.1.2 Linhas de Ônibus

A linha de transporte público do Aimsun é composta pela sua rota, pontos de parada atrelados ao seu itinerário e pela série de horários a qual é submetida. É necessário criar um Plano de Transporte Público, que consiste em uma lista de quadros de horários que guiam os horários de partida das linhas.

Os veículos de transporte público são gerados e entram na rede através da primeira seção de cada linha de ônibus e eles trafegam ao longo da rede seguindo o itinerário da linha correspondente e fazendo as paradas nos pontos estabelecidos. Os tempos de chegada são obtidos de acordo com o horário do ônibus, determinado na tabela horária. Se há um terminal de ônibus na primeira seção de uma linha, os ônibus vão começar a sua viagem neste ponto. Caso contrário, eles começam a viagem no início da primeira seção da linha. Assim como, se houver um terminal na última seção de uma linha, o ônibus vai terminar a viagem neste ponto. Não havendo terminal, eles terminarão a viagem no final da última seção da linha.

Os ônibus seguem uma rota fixa através da rede e comportam-se como qualquer outro veículo quando não há um ponto de parada, seguindo os modelos de mudança de faixa e de carro seguidor do Aimsun. Ao identificarem um ponto de ônibus correspondente à linha, eles passam a comportar-se como veículo de transporte público e param no local apropriado. Caso não estejam na faixa adjacente ao ponto de parada, eles tentam mudar para a faixa apropriada antes de atingir o ponto de ônibus e reduzirão a velocidade antes de chegar no mesmo. O modelo de movimentação do veículo do Aimsun garante que: o ônibus mude de faixa a tempo; que ele entre na baía ou saia da via, caso seja obrigados a parar em um terminal; que os ônibus saiam de uma parada do tipo baía aguardando uma brecha segura para se reinserirem no fluxo.

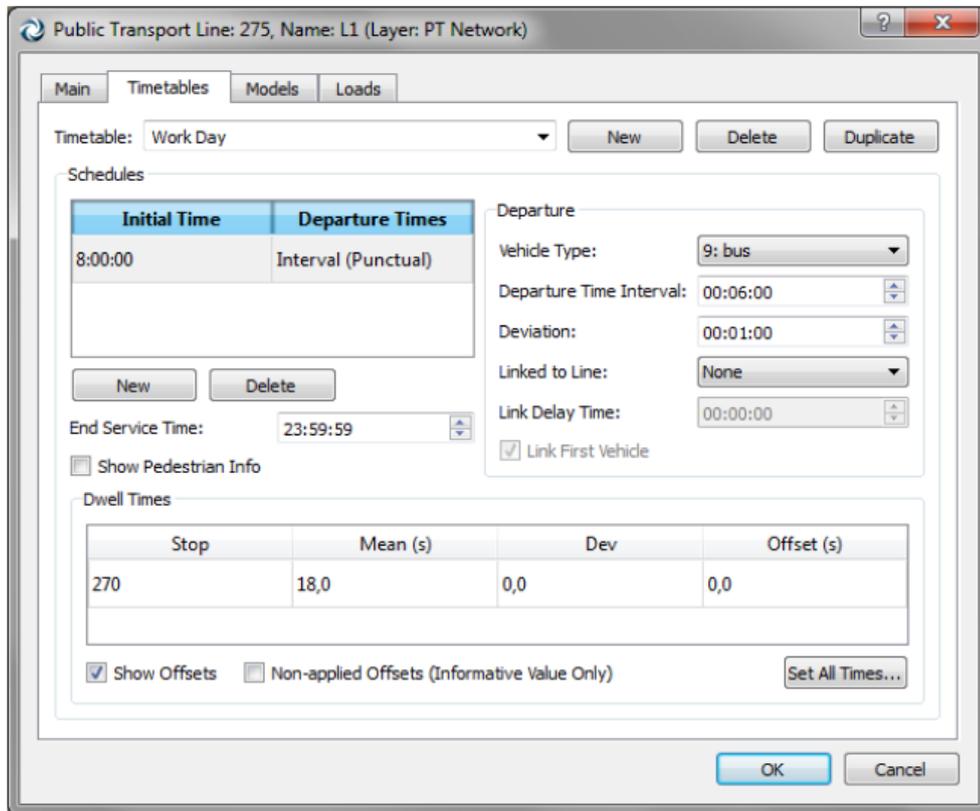
No caso das faixas exclusivas para ônibus, caso ela esteja presente no itinerário da linha, o ônibus trafegará pela faixa em questão. Porém, em qualquer caso, os movimentos de conversão e de parada nos pontos possuem prioridade em relação às faixas exclusivas. Ou seja, se o ônibus precisar realizar conversão ou embarque e desembarque em uma faixa que não seja a preferencial, o mesmo sairá da faixa exclusiva.

O *Timetable* define como os pedestres irão embarcar e desembarcar na linha. Os parâmetros de *Initial Pedestrian Load* e *Deviation* indicam o carregamento do ônibus ao entrar na rede. Já *Alighting Mean* define a quantidade de passageiros que desembarcam nas paradas, onde é inserindo um valor médio e desvio padrão e o cálculo dos valores absolutos é feito por distribuição uniforme. Da mesma forma, é determinada a quantidade de passageiros que embarca nos ônibus, definida pelo parâmetro *Board Mean*, sendo que o número de passageiros que embarcam depende da quantidade de pedestres presentes nos pontos de parada. Os dois últimos parâmetros influenciam no tempo de parada total do ônibus, como visto na Figura 4.2. Outros atrasos, como por exemplo, o tempo gasto na abertura e fechamento das portas, não participa da definição do tempo de parada.

#### 4.1.1.3 Ônibus

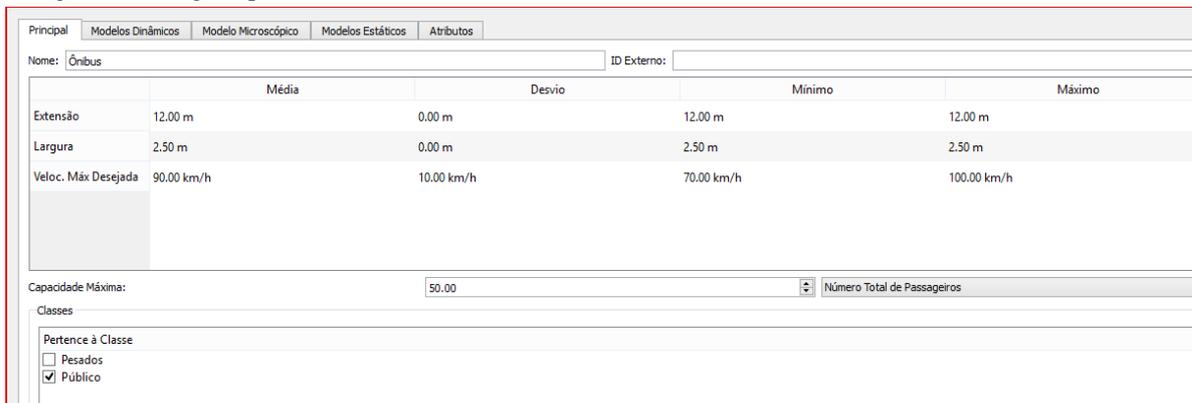
No Aimsun, é possível representar os diferentes tipos de ônibus vistos na revisão. Seus parâmetros podem ser editados e adaptados para a configuração do veículo que se deseja simular, como visto na Figura 4.3. Os parâmetros consistem em comprimento, largura, capacidade, velocidade máxima desejada, capacidade máxima do ônibus, peso, potência, acelerações e desacelerações mínimas, médias e máximas, quantidade e operação das portas e, por fim, parâmetros relacionados aos seus modelos comportamentais. Durante a codificação, observou-se que há poucas opções de modelo 3D para ônibus, dificultando a visualização do andamento da simulação, caso existam muitos tipos de veículo na rede.

Figura 4.2 - Parâmetros para definição do quadro de horários das linhas no AIMSUN



Fonte: TSS (2013).

Figura 4.3 - Alguns parâmetros atrelados ao ônibus no AIMSUN



Fonte: Elaborado pela autora no AIMSUN (TSS, 2013).

Como mencionado anteriormente, dentre os modelos comportamentais, o carro seguidor representa o núcleo do simulador. Portanto, a análise do comportamento do condutor será baseada neste modelo. O modelo de perseguição veicular implementado no Aimsun consiste em uma variação do modelo *Gipps* (1981 e 1986). O modelo é formado por dois componentes: a aceleração, que representa a pretensão do condutor em atingir uma certa velocidade desejada e a desaceleração, que reproduz os obstáculos desencadeados pelo

veículo precedente enquanto o veículo seguidor busca atingir a velocidade desejada. (Barceló, 2010).

A velocidade máxima a qual um veículo (n) pode acelerar (sem estar em processo de seguimento do veículo líder) durante um período de tempo (t, t + T) é representada pela Equação 4.1:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (4.1)$$

Em que:

$V(n, t)$  = velocidade do veículo n no tempo t;

$V^*(n)$ : é a velocidade desejada pelo veículo n na atual seção;

$a(n)$ : é a aceleração máxima para o veículo n;

T: é o tempo de reação.

A velocidade máxima queo mesmo veículo(n) pode atingir, durante o mesmo intervalo de tempo (t, t +T), de acordo com a suas características próprias e as limitações impostas pela presença de o veículo da frente (veículo n-1) é dada pela Equação 4.2 (TSS, 2013):

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n)[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)}} \quad (4.2)$$

Em que:

$d(n)$  (< 0) é a máxima desaceleração desejada pelo veículo n;

$x(n, t)$  é a posição do veículo n no tempo t;

$x(n-1, t)$  é a posição do veículo precedente (n-1) no tempo t;

$s(n-1)$  é o comprimento efetivo do veículo (n-1);

$d'(n-1)$  é uma estimativa da desaceleração desejada pelo veículo (n-1).

A Equação 4.3 apresenta a velocidade definitiva para o veículo (n) no intervalo de tempo (t, t+T) é o mínimo entre as duas velocidades supracitadas:

$$V(n, t + T) = \min \{V_a(n, t + T), V_b(n, t + T)\} \quad (4.3)$$

Assim, a posição do veículo  $n$  é atualizada através da inserção desta velocidade definitiva na equação 4.4:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad (4.4)$$

Em que:

$x(n, t+T)$  = posição do veículo  $n$  no intervalo  $t + T$ (m);

$x(n, t)$  = posição inicial do veículo (m);

$V_{min}(n, t+T)$  = menor velocidade obtida pelas Equações de  $V_a$  e  $V_b$ .

O usuário do Aimsun pode escolher entre diferentes versões de modelos de perseguição veicular. As versões 4.1 e 4.2 diferenciam-se somente em relação à estimativa da desaceleração do veículo líder. Já a versão 6.0 inclui o *headway* mínimo entre o veículo líder e o seguidor, introduzindo uma nova restrição do componente de desaceleração do modelo Gipps.

Na versão 4.1, assume-se que a estimativa da desaceleração do líder é a própria desaceleração desejada do mesmo, como pode ser visto na Equação 4.5. Esta condição pode provocar instabilidades na simulação, pois alguns veículos seguidores acabam trafegando muito próximos do líder.

$$d'(n - 1) = d(n - 1) \quad 4.5$$

Em que:

$d'(n-1)$  = estimativa da desaceleração do veículo líder;

$d(n-1)$  = desaceleração desejada do veículo líder.

A versão 4.2 adota que a estimativa da desaceleração do líder é a média aritmética entre a desaceleração desejada do líder e do seguidor, como pode ser visto na Equação 4.6.

$$d'(n - 1) = 1/2 \{d(n) + d(n - 1)\} \quad (4.6)$$

Em que:

$d(n)$  = desaceleração desejada do veículo seguidor.

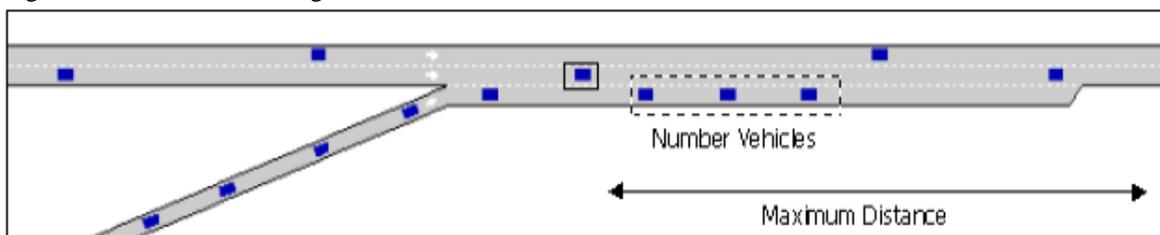
Com a introdução de um *headway* mínimo entre o líder e o seguidor, a versão 6.0 considera a desaceleração do líder como função de um novo parâmetro “ $a$ ”, denominado

Fator de Sensibilidade, como visto na Equação 4.7. Quando “ $a$ ” é menor que 1, o veículo seguidor subestima a desaceleração do líder e, como consequência, se torna mais agressivo, diminuindo o *gap* com o líder. Se “ $a$ ” é maior que 1, o veículo seguidor superestima a desaceleração do líder e, assim, o condutor torna-se mais cauteloso, aumentando o *gap* com o líder.

$$d'(n - 1) = d(n - 1).a \quad (4.7)$$

A proposta do *car-following* de duas faixas do AIMSUN é modelar a influência das pistas adjacentes, apresentado na Figura 4.4. Quando o veículo está se movimentando ao longo da via, o AIMSUN considera a influência que certo número de veículos – que se trata do parâmetro “*Number of Vehicles*” – que se movimentam mais lentamente na faixa adjacente do lado direito, pode ter sobre o veículo. O modelo define uma nova velocidade máxima desejada para o veículo naquela seção (*maximum desired speed of a vehicle in the section*), que vai, assim, ser utilizada no modelo *car-following*.

Figura 4.4 - Modelo carro seguidor do AIMSUN



Fonte: TSS (2013).

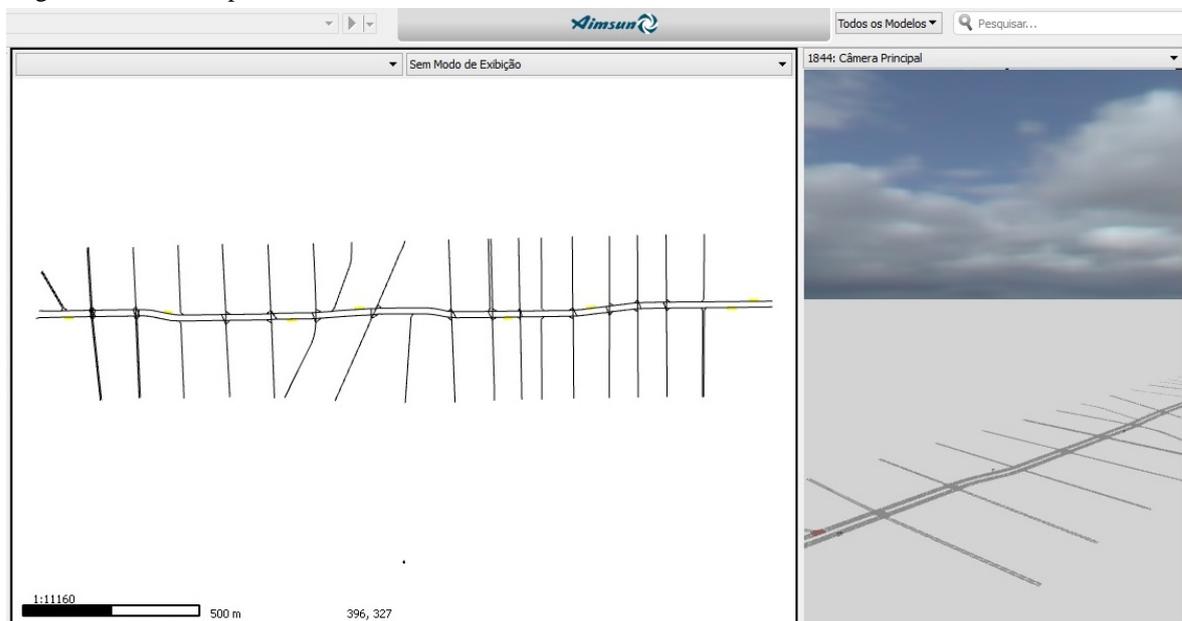
Primeiramente, o modelo calcula a velocidade média para um número de veículos (*Number Vehicles*) viajando a jusante do veículo em uma pista mais lenta adjacente (*Mean Speed Vehicles Down*). Apenas veículos com certa distância (*Maximum Distance*) do veículo atual são considerados.

Se o número de veículos envolvidos for menor que o valor do parâmetro *Number Vehicles*, a velocidade desejada para o atual veículo na via (*Desired Speed of the Current Vehicle at the Section*) é usada para complementar os valores do número de veículos para obtermos uma média mais significativa. A seguir, os parâmetros de *car-following* são listados e detalhados:

- Número de veículos: consiste no número máximo de veículos que devem ser considerados na mudança entre duas faixas;
- Distância máxima: Consiste na distância máxima à frente (em metros) a ser considerada no modelo *car-following* de duas faixas. Por exemplo, se o parâmetro “Número de Veículos” assumir o valor 4 e o parâmetro “Distância Máxima” assumir o valor 100, significa que o veículo seguidor será mais influenciado pelos 4 primeiros carros da frente na faixa adjacente que estão localizados nos próximos 100 metros da sua posição;
- Diferença máxima de velocidade: Diferença de velocidade máxima (em km/h) entre a faixa principal e a faixa adjacente;
- Parâmetro de diferença de velocidade: As diferenças de velocidade definidas podem ser consideradas como diferenças absolutas ou relativas.

A Figura 4.5 apresenta a rede hipotética construída no Aimsun. Como ela, foi possível compreender melhor como os elementos são construídos no simulador.

Figura 4.5 - Rede hipotética construída no AIMSUN



Fonte: Elaborado pela autora no AIMSUN (TSS, 2013).

#### 4.1.2 VISSIM

Para codificar uma rede básica de transporte público por ônibus no Vissim, são necessários: linhas de ônibus, especificando-se o respectivo tipo, com as vias por onde os veículos percorrerão suas rotas específicas; corredores ou faixas reservadas para ônibus (caso o tráfego

não seja compartilhado); pontos de paradas de ônibus, com suas dimensões, tipos e posições; atribuição dos pontos de parada para as linhas correspondentes e suas tabelas horárias; o tipo de veículo da linha e tempos de parada para cada parada de ônibus (PTV, 2014).

#### 4.1.2.1 Pontos de Parada e Linhas de Ônibus

Há três estratégias para configurar a simulação do embarque e desembarque de passageiros nos pontos de parada e do tempo de permanência no ponto de parada: por meio de distribuição de tempos de parada com média e desvio-padrão; através do modelo avançado de passageiros, que depende do tempo de embarque e desembarque do passageiro com; o módulo *Viswalk* permite simular os pedestres baseado na geração dos mesmos em suas origens. O uso desse módulo oferece maior capacidade de se aproximar da realidade. A seguir, cada estratégia é descrita:

Tempo de parada por distribuição: o tempo de parada é baseado na distribuição do tempo de parada. Após definir todas as distribuições (com suas médias e desvios), é necessário atribuí-las para cada parada servida por uma linha de transporte público.

Modelo avançado de passageiros: o tempo de parada e o número de passageiros que embarcam e desembarcam são calculadas utilizando o modelo avançado. Neste método, é necessário definir no veículo de transporte público os parâmetros solicitados pelos simuladores: como tempos médios por passageiro de embarque e desembarque, tempo porto e capacidade do ônibus para passageiros.

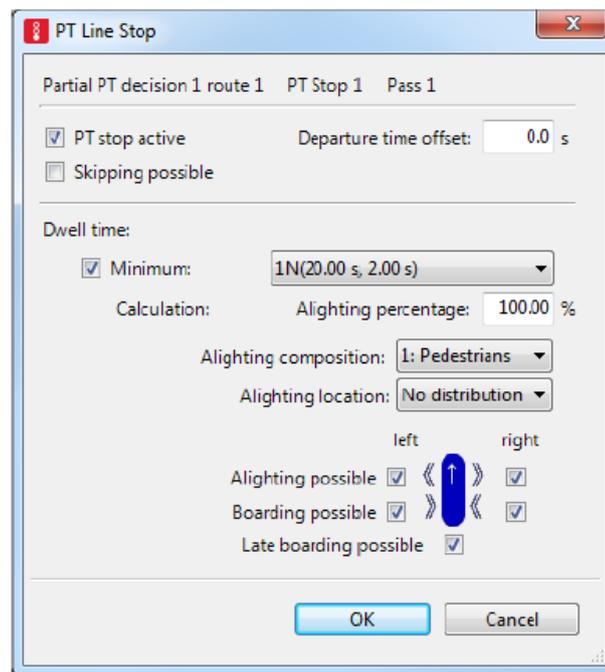
*Viswalk* (simulação de pedestres microscópica): o tempo de parada e o número de passageiros que embarcam e desembarcam são calculados durante a simulação, sendo necessário criar demanda, composição e rotas para pedestres para cada parada.

Com relação ao comportamento do ônibus ao chegar ao ponto de parada, ao se aproximar do ponto, o veículo reduz sua velocidade atual, a fim de atingir a velocidade inferior especificada, com uma desaceleração cujo valor também é estabelecido pelo usuário. O impacto no perfil de velocidade do ônibus ocorre quando ele passa pelo início da área.

As linhas de transporte público são codificadas da mesma forma que as rotas estáticas, com a diferença de que os veículos não são distribuídos e sim gerados. Mesmo após a conclusão da rota, os veículos permanecem na rede e viajam em rotas indefinidas. É possível desativar a linha para certas paradas, aplicando a operação de linhas seletivas. Também há a opção de habilitar o parâmetro *Skipping Possible*, em que os ônibus não param caso não haja passageiros para embarcar ou desembarcar em 50 metros antes da parada.

Para codificar as linhas é necessário escolher o tipo de veículo que faz parte da frota da linha em questão, inserir uma distribuição de velocidade desejada para a linha, escolher os pontos de parada onde a linha será ativa, o percentual de passageiros que desembarcarão de cada veículo da linha (dada pelo percentual de passageiros já presentes no veículo e a ocupação inicial do ônibus ou por distribuição). A figura 4.6 apresenta os parâmetros necessários para codificar as linhas no Vissim.

Figura 4.6 - Parâmetros necessários para codificar as linhas no VISSIM



Fonte: PTV (2014)

No Vissim, existe a opção de adicionar mais um intervalo de tempo nos horários de partida das linhas, através do parâmetro “*Time Offset*”, que consiste no tempo necessário para os ônibus entrarem na rede antes de seus horários de partida, a fim de partirem exatamente no horário programado, na primeira parada da rede.

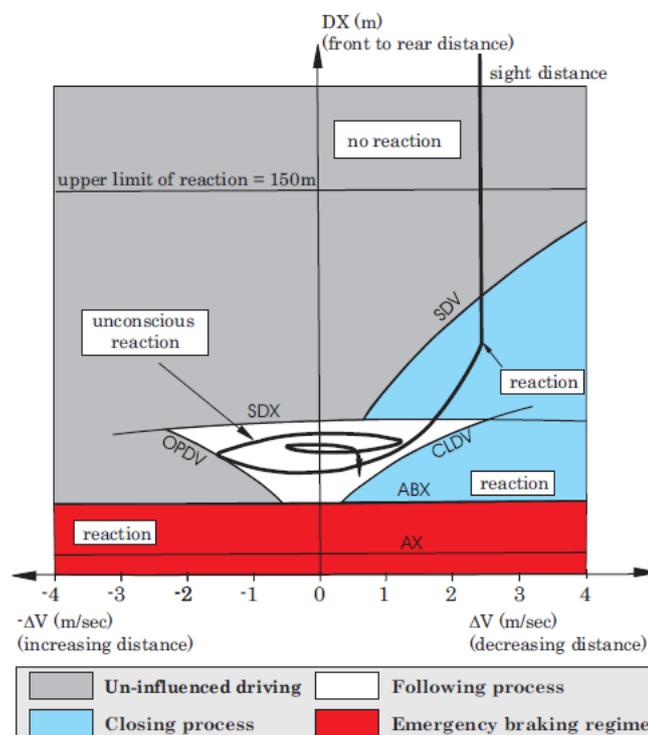
#### 4.1.2.2 Ônibus

Os dados necessários para codificar um veículo como ônibus são: comprimento, largura, distância entre os eixos, todas as informações sobre as portas (posição, altura, largura, operação, altura do degrau), peso (codificado por distribuição), potência (codificado por distribuição), velocidade desejada (codificado por distribuição), aceleração (codificado por função em relação à velocidade de cruzeiro) e desaceleração (codificado por função em relação à velocidade de cruzeiro).

Sobre o comportamento do condutor no Vissim, tem-se o modelo de perseguição veicular do tipo psicofísico (*Action Point*). De acordo com PTV (2014), a lógica do modelo é compreendida da seguinte forma: o condutor trafegando com seu veículo, ao avistar outro condutor com velocidade inferior a sua frente (atingindo um limite de percepção), passa a diminuir sua velocidade. Como o condutor seguidor não é capaz de identificar a velocidade do veículo líder (o que está à frente), ele tende a desacelerar de forma que sua velocidade atinja um valor abaixo da velocidade do líder. Posteriormente, ele percebe que pode acelerar e aumenta um pouco mais sua velocidade (atingindo outro limite de percepção). Assim, é desencadeado um processo iterativo de aceleração e desaceleração.

Os limites de percepção mencionados anteriormente, segundo Wiedemann e Reiter (1992), são representados por seis curvas de percepção. Estas curvas são originadas de expressões matemáticas que consideram erros de estimativa de distância, velocidade e taxas de aceleração e desaceleração em relação ao mesmo condutor ao longo do tempo e em relação a condutores diferentes. A Figura 4.7 apresenta as curvas de percepção.

Figura 4.7 - Limites de percepção do modelo *car-following* de Wiedemann e Reiter (1992)



Fonte: Cunto (2008)

Ainda de acordo com Wiedemann e Reiter (1992), as interações entre os veículos observadas no modelo *car-following* de Wiedemann são definidas através dos seguintes

estágios: condução livre, processo de aproximação, processo de perseguição (ou *following*) e processo de frenagem. Os limites para cada estágio são definidos como:

- AX – distância desejada entre dois veículos sucessivos em uma fila veículo e o veículo a sua frente, passando a acelerar novamente. Este limite é expresso pela Equação 4.10.

$$OPDV = CLDV \cdot (-OPDV_{add} - OPDV_{mult} \cdot NRND) \quad (3.5)$$

Em que:

OPDV<sub>add</sub>, OPDV<sub>mult</sub> = parâmetros de calibração.

O microssimulador VISSIM oferece duas opções de modelos de carro seguidor (ambos psicofísicos): o Wiedemann 74 e o Wiedemann 99 (versão atualizada do algoritmo de Wiedemann 91). De acordo com PTV (2014), o primeiro é mais recomendado para a simulação de redes com características de tráfego urbano e possui três parâmetros para a realização da calibração do modelo. O segundo adequa-se melhor à simulação de redes com características de tráfego rodoviário ou interurbano e possui dez parâmetros para a realização da caracterização do modelo. Como a análise deste trabalho é para sistemas de transporte público urbanos, será abordado o modelo Wiedemann 74.

O modelo de Wiedemann 74 proporciona três parâmetros para realizar a calibração:

- Distância Média com Veículos Parados (correspondente a AX): consiste na distância média desejada entre os veículos parados. Ele tem uma variação entre -1,0m e 1,0m;
- O Aditivo de Distância de Segurança Desejada ( $bx_{add}$ ) e o Multiplicador da Distância de Segurança Desejada ( $bx_{mult}$ ): ambos os parâmetros influenciam no cálculo da distância de segurança. Calcula-se a distância entre dois veículos (distância “d”) através da seguinte fórmula:  $d = ax + bx$ .

Em que:

$ax$  = distância desejada entre dois veículos parados e

$$bx = bx_{add} + bx_{mult} \cdot z) \cdot \sqrt{v};$$

$v$  = velocidade do veículo (m/s);

$z$  = valor de intervalo [0,1], com distribuição normal de 0,5 e desvio padrão de 0,15.

A Figura 4.8 apresenta a rede hipotética construída no VISSIM. Como ela, foi possível compreender melhor como os elementos são construídos no simulador e quais são saídas relacionadas ao transporte público podem ser extraídas.

Figura 4.8 - Rede hipotética construída no VISSIM



Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

### 4.1.3 Vantagens e Desvantagens

As duas ferramentas podem modelar pontos de parada de ônibus, linhas de ônibus e ônibus, mas foram observadas algumas particulares que facilitam o processo de simulação e deixam a modelagem mais completa e confiável.

AIMSUN e VISSIM são mais adequados para modelar parada de ônibus porque possuem bons recursos na representação da mesma e a construção é intuitiva e simples. Porém, o AIMSUN só apresenta o método de distribuição normal para modelagem dos tempos de parada, o que exclui desse tempo medidas como tempo morto simulado. O VISSIM mostra-se mais completo, pois pode modelar o tempo de permanência utilizando-se a distribuição normal, modelo avançado de passageiros ou simulação de passageiros com Viswalk.

Ahmed (2014) considera o VISSIM o mais adequado na modelagem da estratégia de prioridade para ônibus em cruzamentos semaforizados. O VISSIM é melhor do que AIMSUN para representar pontos de parada de ônibus (BOXILL e YU, 2000; THORRIGNAC, 2008; BARRIOS *et al*, 2001). Para Kolmova *et al* (2006), ele possui mais recursos para construção de pontos de parada. O *software* representa melhor as impedâncias da operação do ônibus em campo (PAPAGEORGIU *et al*. 2009; BARRIOS *et al*. 2001; RATROUT e RAHMAN, 2009).

De acordo com Thorrignac (2008), VISSIM pode modelar operações precisamente detalhadas de ônibus, métodos de prioridade de ônibus em semáforos e impactos

mais amplos de estratégias de prioridade de ônibus na fluidez de outros usuários. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados da análise das funcionalidades dos microssimuladores, em termos de codificação, modelagem e obtenção das saídas da simulação.

De acordo com os autores supracitados, com as informações fornecidas nos respectivos manuais e com a experiência obtida no manuseio dos simuladores, entende-se que o VISSIM se destaca mais em estudos que envolvam análise dos componentes de sistemas de transporte público por ônibus e dos indicadores de qualidade considerados.

## **4.2 Construção e Análise do Experimento de Microssimulação**

### **4.2.1 Definição da Área de Estudo**

A área escolhida como rede de tráfego para o estudo de caso consiste em um trecho da Av. Heráclito Graça, localizado na cidade de Fortaleza. Trata-se de uma via arterial, com quatro faixas de rolamento (duas por sentido) e separação por canteiro central. Possui volume médio diário de aproximadamente 29.800 veículos e está entre as 30 vias de Fortaleza com maiores VMD's. A maioria de seus cruzamentos são semaforizados, com presença de laços detectores (controlados pelo CTAFOR). Há vários polos geradores de viagens por transporte público ao longo da via e entorno, como por exemplo, escolas, faculdades e clínicas médicas.

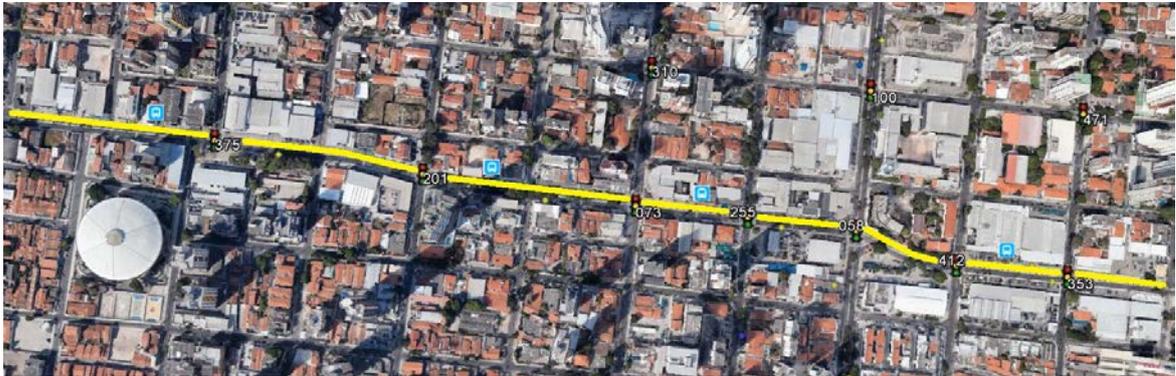
O trecho utilizado no estudo de caso, apresentado na Figura 4.9, compreende o intervalo de sentido leste/oeste da Av. Heráclito Graça, entre as ruas José Vilar e Antônio Augusto. Possui aproximadamente 1,2 km de extensão e é composto por 10 cruzamentos (sendo 7 semaforizados e 3 não semaforizados), 4 pontos de parada de ônibus (com 2 do tipo placa e 2 do tipo plataforma), presença de 4 linhas de ônibus (2 complementares e 2 convencionais) e operação do tipo tráfego compartilhado.

Tabela 4.1 - Análise das funcionalidades dos microsimuladores AIMSUN e VISSIM

| Segmento da simulação | Funcionalidades   | AIMSUN  | VISSIM   |
|-----------------------|---|---|--|
| Dados de entrada      | Criação e edição de pontos de parada, linhas de ônibus e ônibus                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa visualização 2D/3D;</li> <li>- Menos detalhes na edição dos ônibus;</li> <li>- É possível importar dados do tempo de parada, linha e veículos de transporte público de outros simuladores (inclusive do Vissim)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa visualização 2D/3D;</li> <li>- Mais intuitivo;</li> <li>- Melhor representação da aceleração e desaceleração dos ônibus (através de função);</li> <li>- Não é possível importar elementos de transporte público de outros simuladores.</li> </ul>   |
|                       | Representação dos diferentes tipos de pontos de parada, linhas de ônibus e ônibus | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelagem do tempo de parada apenas por distribuição;</li> <li>- A quantidade de desembarques de cada veículo (para cada parada) é definida com base na porcentagem da ocupação com a qual o mesmo se encontra no momento da simulação, tornando mais complexa a codificação;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mais opções para modelagem do tempo de parada: por distribuição dos tempos de parada, através de um modelo avançado de geração de passageiros e do módulo adicional Viswalk;</li> <li>- A quantidade de desembarques de cada veículo (para cada parada) é definida com base na porcentagem da ocupação com a qual o mesmo se encontra no momento da simulação, tornando mais complexa a codificação;</li> <li>- Oferece recursos que facilitam o controle da programação dos horários de partida das linhas.</li> </ul> |
| Modelagem             | Modelagem do comportamento do condutor do veículo de transporte público           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mais parâmetros de calibração;</li> <li>- Representa bem as variações de agressividade do condutor</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se usado o Wiedemann 74 (algoritmo recomendado para redes urbanas), há menor quantidade de parâmetros de calibração, reduzindo o tempo do procedimento;</li> <li>- Representa bem as variações de agressividade do condutor.</li> </ul>   |
|                       | Modelagem do comportamento dos passageiros nos pontos de parada                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possui modelo de movimentação de pedestres (Legion), com quantidade de parâmetros equivalente ao Vissim</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possui modelo de movimentação de pedestres (modelo de forças sociais), com quantidade de parâmetros equivalente ao Aimsun</li> </ul>  |
|                       | Modelagem das interações entre os passageiros e os ônibus                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A lotação observada dentro do veículo não influencia no tempo de embarque dos passageiros;</li> <li>- Não é possível analisar a influência de variáveis como altura do degrau dos veículos e largura das portas no tempo de embarque e desembarque dos passageiros.</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A lotação observada dentro do veículo não influencia no tempo de embarque dos passageiros;</li> <li>- Não é possível analisar a influência de variáveis como altura do degrau dos veículos e largura das portas no tempo de embarque e desembarque dos passageiros.</li> </ul>  |
| Dados de saída        | Quantidade de saídas diretamente ligadas ao transporte público                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possui saídas diretamente relacionadas aos veículos de transporte público, mas a extração dos resultados desagregados por linhas não é facilitado.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- O Vissim possui vários dados de saída diretamente relacionados ao transporte público, que podem ser acompanhados até durante a simulação.</li> </ul>  |

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.9 - Área selecionada para o estudo de caso



Fonte: Elaborado pela autora no *Google Earth*.

As linhas 028-Antônio Bezerra/Papicu, 098-Expresso/Antônio Bezerra/Papicu, 701-Parque Americano e 816-Edson Queiroz/Centro compõem o grupo de linhas presentes na área de estudo. Na Tabela 4.2, são descritos os dados operacionais das mesmas. Os dados da linha 098 não constavam no anuário estatístico consultado, pois esta foi criada posterior à edição do documento.

Tabela 4.2 – Características operacionais das linhas presentes na área de estudo

| Linha | Tipo         | Extensão (km) | Frota (veículos) | Demanda Equivalente / dia (passageiros) | Índice de Passageiros por Km (IPK) | Índice de Passageiros Equivalentes por Km (IPKe) |
|-------|--------------|---------------|------------------|---|------------------------------------|--|
| 028   | Complementar | 26,2          | 23               | 8.958                                   | 4,0                                | 3,3  |
| 701   | Convencional | 13,6          | 6                | 1.359                                   | 2,6                                | 1,8  |
| 098   | Complementar | 26,6          | 17               | 2.486                                   | 1,9                                | 1,7  |
| 816   | Convencional | 26,0          | 10               | 4.893,5                                 | 3,3                                | 2,5  |

Elaborado pela autora com dados de SINDIÔNIBUS (2016)

As linhas 028, 098 e 816 possuem frota com ônibus do tipo padrão e seguem o tipo de operação onde, nos pontos de parada que estão fora dos terminais, os passageiros embarcam pela porta traseira e desembarcam pela porta dianteira (com exceção dos passageiros idosos, gestantes e portadores de necessidades especiais), realizando o pagamento com o cobrador que fica posicionado próximo à porta traseira. Já a linha 701 possui frota com veículos do tipo micro-ônibus e funciona com somente um operador por veículo, em que este exerce as atividades de cobrador da tarifa e de motorista. Nos veículos desta linha, os passageiros embarcam pela porta dianteira e desembarcam pela porta traseira, exceto os passageiros identificados com condição de mobilidade reduzida.

Os dois tipos de veículo de transporte público por ônibus presentes nas linhas da área de estudo são o convencional e o micro-ônibus. ETUFOR (2010) classifica os veículos empregados nas linhas urbanas da cidade – com base em características físicas e de desempenho operacional, como por exemplo, potência do motor, distância entre eixos, carga máxima por eixo e PBT e dimensões do veículo e das portas – como mini, midi, leve, semipesado, pesado e especial. As linhas 028, 098 e 816 encaixam-se na categoria semipesados e a linha 701 enquadra-se no tipo mini, como descrito na Tabela 4.3. As especificações dos ônibus que compõem as frotas das linhas presentes na área de estudo serão codificadas no simulador, a fim de representar o veículo da forma mais precisa possível.

Tabela 4.3 - Especificações dos veículos empregados nas linhas da área de estudo

| Características             | Classificação   |   |
|-----------------------------|---|---|
|                             | Mini (linha 701)  | Semipesado (linhas 028, 098 e 816)  |
| Potência do motor           | Potência Mínima: 136 cv<br>Potência Máxima: 150 cv  | Potência mínima: 184 cv<br>Potência máxima: 231 cv  |
| Distância entre eixos       | Mínimo: 3350 mm<br>Máximo: 4500 mm  | Mínimo: 5170 mm<br>Máximo: 6005 mm  |
| Comprimento do veículo      | Mínimo: 6400 mm<br>Máximo: 8950 mm  | Mínimo: 10542 mm<br>Máximo: 11810 mm  |
| Carga máxima por eixo e PBT | Eixo Dianteiro: 2300 a 2600 kg<br>Eixo Traseiro: 4700 a 5200 kg<br>Capacidade de Carga: 7000 a 7800 kg<br>PBT: até 9800 kg. | Eixo Dianteiro: 6000 a 6500 kg<br>Eixo Traseiro: 10000 a 10500 kg<br>Cap. Tec. de Carga: 16000 a 17000 Kg |
| Número de lugares           | Mínimo de 21 lugares  | Mínimo de 38 lugares  |
| Número de portas            | 1 porta dianteira e/ou 1 porta traseira   | 1 porta dianteira, 1 porta central e 1 porta traseira   |
| Dimensões das portas        | Altura: 1900 mm a 2000 mm<br>Largura: 700 mm a 1100 mm  | Altura: 1900 mm<br>Largura: 700 mm a 1100 mm (Diant.) e 1100 mm (Central e Traseira)                      |

Fonte: Anuário de Transporte Público de Fortaleza (2010)

#### 4.2.2 Coleta de Dados

Os dados de volume veicular foram obtidos através de laços detectores presentes na área de estudo. Estes laços são mantidos pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR). Inicialmente, realizou-se um estudo do perfil de fluxo da área de estudo e verificou-se que o volume de veículo é consideravelmente maior entre os horários de 17h e 18h, em dias típicos da semana (terças, quartas e quintas). Assim, a fim de coletar maior

quantidade de dados e informações de uma amostra maior das linhas de ônibus, optou-se por estender esse intervalo para 16h30 – 18h30.

Após a verificação dos dados veiculares, realizou-se vistoria em campo para a confirmação das posições dos pontos de parada e os itinerários das demais linhas da área foram confirmados na Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR). Verificou-se também que, no intervalo entre os horários de 16h30 e 18h30, o volume de passageiros nas paradas é alto em relação a outros períodos do dia.

A demanda de embarque e desembarque de passageiros foi obtida através de filmagens nos pontos de parada da área de estudo, no dia 12 de abril de 2016, como visto na Figura 4.10. Utilizou um pesquisador equipado com uma câmera em cada ponto de parada. A câmera não foi posicionada em um ponto fixo, pois os ônibus nem sempre paravam próximo ao ponto de parada e, por muitas vezes, observou-se fila de ônibus.

Figura 4.10 - Filmagem de um dos pontos de parada da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

Além da demanda de passageiros, foi possível extrair os tempos de embarque e desembarque de todos os passageiros (e, assim, obter médias específicas para cada linha e cada ônibus), tempos de abertura e fechamento das portas e valores aproximados dos tempos que os ônibus levam desacelerando até parar no ponto e acelerando até retomar sua velocidade de cruzeiro. O tempo de parada coletado consiste em somente o período em que o ônibus esteve parado, atendendo aos passageiros. Não está embutido o tempo morto perdido s paradas. Os tempos de embarque e desembarque médios por pessoa coletados aproximam-se

dos valores geralmente observados na literatura. Obteve-se 2,18 segundos para embarque (com desvio padrão de 0,56) e 2,30 segundos para desembarque (com desvio padrão de 0,49).

O tempo de viagem foi coletado a partir da primeira parada (entre as ruas José Vilar e Silva Paulet) até a última parada da rede (entre as ruas Ildefonso Albano e Antônio Augusto), apresentadas nas Figura 4.11a e 4.11b, respectivamente. A distância entre as mesmas é de pouco mais de 1 km. Nas filmagens, coletou-se o horário (em horas, minutos e segundos) em que o ônibus (identificado pelo número do carro) passa em cada parada, obtendo-se o tempo de viagem pela diferença dos horários registrados.

Figura 4.11 - Primeiro (a) e último (b) pontos de parada da área de estudo



Fonte: Adaptado do Google Earth

Foram coletados os tempos de viagem e os outros dados mencionados de 38 ônibus: oito da linha 028, quatorze da linha 098, sete da linha 701 e nove da linha 816. A Tabela 4.4 apresenta os tempos de viagem de todos os ônibus que passaram pelas quatro paradas (com exceção da linha 701, que passa pelos pontos 2, 3 e 4) obtidos na coleta. É possível observar que há repetição de veículos na coleta, como os carros 2301 e 2305, mostrando que estes realizaram mais de uma viagem durante a coleta.

É necessário ressaltar algumas observações feitas durante a coleta:

- Apesar do tráfego no corredor da Heráclito Graça ser do tipo compartilhado, os ônibus não realizavam mudança de faixas com frequência, devido à dificuldade de encontrar brechas para a mudança de faixa;
- Em grande parte das amostras, os ônibus abriam as portas ao mesmo tempo em que desaceleravam até parar nas paradas. Da mesma forma, após a conclusão dos embarques e desembarques, fechavam as portas no momento que aceleravam até atingir sua velocidade de cruzeiro;

Tabela 4.4 - Tempo total de viagem dos ônibus

| Ônibus | Linha | Nº do carro | Tempo de Viagem (segundos) |
|--------|-------|-------------|----------------------------|
| 1      | 816   | 30514       | 307                        |
| 2      | 816   | 30513       | 330                        |
| 3      | 701   | 2405        | 286                        |
| 4      | 816   | 30515       | 466                        |
| 5      | 098   | 35836       | 375                        |
| 6      | 098   | 35839       | 289                        |
| 7      | 816   | 30516       | 236                        |
| 8      | 098   | 35518       | 219                        |
| 9      | 028   | 35225       | 224                        |
| 10     | 028   | 35412       | 239                        |
| 11     | 098   | 35802       | 253                        |
| 12     | 701   | 2301        | 262                        |
| 13     | 028   | 35229       | 359                        |
| 14     | 098   | 35712       | 364                        |
| 15     | 816   | 30517       | 513                        |
| 16     | 816   | 30511       | 407                        |
| 17     | 098   | 35704       | 520                        |
| 18     | 028   | 35414       | 485                        |
| 19     | 098   | 35722       | 487                        |
| 20     | 816   | 30518       | 374                        |
| 21     | 701   | 2302        | 294                        |
| 22     | 028   | 35504       | 370                        |
| 23     | 028   | 35413       | 213                        |
| 24     | 098   | 35524       | 319                        |
| 25     | 701   | 2405        | 190                        |
| 26     | 701   | 2304        | 164                        |
| 27     | 028   | 35102       | 355                        |
| 28     | 816   | 30512       | 363                        |
| 29     | 816   | 30806       | 220                        |
| 30     | 701   | 2303        | 160                        |
| 31     | 098   | 35007       | 251                        |
| 32     | 098   | 35934       | 312                        |
| 33     | 098   | 35933       | 340                        |
| 34     | 028   | 35410       | 350                        |
| 35     | 098   | 35109       | 378                        |
| 36     | 098   | 35103       | 388                        |
| 37     | 701   | 2301        | 554                        |
| 38     | 098   | 35519       | 218                        |

Fonte: Elaborado pela autora.

- As condições físicas da via influenciam nas velocidades, acelerações e desacelerações dos veículos. Assim como as condições das calçadas também

interferem na velocidade do pedestre ao encaminhar-se até a porta do ônibus para embarcar.

- Em alguns pontos da via, há um desnível maior entre a calçada e o primeiro degrau do ônibus, dificultando embarque e desembarque e impactando do tempo de parada;
- A linha 701, que possui o micro-ônibus em sua frota, registrou o maior tempo médio de embarque por pessoa. O tempo de embarque total médio dos passageiros desta linha foi calculado em 20,23 segundos. É possível observar como o tipo de operação do pagamento da tarifa interfere no tempo de parada. Nesta linha, o motorista exerce as atividades de condutor e cobrador da tarifa, fazendo com que a partida do ônibus após a realização dos embarques e desembarque seja significativamente atrasada;
- O gênero e a idade do passageiro influenciam muito no tempo de embarque e desembarque. Há caso em que a presença de idosos faz com que o tempo de embarque até triplique em relação à média observada em todas as paradas, que é de 2,2 segundos;
- Nos testes realizados com Vissim e Aimsun, foi observado que a velocidade dos passageiros nos pontos de parada é sempre a velocidade de caminhada, o que, por muitas vezes, não foi observado em campo. Sempre que o passageiro percebe que o ônibus parará longe de seu ponto de espera, o mesmo aumenta sua velocidade até chegar em estado de corrida.
- O tipo de parada de ônibus não interferiu no tempo de parada. Nos pontos onde há abrigo, os passageiros sempre se levantam do assento do abrigo quando percebem a chegada da linha aguardada e esperam em pé, assim como nas paradas sem abrigo, até o momento de embarcar;
- A aglomeração de passageiros nas portas aumenta o tempo médio de embarque por pessoa. Não se pode assumir, por exemplo, que a estimativa do tempo total de embarque de 4 passageiros consiste em 4 vezes o tempo médio de embarque por pessoa. Deve-se considerar, além de seu tempo de embarque, a espera na fila para o embarque do (s) passageiros (s) à frente;
- A lotação dentro do veículo também interfere bastante nos tempos de embarque e desembarque. No caso do embarque, os passageiros que ainda não passaram pela catraca obstruem a entrada. No caso do desembarque, a alta

quantidade de passageiros que aguarda o momento da descida próximo à porta de desembarque também causa atraso;

- A influência dos tempos de parada no tempo de viagem varia bastante entre as amostras e pode chegar a 42,5%, como é o caso de um dos ônibus da linha 701. A Tabela 4.5 mostra o impacto do tempo de parada no tempo de viagem total dos ônibus para em algumas amostras da coleta.

Tabela 4.5 - Influência do tempo de parada no tempo de viagem dos ônibus para cada linha

| Linha | Nº do Carro | Tempo de Parada (s) |         |         |         |           | Tempo de Viagem (s) | Influência (%) |
|-------|-------------|---------------------|---------|---------|---------|-----------|---------------------|----------------|
|       |             | Ponto 1             | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 4 | Acumulado |                     |                |
| 816   | 30515       | 6,98                | 12,71   | 3,77    | 3,43    | 26,89     | 466                 | 5,77           |
|       | 30517       | 14,9                | 14,06   | 19,1    | 8,55    | 56,61     | 513                 | 11,035         |
|       | 30518       | 4,07                | 23,75   | 7,34    | 11,61   | 46,77     | 374                 | 12,505         |
| 98    | 35839       | 13,7                | 7,25    | 6       | 33,63   | 60,58     | 289                 | 20,962         |
|       | 35518       | 2,15                | 3,94    | 4,94    | 20,47   | 31,5      | 219                 | 14,384         |
|       | 35524       | 6,95                | 5,41    | 3,06    | 9,63    | 25,05     | 319                 | 7,853          |
| 28    | 35229       | 3,76                | 10,86   | 3,9     | 18,36   | 36,88     | 359                 | 10,273         |
|       | 35414       | 25,9                | 8,46    | 9,4     | 10,5    | 54,26     | 485                 | 11,188         |
|       | 35504       | 14,34               | 4,78    | 4,85    | 13,26   | 37,23     | 370                 | 10,062         |
| 701   | 02405       | X                   | 16,03   | 17,56   | 5,99    | 39,58     | 286                 | 13,839         |
|       | 02301       | X                   | 144,93  | 82,31   | 8,28    | 235,52    | 554                 | 42,512         |
|       | 02302       | X                   | 9,74    | 17,93   | 24,34   | 52,01     | 294                 | 17,691         |

Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.2.3 Codificação da Rede

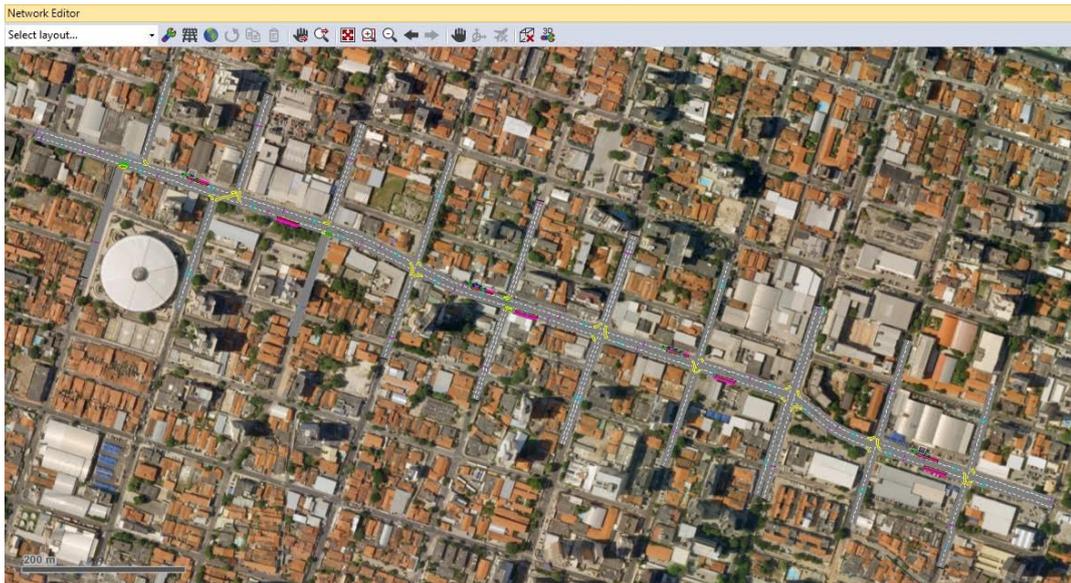
Como indicado anteriormente, o Vissim foi escolhido como o simulador a ser usado no estudo de caso. Foram inseridas todas as vias contidas na área (com suas dimensões, permissões de trânsito, demanda e rotas), que são a Av. Heráclito Graça, via principal e corredor estudado, e suas dez vias secundárias. Também foram inseridas áreas de redução de velocidade nas áreas de movimentos de conversão, utilizando o valor *default* do simulador, que é de 30 km/h para carros e 25 km/h para caminhões e ônibus, a uma desaceleração de 2 m/s<sup>2</sup>.

Após este procedimento, foram inseridos os planos semaforicos que vigoram nos sete semáforos do corredor. Todos possuem planos com mesmo ciclo e são sincronizados. É necessário muito cuidado ao codificar os semáforos na rede de tráfego, pois os atrasos desencadeados pelas partições de vermelho influenciam fortemente no tempo de viagem total

dos ônibus. Qualquer erro inserção dos tempos semafóricos pode impactar negativamente na calibração.

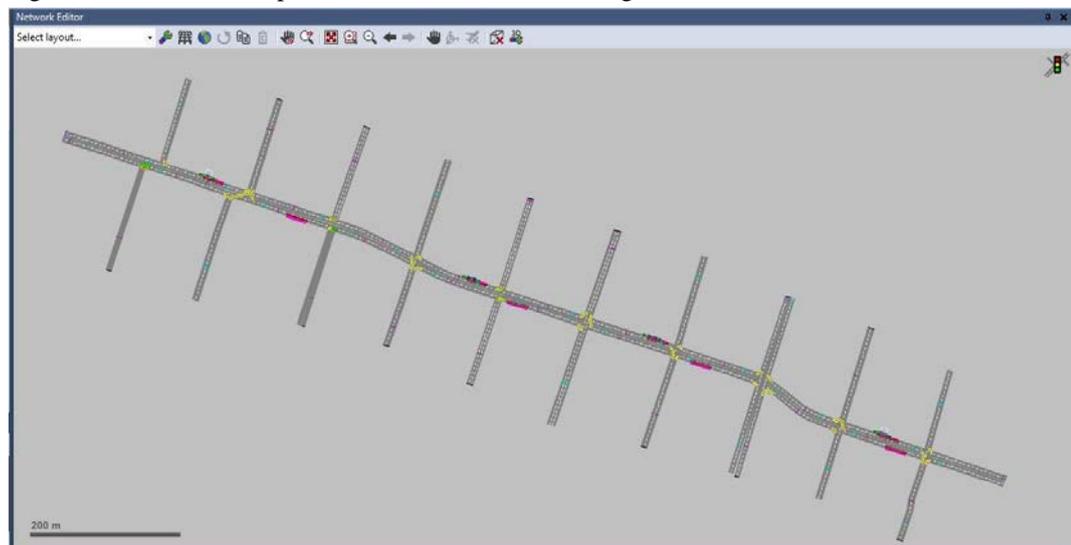
Após a codificação dos elementos que não estão diretamente relacionados ao transporte público, iniciou-se a codificação dos elementos diretamente relacionados a tais sistemas. As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam a rede do estudo de caso já representada no VISSIM.

Figura 4.12 - Corredor representado no VISSIM com imagem do Google Earth de fundo



Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

Figura 4.13 - Corredor representado no VISSIM sem imagem de fundo

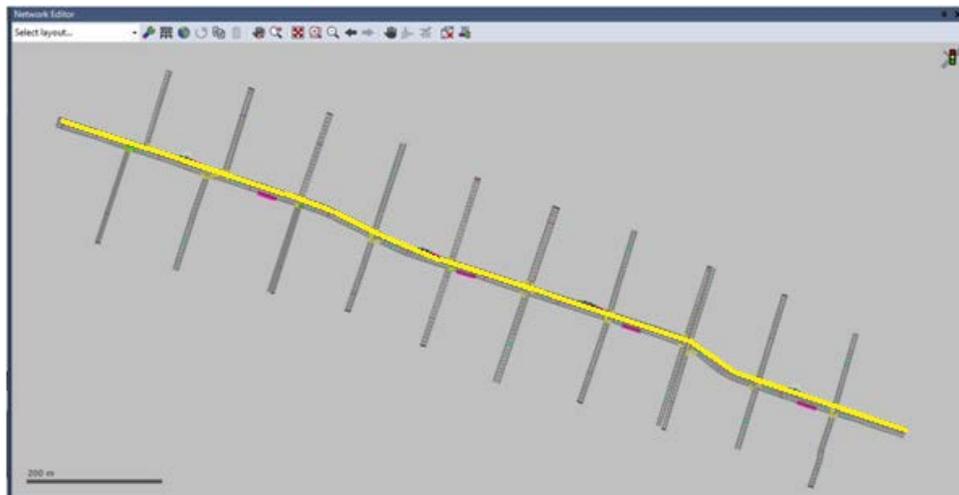


Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

Foram inseridas as quatro linhas de ônibus presentes na área de estudo, com suas rotas fixas, frequências, distribuição de velocidade desejada e tipo de veículo a ser usado na

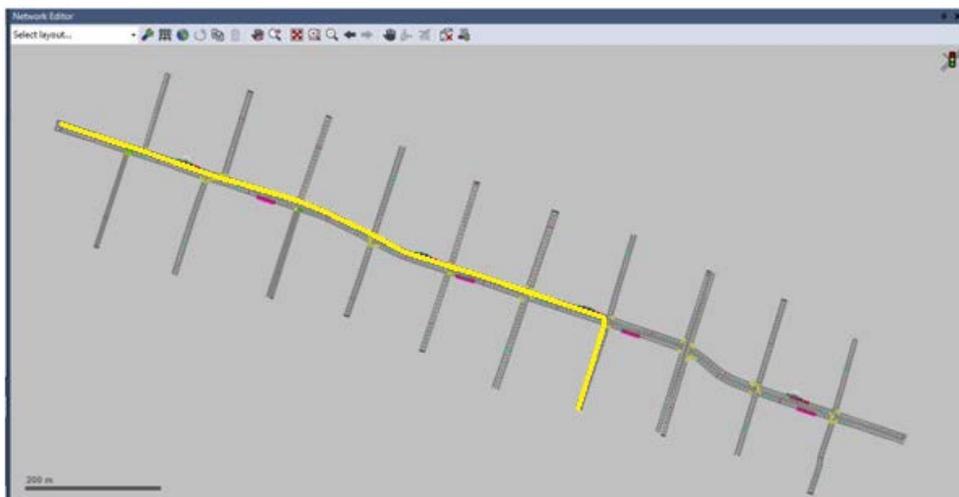
frota. As linhas 028, 098 e 816 possuem o mesmo itinerário, passando por todo o trecho da área de estudo, como visto na Figura 4.14. A linha 701 não passa pelo primeiro ponto de parada, pois entra na rede iniciando seu percurso pela R. José Lourenço, realizando a conversão à esquerda na via principal e passando pelo seu primeiro ponto de parada, como visto na Figura 4.15. No caso, o ponto de parada 2 (entre José Lourenço e Rui Barbosa).

Figura 4.14 - Itinerário das linhas 028, 098 e 816



Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

Figura 4.15 - Itinerário da linha 701



Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

Ao se inserir os horários de partida da linha 701, utilizou-se a seguinte estratégia: um dos dados coletados nas filmagens trata-se do momento em que o veículo da linha aproxima-se do ponto de parada, desacelerando até parar. Não foi coletado o momento em que os ônibus da linha entram na rede, no caso, no momento em que os veículos vem da R.

José Lourenço e estão prestes a realizar a conversão na Av. Heráclito Graça. No Vissim, os horários de partida estabelecidos consistem no horário de entrada do veículo na rede, não no horário em que os mesmos passarão pelas paradas. Logo, optou-se por adiantar em 60 a 90 segundos o horário registrado na coleta, a fim de estimar os momentos em que os ônibus da linha entram na rede de tráfego.

Após a codificação das linhas, partiu-se para a codificação dos veículos de transporte público, com as diferenças de dimensões, potência e peso da linha 701 em relação às demais linhas. O simulador permitiu realizar todas as edições necessárias para representar as especificidades dos ônibus empregados nas frotas das linhas presentes na rede, como os seguintes parâmetros: comprimento e largura do veículo, distância entre eixos, quantidade de portas, distância entre as portas, altura do primeiro degrau, uso das portas (se o embarque é realizado pela mesma porta ou não), distribuições de potência e de peso. A Figura 4.16 mostra os passageiros embarcando no veículo codificado.

Figura 4.16 - Passageiros embarcando no veículo



Fonte: Elaborado pela autora no VISSIM (PTV, 2014).

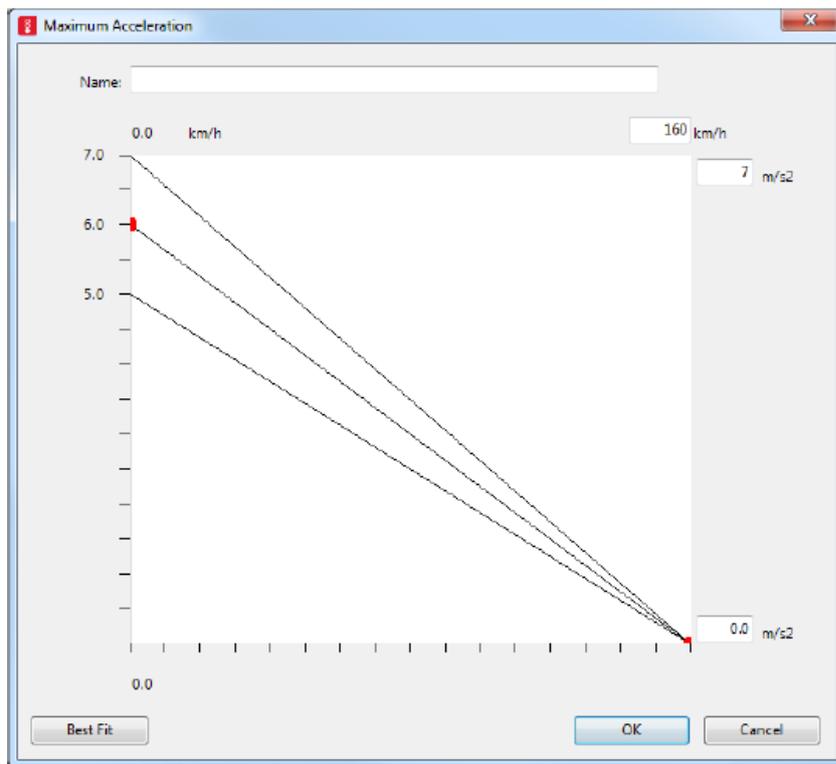
Foram realizados alguns testes para verificar a sensibilidade como: edição da altura do degrau para um valor impraticável e portas com largura menor que a largura dos pedestres. Como esperado, ao inserir valores impraticáveis na altura dos degraus e um valor para a largura da porta menor que a largura dos pedestres, os passageiros não conseguiram realizar embarque ou desembarque.

Ao visualizar o veículo da linha 701 em 3D, observou-se incompatibilidade com as dimensões do veículo em 2D, ou seja, é clara a diferença de comprimento e largura vista durante a simulação em 2D, mas não é possível visualizar esta diferença em 3D. O Vissim

possui um módulo específico chamado V3DM, onde é possível converter modelos 3D em vários formatos.

Dois parâmetros de entrada relacionados ao veículo, que foram usados com valores *default* para ônibus são os parâmetros de aceleração e desaceleração. No Vissim, a aceleração e a desaceleração dos veículos não são definidas por média e desvio, são dadas por função. É necessário codificar as funções de aceleração em relação à velocidade e de desaceleração em relação à velocidade do veículo, como visto na Figura 4.17. Para construir esta função com dados medidos em campo, é necessária coleta de dados robusta com equipamentos que ajudem a velocidade do veículo e/ou acelerações e desaceleração. Ao realizarem-se pequenas variações nas funções *default* do Vissim, os tempos de viagem gerados na simulação apresentaram-se com erros muito altos. Desta forma, confirmou-se a opção de usar as funções padrão já existentes no simulador.

Figura 4.17 - Função da aceleração máxima em relação à velocidade no Vissim



Fonte: PTV (2014)

Após a codificação dos veículos, partiu-se para a codificação das paradas. Como abordado na seção anterior, podem ser utilizadas três estratégias de modelagem do tempo de parada no Vissim: distribuição, modelo avançado de passageiros e *Viswalk*. Foram codificadas três redes com as respectivas opções de modelagem, sem a calibração do modelo

carro seguidor do Vissim, a fim de verificar os tempos de viagem e os tempos de paradas dos ônibus obtidos na simulação. Na rede onde se utiliza a distribuição, não houve a necessidade de codificar áreas de espera ou plataformas de embarque próximas aos pontos de parada, pois os tempos de parada são gerados com base na média e no desvio padrão indicados, não tendo relação com parâmetros associados aos passageiros. Foram inseridas as médias de tempo de parada obtidas na coleta de dados, por linha e por parada, como visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Média de tempos de parada em segundos

| Pontos de Parada | Linha 028 | Linha 098 | Linha 701 | Linha 816 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1                | 9,97      | 8,12      | -         | 6,2       |
| 2                | 7,66      | 7,19      | 14,03     | 5,26      |
| 3                | 7,09      | 8,44      | 18,49     | 5,74      |
| 4                | 10,88     | 12,58     | 12,07     | 4,53      |
| Média            | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |

Fonte: Elaborado pela autora

A rede foi simulada com as respectivas médias e desvios. Os tempos de viagem obtidos na simulação apresentaram erros médios absolutos aceitáveis, mas ainda considerados altos, como visto na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação com o método de distribuição

| Linha          | 028    | 098    | 701    | 816    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| T.V. Simulado  | 362,86 | 362,08 | 271,22 | 372,81 |
| T.V. Observado | 314    | 331    | 239    | 320    |
| EPAM           | -15,56 | -9,39  | -13,48 | -16,50 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados das simulações dos tempos de parada, apresentados na Tabela 4.8, demonstram que uma das linhas apresentou erro médio absoluto discrepante das outras linhas. Isso se deve ao fato da linha 701 apresentar valores muito variantes em seus tempo de parada, apresentando tempos de parada baixos, como por exemplo, 5,14 segundos e altos como 146,93 segundos. Tal linha possui um tipo de operação com comportamento mais imprevisível em relação às outras linhas, pois o motorista do veículo pode perder muito tempo recebendo a tarifa dos passageiros, aumentando o tempo de parada previsto. Utilizando a estratégia de distribuição, não é possível manipular variáveis como tempo de embarque e desembarque dos passageiros, tempo morto e tipos de passageiro. As saídas dependerão do

valor mínimo, médio e máximo dos tempos de parada inseridos como dados de entrada. Caso tais valores possuam alto desvio padrão, as saídas podem se distanciar das medidas observadas em campo.

Tabela 4.8- Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação com o método de distribuição

| <b>Linha</b>   | <b>028</b> | <b>098</b> | <b>701</b> | <b>816</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| T.P. Simulado  | 7,83       | 8,30       | 19,88      | 5,82       |
| T.P. Observado | 8,90       | 9,08       | 14,86      | 5,43       |
| EPAM           | 12,02      | 8,59       | -33,78     | -7,18      |

Fonte: Elaborado pela autora

No caso da rede em que se utiliza o modelo avançado de pedestre, também não houve necessidade de inserir áreas de espera, demanda e rotas para os pedestres. Contudo, é necessário inserir os dados necessários nos veículos de transporte público, são eles: Tempo médio de embarque e de desembarque, tempo morto e operação das portas (se as portas são usadas para embarque e desembarque simultaneamente ou não), volume de passageiros a embarcar no veículo. Ou seja, os valores das variáveis que impactam no cálculo do tempo de parada dos ônibus são inseridos na rede, mas não é realizada a simulação de pedestres nos pontos de parada. Os valores inseridos como entrada são os valores coletados em campo, onde se obteve 2,12 como média de tempo de embarque por pessoa e 2,30 como média de tempo de desembarque por pessoa. A quantidade de passageiros que embarca é estipulada para cada veículo de cada linha. Optou-se por utilizar como tempo morto médio, os tempos que o veículo leva desacelerando até parar e acelerando até atingir uma velocidade próxima aos outros veículos da faixa da esquerda. Pois, como mencionado na seção da coleta de dados, a maioria dos condutores abria as portas ao mesmo tempo em que desacelerava até parar no ponto. Assim como fechavam as portas ao mesmo tempo em que aceleravam até o alcance da velocidade de cruzeiro.

As Tabelas 4.9 e 4.10 mostram a diferença nos erros médios absolutos nas simulações dos tempos de viagem e dos tempos de parada dos ônibus. É possível observar um erro menor no tempo de parada médio da linha 701, pois o uso do modelo avançado de pedestre permite manipular os parâmetros de transporte público supracitados.

Tabela 4.9 - Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo avançado de pedestre, com os valores coletados em campo

| <b>Linha</b>   | <b>028</b> | <b>098</b> | <b>701</b> | <b>816</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| T.V. Simulado  | 341,75     | 371,59     | 250,81     | 365,5      |
| T.V. Observado | 314        | 331        | 239        | 320        |
| EPAM           | -8,84      | -12,26     | -4,94      | -14,22     |

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 4.10 - Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo avançado de pedestre, com os valores coletados em campo

| <b>Linha</b>   | <b>028</b> | <b>098</b> | <b>701</b> | <b>816</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| T.V. Simulado  | 9,25       | 9,00       | 11,10      | 4,48       |
| T.V. Observado | 8,90       | 9,08       | 14,86      | 5,43       |
| EPAM           | -3,93      | 0,88       | 25,30      | 17,50      |

Fonte: Elaborado pela autora

Posteriormente, foi utilizado o *Viswalk*. A diferença deste para os outros métodos é que os passageiros são simulados nos pontos de parada, sendo necessário criar áreas de pedestre, demanda, composição e rotas para os mesmos. É definida a demanda de passageiros que chegam nos pontos de parada, para cada intervalo de tempo. Nesta simulação, foi usado o intervalo de 15 minutos em todas as paradas, a fim de representar a taxa de chegada de pedestres nos pontos de parada.

Foram representados os quatro pontos de parada presentes na rede, respeitando suas localizações, distância entre elas e suas dimensões. Como as dimensões da área de espera dos passageiros em campo não são bem definidas, optou-se por inserir as medidas aproximadas da área máxima utilizada pelos passageiros observada na coleta. A Figura 4.18, por exemplo, apresenta a área máxima utilizada pelos passageiros na parada 2 (entre as ruas José Lourenço e Rui Barbosa)

Figura 4.18 - Área de espera utilizada pelos passageiros no ponto de parada 2 (tipo placa)



Fonte: Elaborado pela autora

Sobre a chegada e o comportamento dos passageiros nas paradas, foram inseridas as composições de passageiros (mulher jovem, homem idoso, homem jovem e mulher idosa), com os valores *default* do Vissim para velocidade média dos respectivos tipos de pedestre. Devido à dificuldade medir esta variável em campo e às áreas dos pontos de parada, que são muito menores que a área de uma estação, por exemplo, optou-se por utilizarem-se os valores *default*.

Figura 4.19 - Passageiros em pontos de parada no VISSIM



Fonte: Elaborado pela autora

Na rede simulada com o Viswalk, de uma forma geral, observou-se erros médios absolutos aceitáveis para os tempos de viagem e altos para os tempos de parada, como visto nas Tabela 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 - Tempos de viagem dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo Viswalk

| <b>Linha</b>   | <b>028</b> | <b>098</b> | <b>701</b> | <b>816</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| T.V. Simulado  | 360,82     | 381,47     | 256,32     | 370,83     |
| T.V. Observado | 314        | 331        | 239        | 320        |
| EPAM           | -14,91     | -15,25     | -7,25      | -15,88     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.12 - Tempos de parada dos ônibus obtidos na simulação utilizando o modelo Viswalk

| <b>Linha</b>   | <b>028</b> | <b>098</b> | <b>701</b> | <b>816</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| T.V. Simulado  | 12,21      | 12,50      | 13,59      | 10,03      |
| T.V. Observado | 8,90       | 9,08       | 14,86      | 5,43       |
| EPAM           | -37,19     | -37,67     | 8,55       | -84,72     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Os altos erros obtidos na simulação da medida de desempenho do tempo de parada devem-se ao pouco controle do analista em relação aos parâmetros de transporte público (como tempo médio de embarque e desembarque, tempos de abertura e fechamento de portas e tempo morto). No Viswalk, estes parâmetros são calculados pelo próprio simulador, sem que haja a necessidade de inserir tais dados de entrada. Como tais medidas (coletadas) apresentaram em campo determinada variabilidade, os valores calculados pelo simulador podem se distanciar dos valores de campo. É importante salientar que o modelo de que representa o comportamento dos pedestres no Vissim, o modelo de forças sociais, não foi calibrado neste caso. As áreas de pedestres simuladas neste estudo consistem em pontos de parada com dimensões limitadas, onde a movimentação dos pedestres entre si (e não a interação entre os passageiros e os veículos de transporte público) é muito restrita e pode ser desconsiderada.

### 4.3 Calibração da Rede

Como mencionado anteriormente, a calibração do modelo consiste em um processo fundamental para que o mesmo se torne confiável. Optou-se por calibrar o modelo carro seguidor (*car-following*) do Vissim, mais precisamente o modelo Wiedeman 74, mais adequado para a representação do tráfego urbano.

Antes da etapa de calibração, como descrito na seção anterior, as três redes codificadas com suas respectivas opções de modelagem do tempo de parada (distribuição,

modelo avançado de pedestre e *viswalk*) foram simuladas com os parâmetros *default* do modelo carro seguidor. A Tabela 4.13 apresenta o resumo das saídas das simulações e é possível observar que a rede onde foi usado o modelo avançado de pedestre aponta os menores erros para as duas medidas de desempenho. Assim, esta é a rede como o tipo de modelagem do tempo de para mais adequado para o presente estudo estudo de caso, sendo a rede escolhida para ser aplicado o procedimento de calibração e reduzir ainda mais os erros dos resultados da simulação.

Tabela 4.13 - Resumo dos resultados das simulações com os respectivos tipos de modelagem do tempo de parada dos ônibus

| Medida de desempenho        | Tipo de modelagem do tempo de parada dos ônibus |                 | Linhas          |        |        |        |       |
|-----------------------------|---|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|-------|
|                             |   |                 | 28              | 98     | 701    | 816    |       |
| Tempo de viagem             | Distribuição                                    | Medida de campo | 314             | 331    | 239    | 320    |       |
|                             |   | Medida simulada | 362,86          | 362,08 | 271,22 | 372,81 |       |
|                             |   | EPAM            | -15,56          | -9,39  | -13,48 | -16,5  |       |
|                             | Modelo Avançado de Pedestre                     | Medida de campo | 314             | 331    | 239    | 320    |       |
|                             |   | Medida simulada | 341,75          | 371,59 | 250,81 | 365,5  |       |
|                             |   | EPAM            | -8,84           | -12,26 | -4,94  | -14,22 |       |
|                             | <i>Viswalk</i>                                  | Medida de campo | 314             | 331    | 239    | 320    |       |
|                             |   | Medida simulada | 360,82          | 381,47 | 256,32 | 370,83 |       |
|                             |   | EPAM            | -14,91          | -15,25 | -7,25  | -15,88 |       |
|                             | Tempo de parada                                 | Distribuição    | Medida de campo | 8,9    | 9,08   | 14,86  | 5,43  |
|                             |   |                 | Medida simulada | 7,83   | 8,3    | 19,88  | 5,82  |
|                             |   |                 | EPAM            | 12,02  | 8,59   | -33,78 | -7,18 |
| Modelo Avançado de Pedestre |   | Medida de campo | 8,9             | 9,08   | 14,86  | 5,43   |       |
|                             |   | Medida simulada | 9,25            | 9      | 11,1   | 4,48   |       |
|                             |   | EPAM            | -3,93           | 0,88   | 25,3   | 17,5   |       |
| <i>Viswalk</i>              |   | Medida de campo | 8,9             | 9,08   | 14,86  | 5,43   |       |
|                             |   | Medida simulada | 12,21           | 12,5   | 13,59  | 10,03  |       |
|                             |   | EPAM            | -37,19          | -37,67 | 8,55   | -84,72 |       |

Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente, foram selecionados os parâmetros a serem calibrados neste estudo. Como o objetivo desta simulação é simular o tempo de viagem e os tempos de parada das linhas ao longo da av. Heráclito Graça, os dois parâmetros escolhidos para calibração foram *bx\_add* e *bx\_mult*. Como visto na seção de análise dos simuladores, os parâmetros que fazem parte do algoritmo W74 do Vissim são: *ax*, *bx\_add* e *bx\_mult*. Estes controlam a brecha entre os veículos enquanto estes estiverem em estado de *following*, interferindo nos espaçamentos entre os veículos. Logo, irá interferir nos tempos de viagem dos ônibus.

Avaliou-se a possibilidade de verificar tais parâmetros em campo, mas não há uma forma de observar os parâmetros *bx\_add*. Já o parâmetro *ax* é possível medir em campo. Ressalta-se que os parâmetros comportamentais do modelo de mudança de faixa não foram editados e estão com valores *default*.

De acordo com Lacerda e Castro Neto (2014), o parâmetro *ax* não deve ser calibrado simultaneamente com os parâmetros *bx\_add* e *bx\_mult*. O autor afirma que *ax* interfere no tamanho da fila e os demais parâmetros interferem nos *headways* de saturação, afetando a velocidade de descarga da fila. Usar a estratégia de calibrar os três parâmetros ao mesmo tempo pode gerar numa combinação de valores para estes parâmetros que não seja coerente com a realidade.

Assim, optou-se por calibrar os parâmetros *bx\_mult* e *bx\_add*. Já para o *ax*, preferiu-se utilizar o valor *default*. Lacerda e Castro Neto (2014) coletaram *ax* em campo por meio da avaliação de fotografias geradas por câmeras posicionadas nas calçadas, a aproximadamente 20 metros da faixa de retenção. Eles coletaram o valor médio do espaçamento, que foi de 1,9 m, pouco abaixo do valor *default*, que é de 2 m. O desvio padrão coletado foi de 0,7 m, sendo que o padrão do Vissim é 1 m. O corredor utilizado na coleta dos autores possui características de tráfego próximas aos da Av. Heráclito Graça. Logo, decidiu-se por usar o valor 2 m para *ax*, bem próximo do valor coletado.

Não foram usados métodos de automatização para a calibração. Julgou-se que a quantidade de parâmetros a serem calibrados é pequena. Foi estabelecida uma margem com valores máximos e mínimos para os dois parâmetros e depois foram feitos os confrontos entre os pares de valores máximos e mínimos. Posteriormente, viu-se que o melhor resultado encontrado (valores menores que os *default*) foi referência para a estimação dos próximos valores a serem testados, a fim de diminuir ainda mais a redução do erro. Em conclusão, os menores erros encontrados, considerando as quatro linhas de ônibus, foram os resultantes das simulações em que foram assumidos valores bem abaixo dos valores *default* para os dois parâmetros. Optou-se por concluir a calibração após chegar aos limites ótimos para *bx\_add* e *bx\_mult* iguais a 1,6 e 2,7, respectivamente. Se fossem utilizados valores maiores ou menores que estes, os erros aumentariam, considerando os tempos de viagem e tempos de parada de todas as linhas. Foram simuladas para todos os testes dez replicações de 2 horas, sendo os primeiros 15 minutos utilizados para tempo de aquecimento da rede. De acordo com Wiegand e Yang (2011), esta quantidade de replicações (com semestres diferentes, para que haja aleatoriedade) é suficiente para a consolidação dos resultados. As Tabela 4.14 e 4.15 mostram,

para as duas medidas de desempenho, os testes com os valores de *bx\_add* e *bx\_mult* apresentando os menores erros possíveis, com o par de valores ótimo encontrado em destaque.

Foi observado durante os testes que, de todas as linhas, a 701 era a mais sensível na alteração dos parâmetros de *bx\_add* e *bx\_mult*. Provavelmente, este cenário se deve ao fato da linha não passar por todo o trecho simulado. Quanto menor o trecho, menores são as filas e espaçamentos. Enquanto os tempos de viagem das linhas 029, 098 e 816 foram medidos e simulados em um trecho de pouco mais de 1 km, os tempos da linha 701 foram medidos e simulados em um trecho de aproximadamente 690 metros.

Tabela 4.14 - Resumo do processo de calibração da medida de desempenho tempo de viagem para as quatro linhas presentes na rede, com os valores ótimos em destaque

| Valores <i>bx_add</i> / <i>bx_mult</i> | Tipo de medida | Linha 028 | Linha 098 | Linha 701 | Linha 816 |
|--|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,6 / 2,6                              | Simulada       | 301,49    | 320,68    | 245,16    | 326,44    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 3,98      | 3,12      | -2,58     | -2,01     |
| 1,6 / 2,5                              | Simulada       | 294,37    | 322,05    | 243,66    | 319,28    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 6,25      | 2,70      | -1,95     | 0,23      |
| 1,5 / 2,5                              | Simulada       | 286,69    | 314,60    | 244,42    | 312,38    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 8,70      | 4,95      | -2,27     | 2,38      |
| 1,3 / 2,5                              | Simulada       | 287,54    | 310,07    | 245,04    | 302,37    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 8,43      | 6,32      | -2,53     | 5,51      |
| 1,6 / 2,7                              | Simulada       | 294,60    | 318,95    | 243,63    | 324,43    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 6,18      | 3,64      | -1,94     | -1,38     |
| 1,7 / 2,5                              | Simulada       | 299,31    | 322,14    | 244,76    | 323,24    |
|  | Observada      | 314       | 331       | 239       | 320       |
|  | EPAM           | 4,68      | 2,68      | -2,41     | -1,01     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.15 - Resumo do processo de calibração da medida de desempenho tempo de parada para as quatro linhas presentes na rede, com os valores ótimos em destaque

| Valores <i>bx_add</i> / <i>bx_mult</i> | Tipo de medida | Linha 028 | Linha 098 | Linha 701 | Linha 816 |
|--|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,6 / 2,6                              | Simulada       | 8,98      | 8,82      | 12,71     | 4,58      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | -0,90     | 2,86      | 14,47     | 15,65     |
| 1,6 / 2,5                              | Simulada       | 8,86      | 8,92      | 12,71     | 4,72      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | 0,45      | 1,76      | 14,47     | 13,08     |
| 1,5 / 2,5                              | Simulada       | 9,52      | 8,88      | 12,81     | 4,58      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | -6,97     | 2,20      | 13,80     | 15,65     |
| 1,3 / 2,5                              | Simulada       | 9,03      | 8,89      | 12,81     | 4,57      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | -1,46     | 2,09      | 13,80     | 15,84     |
| 1,6 / 2,7                              | Simulada       | 8,79      | 9,12      | 12,71     | 4,64      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | 1,24      | -0,44     | 14,47     | 14,55     |
| 1,7 / 2,5                              | Simulada       | 8,73      | 8,78      | 12,81     | 4,59      |
|  | Observada      | 8,90      | 9,08      | 14,86     | 5,43      |
|  | EPAM           | 1,91      | 3,30      | 13,80     | 15,47     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Após testar os pares de valores para os parâmetros de calibração *bx\_add* e *bx\_mult*, observou-se que o par com valores 1,6 e 2,7, respectivamente, foi o que mais gerou resultados com erros reduzidos, em relação ao par com valores *default* (2 e 3). A Tabela 4.16 mostra os erros percentuais médios absolutos das duas medidas de desempenho, para as quatro linhas estudadas. Concluído o procedimento de calibração, é possível observar que todos os erros foram reduzidos. A linha 98 foi a que apresentou melhores resultados e a linha 701, mesmo tendo um tipo de operação mais difícil de representar no simulador, também apresentou bons resultados.

Tabela 4.16 - Comparação dos erros antes e depois da calibração

| Medida de desempenho | Valores bx_add / bx_mult | Tipo de medida  | Linhas |        |        |        |
|----------------------|--------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                      |                          |                 | 28     | 98     | 701    | 816    |
| Tempo de viagem      | 2,0 / 3,0                | Medida de campo | 314    | 331    | 239    | 320    |
|                      |                          | Medida simulada | 341,75 | 371,59 | 250,81 | 365,5  |
|                      |                          | EPAM            | -8,84  | -12,26 | -4,94  | -14,22 |
|                      | 1,6 / 2,7                | Medida de campo | 314    | 331    | 239    | 320    |
|                      |                          | Medida simulada | 294,6  | 318,95 | 243,63 | 324,43 |
|                      |                          | EPAM            | 6,18   | 3,64   | -1,94  | -1,38  |
| Tempo de parada      | 2,0 / 3,0                | Medida de campo | 8,9    | 9,08   | 14,86  | 5,43   |
|                      |                          | Medida simulada | 9,25   | 9      | 11,1   | 4,48   |
|                      |                          | EPAM            | -3,93  | 0,88   | 25,3   | 17,5   |
|                      | 1,6 / 2,7                | Medida de campo | 8,9    | 9,08   | 14,86  | 5,43   |
|                      |                          | Medida simulada | 8,79   | 9,12   | 12,71  | 4,64   |
|                      |                          | EPAM            | 1,24   | -0,44  | 14,47  | 14,55  |

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4 Análise dos Resultados

Após executar todas as simulações, foi possível analisar qual dos tipos de modelagem do tempo de parada dos ônibus é o mais adequado para o presente estudo de caso. A opção de distribuição não foi a ideal neste caso, pois os valores de tempo de parada obtidos em campo são muito variáveis. Quando o simulador gera os tempos de parada como saída, estes tempos são calculados por distribuição normal (sendo inseridos valores mínimos, médios e máximos). Caso os valores de campo, inseridos como dados de entrada, variem muito, o simulador vai gerar valores de tempos de parada dentro do intervalo de distribuição, mas alguns valores observados com baixa frequência em campo podem aparecer com maior regularidade na simulação. A escolha da distribuição normal como modelagem do tempo de parada pode ser adequado para estudos onde não se tenha muitos dados de transporte público coletados, mas é necessário medir os tempos de parada em campo e o ideal é que os valores não apresentem desvio padrão muito alto. Também é uma opção menos trabalhosa para casos onde não se tem o objetivo de analisar o comportamento em si nos pontos de parada.

A rede em que foi utilizado o modelo avançado de pedestre apresentou o melhores resultados (menores erros). Como é possível manipular variáveis relacionadas ao transporte público (como tempos de embarque e desembarque, tempo morto, tempos de abertura e fechamento das portas e características dos ônibus), torna-se mais fácil representar a operação das linhas observada em campo no simulador. Para estudos de caso onde há dificuldade em

coletar as variáveis de transporte público, esta não é a opção ideal, pois é necessário inserir tais variáveis como dados de entrada. Apesar do simulador oferecer valores *default* para tais parâmetros, é pertinente realizar coleta em campo para que as medidas padrão podem se diferenciar muito das reais.

Na rede com *Viswalk* implementado, foram construídas todas as áreas de pedestres (área de traslado, área de espera e plataforma de embarque e desembarque) e foi necessário inserir as dimensões observadas em campo, informações dos passageiros (como quantidade, taxa de chegada e distribuição dos passageiros nas paradas, gênero e idade) e do veículo (dimensões das portas, definição das portas para embarque e/ou desembarque e altura dos degraus). As variáveis de transporte público supracitadas não são inseridas como dados de entrada, mas sim calculadas pelo modelo *Viswalk*. Assim, o analista não consegue ter maior controle sobre os parâmetros de transporte público e determinadas especificidade da operação das linhas. Por exemplo, na simulação *Viswalk*, o fechamento das portas sempre leva 2 segundos e sempre é executado antes do veículo iniciar seu deslocamento. As amostras em campo demonstraram um comportamento diferente, onde os condutores frequentemente realizavam o fechamento das portas ao mesmo tempo em que aceleravam. Outro exemplo é o fato dos passageiros, na simulação só aproximarem-se da plataforma de embarque quando o veículo para completamente no ponto de parada. Em campo, os passageiros se deslocam para o ponto de embarque mais próximo assim que avistam a linha desejada. Na simulação, o tempo de embarque e desembarque dos passageiros é calculado de acordo com o tipo implementado (classificado por gênero, idade e presença ou não de mobilidade reduzida) e a quantidade de pessoas a embarcar na linha. Já em campo, observou-se que tais tempos dependem não só destas variáveis, como também de fatores como lotação dentro do veículo (diminuído a taxa de chegada dentro do mesmo), operações onde o motorista realiza a cobrança da tarifa e condições de infraestrutura das calçadas. Assim, o *Viswalk* mostra-se como opção mais adequada nos casos onde há dificuldade de coletar em campo parâmetros como tempo morto, tempos de abertura e fechamento de porta e tempos de embarque e desembarque, pois o próprio modelo calcula tais variáveis. Nos estudos onde se tem o objetivo de analisar interações maiores entre os pedestres (como em terminais de ônibus, por exemplo), esta é a alternativa ideal. No entanto, é necessário calibrar também o modelo de forças sociais, que se trata do modelo que representa a movimentação e interação entre os pedestres.

Posteriormente, foi selecionada a rede implementada com modelo avançado de pedestre para a realização do procedimento de calibração do modelo *car-following*. O par de valores ótimo para os parâmetros de calibração  $bx\_add$  e  $bx\_mult$  é, respectivamente, 1,6 e 2,7. Como visto na Tabela 4.16, todos os erros foram reduzidos após a calibração. Foi possível observar. Mesmo tendo uma operação mais difícil de modelar, a linha 701 teve seu erro reduzido de forma considerável. A linha mostrou-se a mais sensível às alterações dos valores dos parâmetros de calibração, pois a extensão de seu percurso é menor que a das outras linhas. Apesar de apresentar erros aceitáveis antes e depois da calibração, a linha 816 também apresentou erros mais altos em comparação às linhas 028 e 098. Durante a coleta de dados, observou-se que a lotação dentro do veículo era sempre mais frequente e isto causa grande impacto no tempo total de embarque dos passageiros, conseqüentemente no tempo de parada dos ônibus da linha. Uma das limitações do simulador é não representar a lotação dentro dos veículos e a influência desta no tempo que os ônibus permanecem nas paradas. Já as linhas 028 e 098 apresentaram comportamento durante a simulação muito semelhante ao observado em campo, pois as impedâncias relatadas em relação às linhas 701 e 816 não estavam presentes ou eram pouco frequentes durante suas operações. Este cenário se reflete nos baixos erros gerados pelas linhas 028 e 098, antes e depois da calibração.

Também foi possível observar após a calibração o quanto os tempos de parada influenciam no tempo de viagem total dos ônibus. A Tabela 4.17 mostra a comparação da relação entre as duas medidas de desempenho antes e depois da calibração, demonstrando que o impacto é semelhante nos cenários real e simulado. A maior influência observada está na linha 701, com impactos de 6,22% na coleta de dados de campo e de 5,22% na rede simulada. Isto se deve ao percurso mais curto desta linha em relação às linhas 028, 098 e 816.

Tabela 4.17 - Influência do tempo de parada no tempo de viagem dos ônibus

| Medidas de desempenho e influência    | Tipo de medida       | Linhas |        |        |        |
|---------------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                       |                      | 28     | 98     | 701    | 816    |
| Tempo de viagem (s)                   | Coletada em campo    | 314    | 331    | 239    | 320    |
|                                       | Simulada e calibrada | 294,6  | 318,95 | 243,63 | 324,43 |
| Tempo de parada (s)                   | Coletada em campo    | 8,9    | 9,08   | 14,86  | 5,43   |
|                                       | Simulada e calibrada | 8,79   | 9,12   | 12,71  | 4,64   |
| Tempo de parada / Tempo de viagem (%) | Coletada em campo    | 2,83   | 2,74   | 6,22   | 1,70   |
|                                       | Simulada e calibrada | 2,98   | 2,86   | 5,22   | 1,43   |

Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, foi possível realizar todas as análises pretendidas neste trabalho utilizando o Vissim como ferramenta. No entanto, por ser um simulador calibrado para a realidade de tráfego da Alemanha, é necessário observar as especificidades observadas em campo e implementá-las no *software* durante o procedimento de codificação, para que o estudo seja o mais próximo possível da realidade. A escolha das medidas de desempenho mais adequadas ao objetivo do estudo e que representem bem o desempenho do sistemas de transporte público, uma coleta de dados confiável dos parâmetros de transporte público e uma calibração criteriosa são fundamentais para se obter bons resultados na modelagem.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho é analisar o potencial da microsimulação na modelagem de sistemas de transporte público por ônibus. Conclui-se que os microsimuladores evoluíram ao longo dos anos e há grande esforço das desenvolvedoras no aperfeiçoamento da modelagem dos componentes de transporte público. Os resultados do trabalho levaram a conclusões relevantes quanto à importância da coleta de dados para a representação eficaz destes sistemas; a importância de se modelar cuidadosamente o ponto de parada, pois é neste componente que ocorre boa parte dos atrasos dos ônibus em um corredor e a importância da calibração para o alcance da melhor qualidade possível da modelagem.

Através da revisão bibliográfica, foi possível constatar que os microsimuladores são ferramentas cada vez mais usadas nos estudos modernos. Sendo aplicadas para pequenas ou menos entidades e em todos os tipos de operação de tráfego para o modo ônibus. Na maioria dos estudos, enfatizou-se a necessidade de calibração dos parâmetros de transporte público. Porém, pode existir certo equívoco entre os pesquisadores quando se referem aos parâmetros de calibração. Entende-se que, se os parâmetros são coletados em campos, os mesmos são caracterizados como dados de entrada. Os de calibração serão os parâmetros em que haverá alterações em seus valores a fim de se obter os melhores resultados possíveis.

Na fase de análise dos manuais e manuseio dos simuladores, foi possível constatar que Vissim e Aimsun, além de serem amplamente utilizados em estudos de transporte público, são os que mais se destacam entre os simuladores. As atuais versões são as mais atualizadas e com melhor representação das interseções entre ônibus e passageiros. Todos os componentes do sistema de transporte público por ônibus podem ser bem representados, ressaltando a necessidade de replicar as condições específicas da área a ser simulada. Mas há uma diferença significativa: o Vissim apresenta-se como mais completo, com mais opções de modelagem do tempo de parada, parâmetro tão importante na modelagem de sistemas de transporte público.

Nas fases de coleta de dados e de codificação, foi possível observar como existem especificidades em campo que os microsimuladores ainda não conseguem representar, tendo o analista que “compensar tais limitações”. Constatou-se também o quanto o tempo de parada pode impactar no tempo de viagem do ônibus, observando influências de até 42,5%. O impacto da lotação dentro dos veículos no embarque e desembarque dos passageiros que estão nas paradas, o impacto da conservação de vias e calçadas na movimentação de veículos e passageiros são limitações difíceis de serem neutralizadas pelo analista. As operações onde o

motorista também realiza a cobrança da tarifa influencia muito no tempo de embarque médio dos passageiros e este tipo de operação precisa ser codificado com muito cuidado no simulador, pois o mesmo não prevê este tipo de impedância, tendo que ser feitas adaptações para que o funcionamento da linha seja simulado o mais próximo possível da realidade.

A fase de calibração mostrou o quanto é importante calibrar os modelos comportamentais do simulador, pois as manobras realizadas pelos ônibus e por outros veículos da rede (que interferem nos movimentos dos ônibus) são ditados por tais modelos. Principalmente, quando a área estudada se trata de um corredor com operação de tráfego misto. Para redes onde haja análise de questões relacionadas ao transporte público, é fundamental selecionar uma medida de desempenho que tenha relação direta com este modo, como por exemplo a medida estudada neste trabalho, o tempo de parada dos ônibus. Se somente o tempo de viagem dos ônibus tivesse sido estudado, não seria possível verificar se o simulador está modelando satisfatoriamente a operação nos pontos de parada, ainda que os tempos de viagem simulados apresentassem valores próximos dos medidos em campo.

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- Simular outros tipos de operação onde o ônibus tenha prioridade: áreas com faixas preferenciais, corredores com estações BRT, presença de semáforos com prioridade etc.;
- Simular um terminal de ônibus, a fim de estudar maiores interações entre passageiros e entre os passageiros e os veículos.
- Calibrar o modelo comportamental de mudança de faixa e aceitação de brecha do simulador utilizado;
- Coletar os perfis de aceleração e desaceleração dos ônibus nos pontos de parada e em cruzamentos semaforizados;
- Caso o Vissim seja o simulador utilizado no estudo, coletar em campo o parâmetro  $ax$  (do modelo *car-following* W74) somente para ônibus, pois podem existir diferenças significativas em relação aos valores coletados especialmente para carros;
- Estudar os modelos de movimentação dos pedestres nas paradas, caso as áreas de espera analisadas sejam de dimensões maiores que os de pontos de parada em meio de quadra.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, B. Exploring New Bus Priority Methods at Isolated Vehicle Actuated Junctions. **Transportation Research Procedia**, v. 4, p. 391-406. 2014. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.030.
- ALARCÓN, V. I. Z. **Uso de Herramientas de Microsimulación para la Definición de Estrategias de Control de Tránsito para la Ciudad de Santiago**. 2010. Monografía (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 2010.
- ANTUNES, E. M. **Avaliação do Transporte Público por Ônibus sob o Ponto de Vista do Usuário em Cidades Médias Paranaenses**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- AMERICAN PUBLIC TRANSPORTATION ASSOCIATION. **Implementing BRT Intelligent Transportation Systems**. Washington, DC. 2010.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Pontos de Parada de Ônibus Urbano**. São Paulo, Brasil. 2002.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Relatório Geral 2012**. São Paulo, Brasil. 2014.
- ARAÚJO, D. R. C.; CYBIS H. B. B. Aplicação do Simulador de Tráfego DRACULA em Porto Alegre – Análise Comparativa com o SATURN. **Anais do XVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, v. 1, p. 341-352. Natal, RN. 2002.
- ASTARITA, V.; ER-RAFA, K.; FLORIAN, M.; MAHUT, M.; VELAN, S. Comparison of Three Methods for Dynamics Network Loading. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, p. 179-190. 2001.
- ATKINS; INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES. **SATURN: Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks**. Manual - Version 11.3. Leeds, Reino Unido. 2015.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of Traffic Simulation**. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 145. New York: Springer, 2010. 440 p.
- BARRIOS, E.; RIDGWAY, M.; CHOA, F. The Best Simulation Tool for Bus Operations. **Institute of Transport Engineers District 6<sup>o</sup> Annual Meeting**. Albuquerque, USA. 2001.
- EMPRESA DE TRANSPORTES E TRÂNSITO DE BELO HORIZONTE. **PlanMob-BH – Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte. Relatório final**. Belo Horizonte, Brasil. 2013.
- BOXILL, S. A.; YU, L. **An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development**. Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University. 2000.

BURGOS, V. **Revisión de la Incorporación del Transporte Público en Modelos Microscópicos de Tráfico**. 2004. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 2004.

CASTILHO, R. A. **Análise e Simulação da Operação de Ônibus em Corredores Exclusivos**. 1997. 121 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1997.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO DE SÃO PAULO. **Pesquisa de Monitoração da Fluidez - Desempenho do Sistema Viário Principal, Volume e Velocidade – 2012**. São Paulo, Brasil. 2013.

CHAGAS, L. A. **Critérios para Definição de Elementos de Projeto de Estações de Corredores de BRT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CHAPMAN, R. A. Bus Boarding Times - a Review of Studies and Suggestions for Interpretation. **Research Report N° 8**. Transport Operations Research Group, Newcastle, U.K. 1975.

CHATTERJEE, I. **Replication of Freeway Work Zone Capacity Values in a Microscopic Simulation Model**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - University of Missouri, Columbia, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Pesquisa CNI – IBOBE: Retratos da Sociedade Brasileira: Mobilidade Urbana**. Brasília, Brasil. 2015.

COELHO, E. C. **Avaliação dos Níveis de Congestionamento em Vias Arteriais com Utilização da Micro-Simulação**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota Nacional de Veículos - 2015**. Brasília, Brasil. 2015. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/estatistica/257-frota-2015>.

EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO DE FORTALEZA. **Anuário de Transportes Públicos de Fortaleza 2010**. ETUFOR. Fortaleza, Brasil. 2010.

FAGGIONI, A. C.; SORRATINI, J. A. Estudo da Confiabilidade do Transporte Coletivo Urbano de Uberlândia, MG por meio de Microsimulação. **Horizonte Científico**, v. 2, n. 2, p. 1-10. 2008.

FARIAS, C. A. **Percepção do Usuário com Relação às Características do Nível de Serviço do Transporte Coletivo Urbano por Ônibus**. 1985. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

FERNÁNDEZ, R. Design of Bus-stop Priorities. **Traffic Engineering and Control**, v. 40, p. 335-340. 1999.

FERNÁNDEZ, R.; BURGOS, V. How Public Transport is Being Modelled in Microscopic Traffic Simulators? **European Transport Conference**. Strasbourg, França. 2004.

FERNÁNDEZ, R. Modelling Public Transport Stops by Microscopic Simulation. **Transportation Research Part C**, v. 18, p. 856-868. 2010.

FERRAZ, A. C. **Sobre a Eficiência e Eficácia do Transporte Público nas Cidades Médias**. 1990. Tese (Livre docência em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E. **Transporte Público Urbano**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2004. 410 p.

GARDNER, G.; CORNWELL, P. R.; CRACKNEL, J. A. The Performance of Busway Transit in Developing Cities. **Transportation and Road Research Laboratory**. Report 329. Crowthorne, Reino Unido. 1991.

GIBSON, J.; FERNÁNDEZ, R. Recomendaciones para el Diseño de Paraderos de Buses de Alta Capacidad. **Apuntes de Ingeniería**, v. 18, p. 35-50. 1995.

GIPPS, P. G. A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 15, p. 105-111. 1981. DOI: 10.1016/0191-2615(81)90037-0.

GIPPS, P. G. A Model for the Structure of Lane Changing Decisions. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 20, p. 403-414. 1986. DOI: 10.1016/0191-2615(86)90012-3.

GOMES, G. Z. **Uso de Microsimulação na Avaliação da Sustentabilidade de Corredores Rodoviários**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

HELLINGA, B. R. Requirements for the Calibration of Traffic Simulation Models. **Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering**, v. 4, p. 211-222. 1998.

HIDAS, P.; AITKEN, S.; SHARMA, S.; XU, M. Evaluation of Bus Operations by Microsimulation in a Sydney CBD Corridor. **Anais do 32º Australasian Transport Research Forum**. Auckland, Nova Zelândia. 2009.

HOLLANDER, Y.; LIU, R. The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. **Transportation**, v. 35, p. 347–362. 2008. DOI: 10.1007/s11116-007-9156-2.

HOURDAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P. G.; KOTTOMMANNIL, J. A Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. **Transportation Research Record**, n. 1852, p. 130-139. Washington D.C. 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Evolução da Frota de Automóveis e Motos no Brasil 2001 – 2012**. Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Indicadores de mobilidade urbana da PNAD 2012**. Brasília, Brasil. 2013.

INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES. **DRACULA: Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation**. Leeds, Reino Unido. 2015, Disponível em: < <http://www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/>>. Acesso em: 16/07/2015.

JAYAKRISHNAN, R.; CORTÉS, C. E.; LAVANYA, R.; PAGÉS, L. Simulation of Urban Transportation Networks with Multiple Vehicle Classes and Services: Classifications, Functional Requirements and General-Purpose Modeling Schemes. **Transportation Research Board**, Washington D.C. 2003.

KOLMAKOVA, N.; YURSHEVICH, E.; YATSKIV, I. Modelling as a Means of Solving the Problem of City Traffic Optimisation. **Transport and Telecommunication**, v. 7, p. 156-164. 2006.

LACALLE, M. J. **Calibración del Microsimulador AIMSUN para Flujo Ininterrumpido em la Ciudad de Santiago**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia) – Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica do Chile, Santiago, 2003.

LACERDA, S. M. **Precificação de Congestionamento e Transporte Coletivo Urbano**. BNDES Setorial. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

LACERDA, V. M.; CASTRO-NETO, M. M. Considerações sobre a calibração do modelo de Car-Following do VISSIM para Vias Arteriais Urbanas. **XXVIII ANPET - Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Curitiba, PR. 2014.

LIEBERMAN, E.; RATHI, A. K. Traffic Simulation. **The Revised Monograph on Traffic Flow Theory**. Federal Highway Administration. Washington, D.C. 1997

LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. On Kinetic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long, Crowded Roads. **Proceedings of the Royal Society of London**. A229, p. 317-345, London. 1955.

LIU, R. **DRACULA - Microscopic Traffic Simulator**. Institute of Transport Studies, University of Leeds. Leeds, Reino Unido. 1994.

LIU, R.; CLARK, S. D.; MONTGOMERY, F. O.; TATE, J. The Microscopic Modelling of Kerb Guided Bus Schemes. **79º Transportation Research Board Annual Meeting**. Washington, D. C. 2000.

MCTRANS. **TSIS-CORSIM: Traffic Software Integrated System – Corridor Simulation**. McTrans. Disponível em: < <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>>. Acesso em 16/07/2015.

MAIA, F. V. B. **Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático - Operacionais na Malha Viária Urbana**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MAY, A. D. **Traffic Flow Fundamentals**. 1st ed. New Jersey: Prentice Hall. 1990. 464 p.

MCLEAN, J. R. **Two-Lane Traffic Operation: Theory and Practice**. 1st ed. New York: Gordon & Breach. 1989. 408 p.

MILLER, A. J. Nine Estimators of Gap Acceptance Parameters. **5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation**, n. 0, p. 215-235. New York, USA. 1972.

MILLER, M.; YIN, Y.; BALVANYOS, T.; CEDER, A. Framework for Bus Rapid Transit Development and Deployment Planning. **California PATH Research Report**. California, USA. 2004.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Relatório Final**. Brasília, Brasil. 2011.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. **Estudo sobre Prioridade ao Transporte Coletivo Urbano**. Brasília, Brasil. 2002.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. **Anuário NTU 2012-2013**. Brasília, Brasil. 2013.

OLIVEIRA, M. L.; CYBIS, H. B. B. Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. **Anais da VIII Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana**. Gramado, RS. 2008.

OLIVEIRA-NETO, F. M. **Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

OLSTAM, J. J.; TAPANI, A. **Comparison of Car-following Models**. Swedish National Road and Transport Research Institute. Linköping, Suécia. 2004.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DA SEGURANÇA VIÁRIA. **Retrato da Segurança Viária no Brasil – 2014. 107f**. Brasília, Brasil. 2015.

OWEN, B.; BROCK, G.; MASTBROOK, P.; PAVLIK, R.; RAO, S.; STALLARD, C.; SUNKARI, Z.; ZHANG, Y. **A compendium of Traffic Model Validation Documentation and Recommendations**. Phase I, Tasks A-H. USA: Department of Transportation. 1996.

PAPAGEORGIU, G.; DAMIANOU, P.; PITSILLIDES, A.; APHAMIS, T.; CHARALAMBOUS, D.; IOANNOU, P. Modelling and Simulation of Transportation Systems: a Scenario Planning Approach. **Automatika**, v. 50, p. 39-50. 2009.

PERON, L. **Contribuição Metodológica para Aplicação de Prioridade Semafórica Condicional em Corredores de Ônibus**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PIPES L. A. An Operational Analysis of Traffic Dynamics. **J Appl Phys**, v.24, p. 274-287. 1953.

PORTUGAL, L. S. **Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2005. 198 p.

PLANUNG TRANSPORT VERKEHR. **PTV VISSIM 7. User Manual**. Planung Transport Verkehr AG. Karlsruhe, Germany. 2014.

QUADSTONE. **Quastone Paramics**. Quadstone. 2015. Disponível em: <<http://www.paramics-online.com/>>. Acesso em: 16/07/2015.

RAJ G. G.; SEKHAR, R.; VELMURUGAN, S. Micro Simulation Based Performance Evaluation of Delhi Bus Rapid Transit Corridor. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 104, n. 0, p. 825-834. 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.177.

RAKHA, H. A. (2002) **INTEGRATION Release 2.30 for Windows: User's Guide – Volume 1: Fundamental Model Features E Volume 2: Advanced Model Features**. Michel Van Aerde and Associates Ltd. Kingston, Ontario, Canadá. 2002.

RAKHA, H.; GAO, Y. Calibration of Steady-state Car-following Models Using Macroscopic Loop Detector Data. **Proceedings of the 89th Transportation Research Board Annual Meeting**, Washington, D.C. 2010.

RATROUT, N. T.; RAHMAN, S. M. A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Software. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 34, p. 121-133. 2009.

REUSCHEL A. Vehicle Movements in a Platoon, **Zeitschrift des Osterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines**, p. 193-215. 1950a.

REUSCHEL A. Vehicle Movements in a Platoon with Uniform Acceleration or Deceleration of the Lead Vehicle. **Zeitschrift des Osterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines**, p. 73–77. 1950b.

SANTOS, P. M. **Método de Calibração de um Modelo Veículo Seguidor para BRT e Ônibus em Corredor Segregado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SCHEIN, A. L. **Sistema de Informação ao Usuário como Estratégia de Fidelização e Atração**. 2003. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SILVA, P. C. M. **Modelling Interactions Between Bus Operations and Traffic Flow**. 2001. Tese (Doutorado em Estudos de Transporte) - University of London, London, 2001.

SILVA, A. N. R. da; FERRAZ, A. C. P. **Transporte Público Urbano: Operação e Administração**. Notas de aula. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP. São Carlos, Brasil. 1991.

SIMÕES, M. L. O. **Definição de uma Estratégia Optimizada de Controle de Tráfego em Cruzamentos Usando Simulação Estocástica**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

SORRATINI, J. A.; LIU, R.; SINHA, S. Assessing Bus Transport Reliability Using Micro-Simulation. **Transport Planning and Technology**, v.31, n. 3, p. 303-324. 2008. DOI: 10.1080/03081060802086512.

SOUSA, D. L. M.; RIBEIRO, P. C. M. Análise dos Impactos Causados no Tráfego por Alterações na Rede Viária Utilizando Micro-simulação. **18º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, pp. 441-452. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. **Pesquisa de Mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo: Síntese das Informações Pesquisa Domiciliar**. São Paulo, Brasil. 2013.

TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM. **TCQSM - Transit Capacity and Quality of Service Manual**. 3rd ed. Transportation Research Board. 2013.

THORRIGNAC, G. **Lessing Bus Journey Time on Congested Road Infrastructures: Micro Modelling Methodology**. Mott MacDonald. Croydon, UK. 2008.

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

TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS. **Aimsun 8 User Manual**. Transport Simulation Systems, v. 8. Barcelona, Espanha. 2013.

TU, T. V.; SANO, K.; Y, N. C.; TAN, D. T. Simulation os Bus Operations in Urban Roads Using PARAMICS. **Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 7, p. 344-344. 2009. DOI: 10.11175/eastpro.2009.0.344.0.

VILARINHO, C. A. T. **Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas**. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

VUCHIC, V. R. **Transportation for Livable Cities**. 1st ed. New Jersey: Routledge. 1999. 352 p.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit: Operations, Planning and Economics**. 1st ed. New Jersey: John Wiley and Sons. 2005. 644 p.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit: Systems and Technology**. 1st ed. New Jersey: John Wiley and Sons. 2007. 602 p.

WANG, Y.; PREVEDOUROS. P. D. Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in Replicating Volumes and Speeds on Three Small Networks. **Transportation Research Record**, n. 1644, p. 80-92. 1998.

WIEDEMANN, R.; REITER, U. **Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission - Background and Actual State**. CEC Project ICARUS (V1052), Final Report, volume 2. Bruxelas, Bélgica. 1992.

WIEGAND, J. D.; YANG, C. Y. D. Traffic Simulation Runs: how many Needed?. **Public Roads**, v. 74, n. 4, p. 30-35. 2011.

WRIGHT, L.; HOOK, W. **Manual de BRT: Guia de Planejamento**. Ministério das Cidades. Brasília, Brasil. 2008.

ZHANG, J.; HOUNSELL, N.; SHRESTHA, B. Calibration of Bus Parameters in Microsimulation Traffic Modelling. **Transportation Planning and Technology**, v. 35, p. 107 - 120. 2012. DOI: 10.1080/03081060.2012.635431.