



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

VICTOR MACÊDO LACERDA

**ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA EM VIAS URBANAS COM USO DO
MICROSSIMULADOR VISSIM**

FORTALEZA

2016

VICTOR MACÊDO LACERDA

ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA EM VIAS URBANAS COM USO DO
MICROSSIMULADOR VISSIM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto

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)

L142e Lacerda, Victor Macêdo.
Estimação da velocidade média em vias urbanas com uso do microssimulador Vissim / Victor Macêdo
Lacerda. – 2016.
152 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. Manoel Mendonça de Castro Neto.

1. Microssimulação de Tráfego. 2. Tráfego Urbano. 3. Algoritmos Genéticos. 4. Car-following. 5. Modelos comportamentais. I. Título.

CDD 388

VICTOR MACÊDO LACERDA

ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA EM VIAS URBANAS COM USO DO
MICROSSIMULADOR VISSIM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em: 19 / 12 / 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D. (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D.

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph. D.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS)

À Deus.

A meus pais e irmã, Fátima, Edilson e Amanda

AGRADECIMENTOS

À minha família, Edilson, Fátima e Amanda pelo apoio e carinho em todos esses anos, além de todos os meus primos, tios e familiares, que sempre acreditaram no meu potencial e me encorajaram ao longo da minha caminhada.

Ao meu orientador Manoel Mendonça, por todo o companheirismo desde a graduação, me estimulando a participar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e sempre contribuindo com conhecimentos e conselhos, não só para a pesquisa, mas em diversos âmbitos da minha vida.

A todos os colegas de sala de aula e do GTTEMA que contribuíram com análises, conselhos e pesquisas de campo, em destaque: Franco Matos, Sued Lacerda, Lisel, Vanessa Jamille, Ximena, Roberto Torquato, Lara Lima, Lara Barroso, Alessandro, Talyson, Helry, Dênnys, Renan Carioca, Caio, Julie, Leonardo Mota, Amanda Alves, Cassiano e, em especial, aos amigos Leonardo Ribeiro, Matheus Ferreira e Diego Alves por todo o apoio e contribuição com os Algoritmos Genéticos.

Aos meus avaliadores Flávio e Helena por todas as contribuições dadas à pesquisa, desde as etapas iniciais até a defesa.

A todos os professores do PETRAN, em especial os professores Felipe Loureiro, Bruno Bertoncini, Flávio Cunto, Mario Azevedo, Uchôa e Verônica por todos os ensinamentos dentro e fora de sala durante todos os anos do mestrado.

Ao meu chefe Luiz Alberto por toda a compreensão e apoio, sempre flexibilizando meu trabalho para que meu mestrado não fosse comprometido e a todos os amigos do PAITT por todo o apoio e força durante todo o processo.

Aos amigos da AMC, em especial do CTAFOR, e da ETUFOR por terem contribuído com dados para a pesquisa.

A todos os amigos, familiares e professores do programa que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse sonho.

RESUMO

A procura por alternativas de solução para a baixa fluidez no tráfego urbano das grandes cidades vem se tornando cada vez mais uma preocupação da gestão pública, uma vez que o aumento dos congestionamentos impacta direta ou indiretamente, na qualidade de vida e produtividade dos usuários. Na tentativa de prever com confiabilidade os diversos cenários para as diversas alternativas de solução, os microssimuladores vêm sendo uma das principais ferramentas disponíveis, podendo auxiliar no processo de tomada de decisão e na avaliação do custo/benefício. Contudo, o grande desafio está na quantidade elevada de parâmetros e no grau de refinamento dos modelos dos microssimuladores. A maioria deles apresenta basicamente três modelos: o *car-following*, o qual representa os movimentos longitudinais da corrente de tráfego, o *lane-changing* e o *lateral movements*, representando as mudanças de faixa e movimentos laterais, respectivamente, e o *gap acceptance*, que modela o processo de aceitação de brechas. Tais modelos podem apresentar, conjuntamente, centenas de parâmetros que, além de impactar individualmente nas medidas de desempenho de tráfego, correlacionam entre si gerando diferentes comportamentos aos condutores. Contudo, não encontra-se atualmente um método de calibração satisfatório no que diz respeito à modelagem do desempenho do tráfego urbano, estando os métodos existentes tendenciados a métodos de calibração automatizados. O presente trabalho tem por objetivo, então, propor uma metodologia de calibração dos modelos comportamentais do VISSIM para vias arteriais urbanas considerando todos os parâmetros de todos os modelos que impactam no movimento longitudinal dos veículos. Dessa forma, inicialmente foram compreendidos e quantificados os efeitos dos parâmetros na medida de desempenho *velocidade média*, partindo para a classificação de todos os parâmetros em blocos. Para cada bloco de parâmetros foram definidas as estratégias de calibração com base nas respectivas medidas-alvo de cada bloco. Por fim, calibrou-se e validou-se dois corredores arteriais como estudo de caso, de forma a consolidar a metodologia de calibração estabelecida e compará-la com o processo de calibração automatizado por algoritmos genéticos.

Palavras-chave: Modelagem do tráfego urbano. Microssimulação de tráfego. Calibração de microssimuladores. Modelos comportamentais. Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

The search for alternative solutions for high traffic congestions in big cities is becoming an increasingly concern of public management, since the growth of this issue impacts directly or indirectly the quality of life and productivity of users. In attempt to reliably predict the several scenarios for the various solution alternatives, micro simulators have been one of the main tools available and can assist in both the decision-making process and the evaluation of the cost/benefit. However, the major challenge is the high number of parameters and the degree of refinement of micro simulators models. Basically, the majority presents three models: car-following, which represents the longitudinal movement of traffic stream; lane-changing; lateral movements and gap acceptance. Such models may display, in conjunction, hundreds of parameters which, besides the individually impact on traffic performance measurements, can be correlated among each other, generating different driving behaviors. However, nowadays, a satisfactory calibration method aiming to model urban traffic performance is not available, having existing methods biased to automated calibration process. Therefore, this study aims to propose a calibration methodology of the behavioral VISSIM models for urban arterial roads considering all parameters and behavioral models that impact the longitudinal movement of the vehicles. Initially the effects of parameters on performance measure average speed will be understood and quantified, in order to classify all parameters in clusters. For each parameter set, a calibration strategy based on the respective target measure will be defined. Finally, two arterial corridors were calibrated and validated as a case study, in order to consolidate the established calibration methodology and compare it with the automated calibration process by genetic algorithms.

Keywords: Urban traffic modeling. Microscopic traffic simulation. Micro simulators calibration. Driving behavioral models. Genetic Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Modelo de car-following de Wiedemann..... | 25 |
| Figura 2 | – Relação entre distância mínima de following (d) e velocidade (v) para algoritmos de car-following W74 e W99 do VISSIM..... | 28 |
| Figura 3 | – Desaceleração para mudanças de faixa..... | 37 |
| Figura 4 | – Parâmetro Min. headway (Front/rear) na versão 5.4 e 6.0 do VISSIM..... | 38 |
| Figura 5 | – Primeiro caso do parâmetro Advanced Merging..... | 40 |
| Figura 6 | – Ilustração dos casos 2, 3 e 4 do parâmetro Advanced Merging..... | 40 |
| Figura 7 | – Representação do parâmetro Cooperative lane change..... | 42 |
| Figura 8 | – Representação do parâmetro Lateral correction of rear end position..... | 43 |
| Figura 9 | – Parâmetros de lane-changing com valores default..... | 44 |
| Figura 10 | – Metodologia proposta..... | 65 |
| Figura 11 | – Comportamento do Look ahead distance e Look back distance..... | 70 |
| Figura 12 | – Corredor arterial Av. Santos Dumont..... | 72 |
| Figura 13 | – Corredor arterial Av. Pontes Vieira..... | 73 |
| Figura 14 | – Volumes coletados Av. Santos Dumont..... | 74 |
| Figura 15 | – Rotas, headways e localização dos pontos de parada dos ônibus da Av. Pontes Vieira..... | 75 |
| Figura 16 | – Rede da Av. Santos Dumont codificada..... | 76 |
| Figura 17 | – Rede da Av. Pontes Vieira codificada..... | 76 |
| Figura 18 | – Gráfico da influência do parâmetro Temporary lack of attention na velocidade média..... | 84 |
| Figura 19 | – Distribuições de frequência das velocidades desejadas observadas..... | 98 |
| Figura 20 | – Imagem do vídeo do Drone utilizado para obtenção de Fluxos de Saturação..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 21 – Imagem do vídeo do Drone utilizado para obtenção da distância média de parada entre os veículos..... | 100 |
| Figura 22 – Histograma das distâncias de parada obtidas na Av. Santos Dumont..... | 101 |
| Figura 23 – Distribuição acumulada dos tempos de parada dos ônibus na Av. Pontes Vieira..... | 102 |
| Figura 24 – Gráficos dos resultados do AG para Av. Santos Dumont..... | 110 |
| Figura 25 – Resultados do AG para a Av. Pontes Vieira..... | 113 |
| Figura 26 – Gráfico comparativo dos erros de cada trecho para cada cenário do AG (Av. Pontes Vieira) | 113 |
| Figura 27 – Gráfico com valores dos parâmetros em função dos cenários do AG para a Av. Santos Dumont..... | 118 |
| Figura 28 – Gráfico com valores dos parâmetros em função dos cenários do AG para a Av. Pontes Vieira..... | 119 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de car-following, com valores default..... | 33 |
| Tabela 2 – Exemplos de estudos de calibração do VISSIM..... | 52 |
| Tabela 3 – Exemplos de Medidas de Ajuste (<i>Goodness-of-fit</i>)..... | 58 |
| Tabela 4 – Análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 a CC9 do W99 (Av. Santos Dumont) | 78 |
| Tabela 5 – Análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 a CC9 do W99 (Av. Pontes Vieira)..... | 79 |
| Tabela 6 – Análise de sensibilidade do modelo W74 de car-following para Av. Santos Dumont..... | 80 |
| Tabela 7 – Análise de sensibilidade do modelo W74 de car-following para Av. Pontes Vieira..... | 81 |
| Tabela 8 – Valores limites dos parâmetros de car-following e indicação do comportamento agressivo (vermelho) e cauteloso (verde)..... | 82 |
| Tabela 9 – Análise de sensibilidade dos demais parâmetros de car-following (Av. Santos Dumont) | 83 |
| Tabela 10 – Valores limites dos parâmetros de car-following e indicação do comportamento agressivo (vermelho) e cauteloso (verde) | 86 |
| Tabela 11 – Análise de sensibilidade dos parâmetros de lane changing (Av. Santos Dumont) | 87 |
| Tabela 12 – Análise de sensibilidade dos parâmetros de lane-changing (Av. Pontes Vieira) | 89 |
| Tabela 13 – Classificação dos parâmetros de car-following..... | 92 |
| Tabela 14 – Classificação dos parâmetros de lane-changing..... | 93 |
| Tabela 15 – Blocos de parâmetros e suas estratégias de calibração..... | 95 |
| Tabela 16 – Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas e veículos-teste no sentido oeste-leste, dia 19/10..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 17 – Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas no sentido L-O, dia 19/10. | 97 |
| Tabela 18 – Velocidades desejadas coletas em campo..... | 98 |
| Tabela 19 – Resumo dos Fluxos de Saturação obtidos em campo para Av. Pontes Vieira.. | 100 |
| Tabela 20 – Velocidades Médias dos ônibus na Av. Pontes Vieira..... | 102 |
| Tabela 21 – Cenários de calibração do AG..... | 104 |
| Tabela 22 – Resultado das simulações com parâmetros default da Av. Santos Dumont..... | 105 |
| Tabela 23 – Resultados das simulações com parâmetros default da Av. Pontes Vieira..... | 106 |
| Tabela 24 – Parâmetros e operadores do AG utilizados..... | 107 |
| Tabela 25 – Resultados obtidos da calibração manual da Av. Santos Dumont..... | 108 |
| Tabela 26 – Melhores soluções encontradas pelo AG para a Av. Santos Dumont..... | 109 |
| Tabela 27 – Resultados da calibração dos parâmetros bx_add e bx_mult para a Av. Pontes Vieira..... | 110 |
| Tabela 28 – Resultados da calibração manual da Av. Pontes Vieira..... | 111 |
| Tabela 29 – Resultados da calibração com AG da Av. Pontes Vieira. | 112 |
| Tabela 30 – Resultados da Análise de sensibilidade do Min. Time Gap para Av. S. Dumont. | 114 |
| Tabela 31 – Resultados da Análise de sensibilidade do Min. Time Gap para Av. Pontes Vieira. | 115 |
| Tabela 32 – Resultados da Validação da Av. Santos Dumont (Trecho 1). | 116 |
| Tabela 33 – Resultados da Validação da Av. Pontes Vieira (Dia 26 de 8h às 9h). | 117 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------|--|
| AC | Áreas de Conflito (<i>Conflict Areas</i>) |
| AG | Algoritmo(s) Genético(s) |
| AM | <i>Advanced Merging</i> |
| CF | <i>car-following</i> |
| EM | Erro Médio |
| EMA | Erro Médio Absoluto |
| EMAN | Erro Médio Absoluto Normalizado |
| EMN | Erro Médio Normalizado |
| EP | Erro Percentual |
| EPAM | Erro Percentual Absoluto Médio |
| EQ | Erro Quadrático |
| FHWA | <i>Federal Highway Administration</i> |
| FS | Fluxo de Saturação |
| GA | <i>gap-acceptance</i> |
| HCM | <i>Highway Capacity Manual</i> |
| IC | <i>Intervalo de Confiança</i> |
| LAD | <i>Look ahead distance</i> |
| LBD | <i>look back distance</i> |
| LC | <i>lane-changing</i> |
| LM | <i>lateral movements</i> |
| <i>MaxLAD</i> | Maximum Look ahead distance |
| <i>MaxLBD</i> | <i>Maximum look back distance</i> |
| <i>MinLAD</i> | Minimum Look ahead distance |
| <i>MinLBD</i> | <i>Minimum look back distance</i> |
| <i>OV</i> | <i>Observed Vehicles</i> |
| REQM | Raiz Erro Quadrático Médio |
| REQMN | Raiz Erro Quadrático Médio Normalizado |
| RP | Regras de Prioridade (<i>Priority Rules</i>) |
| <i>TLA</i> | <i>Temporary Lack of Attention</i> |
| VM | <i>Velocidade Média</i> |
| W74 | Wiedemann-74 |
| W99 | Wiedemann-99 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Contextualização | 17 |
| 1.2 | Problemas de pesquisa | 18 |
| 1.3 | Objetivos | 19 |
| 1.4 | Estrutura da pesquisa | 20 |
| 2 | OS MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VISSIM | 22 |
| 2.1 | O algoritmo de car-following | 23 |
| 2.1.1 | <i>O Modelo de car-following de Wiedemann</i> | 24 |
| 2.1.2 | <i>Os algoritmos de car-following W74 e W99 do VISSIM</i> | 26 |
| 2.1.3 | <i>Demais parâmetros de following no VISSIM</i> | 30 |
| 2.2 | Demais modelos do VISSIM | 33 |
| 2.2.1 | <i>O Algoritmo de Lane-Changing (Mudança de Faixa)</i> | 34 |
| 2.2.2 | <i>Os Algoritmos de Lateral Movements (Movimentos Laterais) e Gap Acceptance (Aceitação de Brechas)</i> | 45 |
| 2.2.3 | <i>Modelagem do Transporte Público por Ônibus</i> | 46 |
| 3 | CALIBRAÇÃO DE MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO | 48 |
| 3.1 | Objeto de estudo e escolha dos modelos, algoritmos e parâmetros | 48 |
| 3.2 | Coleta de dados e medidas de desempenho | 54 |
| 3.2.1 | <i>Dados de Entrada</i> | 54 |
| 3.2.2 | <i>Medidas-alvo e Medidas de Desempenho</i> | 55 |
| 3.3 | Escolha das medidas de ajuste (goodness-of-fit) | 57 |
| 3.4 | Calibração automatizada: Algoritmos Genéticos | 58 |
| 3.4.1 | <i>Parâmetros dos Algoritmos Genéticos</i> | 60 |
| 3.5 | Validação dos modelos | 61 |
| 4 | METODOLOGIA PROPOSTA | 64 |
| 5 | ESTUDO DE CASO | 68 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Fase de pré-calibração..... | 68 |
| 5.1.1 | <i>Compreensão dos parâmetros.....</i> | 68 |
| 5.1.2 | <i>Definição da área de estudo.....</i> | 71 |
| 5.1.3 | <i>Coleta de dados para a Codificação.....</i> | 73 |
| 5.1.4 | <i>Análise do efeito dos parâmetros nas medidas de desempenho.....</i> | 76 |
| 5.1.5 | <i>Classificação dos parâmetros.....</i> | 91 |
| 5.1.6 | <i>Definição dos blocos de parâmetros.....</i> | 94 |
| 5.2 | Fase de calibração..... | 95 |
| 5.2.1 | <i>Coleta de dados para Calibração.....</i> | 95 |
| 5.2.2 | <i>Definição dos cenários de calibração.....</i> | 103 |
| 5.2.3 | <i>Simulação com parâmetros default.....</i> | 105 |
| 5.2.4 | <i>Configuração do AG.....</i> | 106 |
| 5.2.5 | <i>Calibração e Validação dos Modelos.....</i> | 108 |
| 5.2.6 | <i>Análise das estratégias de calibração.....</i> | 118 |
| 6 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 122 |
| 6.1 | Conclusões da pesquisa..... | 122 |
| 6.2 | Sugestões para trabalhos futuros..... | 125 |
| | REFERÊNCIAS | 127 |
| | APÊNDICE A: TABELAS COM DADOS DE DEMANDA DA AV. PONTES VIEIRA..... | 132 |
| | APÊNDICE B: TABELA COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS DEMAIS PARÂMETROS DE CAR-FOLLOWING PARA AV. PONTES VIEIRA..... | 150 |
| | APÊNDICE C: TABELAS COM VELOCIDADES MÉDIAS COLETADAS NO DIA 26/10 NA AV. PONTES VIEIRA..... | 151 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A procura por alternativas de solução para a baixa fluidez e segurança viária no tráfego urbano das grandes cidades vem se tornando cada vez mais uma preocupação da gestão pública, uma vez que o aumento dos congestionamentos e acidentes impactam direta ou indiretamente, na qualidade de vida e produtividade dos usuários. Os problemas de fluidez nas médias e grandes cidades vêm se acentuando ao longo dos anos, devido ao crescimento desenfreado do número de veículos, aliado a políticas de planejamento não tão eficientes, baseadas, na maioria das vezes na intuição. No Brasil, segundo CINTRA (2014), estima-se que os congestionamentos no trânsito causam perdas de R\$7,6 mil por ano em média para cada proprietário de carro na cidade de São Paulo, dos quais R\$6,1 mil correspondem somente à perda de tempo do condutor.

As possibilidades de solução são diversas, envolvendo os mais diferentes níveis de investimento, partindo desde alterações de circulação na oferta viária existente à construção de viadutos ou túneis. No Brasil, as grandes cidades têm investido cada vez mais no uso de outros modos de transporte, como a bicicleta, e na priorização do transporte público, através de corredores exclusivos, por exemplo. Essas medidas costumam ser onerosas para o poder público e impactam a qualidade de vida da população de uma forma geral. Portanto, a estimativa adequada dos custos e dos benefícios esperados com as intervenções tornam-se os principais desafios na análise de soluções para os congestionamentos urbanos.

O uso de microssimuladores de tráfego vem sendo uma poderosa ferramenta para a análise de alternativas, fornecendo embasamento necessário para a tomada de decisão no planejamento do sistema de transportes, nos níveis estratégico, tático e operacional. Os modelos computacionais de simulação de tráfego estão sendo cada vez mais empregados, permitindo a análise de sistemas de grande complexidade, além de estarem entre as melhores alternativas para os engenheiros de tráfego, tendo em vista que esta permite avaliar diversos problemas e aplicar em casos reais.

Contudo, é sabido que a eficácia e eficiência de um simulador fundamentam-se na sua capacidade de replicar com precisão as condições existentes, o que requer uma calibração adequada dos parâmetros comportamentais, haja vista que os simuladores de tráfego por *default* retratam uma realidade muito provavelmente distinta da que se deseja modelar. A calibração é um processo em que ajustam-se os parâmetros do modelo de simulação, até que os resultados produzidos pelo simulador repliquem satisfatoriamente os dados obtidos em campo. O número

elevado e a complexidade de tais parâmetros fazem com que existam diversas lacunas de conhecimento sobre o processo de calibração de microssimuladores de tráfego, o que compromete a capacidade de previsibilidade das alternativas de solução simuladas.

Desde o surgimento das primeiras plataformas de microssimulação, a complexidade dos modelos utilizados aliado aos diferentes objetos de estudo, fizeram com que uma gama de métodos de calibração fossem desenvolvidos, desde métodos de calibração visual ou manual através de tentativa e erro, até métodos de calibração automatizada com inteligência artificial. Sendo esse objeto de estudo o tráfego urbano, a modelagem torna-se ainda mais complexa devido ao próprio fenômeno analisado.

Embora as ferramentas disponíveis atualmente possibilitem calibrações cada vez mais refinadas, não tem se observado, principalmente em âmbito nacional, uma metodologia de calibração satisfatória que possibilite aliar os diversos métodos de otimização, sejam eles algoritmos genéticos ou redes neurais, por exemplo, ao conhecimento e experiência do analista no que se refere o fenômeno de tráfego urbano. Na maioria das vezes, utiliza-se uma ferramenta computacional para otimizar uma dezena de parâmetros que impactam uma medida de desempenho de interesse, julgando-se o modelo calibrado quando se encontra um erro aceitável, entrando o conhecimento do analista sobre o tráfego apenas na definição dos limites dos intervalos de busca dos valores dos parâmetros.

Esta lacuna pode ser percebida mesmo considerando a calibração de apenas um dos submodelos comportamentais microscópicos, com o de *car-following*, que dita os movimentos longitudinais dos veículos, no qual diversos autores utilizam métodos de calibração automatizados discriminadamente, desconsiderando aspectos importantes como a dependência entre os parâmetros, a relação com as medidas de desempenho e a análise isolada de um determinado parâmetro.

1.2 Problemas de pesquisa

O microssimulador de tráfego alemão VISSIM, versão 8.0 (PTV, 2016) apresenta cinco modelos comportamentais principais: *car-following*, que modela os espaçamentos longitudinais dos veículos; *lane-changing* e *lateral movements*, que modelam as mudanças de faixa e os movimentos laterais dentro de uma faixa de tráfego, respectivamente; *gap acceptance*, que diz respeito às aceitações de brechas e o modelo de escolha de rotas. Dentre os modelos comportamentais, o de *car-following* é o que tem atraído a maior atenção de pesquisadores e analistas, por este ser o modelo que representa os movimentos longitudinais da

corrente de tráfego, exercendo assim forte influência na capacidade e em medidas de desempenho como densidade e velocidade média.

Devido ao grau de refinamento desses modelos, o processo de calibração é bastante complexo, principalmente quando o objeto de estudo é o meio urbano. Diante deste contexto, um dos principais problemas identificados no estado da arte e que será abordado nessa pesquisa é a ausência de um método de calibração satisfatório para medidas de desempenho do tráfego como velocidade média, fazendo com que analistas e pesquisadores limitem-se à calibração feita exclusivamente por métodos de otimização automatizados.

Dessa forma, com enfoque nos modelos comportamentais do VISSIM voltados à modelagem do tráfego em vias arteriais urbanas, surgem algumas questões que motivaram esta pesquisa de Mestrado.

- A utilização do modelo de *car-following* Wiedemann-99, de maior complexidade, em vez do Wiedemann-74, traz benefícios à estimativa da velocidade média?
- Quais parâmetros comportamentais exercem influência relevante no comportamento de *following*?
- Quais parâmetros comportamentais exercem impacto significativo na velocidade média?
- Quais as melhores estratégias de calibração dos parâmetros comportamentais para se modelar velocidade média?
- Quais os efeitos ocasionados por um método de calibração exclusivamente automatizado e simultâneo em comparação com um método de calibração manual e sequencial?

1.3 Objetivos

Diante do exposto, o objetivo principal desta pesquisa de mestrado é propor uma metodologia de calibração dos modelos comportamentais do VISSIM para vias arteriais urbanas, tendo como foco a medida de desempenho velocidade média. Para que esse objetivo seja alcançado, surgem, então, cinco objetivos específicos, descritos a seguir.

O primeiro objetivo específico é avaliar a contribuição trazida pela utilização do modelo de *car-following* W99, mais complexo, em vez do W74, para estimativa de velocidade média em corredores arteriais urbanos. O segundo objetivo específico é compreender o efeito

e as interações dos parâmetros dos quatro modelos comportamentais do VISSIM que impactam no movimento longitudinal dos veículos.

O terceiro objetivo específico é classificar os parâmetros analisados de forma a identificar quais exercem impacto significativo na medida de desempenho velocidade média e, dessa forma, devem compor os blocos de parâmetros a serem calibrados. Uma vez identificados os blocos, o quarto objetivo específico é definir uma estratégia de calibração para a rede de simulação.

Por fim, o quinto objetivo específico consiste em calibrar e validar uma rede piloto como estudo de caso de um corredor arterial reticulado, de forma a avaliar a metodologia de calibração proposta e comparar com um método de calibração completamente automatizado e simultâneo, ou seja, com todos os parâmetros calibrados ao mesmo tempo.

1.4 Estrutura da pesquisa

Esta dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos. Neste primeiro foi realizada uma contextualização da problemática que motivou o estudo, seguido do levantamento dos principais problemas de pesquisa e dos objetivos principal e específicos. Os capítulos 2 e 3 são capítulos de revisão bibliográfica, sendo o capítulo 2 focado nos modelos comportamentais do VISSIM. Nesse capítulo, cada um dos modelos comportamentais é abordado primeiramente com um breve histórico e conceito sobre seu uso no estado da arte, seguido de um detalhamento de como cada modelo opera no simulador, quais os conceitos de cada um e as possíveis interferências nos modelos de *car-following* e movimentos longitudinais dos veículos, além de uma abordagem das lacunas de conhecimento dentro de cada um dos modelos. Além dos modelos comportamentais, esse capítulo apresenta uma abordagem sobre a modelagem do transporte público no VISSIM.

O capítulo 3, também de revisão, discute o processo de calibração de microssimuladores de tráfego. Nesse capítulo será abordado alguns métodos de calibração, que podem divergir quanto ao objeto de estudo, escolha dos modelos e parâmetros, coleta de dados, medidas de desempenho e medidas de ajustes, dentro outros aspectos. Ainda nesse capítulo, será detalhado a calibração automatizada por Algoritmo Genético (AG), finalizando com uma explanação sobre o processo de validação de microssimuladores. Este capítulo tem um caráter crítico, além de expositivo e explicativo, na medida em que compara diferentes estudos de calibração do VISSIM para vias urbanas.

O Capítulo 4 apresenta os detalhes da metodologia de calibração adotada neste trabalho. O Capítulo 5 apresenta a aplicação da metodologia de calibração para a modelagem da velocidade média em duas vias arteriais de Fortaleza, metodologia esta que será comparada com um processo de calibração com busca automatizada por AG. Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da pesquisa.

O último capítulo apresenta as conclusões e considerações finais a respeito dos resultados e da pesquisa de uma forma geral. Nesse capítulo também serão levantadas as limitações da pesquisa de forma a subsidiar a proposição de trabalhos futuros, que também encontra-se nesta seção.

2 OS MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VISSIM

O grande desafio dos técnicos ao se utilizarem de ferramentas de simulação de tráfego é prever, com um certo grau de confiabilidade, os benefícios de um determinado cenário. Diversos métodos e diversos microssimuladores têm sido utilizados para tentar aferir a nova capacidade de uma via, a velocidade média de um corredor, o impacto de um corredor exclusivo para ônibus, a redução nos tamanhos de fila de uma determinada interseção ou ainda a redução da emissão de poluentes dado um determinado cenário. Todos esses são exemplos de soluções aplicadas às grandes cidades para mitigar os problemas dos grandes congestionamentos.

Os microssimuladores de tráfego têm sido bastante utilizados e diferem principalmente com relação aos seus modelos comportamentais. Alguns exemplos de microssimuladores existentes no mercado são o AIMSUM, baseado nos modelos de Gipps (1981 e 1986); o CORSIM, desenvolvido pela FHWA (*Federal Highway Administration*) e tendo seus modelos baseados nos modelos de Pitt (HALATI *et al.*, 1997); e vários outros como TransModeler, PARAMICS, DRACULA e o VISSIM, o microssimulador utilizado nesta pesquisa.

O VISSIM é um modelo de simulação microscópico desenvolvido para modelar microscopicamente o comportamento do tráfego veicular, operações de transporte público e fluxo de pedestres e ciclistas. O nome VISSIM é uma sigla do termo alemão *Verkehr In Städten SIMulation* que significa *Simulação do tráfego em cidades* (PTV, 2010).

O VISSIM utiliza como algoritmos de representação de tráfego os modelos propostos por WIEDEMANN (1974) e WIEDEMANN (1991), combinando os modelos de percepção de motoristas com modelos de desempenho de tráfego. Basicamente, o microssimulador contempla os modelos comportamentais de seguimento veicular (*car-following*), que apresenta características psicofísicas, além dos modelos de mudança de faixa (*lane-changing*) e movimentos laterais (*lateral movements*), escolhas de rota e aceitação de brechas (*gap acceptance*). Todos esses submodelos exercem influência entre si, podendo citar como exemplo o espaçamento mínimo para o veículo líder necessário para realizar a mudança de faixa, que é influenciado pela distância mínima definida pelo modelo de *car-following*. Algumas dessas influências foram abordadas por KIM E MAHMASSAMI (2011), porém, pouca atenção tem sido dada na literatura para avaliar e compreender a forma que estes modelos interferem entre si.

De acordo com OLIVEIRA e CYBIS (2008), o *software* VISSIM apresenta vantagens em comparação a outros devido a (i) facilidade de elaboração das redes modeladas e (ii) flexibilidade de implementação do comportamento do tráfego (*following* e mudança de faixa) relacionado a cada *link*, e ainda, segundo MEDEIROS (2012), (iii) facilidade e praticidade nos relatórios e dados de saída.

O VISSIM atualmente encontra-se na versão 9.0 do *software*. Todos os estudos elaborados nesta pesquisa de mestrado foram feitos na versão 8.0. De acordo com os manuais do *software*, nenhuma mudança foi feita nos modelos comportamentais ao longo das versões, sendo modificadas apenas aspectos usuais como interface do programa, métodos de coleta de *outputs*, ferramentas de codificação da rede, dentre outros aspectos.

Neste capítulo são abordados os quatro modelos comportamentais do VISSIM, excetuando-se apenas o modelo de escolha de rota. Dessa forma, este capítulo apresenta uma breve contextualização do algoritmo de *car-following* de uma forma geral, seguido pela modelagem deste algoritmo dentro do VISSIM. Da mesma forma, o algoritmo de *lane-changing* é abordado neste capítulo, iniciando-se com uma contextualização breve e partindo para a funcionalidade destes modelos no VISSIM, finalizando com os modelos de *lateral movements* e *gap-acceptance*.

2.1 O algoritmo de *car-following*

Considerando dois veículos trafegando em uma via de sentido único, um seguindo o outro, o movimento do veículo líder é ditado, dentre vários princípios, pelas características do veículo, pelas características do próprio condutor e pelo ambiente de condução (características da via, condições climáticas, etc). O veículo seguidor deve ter o cuidado de não colidir com o veículo da frente e essa interação entre os dois é baseado numa diferença de espaço, velocidade e aceleração.

Uma vez que a velocidade desejada de condução do veículo seguidor é maior que a velocidade de condução do veículo líder, o veículo seguidor entrará num processo de *following*, onde sua posição, velocidade e aceleração são afetadas pelo veículo líder. Isso implicará em reações do veículo seguidor aos estímulos do veículo líder, o que varia de condutor para condutor, e podem ser mais sensíveis à medida que a velocidade cresce. O comportamento de *following* depende do comportamento do condutor e das características do veículo. Quanto mais agressivo for o motorista, maior será a sua velocidade desejada e, conseqüentemente, menor será sua distância de *following* do veículo líder.

Os modelos de *car-following* foram inicialmente desenvolvidos nos anos de 1950, quando o tráfego foi crescendo e as pesquisas se desenvolviam para entender os fatores que afetam a capacidade de vias. Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos para replicar os *headways* de tempo e espaço no processo de *following*. Esses modelos geralmente descrevem a trajetória do veículo seguidor como uma função da trajetória do veículo líder e as brechas de tempo e espaço entre estes (ELEFTERIADOU, 2014).

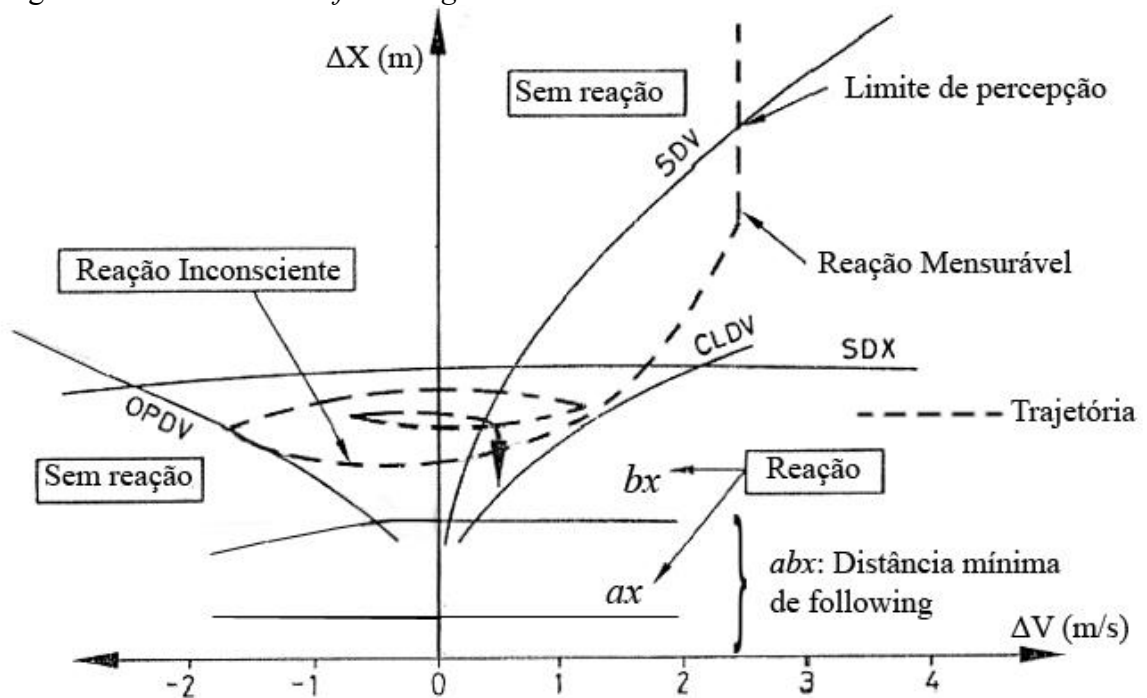
Um dos primeiros modelos existentes de *car-following* foi o modelo de PIPES (1953), que examinou matematicamente a dinâmica de uma linha de tráfego composta por n veículos. Seu modelo assumia que a distância entre o veículo líder e o veículo seguidor é igual ao comprimento de um veículo para cada 10 milhas por hora de velocidade, mais a distância mínima entre os veículos quando parados. Outros modelos foram desenvolvidos por GAZIS *et al* (1961) e outros, que ficaram conhecidos como os modelos GHR ou Modelos GM, pois foram desenvolvidos e testados nos laboratórios da *General Motors*. Os modelos GHR consideraram a sensibilidade do veículo seguidor aos estímulos do veículo líder.

Um dos primeiros modelos de *car-following* que foram desenvolvidos e implementados num ambiente de microssimulação foi o modelo de PITT (HALATI *et al.*, 1997), desenvolvido pela Universidade de Petersburgo. O modelo foi inicialmente implementado no INTRAS, um microssimulador desenvolvido em 1970 pela *Federal Highway Administration* (FHWA). Em sequência surgiram os microssimuladores FRESIM e CORSIM.

Atualmente, um dos modelos mais utilizados é o modelo de GIPPS (1981), desenvolvido na Austrália e comumente usado no microssimulador AIMSUM. Além deste, o modelo MITSIM também é bastante usual, o qual aprimorou os modelos GHR. Os modelos utilizados pelo VISSIM são baseados no modelo de Wiedemann, que foi desenvolvido em 1974. Os itens a seguir tratam em detalhe o modelo psicofísico de Wiedemann e como o VISSIM os incorpora.

2.1.1 O Modelo de *car-following* de Wiedemann

O modelo proposto por WIEDEMANN (1974) é um modelo do tipo psicofísico, em que o motorista seguidor responde aos estímulos do veículo líder com base na aparência da variação das dimensões do veículo líder. O modelo pode ser melhor compreendido por meio da Figura 1. O eixo das abscissas representa a diferença de velocidade ΔV entre os veículos seguidor e líder, e o eixo das ordenadas representa a distância entre eles (ΔX).

Figura 1 – Modelo de *car-following* de Wiedemann

Fonte: Adaptada de WIEDEMANN E REITER (1992).

Considere o veículo líder trafegando com velocidade constante ($V_{líder}$). O veículo seguidor se aproxima com velocidade aproximadamente constante ($V_{seguidor}$), o que significa que o ΔX vai diminuindo e o ΔV permanece aproximadamente constante. Ao cruzar o limite SDV , o veículo seguidor começa a diminuir sua velocidade levemente, portanto ΔX continua diminuindo, mas de forma menos acentuada. O limite SDV – assim como os limites do modelo – impõem aos motoristas alguma ação de aceleração ou desaceleração, portanto são comumente chamados de pontos de ação (*action points*). O veículo seguidor continua diminuindo sua velocidade até que $V_{seguidor}$ fique menor que $V_{líder}$. Ao perceber que o espaçamento para o veículo da frente começa a aumentar, o veículo seguidor retorna a acelerar próximo ao ponto de ação $OPDV$. A partir deste ponto, o módulo de ΔV começa a diminuir, mas o ΔX ainda aumenta, pois $V_{seguidor}$ ainda é menor que $V_{líder}$. Quando $V_{seguidor}$ passa a ser maior do que $V_{líder}$, ou seja, quando ΔV se torna positivo novamente, ΔX recomeça a diminuir, e o motorista continua a acelerar até chegar no ponto de ação $CLDV$, quando ele então retira o pé do acelerador. A partir deste ponto, o veículo seguidor ainda se aproxima do veículo líder (ΔX diminui), pois o ΔV ainda é positivo. Em seguida, o espaçamento começa a aumentar novamente quando ΔV se torna negativo, e o motorista reagirá no ponto de ação $OPDV$ novamente. Este comportamento oscilatório se repete, caracterizando o regime de *following*.

O *headway* no estado de *following* varia entre o limite inferior $ax+bx$ (chamado de abx) e o limite superior SDX . O parâmetro ax significa o *headway* médio entre os veículos quando parados, e é dada pela Equação 1.

$$ax = L + ax_{add} + rndl(I).ax_{mult} \quad (1)$$

Na Equação 1, ax significa a distância média entre as frentes dos veículos (*headways* de espaço) quando parados em fila, dado em metros (m); L representa o comprimento do veículo em metros (m); ax_{add} equivale ao fator aditivo de ax , dado em metros (m); ax_{mult} é o fator multiplicativo de ax , também dado em metros (m) e; $rndl[I]$ representa uma variável aleatória $N(0,5;0,15)$, truncada entre 0 e 1.

O parâmetro bx , é a distância adicional deixada pelo veículo seguidor pelo fato deste estar em movimento, já que os *headways* aumentam com o aumento da velocidade. O bx é dado pela seguinte Equação 2.

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} \cdot rndl(I)) * \sqrt{v} \quad (2)$$

Segundo a Equação 2, bx representa a distância de segurança, em metros (m); bx_{add} equivale ao fator aditivo de bx ; bx_{mult} é o fator multiplicativo de bx ; v é a velocidade do líder enquanto houver aproximação dos veículos, e do veículo seguidor enquanto houver distanciamento, dada em metro por segundo (m/s).

Portanto, o modelo de Wiedemann considera que o *headway* mínimo de *following* ($abx = ax + bx$) aumenta com a raiz quadrada da velocidade. Valores altos de ax implicam em filas maiores. Valores altos de ax e bx implicam em distâncias mínimas de *following* maiores, portanto implicam em redução da capacidade viária.

2.1.2 Os algoritmos de car-following W74 e W99 do VISSIM

O VISSIM permite ao usuário escolher entre dois modelos de *car-following*: o modelo Wiedemann-74 (W74) e o modelo Wiedemann-99 (W99). Ambos são baseados no trabalho de WIEDEMANN (1974). O manual indica que o W74 seja utilizado para o tráfego urbano e que o W99 seja empregado na modelagem do tráfego rodoviário, porém o documento não traz justificativa para tal recomendação.

O parâmetro ax do modelo W74 tem basicamente o mesmo significado do ax de Wiedemann, porém eles se diferem em dois pontos. O primeiro é que o ax do simulador

representa o espaçamento entre os veículos parados, e não o *headway*. A segunda diferença é que, apesar de não deixar explícito, o VISSIM adota o ax_{mult} igual a 1,0 m, constante e não passível de ser modificado pelo usuário, fazendo com que este nem seja sequer um parâmetro do *software*. O valor *default* de ax é 2,0 m com uma variação segundo uma distribuição Normal com desvio padrão 0,3 m, truncada entre os valores 1,0 m e 3,0 m (Equação 3), portanto a mesma variação adotada por WIEDEMANN (1974). Esta variação diz respeito à geração dos valores de ax para os veículos da rede, e não a uma variação para o mesmo veículo. Ou seja, uma vez um veículo é gerado, seu valor de ax permanece constante durante a simulação.

A distância mínima de *following* (d) é dada pela soma de $ax + bx$, sendo bx do W74 idêntico ao bx proposto por Wiedemann (Eq. 4). O valor *default* de bx_{add} é de 2,0 m e de bx_{mult} é de 3,0. Como d representa o espaçamento entre os veículos no VISSIM e abx representa o *headway* dos veículos no trabalho de Wiedemann, tem-se que $abx = d - L$.

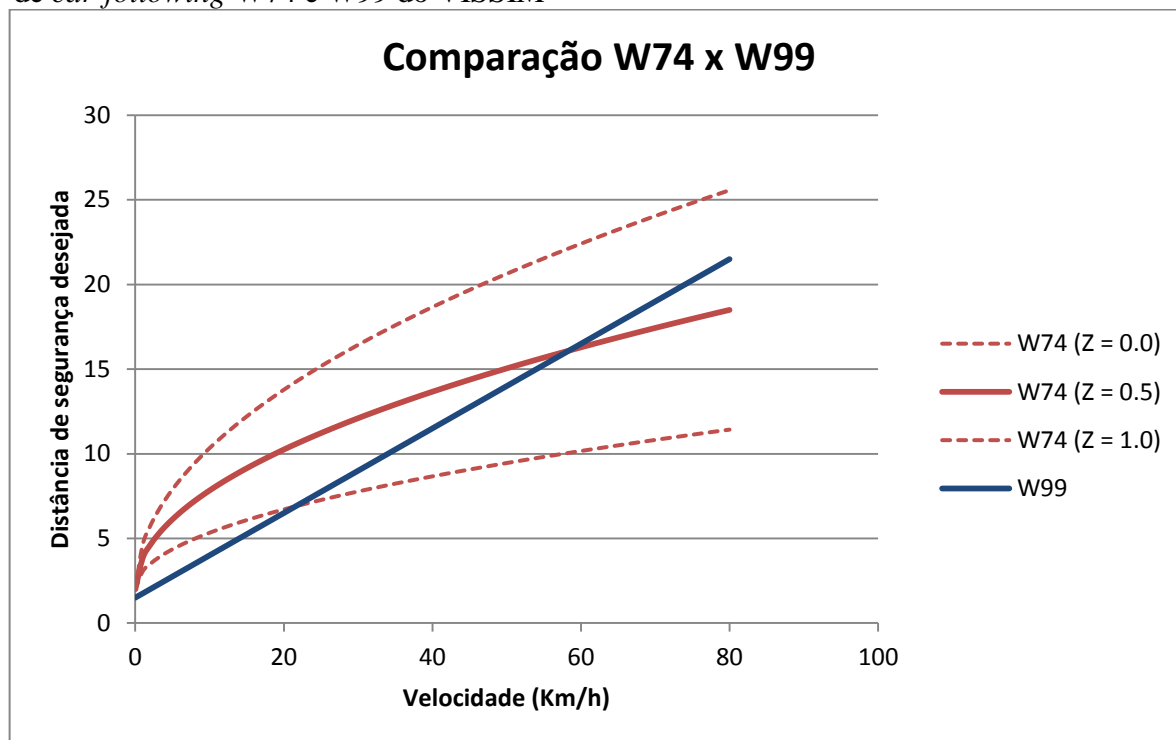
$$ax = 2,0 \text{ m}; \sigma = 0,3 \text{ m} \quad (3)$$

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} * z) * \sqrt{v} \quad (4)$$

$$d = CC0 + CC1 * v \quad (5)$$

O W99 descreve d por meio de apenas dois parâmetros: $CC0$, que tem o mesmo significado de ax do W74, ou seja, a distância média entre veículos quando parados em fila, e $CC1$, que similarmente ao bx do W74, define o incremento da distância mínima de *following* devido aos veículos estarem em movimento (Equação 5). Uma das principais diferenças entre os modelos W74 e W99 diz respeito à variação da distância mínima de *following* (d) como função da velocidade (v): enquanto no modelo W74 a variação é parabólica, no W99 ela é linear, como mostra o gráfico da Figura 2, que foi elaborada com os parâmetros dos modelos em valores *default*, em função de diferentes velocidades. É importante perceber que o W74 implica em espaçamentos maiores para velocidades menores, o que é mais adequado para representar o tráfego urbano, já que nesta configuração espaçamentos maiores permitem mais aceitações de brechas. Já para o tráfego em rodovias, estudos corroboram com a relação linear entre *headway* e velocidade (MA e AHN, 2008), confirmando a adequação do modelo W99 para o tráfego ininterrupto. Vale notar que Wiedemann propôs a relação quadrática entre bx e v , e justificou afirmando que para velocidades maiores os motoristas tendem a subestimar a distância de segurança, portanto, a taxa de crescimento de d diminui com o aumento de v (WIEDEMANN, 1974).

Figura 2 – Relação entre distância mínima de *following* (d) e velocidade (v) para algoritmos de *car-following* W74 e W99 do VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outra diferença fundamental entre o W74 e o W99 do VISSIM é que o primeiro não permite o usuário definir valores para as demais variáveis do modelo de *car-following* de Wiedemann – *SDV*, *SDX*, *CLDV* e *OPDV*; tais parâmetros estão embutidos no algoritmo do W74 com valores iguais aos valores *default* do W99. Os usuários que precisam definir tais parâmetros devem utilizar o modelo W99, cujos parâmetros podem ser relacionados com os parâmetros originais de Wiedemann como descritos a seguir.

O parâmetro CC2 determina a grandeza *SDX* do modelo de Wiedemann, ou seja, ele delimita o espaçamento máximo dos veículos em *following*. Assim, motoristas mais agressivos possuem CC2 menores. O valor *default* é 4,0 m, o que segundo o manual do *software* resulta num processo de *following* bem estável (PTV, 2014). FELLENDORF E VORTISCH (2010) afirmam que *SDX* (CC2) é geralmente 1,5 a 2,5 vezes o tamanho de *abx* (d). Com os parâmetros CC0, CC1 e CC2 em valores *default*, e com velocidade de 50 km/h, o espaçamento entre os veículos no processo de *following* varia entre 14,0 m e 18,0 m.

O parâmetro CC3 refere-se ao parâmetro *SDV* de Wiedemann. Ele representa o momento em que o veículo começa a desacelerar devido à presença de um veículo a sua frente, iniciando a partir deste momento o processo de aproximação. Portanto, quanto menor o valor de CC3, mais tarde ele começará a diminuir a sua velocidade durante a aproximação. O valor

default é de -8,0 s, ou seja, o veículo incitará a desacelerar quando estiver a 8,0 s de atingir a distância de segurança.

Os parâmetros CC4 e CC5, adimensionais, definem os limites das diferenças de velocidades ente os veículos que determinam os momentos de retomada da aceleração e desaceleração do veículo seguidor no regime de *following*. Portanto, estão relacionados com as curvas *OPDV* e *CLDV* de Wiedemann. O manual sugere que os parâmetros tenham a mesma magnitude e sinais opostos, o que presume uma simetria no comportamento oscilatório de aceleração e desaceleração durante o regime de *following*. Os valores *default* destes dois parâmetros são -0,35 e +0,35, para CC4 e CC5, respectivamente. Quanto menor for o valor (em módulo) dos parâmetros, mais rápido responderá o motorista à variação de velocidade do veículo líder, ou seja, mais agressivo.

O parâmetro CC6 controla o efeito da distância de *following* na oscilação da velocidade do veículo seguidor. Quanto maior o valor de CC6, maior será o aumento da oscilação da velocidade com o aumento da distância de *following*. Seu valor *default* é 11,44 m/s². O valor 0 (zero) para este parâmetro resulta na oscilação da velocidade independente da distância de *following*, o que não é muito realista, já que veículos mais próximos tendem a variar menos a sua velocidade devido à atenção dada pelo seguidor aos estímulos do veículo líder e à maior dependência entre as velocidades dos veículos seguidor e líder (LOWNES E MACHEMEHL, 2006).

O manual do VISSIM versão 6.0 descreve o parâmetro CC7 apenas como a oscilação durante a aceleração. O manual da versão 5.4 é mais preciso, pois afirma que o parâmetro é a aceleração do veículo no regime de *following*, e tem como valor *default* 0,25 m/s². Um valor alto de CC7 indica unidades veículos-motoristas que apresentam taxas de aceleração e desaceleração maiores, sendo mais agressivos, portanto.

O parâmetro CC8 representa a aceleração desejada do veículo quanto ele parte do repouso e tem com valor *default* 3,5 m/s². Este parâmetro tem como limite a aceleração máxima definida pelas curvas de aceleração. O parâmetro CC9 é o valor da aceleração quando o veículo trafega a 80 km/h e também tem seu valor limitado pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração. Motoristas agressivos possuem CC8 e CC9 elevados.

O modelo de W99 computa a velocidade do veículo como o mínimo entre duas velocidades: uma baseada nas restrições de aceleração do veículo (parâmetros CC8 e CC9) e outra baseada no modelo de *car-following* para modo estacionário ($\Delta v \approx 0$). Sendo assim, de acordo com RAKHA E GAO (2008), o modelo é formulado de acordo com a Equação 6.

$$u_n(t + \Delta t) = \min \left\{ \begin{array}{l} u_n(t) + 3,6 \cdot \left(CC8 + \frac{CC8 - CC9}{80} \cdot u_n(t) \right) \Delta t \\ 3,6 \cdot \frac{s_n(t) - CC0 - L_{n-1}}{u_n(t)} \end{array} \right. , u_f \quad (6)$$

2.1.3 Demais parâmetros de following no VISSIM

Além dos modelos de Wiedemann W74 e W99, o VISSIM traz outros nove parâmetros no seu algoritmo de *car-following*, os quais podem ser alterados independente do modelo de Wiedemann escolhido.

Os três primeiros parâmetros referem-se ao *look ahead distance (LAD)*, os quais permitem ao usuário informar a mínima e máxima distância que o condutor pode observar à frente, ou ao seu lado, e o número de veículos, para reagir a um determinado evento. O primeiro parâmetro, *minimum LAD (MinLAD)*, que por *default* é 0 (zero) metros, define a distância mínima que o condutor poderá observar à sua frente. O segundo parâmetro é o *maximum LAD (MaxLAD)*, o qual determina a distância máxima que o condutor pode ver a frente. O valor *default* deste parâmetro é 250 m, e, de acordo com o manual do *software*, pode ser estendido para a modelagem do tráfego rodoviário, por exemplo, já que este modo de transporte possui veículos com grandes dimensões.

O terceiro parâmetro é o *observed vehicles (OV)*, que define quantos veículos à frente o condutor irá considerar de modo a reagir a algum estímulo. Estes estímulos podem estar relacionados a reações a diversos objetos como áreas de velocidade reduzida, semáforos, regras de prioridade, áreas de conflito ou quaisquer outros obstáculos. O valor *default* do número de veículos observados é 4 (quatro) e, segundo MILLER (2009), o valor deste parâmetro deve ser de pelo menos 2 (dois) senão, em determinadas circunstâncias, os motoristas podem não olhar à frente o suficiente para reagir aos objetos da rede. Se existirem muitos desses objetos em um curto espaço, aumentar o número de veículos observados pode ser uma boa estratégia (isso aumentará o tempo de simulação), já que os condutores irão considerar mais veículos à sua frente, tornando-se mais "atenciosos" a reações à jusante.

Existem algumas lacunas do conhecimento com relação aos efeitos dos parâmetros do *LAD*. A primeira delas é qual parâmetro é dominante, o *MaxLAD* ou o *OV*? Ou seja, caso o número de veículos observados seja 4, e o quarto veículo esteja a uma distância além do *MaxLAD*, o condutor irá considerá-lo? Caso o valor do *MinLAD* seja maior que zero, por exemplo, 30 m, o condutor irá desconsiderar tudo que está a menos de 30 m? Esses questionamentos foram explorados e serão apresentados ao longo desta pesquisa. GAO (2008)

testou diversos valores de *MaxLAD* e chegou à conclusão que um *MaxLAD* com valor de 50 m não permite o tempo necessário para o condutor parar num semáforo, por exemplo. Com o valor de 90 m, o condutor tinha apenas uma curta distância para parar, sendo necessário aplicar uma alta desaceleração, da ordem de 6 m/s². Com o aumento do valor deste parâmetro, os veículos foram capazes de parar utilizando valores de desaceleração mais leves e aceitáveis.

Existem dois parâmetros que definem a distância que um condutor pode observar à montante, de forma a reagir a um evento como mudança de faixa ou inserção em uma determinada via. O primeiro deles é o *minimum look back distance (MinLBD)*, que possui valor *default* de 0 (zero) metros, e tem importância quando se deseja modelar comportamentos laterais de veículos numa mesma faixa, fazendo com que o condutor possa observar, olhando para trás, um outro veículo imediatamente ao seu lado. O segundo parâmetro, *maximum look back distance, (MaxLBD)* define a distância máxima que o condutor pode observar e considerar à montante. Ambos os parâmetros são importantes para a percepção do condutor dos veículos que se aproximam. Sendo assim, valores baixos de *MaxLBD* podem resultar em situações em que o condutor não perceba o veículo atrás.

LOWNES e MACHEMEHL (2006) e GOMES *et al* (2004) definem o *look back distance (LBD)* como a distância à montante de uma rampa ou de uma secção de estrada, que um condutor começa a posicionar para iniciar manobras, ou, mais especificamente, como a distância a montante que um veículo começa a tentar mudar de faixa. O conceito dado por esses autores confunde-se bastante com o conceito do parâmetro *lane change distance*, parâmetro do algoritmo de *lane-changing* que define a distância na qual o veículo inicia a tentativa de mudança de faixa. O manual do *software* distingue bem estes dois parâmetros, porém, não traz detalhes de como o *LBD* afeta o comportamento do usuário, mesmo indicando que o parâmetro é mais importante na modelagem de veículos conduzindo na mesma faixa (*lateral behavior*).

De fato, o *LBD* estará relacionado principalmente à capacidade de mudança de faixa do veículo. O manual do *software* sugere que o usuário pode diminuir o valor máximo deste parâmetro, que por *default* é 150 m, caso a rede trate-se de uma malha urbana, com diversos conectores e distâncias curtas entre os *links*. Isso pode afetar positivamente a velocidade de simulação.

Outros dois parâmetros que podem ser alterados pelo usuário estão relacionados ao *Temporary Lack of Attention (TLA)*, que pode ser descrito como o período de tempo em que o condutor não reage ao estímulo do veículo à sua frente devido à falta de atenção, excetuando-se em casos de frenagem de emergência. Os parâmetros simulam o efeito de variáveis exógenas ao fenômeno de tráfego como uso de telefones celulares e de equipamentos de som. Segundo

desenvolvedores do *software*, estes parâmetros foram introduzidos para evitar altas capacidades irrealistas com *headways* de *following* baixos, ou seja, para permitir a representação de desatenções espontâneas que podem ser vistas na realidade atual do tráfego nas cidades.

No primeiro parâmetro, o usuário pode definir a duração da falta de atenção, que por *default* é zero segundos, e no segundo parâmetro define-se a frequência com que esta ocorre, que por *default* é 0,0%. O aumento desses dois parâmetros (duração e frequência) diminui a capacidade do *link*, visto que estes parâmetros retardam a partida dos condutores. Contudo, não foi encontrada na literatura como realmente esses parâmetros atuam, se existe alguma relação com o tempo de reação do condutor e se a frequência de ocorrência da falta de atenção é dada para os condutores ou para os eventos, ou seja, caso o valor estipulado seja de 2%, isto afetará 2% dos condutores da rede ou 2% das estimativas de aceleração e desaceleração feitas pelo programa a cada passo da simulação? Esses questionamentos também serão abordados na pesquisa.

Além dos parâmetros acima descritos, outros dois podem ser ativados ou desativados pelo usuário e foram adicionados ao VISSIM somente nas versões mais recentes. O primeiro deles é o *smooth closeup behavior*, o qual determina o quanto suavemente o veículo desacelera ao se aproximar de um obstáculo (AGHABAYK *et al*, 2013). Se habilitado, os veículos, ao perceberem algum obstáculo ou necessitarem de alguma reação, irão desacelerar uniformemente até se aproximarem do obstáculo, iniciando a desaceleração desde o valor máximo do *LAD* (por *default* 250 m) até o obstáculo. Este comportamento gera uma desaceleração mais suave, pois se inicia a uma distância considerável.

Se desabilitado (*default*), o veículo seguidor assume um comportamento normal de *following*, independente da presença de um obstáculo, até a velocidade do veículo líder cair para menos de 1 m/s e venha a se tornar uma "impedância" para o seu trajeto. Assim, o veículo seguidor irá desacelerar mais bruscamente, já que dependerá da reação do veículo da sua frente e não da presença do obstáculo. O manual do *software* não estabelece a relação deste parâmetro com os perfis de aceleração. Há ainda uma hipótese de que, se desabilitado, este parâmetro pode aumentar a capacidade da via, já que as frenagens serão mais bruscas, frente à presença de obstáculos. Esses questionamentos serão avaliados nesta pesquisa.

Por fim, o parâmetro *standstill distance for static obstacles* determina a distância que o veículo, quando parado, mantém dos obstáculos estáticos, como marcadores de sinais de 'Pare', regras de prioridade ou áreas de conflito. Se desabilitado (*default*), os veículos utilizam um valor aleatório que segue uma distribuição Normal, com média de 0,5 m e variância de 0,15 m². Se habilitado, os veículos utilizam um valor determinado pelo usuário, que por *default* é 0,5

m. Segundo o manual, ativar este parâmetro pode ser útil para veículos de transporte público pararem em posições fixas de acordo com as filas nas plataformas dos pontos de parada. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros de car-following, com os valores *default*.

Tabela 1 – Parâmetros de *car-following*, com valores *default*

| Parâmetros | Definição | Valor <i>Default</i> | |
|------------------------------|---|--|--------------------------|
| Parâmetros de 'Following' | <i>Min. Look Ahead Distance (MinLAD)</i> | 0,00 m | |
| | <i>Max. Look Ahead Distance (MinLAD)</i> | 250,00 m | |
| | <i>Observed Vehicles</i> | 4,00 | |
| | <i>Min. Look Back Distance (MaxLBD)</i> | 0,00 m | |
| | <i>Max. Look Back Distance (MinLBD)</i> | 150,00 m | |
| | <i>Duration Temporary lack of attention</i> | 0,00 s | |
| | <i>Probability Temporary lack of attention</i> | 0,00 % | |
| | <i>Smooth Closeup behavior</i> | Desabilitado | |
| | <i>Standstill distance for static obstacles</i> | Desabilitado | |
| Modelo de Wiedemann 74 | <i>ax</i> <i>bx_add</i> <i>bx_mult</i> | <i>Average Standstill Distance</i> <i>Additive part of safety distance</i> <i>Multiplicative part of safety distance</i> | 2,00 m 2,00 m 3,00 |
| Modelo de Wiedemann 99 | <i>CC0</i> | <i>Standstill Distance</i> | 1,50 m |
| | <i>CC1</i> | <i>Headway Time</i> | 0,90 s |
| | <i>CC2</i> | <i>'Following' variation</i> | 4,00 m |
| | <i>CC3</i> | <i>Threshold for Entering 'Following'</i> | -8,00 |
| | <i>CC4</i> | <i>Negativa 'Following' Threshold</i> | -0,35 |
| | <i>CC5</i> | <i>Positive 'Following' Threshold</i> | 0,35 |
| | <i>CC6</i> | <i>Speed Dependency of Oscillation</i> | 11,44 |
| | <i>CC7</i> | <i>Oscillation Acceleration</i> | 0,25 m/s ² |
| | <i>CC8</i> | <i>Standstill Acceleration</i> | 3,50 m/s ² |
| <i>CC9</i> | <i>Acceleration with 80 Km/h</i> | 1,50 m/s ² | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 Demais modelos do VISSIM

Esta seção descreve os demais modelos do VISSIM, detalhando como se dá o funcionamento dos parâmetros de cada um e suas possíveis relações com o modelo de *car-following* e os movimentos longitudinais, que são o foco desta pesquisa. Serão explanados os modelos de *lane-changing*, *lateral movements*, *gap-acceptance* e, por fim, parâmetros relacionados à aceleração/desaceleração dos veículos. No fim desta seção é feita também uma análise específica para veículos de transporte público, demonstrando os principais parâmetros do *software* relacionados à esses veículos e suas possíveis relações com as correntes de tráfego e movimentos longitudinais.

2.2.1 O Algoritmo de Lane-Changing (Mudança de Faixa)

O processo de mudança de faixa depende de muitos parâmetros e pode, por vezes, se tornar muito complexo. Condutores possuem diferentes razões para mudar de faixa e essa manobra de mudança de faixa é suscetível de ser afetada pela sua urgência. Além disso, condutores podem realizar uma mudança de faixa com ou sem a cooperação do veículo da faixa vizinha. Segundo ELEFTERIADOU (2014), as características do *lane-changing* são muitas, e este algoritmo não tem sido tão estudado quanto o de *car-following*, muito menos a relação entre os dois modelos.

Não existem atualmente relações analíticas que englobem inteiramente o processo de mudança de faixas. Sendo assim, o algoritmo é dado por uma sequência de passos para a tomada de decisão. Num primeiro momento, o condutor considera se a mudança de faixa é necessária ou apenas desejável. Mudanças de faixa desejáveis são realizadas para se obter alguma vantagem, seja de aumento de velocidade ou de uma nova posição em uma fila. Diferentes condutores possuem diferentes critérios para realizar uma mudança de faixa desejável, e essas características são muito importantes no processo de *lane-changing*. Para modelar essa decisão, devem ser desenvolvidos critérios ou limites, que são diferentes para diferentes tipos de condutores e situações.

No próximo passo, o condutor determina em qual faixa ele deseja/necessita se posicionar. Essa decisão é mais complexa para mudanças de faixa desejáveis, onde o condutor precisa selecionar uma faixa baseado em uma série de critérios como o tamanho de fila ou velocidade operacional da faixa vizinha. Novamente, os critérios diferem-se para diferentes tipos de condutores.

No terceiro passo o condutor avalia o tamanho das possíveis brechas (*gaps*) na faixa vizinha. Caso o condutor rejeite a brecha disponível, deve estar apto a encontrar uma nova brecha ou reavaliar os seus critérios de mudança de faixa. Esse processo envolve algoritmos de *gap-acceptance*, que serão discutidos em outro item. No quarto passo, o motorista move-se para a faixa vizinha e ajusta sua velocidade de acordo com as condições da nova faixa, considerando, novamente, os parâmetros do algoritmo de *car-following*.

Os primeiros estudos aplicaram os algoritmos de *lane-changing* para o regime de tráfego em *freeways*. GIPPS (1986) desenvolveu um dos primeiros modelos de mudança de faixa para ferramentas de microssimulação voltados para o meio urbano (ELEFTERIADOU, 2014). Em seu modelo, GIPPS (1986) considerou se é fisicamente possível e seguro realizar a mudança de faixa, se existem e onde estão localizados obstáculos fixos, se existe transporte

público na faixa vizinha, se o condutor está interessado em realizar a mudança, a presença de veículos pesados e a velocidade da faixa adjacente. Posteriormente, HIDAS (2002) desenvolveu algoritmos de *lane-changing* que incorporaram manobras de mudança de faixa cooperativas e forçadas.

O VISSIM modela as decisões de mudança de faixa para duas situações. A primeira delas, denominada mudança de faixa livre, é realizada quando o condutor não possui uma conversão obrigatória ao longo do seu trajeto. Este tipo de mudança de faixa se dá, então, quando este condutor percebe um congestionamento ou uma velocidade menor que a sua desejada, na sua faixa de origem. Segundo o próprio manual do *software*, a agressividade do condutor neste tipo de mudança de faixa não pode ser modificada pelo usuário, porém, esta recebe fortes influências dos parâmetros de *car-following* de Wiedemann, em parâmetros como *min. headway (front/rear)* e *safety distance reduction factor*, por exemplo, que serão descritos posteriormente.

O outro tipo de mudança de faixa é a mudança de faixa necessária, utilizada quando o condutor necessita converter para um determinado *link*. Os principais parâmetros que influenciam este tipo de decisão estão relacionados aos conectores dos *links*, sendo eles a *emergency stop distance*, consistindo na distância mínima ao conector que o condutor para caso não consiga efetuar a mudança de faixa previamente, e a *lane change distance*, sendo definida pela distância ao conector na qual o condutor torna-se consciente da mudança de faixa. Por *default*, o VISSIM apresenta 5,0 m de *emergency stop distance* e 200,0 m de *lane change distance*. Quanto menor for a distância entre a *lane change distance* e a *emergency stop distance*, menos tempo e espaço o condutor terá para realizar a mudança e, conseqüentemente, mais agressivo será o condutor. Além disso, se essa distância é curta, pode não haver espaço suficiente para a mudança ocorrer, fazendo com que o veículo chegue mais rápido a *emergency stop distance* e pare para esperar uma brecha, congestionando a faixa na qual ele se encontra.

Para as mudanças necessárias, o VISSIM utiliza padrões de desaceleração (desejadas e máximas) tanto para o veículo que deseja mudar de faixa, quanto para o veículo da faixa adjacente que supostamente irá colaborar com a mudança. Esses padrões de desaceleração variam de acordo com a distância em que o condutor se encontra da *emergency stop distance*. O principal fator que permite a mudança de faixa está relacionado com os parâmetros de aceitação das brechas, levando em consideração, por exemplo, a distância de segurança dos modelos de Wiedemann.

Diversos parâmetros influenciam as mudanças de faixa. Inicialmente, o usuário pode optar por dois tipos de comportamento: i) *Free lane selection*, onde o veículo pode

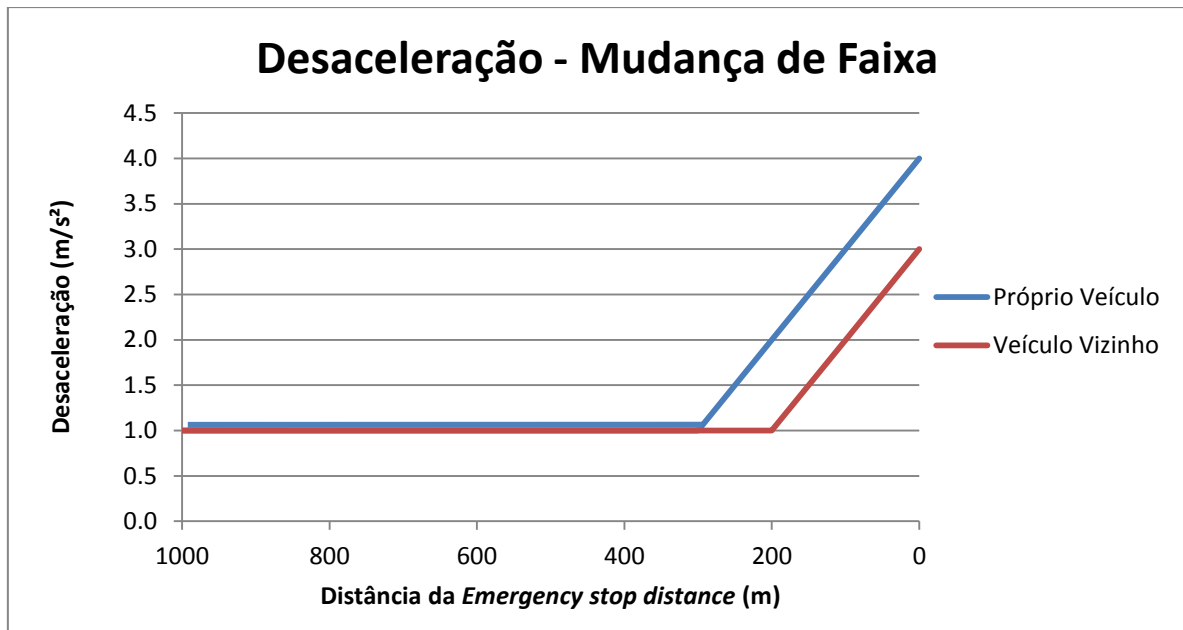
ultrapassar utilizando qualquer uma das faixas e ii) *Right-side rule, left-side rule*, usado somente para *freeways* de acordo com o código de tráfego alemão. A primeira opção é a mais indicada, vindo como *default* do *software*.

Existem três parâmetros, relacionados com a desaceleração dos veículos, que influenciam diretamente a mudança de faixa necessária, tanto para o veículo que precisa mudar de faixa (*own vehicle*), como para o veículo da faixa adjacente (*trailing vehicle*). O primeiro deles é o *maximum deceleration*, o qual representa o limite máximo de desaceleração para mudanças de faixa. O *software* apresenta como *default* -4 m/s^2 para o veículo que deseja mudar de faixa e -3 m/s^2 para o veículo adjacente. O limite mínimo de desaceleração para mudanças de faixa é o *accepted deceleration*, tendo como valor *default* -1 m/s^2 para ambos os veículos.

O terceiro parâmetro é denominado *-1 m/s² per distance*, o qual reduz a desaceleração máxima, linearmente, com o aumento da distância a partir da *emergency stop distance* (*default* de 5,0 m). Em outras palavras, quanto mais próximo da *emergency stop distance*, maior será o valor da desaceleração. O valor *default* deste parâmetro é 100 m, o que representa que a cada 100 m de distância a partir da *emergency stop distance*, a desaceleração máxima reduzirá de 1 m/s^2 , até atingir a *accepted deceleration*. O gráfico da Figura 3 mostra o comportamento da desaceleração com valores *default*. Um questionamento sobre esses parâmetros é no caso de o detector de decisão do veículo estiver posicionado próximo ao destino. Nessa caso, há a dúvida se o veículo já desacelera anteriormente ou se ele inicia sua desaceleração com valor acima da mínima.

O *software* determina um tempo máximo de espera para mudança de faixa, afim de que esse veículo não bloqueie a via por muito tempo. Este tempo é definido pelo parâmetro *waiting time before diffusion*, que possui 60 segundos como valor *default*. Caso o veículo seja retirado da rede devido a esse parâmetro, esta informação estará no relatório de erros gerado no fim de cada simulação.

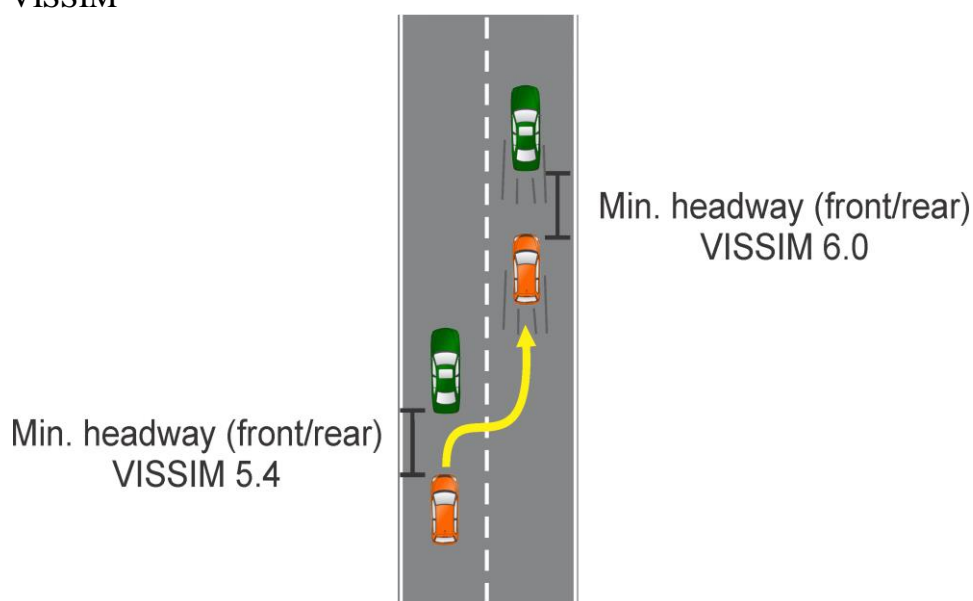
Figura 3 – Desaceleração para mudanças de faixa



Fonte: Elaborada pelo autor.

O parâmetro *min. headway (front/rear)* apresenta definições distintas nas últimas versões do *software*. Segundo o manual da versão 5.4, este parâmetro define a distância entre dois veículos parados necessária para o veículo realizar a mudança de faixa. Contudo, as versões de 6.0 a 8.0 definem o *min. headway (front/rear)* como a distância mínima entre a frente do veículo e à traseira do veículo à frente, após a mudança de faixa. Em ambas as versões, esse parâmetro possui valor *default* de 0,50 m. Apesar do manual do *software* não indicar, é fácil perceber que esse parâmetro tem uma relação direta com os parâmetros de *car-following*, já que estes indicam a distância longitudinal entre os veículos. Contudo, não é detalhada como se dá a interação desse parâmetro com os parâmetros de Wiedemann. A Figura 4 apresenta a representação deste parâmetro na versão 5.4 e 8.0 do *software*.

Figura 4 – Parâmetro *Min. headway (Front/rear)* na versão 5.4 e 6.0 do VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das desacelerações, os condutores levam em consideração a distância de segurança (dx_safe) para realizar uma mudança de faixa. Sendo assim, o condutor avalia: i) se a distância de segurança entre ele e o veículo adjacente à montante, após a mudança de faixa é atendida; ii) se a distância de segurança entre ele e o veículo à sua frente, na mesma faixa, é suficiente e; iii) se a distância de segurança entre ele e o veículo adjacente à jusante (mais lento) na nova faixa é atendida. O VISSIM reduz o valor da distância de segurança, durante a mudança de faixa, através do parâmetro *safety distance reduction factor*, que possui valor de 0,60 como *default*, o que reduz a distância de segurança em 40%. Quanto menor o valor deste parâmetro, maior será a redução da distância de segurança e, conseqüentemente, mais fácil será a mudança de faixa. O conceito deste parâmetro confunde-se bastante com o parâmetro *min. headway (front/rear)*, já que os dois abordam a distância entre os veículos após a mudança de faixa. Dessa forma, ao longo da pesquisa será avaliado qual dos dois é predominante, o *min. headway (front/rear)* ou a distância de segurança de Wiedemann reduzida.

O veículo da faixa vizinha pode cooperar com a mudança de faixa de um veículo que o deseja fazer através do parâmetro *maximum deceleration for cooperative braking*. Este parâmetro define se o veículo vizinho freia cooperativamente a fim de facilitar a mudança de faixa. O valor *default* desse parâmetro é de -3 m/s^2 , e caso o veículo vizinho precise desacelerar a um valor maior que este para permitir a mudança de faixa, este freio cooperativo não ocorre. Quanto maior o valor deste parâmetro, em módulo, mais fáceis serão as mudanças de faixa. O manual do *software* recomenda valores entre 70 e 100% da aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

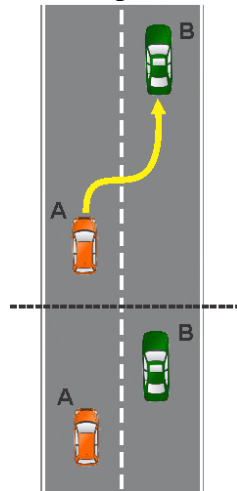
Durante o *cooperative braking*, o veículo vizinho desacelera de acordo com dois valores: i) até o máximo de 50% da desaceleração desejada (definida nos perfis de aceleração/desaceleração dos veículos), até o veículo iniciar a mudança de faixa e; ii) entre 50% da desaceleração desejada e a desaceleração máxima especificada no campo de *maximum deceleration*. Normalmente, a desaceleração do veículo da frente durante uma mudança de faixa é consideravelmente menor que a desaceleração máxima, já que o veículo que deseja mudar de faixa não espera uma desaceleração alta do veículo vizinho.

O parâmetro *overtake reduced speed areas* vem desabilitado por *default*, o que sugere que o veículo não inicia uma mudança de faixa livre antes de uma zona de redução de velocidade e ignora completamente zonas de velocidade reduzida em uma nova faixa, caso faça a mudança ao longo de uma zona de redução de velocidade. Caso seja habilitado, o veículo considera a velocidade reduzida da nova faixa caso faça a mudança e o comportamento do veículo com relação a mudança de faixa é função dos limites de velocidade existentes na zona de redução de velocidade. O manual do *software* não descreve como se dá essa modelagem, caso o parâmetro seja habilitado.

Outro parâmetro que é passível somente de ser habilitado ou desabilitado é o *advanced merging (AM)*. Este parâmetro representa um conjunto de quatro comportamentos, os quais não podem ser alterados individualmente. Dessa forma, uma vez habilitado o parâmetro *AM*, todos os quatro comportamentos também serão. Estando habilitado (situação *default*), o *AM* possibilita uma mudança de faixa mais facilitada, aumentando a capacidade do *link*, diminuindo a probabilidade de um veículo parar para esperar uma brecha para mudança de faixa.

No primeiro caso, o veículo que deseja mudar de faixa pode reduzir sua velocidade em um determinado momento para aceitar uma brecha. Caso desabilitado, o veículo somente reduz sua velocidade quando se aproxima da *emergency stop distance*. A Figura 5 apresenta essa configuração, onde o veículo A reduz sua velocidade para realizar a mudança de faixa atrás do veículo B.

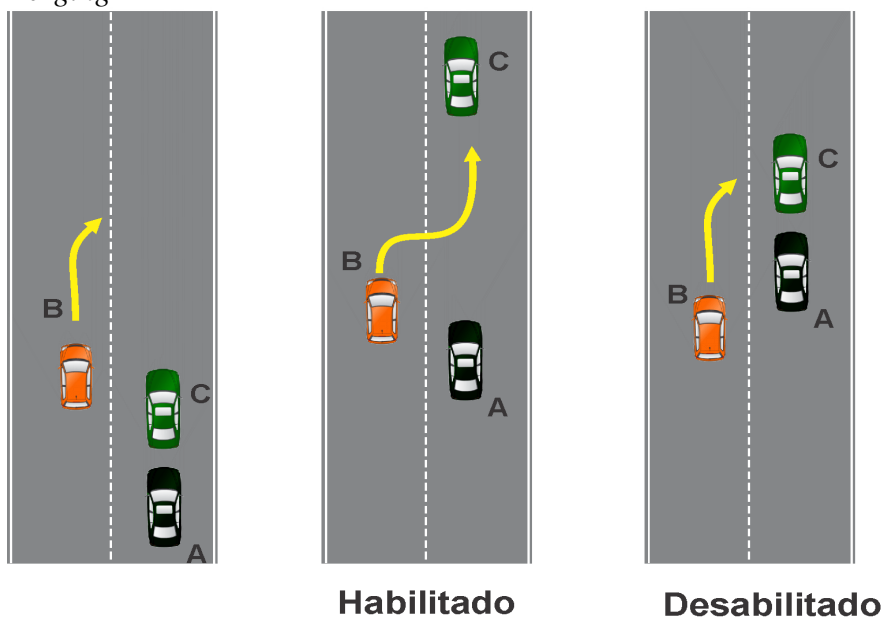
Figura 5 – Primeiro caso do parâmetro *Advanced Merging*



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 6 ilustra o segundo caso. Se um veículo "A" com um veículo em frente "C" detecta que um veículo "B" em frente, na faixa vizinha, quer mudar para a faixa de "A", esta opção pode ser usada para a frenagem cooperativa de "A". Se a opção não estiver selecionada, o veículo "A" deixa a cooperação apenas para o veículo "C". Neste caso, "C" pode já estar muito perto de "B", de modo que "C" ultrapasse "B", e "A" esteja muito perto de "C" fazendo com que "C" feche-se para o freio cooperativo, impossibilitando a mudança de faixa de "B", em vez de permitir a mudança de "B" para a sua frente.

Figura 6 – Ilustração dos casos 2, 3 e 4 do parâmetro *Advanced Merging*



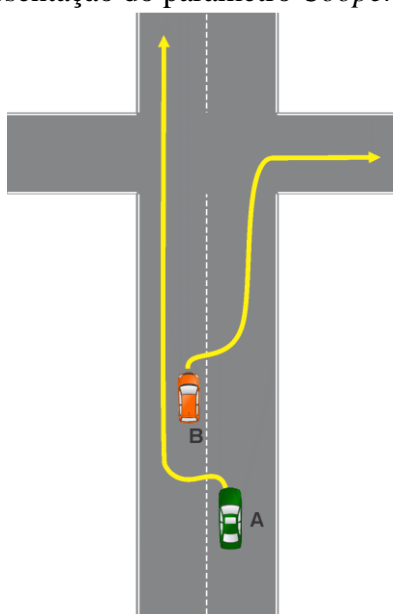
Fonte: Elaborada pelo autor

No terceiro caso, um veículo pode permitir a mudança de faixa de mais de um veículo. Seguindo o mesmo caso anterior, se por algum motivo o veículo "A" deixa de permitir a mudança de "B" e acaba ultrapassando-o, com essa opção selecionada o veículo "A" irá cooperar imediatamente com a mudança de qualquer outro veículo. Se essa opção não for selecionada, nos próximos 50 m, o veículo "A" não vai frear cooperativamente para qualquer outro veículo vizinho em frente.

Ainda levando em consideração a Figura 6, no quarto e último caso, se por algum motivo "B" não mudou de faixa, mesmo com o veículo "A" permitindo, o veículo "A" esquece que deveria ter permitido a mudança de "B" e pode permitir que outros veículos mudem para sua faixa, imediatamente, após se distanciar de "B". Se essa opção não for selecionada, nos próximos 50 m o veículo "A" não vai frear cooperativamente para qualquer outro veículo vizinho. Em resumo, o terceiro e o quarto comportamento significam que, caso o veículo "A" deixe de permitir a mudança de "B" ou o veículo "B" não mude de faixa mesmo com "A" permitindo, com o *AM* habilitado o veículo "A" irá cooperar para outro veículo e, se desabilitado, não irá frear cooperativamente.

Outro parâmetro que pode ser habilitado ou desabilitado é o *cooperative lane change*. Caso habilitado, este parâmetro permite que um veículo mude de faixa para auxiliar a mudança de faixa de outro veículo. Por exemplo, se o veículo "B" quer mudar de faixa para a faixa do veículo "A", este último muda de faixa para facilitar a mudança de B. Nesse caso, o veículo "A", que facilitou a mudança, realiza a mudança de faixa como se quisesse acessar algum conector à distância. Contudo, o veículo "A" não realiza o *cooperative lane change* em três casos: i) se a nova faixa não for interessante para sua rota de destino; ii) Se o veículo "B" está a mais de 10,8 km/h mais rápido e; iii) O tempo para colisão deve ser maior que 10 s, se o veículo "A" aumentar a velocidade em 10,8 km/h. A Figura 7 apresenta uma representação desse parâmetro.

Figura 7 – Representação do parâmetro *Cooperative lane change*

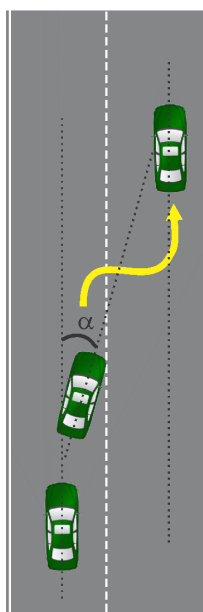


Fonte: Elaborada pelo autor.

O *software* apresenta o *cooperative lane change* desabilitado por *default*. Caso habilitado, dois parâmetros são possíveis de serem alterados. O primeiro deles é o *maximum speed difference*, que por *default* é 10,8 km/h, que representa a diferença de velocidade aceitável para a mudança de faixa cooperativa. Já o segundo, denominado *maximum collision time*, representa o tempo de colisão máximo aceitável para a mudança de faixa cooperativa, que por *default* é 10 segundos.

O último parâmetro de *lane-changing* é o *lateral correction of rear end position*, que por *default* vem desabilitado. Quando habilitado, para uma mudança de faixa que ocorre a uma velocidade menor do que a definida na seção de *maximum speed*, esse parâmetro faz com que a extremidade traseira do veículo se mova lateralmente. O veículo deve estar paralelo à sua faixa inicial ao final da mudança de faixa, ao invés de estar angular em relação a mesma. Este parâmetro, caso habilitado, possibilita ajustes nessa correção lateral dos veículos, segundo outros três parâmetros. A Figura 8 apresenta uma representação desse parâmetro.

Figura 8 – Representação do parâmetro *Lateral correction of rear end position*



Fonte: Elaborada pelo autor.

O primeiro dos parâmetros do *lateral correction of rear end position* é o *maximum speed*, que define o limite sob o qual a correção da posição final deve ocorrer, caso habilitada. O valor *default* é 3,0 km/h, e a correção lateral não ocorre para veículos acima desta velocidade. O segundo parâmetro é o *active during time period from*, que representa o tempo, após o início da mudança de faixa, em que o movimento lateral da posição de extremidade traseira deve começar, tendo como valor *default* 1,0 s. O terceiro parâmetro é semelhante ao segundo, e representa o tempo, após o início da mudança de faixa, em que o movimento lateral da posição de extremidade traseira deve terminar, tendo como valor *default* 10,0 s.

Em resumo, caso habilitado, o *lateral correction of rear end position* possibilita que veículos com velocidade abaixo de 3,0 km/h movam lateralmente sua traseira, iniciando o movimento de correção lateral entre 1 e 10 s após o início da mudança de faixa (valores *default*), impactando, assim, no tempo da manobra de mudança de faixa. Este parâmetro só tem efeito se o parâmetro *keep lateral distance to vehicles on next lane(s)*, do modelo de *lateral movements*, estiver habilitado. A Figura 9 mostra um resumo dos parâmetros de *lane-changing*, com valores *default*, retirada do próprio *software*. Nos estudos de calibração, diversos parâmetros foram levados em consideração por diversos autores. Este tópico será abordado no capítulo seguinte.

Figura 9 – Parâmetros de *lane-changing* com valores *default*

The screenshot shows the 'Driving Behavior Parameter Set' dialog box with the 'Lane Change' tab selected. The parameters are as follows:

| Necessary lane change (route) | | Own | Trailing vehicle |
|------------------------------------|--|------------------------|------------------------|
| Maximum deceleration: | | -4.00 m/s ² | -3.00 m/s ² |
| - 1 m/s ² per distance: | | 100.00 m | 100.00 m |
| Accepted deceleration: | | -1.00 m/s ² | -1.00 m/s ² |

| | |
|---|------------------------|
| Waiting time before diffusion: | 60.00 s |
| Min. headway (front/rear): | 0.50 m |
| To slower lane if collision time is above | 11.00 s |
| Safety distance reduction factor: | 0.60 |
| Maximum deceleration for cooperative braking: | -3.00 m/s ² |

Overtake reduced speed areas
 Advanced merging
 Consider subsequent static routing decisions

Cooperative lane change

| | |
|---------------------------|------------|
| Maximum speed difference: | 10.80 km/h |
| Maximum collision time: | 10.00 s |

Lateral correction of rear end position

| | |
|----------------|-----------|
| Maximum speed: | 3.00 km/h |
|----------------|-----------|

Active during time period from 1.00 s until 10.00 s after lane change start

Fonte: PTV (2014).

Existem outros dois parâmetros que só passaram a ser incorporados a partir da versão 6.0 do VISSIM. O parâmetro *to slower lane if collision time is above* só pode ser habilitado para o comportamento *Right-side rule*, *left-side rule*. Segundo o manual, esse parâmetro define a distância mínima para um veículo à frente, em segundos, que deve estar disponível na pista mais lenta, de modo que um veículo de ultrapassagem mude para a pista mais lenta. Por fim, o parâmetro *consider subsequent static routing decisions* não apresenta explicações no manual da versão 6.0 do *software*, apenas da versão 7.0 em diante, e representa decisões de mudanças de faixas para o caso de mudanças de rotas subsequentes em um mesmo *link*. Como os modelos de escolha de rota não serão abordados na pesquisa, esse parâmetro também não será.

Em resumo, no VISSIM um veículo inicia a tentativa de mudança de faixa a partir da *lane change distance*, com o limite para realizar esta mudança até a *emergency stop distance*

do seu conector de destino. Ao longo desse intervalo, a agressividade da mudança é dada pelas taxas de desaceleração do veículo que deseja mudar de faixa e do veículo vizinho. Os demais parâmetros surgem para facilitar, ou não, essa mudança de faixa, interferindo na brecha disponível e na distância de segurança (*min. headway front/rear* e *safety distance reduction factor*), na cooperação do veículo vizinho (*cooperative braking* e *cooperative lane change*), e nas facilidades de manobras (*advanced merging* e *lateral correction of rear end position*). Caso o veículo não consiga realizar a mudança nesse intervalo definido, ele irá parar no limite da *emergency stop distance* e irá aguardar o aparecimento de uma brecha, com o limite de espera definido pelo parâmetro *waiting time before diffusion*.

Ao observar os conceitos dos parâmetros, percebe-se facilmente que dois deles têm uma possível influência nos parâmetros de Wiedemann e, conseqüentemente, no movimento longitudinal dos veículos. Esses dois parâmetros são o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduction factor*. Os demais parâmetros influenciam diretamente nas taxas de aceleração e desaceleração, para diferentes comportamentos, e nas manobras das mudanças de faixa. O efeito de cada um desses parâmetros será avaliado posteriormente.

2.2.2 Os Algoritmos de Lateral Movements (Movimentos Laterais) e Gap Acceptance (Aceitação de Brechas)

O VISSIM possui ainda outros dois modelos comportamentais que ditam os movimentos laterais dos veículos dentro de uma faixa (*Lateral Movements*) e a aceitação de brechas (*Gap Acceptance*). Como o foco desta pesquisa de mestrado são os movimentos longitudinais dos veículos, esses modelos comportamentais não serão considerados no processo de calibração, já que o primeiro trata diretamente os movimentos laterais dos veículos e o segundo trata, principalmente, da modelagem de brechas para veículos se inserirem em uma via principal.

Há a hipótese que em um ambiente urbano, com alta densidade de cruzamentos semaforizados, as brechas surjam em função dos semáforos, fazendo com que o impacto dos veículos provenientes de vias secundárias, com interseções não semaforizadas, na velocidade média da via principal, não seja tão considerável. Além disso, interseções não semaforizadas normalmente possuem um fluxo veicular reduzido.

2.2.3 Modelagem do Transporte Público por Ônibus

A modelagem de transporte público vem ganhando cada vez mais importância nas cidades em desenvolvimento, uma vez que uma das soluções para os grandes problemas de fluidez, e até mesmo de segurança viária, é o investimento em transporte público. Nas capitais de países em desenvolvimento onde nem sempre existem condições econômicas para o desenvolvimento de transporte ferroviário ou metroviário, o uso de ônibus urbano acaba sendo um dos principais meios de transporte público.

Diversas cidades brasileiras têm investido nos últimos anos em estruturas de priorização do transporte público, destacando-se os BRT (*Bus Rapid Transit*) e BRS (*Bus Rapid System*). Devido à limitação de recursos, o uso dessas estruturas geralmente é feito com a oferta viária existente, impactando a operação que nela já existia. Dessa forma, a simulação também pode auxiliar no impacto dessas estruturas para a oferta viária existente.

Apesar da sua grande importância, a modelagem do transporte público não é foco desta pesquisa, embora o impacto de veículos pesados como ônibus será considerado. Em geral, a literatura quando trata de transporte público, foca em variáveis como o próprio veículo, operações em pontos de parada, dispositivos de controle além dos parâmetros comportamentais. Na literatura nacional destacam-se os trabalhos de CHAGAS (2014), que utilizou o VISSIM para modelar a operação de um BRT na cidade de Belo Horizonte e PERON (2015) que analisou a velocidade média e tempo de viagem do transporte público em um corredor no qual foi implantada a tecnologia de *Transit Signal Priority* (TSP), também com o uso do VISSIM.

No âmbito internacional, RAJ, SEKHAR E VELMURUGANC (2013) avaliaram o desempenho operacional de um BRT na cidade de Nova Deli (Índia) e AHMED (2014) analisou diferentes estratégias de prioridade para ônibus, ambos utilizando VISSIM.

Grande parte dos parâmetros descritos neste capítulo possui analogia para a modelagem dos ônibus, a iniciar pelos perfis de aceleração/desaceleração, velocidades desejadas e os parâmetros de potência veicular. Os modelos de *car-following*, *lane-changing* e *lateral movements* não podem ser aplicados exclusivamente para ônibus no VISSIM, contudo, neste último modelo, é possível inserir determinadas exceções para ultrapassagem de ônibus na mesma faixa. Em contrapartida, os parâmetros de *gap-acceptance*, mais especificamente do submodelo de *Regras de Prioridade*, podem ser definidos distintivamente para os ônibus.

As operações de embarque e desembarque nos pontos de parada exercem uma forte influência nos corredores arteriais, principalmente quando se tem apenas duas faixas de tráfego em um determinado sentido. O VISSIM modela o tempo de parada dos ônibus de duas formas

distintas. Na primeira delas, o tempo de permanência do ônibus no ponto de parada é definido em função da quantidade de operações de embarque e desembarque, que é função da demanda de passageiros, quantidade de portas nos veículos, dentre outros aspectos. Todos esses parâmetros são passíveis de serem modificados no simulador. A segunda forma, mais simples, é inserindo uma distribuição de tempo, a qual pode ser uma distribuição Normal ou empírica. Por *default*, o VISSIM utiliza uma distribuição Normal com média de 20 segundos e desvio padrão de 2 s, truncada no intervalo de zero a 40 s. Cada linha de transporte público definida e cada ponto de parada pode ter sua distribuição temporal específica, assim como sua velocidade desejada específica. Por fim, todos os dados de saída do simulador podem ser obtidos com exclusividade para os ônibus.

No escopo desta pesquisa, a modelagem dos ônibus se faz necessária devido ao impacto destes nos corredores arteriais urbanos. Variáveis como tempo médio de parada e velocidade desejada exercem uma forte influência na velocidade média de vias de tráfego misto. Além destas variáveis serem incorporadas nesta pesquisa, será realizada também uma comparação das medidas de desempenho com os dados coletados relativos ao transporte público e com os parâmetros com valor *default*.

O capítulo seguinte aborda o processo de calibração de microssimuladores, tendo como foco os trabalhos com o simulador VISSIM. Neste capítulo serão apresentados estudos que apresentam diferentes metodologias de calibração e de validação.

3 CALIBRAÇÃO DE MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO

A etapa de calibração é uma etapa essencial em qualquer esforço de modelagem. Modelos microscópicos tendem a oferecer maior complexidade devido à elevada quantidade de parâmetros normalmente envolvidos. No caso do VISSIM, como mostrado anteriormente, existem cerca de 20 parâmetros somente para o algoritmo de *car-following* e outros 20 para o algoritmo de *lane-changing*.

Segundo FELLENDORF E VORTISCH (2010), nos 15 anos de existência do VISSIM diversos esforços de calibração foram realizados para ajustar os parâmetros dos modelos comportamentais para os comportamentos de condução dos diversos países do mundo. Esses parâmetros apresentam valores *default*, representando realidades de comportamentos de diversos ambientes, logo, para que o simulador possa representar de forma satisfatória a realidade particular de interesse, é necessária um ajuste adequado dos seus parâmetros.

O principal objetivo da calibração é ajustar os parâmetros do simulador, de forma a minimizar a discrepância entre o modelo e a realidade. Atualmente, embora não exista na literatura uma maneira universal para calibração e validação de modelos de tráfego, o que se justifica pelas particularidades de cada estudo, vários pesquisadores têm discutido e apresentado procedimentos e diretrizes com certo grau de universalidade.

Segundo HOLLANDER E LIU (2008), existe uma diferença entre a calibração dos modelos de microsimulação de tráfego e a calibração de outros modelos na rede, como o modelo de alocação do tráfego. As falhas prováveis nas previsões feitas por um modelo de alocação indevidamente calibrado podem resultar em erros de natureza local (por exemplo, fluxos errôneos em um *links* específicos), enquanto um modelo de microsimulação de tráfego não adequadamente calibrado estão mais propensos a falhar tanto local como globalmente.

A diversa gama de métodos existentes na literatura para calibrar o microsimulador VISSIM varia quanto aos algoritmos e modelos escolhidos para a calibração, ao objeto de estudo (meio urbano ou rodoviário), à natureza dos dados utilizados, às medidas de desempenho escolhidas, às medidas de ajuste (*goodness-of-fit*) utilizadas, dentre outros aspectos. Os subtópicos a seguir mostram como cada aspecto tem sido abordado no estado da arte.

3.1 Objeto de estudo e escolha dos modelos, algoritmos e parâmetros

O número de parâmetros que idealmente se deseja calibrar é alto, logo, é inviável se considerar todos estes na calibração devido ao esforço computacional envolvido e limitada

disponibilidade de dados. Em toda a literatura analisada, notou-se que apenas uma quantidade relativamente pequena de parâmetros era utilizada na calibração e, além disso, poucos estudos calibraram parâmetros de todos os modelos comportamentais. Os analistas devem atentar que uma sofisticada metodologia de calibração pode trazer pouco ganho se alguns parâmetros que influenciam fortemente a medida de desempenho interessada não foram incluídos (HOLLANDER E LIU, 2008).

A vantagem de se utilizar um número menor de parâmetros é, além de uma simplicidade na calibração, poder compreender melhor o impacto individual de cada um deles e sensibilidade dos *outputs* com relação aos parâmetros definidos. Em alguns casos, a calibração é feita através de um procedimento manual, em outros, onde é utilizado um maior número de parâmetros, normalmente a calibração é dada utilizando-se métodos automatizados e, conseqüentemente, obtendo-se mais eficiência para a busca da solução ótima, porém, podendo-se obter resultados de combinações de parâmetros não condizentes com a realidade.

Em geral, quando um analista escolhe um conjunto de parâmetros de calibração, a ambiciosa tarefa é escolher um número de parâmetros que seja grande suficiente para cobrir os vários elementos comportamentais do modelo, mas pequeno suficiente para permitir o entendimento da contribuição de cada parâmetro, e que também seja possível tornar o esforço computacionalmente mais viável (HOLLANDER E LIU, 2008). Uma boa estratégia para tratar o dilema da quantidade de parâmetros a serem calibrados, é avaliar todos os parâmetros disponíveis e dividi-los em grupos. HOLLANDER E LIU (2008) fazem a seguinte proposição de divisão:

1. Parâmetros os quais os valores são relativamente fáceis de serem medidos diretamente (por exemplo, comprimento médio dos veículos);
2. Parâmetros cujos valores podem ser encontrados em estudos anteriores e podem ser replicados para situação de análise;
3. Parâmetros cuja influência nos dados de saída pode ser negligenciada. Para verificar se um parâmetro não influencia os dados de saída, pode ser necessário realizar uma análise de sensibilidade, variando cada parâmetro individualmente, ou conjuntamente;
4. Parâmetros que são inadequados para serem ajustados para o modelo. Por exemplo, se os modelos tratarem de um tipo de veículo de pequeno porte, não se faz necessário incluir aceleração dos ônibus na calibração dos parâmetros.

5. Os parâmetros que não se incluíram nos itens acima devem ser considerados para o conjunto de parâmetros a serem calibrados.

Diversos estudos, como MENNENI *et al.* (2008), calibraram somente o algoritmo de *car-following*, alegando que este é o que impacta mais diretamente na capacidade dos *links*. Contudo, diversos outros estudos, como PARK E SCHNEEBERGER (2003) e KIM E RILETT (2005) mostram a necessidade de calibrar, além do *car-following*, o *lane-changing*. Ainda assim, na literatura não são encontrados metodologias que abordem todos os parâmetros existentes, mostrando quais precisam ser calibrados, quais podem ser deixados com valor *default* e quais podem ser coletados em campo.

A literatura nacional apresenta estudos de calibração apenas para o algoritmo W99, quase todos aplicados à modelagem do tráfego rodoviário. Merece destaque o trabalho de OLIVEIRA E CYBIS (2008), que traz uma revisão bibliográfica sobre os estudos de calibração do modelo de *car-following* e calibra os parâmetros *CC0*, *CC1*, *CC4* e *CC5*. Em outro estudo, CALEFFI *et al.* (2012) calibra o W99 para um trecho de rodovia.

Para a literatura voltada para o modelo W74, PARK E SCHNEEBERGER (2003) utilizaram uma via arterial com 12 semáforos atuados e calibraram apenas o parâmetro *ax*, com o intervalo de busca [0,5-7,0] m, encontrando o valor de 3,0 m. KIM *et al.* (2005) utilizaram estatística não paramétrica e algoritmo genético para calibrar *ax*, *bx_add* e *bx_mult* (entre outros parâmetros) para uma via arterial controlada por semáforos atuados. A calibração não buscou valores fixos para os parâmetros, mas sim intervalos de valores a serem escolhidos pelo usuário. Os resultados mostraram os seguintes intervalos prováveis para os parâmetros: *ax* = [1-4] m, *bx_add* = [1-10] m e *bx_mult* = [1-10]. PARK E QI (2005) empregaram regressão linear e algoritmo genético para calibração, chegando aos seguintes valores: *ax* = 3,85 m, *bx_add* = 5,0 m e *bx_mult* = 5,3. Nos três artigos citados neste parágrafo, os parâmetros do W74 foram calibrados simultaneamente com outros parâmetros do *software*, incluindo os do algoritmo de mudança de faixa. Não foi encontrado na literatura nenhum estudo que indique qual a melhor estratégia para calibração com relação a calibrar simultaneamente ou separadamente os parâmetros. ASAMER *et al.* (2013) restringiram *bx_add* = *bx_mult* para simplificar a calibração, o que em contrapartida limitou a combinação de valores possíveis para os dois parâmetros, e vale ressaltar que os próprios valores *default* dos dois parâmetros são distintos.

Não foi encontrado na literatura pesquisas que mostrem a possível contribuição trazida pela utilização do modelo W99 para o tráfego urbano em relação ao W74, embora

existam trabalhos em que o W99 é utilizado para o tráfego urbano, por exemplo, CUNTO E SACCOMANNO (2008), MEDEIROS *et al.* (2013), JIE *et al.* (2013). Esta é uma lacuna abordada no presente trabalho.

Além dos parâmetros de Wiedemann, diversos outros estudos também incorporaram os demais parâmetros de *car-following*, destacando-se PARK E SCHNEEBERGER (2003), que incorporaram o parâmetro *observed vehicles* no processo de calibração, chegando à conclusão que o valor *default* é o mais indicado, e KIM E RILETT (2005), que também calibraram os parâmetros *OV*, encontrando o valor de 2,0, e *look ahead distance*, encontrando o valor de 1300 m, considerando o menor erro médio absoluto. A Tabela 2 apresenta um resumo de alguns estudos que calibraram modelos do VISSIM.

Com relação aos parâmetros de *lane-changing*, PARK E SCHNEEBERGER (2003) calibraram os parâmetros *emergency stop distance*, encontrando o valor de 3,0 m e *lane change distance*, obtendo o valor de 175 m. KIM E RILETT (2005) calibraram apenas o parâmetro *lane change distance*, obtendo o valor de 80 m com o menor erro médio absoluto. Como dito anteriormente, pouca atenção tem sido dada aos modelos de mudança de faixa, haja vista sua dificuldade de observação e o fato dos modelos sofrerem influência de todos os outros, seja *car-following*, *gap acceptance*, parâmetros relacionados aos perfis de aceleração e desaceleração dos veículos e parâmetros de *links* e conectores.

Merece destaque o trabalho de JIENG *et al.* (2014), que avaliaram tecnologias de dispositivos de controle de mudança de faixa utilizando microssimulação. Em seu trabalho, utilizaram o VISSIM para simular um trecho de rodovia, com cenários com e sem os dispositivos, calibrando 11 parâmetros do algoritmo de *lane-changing* do VISSIM, sendo esses os seis parâmetros de aceleração dos veículos (*own* e *trailing*), o *min. headway front/rear*, *safety distance reduction factor*, *max. deceleration for cooperative braking* e os dois parâmetros do *cooperative lane changing*.

Tabela 2 – Exemplos de estudos de calibração do VISSIM

| Trabalhos | Tipo de tráfego | Medidas de Desempenho | Modelos Calibrados | Parâmetros Seleccionados |
|---------------------------------|-----------------|---|---------------------------------------|---|
| FELLENDORF E VORTISCH (2001) | Rodoviário | Fluxo e Velocidade | ---- | ---- |
| PARK E SCHNEEBERGER (2003) | Urbano | Tamanhos de fila; tempos de viagem | W74 e lane changing | <i>Emergency stop distance; lane change distance; Observed vehicles; ax; Waiting time before diffusion; Min. Headway front/rear</i> |
| KIM <i>et al.</i> (2005) | Urbano | Tempo de viagem | W74 e lane changing | <i>ax; bx_add; bx_mult; Look ahead distance; Observed vehicles; Lane change distance</i> |
| PARK E QI (2005) | Urbano | Tempo de viagem | W74 e gap acceptance (Priority rules) | <i>Observed vehicles; Max. Look ahead distance; ax; bx_add; bx_mult; Min. Headway; Min. Gap time</i> |
| LOWNES E MACHEMEHL (2006) | Rodoviário | Capacidade | W99 | <i>CC0; CC1; CC2; CC3; CC4; CC5; CC6; CC7; CC8; CC9</i> |
| MENNENI <i>et al.</i> (2008) | Rodoviário | Volume e Velocidade | W99 | <i>CC1; CC2; CC3; CC4; CC5</i> |
| OLIVEIRA E CYBIS (2008) | Rodoviário | Velocidade | W99 | <i>CC0; CC1; CC4; CC5</i> |
| MEDEIROS (2012) | Urbano | Tempo de Viagem | W99 e lane changing | <i>CC0; CC1; CC2; CC3; CC6; CC5; CC6; Min. Headway front/rear; Safety distance reduction factor; Max. Dec. Cooperative braking</i> |
| CALEFFI <i>et al.</i> (2012) | Rodoviário | Fluxo e Velocidade | W99 | <i>CC0; CC1; CC4; CC5</i> |
| JIE <i>et al.</i> (2013) | Urbano | Velocidade; Emissão de Poluentes | W99 | <i>CC1; CC2; CC3; CC7; CC8</i> |
| ASAMER <i>et al.</i> (2013) | ---- | Atraso, Fluxo | W74 | <i>ax; bx_add; bx_mult</i> |
| MANJUNATHA <i>et al.</i> (2013) | Rodoviário | Atraso | W99 e Lateral Movements | <i>Distance standing e Distance driving; CC0 a CC9</i> |
| MATSUHASHI <i>et al.</i> (2005) | Urbano | Processamento de imagens e veloc. média | CF, LA, GA (Conflict Areas) e LM | <i>Min. headway front/rear; MinLAD e MaxLAD; Add. part of desired safety; Overtake on same lane</i> |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando o modelo de *lateral movements*, HOSSAIN (2004) calibrou um modelo de tráfego heterogêneo tendo como medida-alvo o fluxo de saturação medido através de vídeos numa interseção da cidade de Dhaka, Bangladesh. FALKENBERG E VORTISCH (2003) *apud* BARCELÓ (2010) também calibraram esse modelo numa aplicação para o tráfego de bicicletas, na Alemanha, e de motocicletas no Vietnã. Até o ano de 2010, o último trabalho publicado com uso do algoritmo de *lateral movements* foi o de MATSUHASHI et al. (2005), o qual mediu gráficos de fluxo x velocidade de motocicletas através de vídeos e calibrou a distância de segurança lateral tendo como medida-alvo as relações macroscópicas de fluxo x velocidade. Em seu trabalho, MATSUHASHI et al. (2005) calibraram os parâmetros *min. headway front/rear* com valor de 1,0 m, *MinLAD* e *MaxLAD*, com valores de 0,0 m e 100,0 m, respectivamente, *additive part of desired safety* com valor de 1,0 m e *overtake on same lane* somente para motos e bicicletas.

Além destes, MANJUNATHA *et al* (2013) também utilizaram o modelo de *lateral movement* para a modelagem de *mixed-traffic* em um comportamento de *non-lane based traffic*. Em seu trabalho, MANJUNATHA *et al* (2013) calibraram os parâmetros *distance standing* e *distance driving* para diferentes tipos de veículos, encontrando valores de 0,5 m e 0,9 m para veículos leves, respectivamente, além dos 10 parâmetros do modelo de W99, utilizando algoritmos genéticos.

Com relação à calibração dos parâmetros de *gap-acceptance*, destaca-se o trabalho de VITI, WOLPUT E TAMPÈRE (2013), que calibraram o modelo de RP para interseções em T, tendo como medida-alvo o tempo de viagem do veículo na secundária necessário para se inserir na via principal. A utilização de medidas de desempenho como tempo de viagem ou tamanho de fila para calibração de parâmetros como brecha crítica é questionável, já que outros fatores influenciam fortemente estas medidas de desempenho como o comportamento da chegada dos veículos na via secundária e a distância entre os veículos (espaçamento) quando estão parados. A discussão sobre as medidas de desempenho é feita no item seguinte.

Dentre os trabalhos analisados que utilizaram *car-following* e *gap-acceptance*, merece destaque o de PARK E QI (2005), que calibraram dois parâmetros do submodelo *Regras de Prioridade*, encontrando valores ótimos de 20,0 m para o *min. headway* e 4,0 s para o *min. gap time*. Uma das principais razões da não utilização desses parâmetros no processo de calibração é o fato deles estarem mais relacionados à etapa de codificação da rede, sendo tratados, portanto como dados de entrada.

É importante ressaltar que o parâmetro brecha crítica sofre muitas influências das características geométricas da interseção em análise, dos tipos de veículos, condições

meteorológicas e de iluminação e aspectos psicofísicos dos condutores. Dessa forma, é importante analisar como esse valor de brecha crítica pode ser utilizado no VISSIM, principalmente quando combinados os dois submodelos de aceitação de brecha em uma única interseção.

Outro fator que faz com que estes parâmetros não entrem no processo de calibração diz respeito a cada interseção ter sua particularidade. Isso faz com que na etapa de codificação da rede, cada interseção não-semaforizada seja tratada individualmente. Dessa forma, é questionável a utilização do mesmo valor de brecha crítica para todas as interseções não semaforizadas da rede. Quando se leva em consideração os oito parâmetros do submodelo de *Conflict Areas*, o processo de calibração torna-se ainda mais complexo.

3.2 Coleta de dados e medidas de desempenho

A coleta de dados deve ser uma etapa bem planejada, pois costuma ser uma das mais dispendiosas. Os dados são usados em diversos estágios da modelagem, seja para informar variáveis de entrada dos modelos, seja para as medidas-alvo de calibração e validação.

Atualmente não se encontra na literatura uma abordagem sistematizada da coleta de dados, num processo de simulação utilizando o VISSIM, que contemple todos os tipos de dados, a saber: 1) *Dados de entrada*, no qual são detalhados os *inputs* do simulador; 2) *Medidas-alvo*, que representam as medidas que são utilizadas como alvo na minimização dos erros na calibração e na validação e; 3) *Medidas de desempenho*, que são os indicadores do desempenho do tráfego em estudo. Vale ressaltar que uma medida de desempenho pode ser uma medida-alvo utilizada na calibração ou validação, o que geralmente ocorre nos trabalhos encontrado na literatura.

3.2.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada são os dados necessários para que a simulação ocorra e são geralmente verificados na etapa de codificação da rede. Os primeiros dados geralmente coletados são os relacionados aos volumes e as características físicas da malha, incluindo o controle e as regras de circulação. Assim, faz-se necessário coletar o volume de entrada em cada *link* e a composição veicular (proporção de veículos leves, caminhões, ônibus) e os volumes direcionais em cada interseção. Outra opção de entrada de demanda se dá por meio da matriz de fluxos origem-destino.

Levando em consideração o ambiente urbano, são necessários, ainda, dados relativos ao transporte público como rota das linhas, *headway* dos coletivos, posicionamento dos pontos de parada, tempo médio dos ônibus nas paradas e, dependendo do nível de detalhamento da simulação e dos objetivos, dados relativos aos usuários de transporte público como volume, idade e gênero.

Para o caso do tráfego urbano, faz-se necessário coletar os dados relativos aos semáforos como número de estágios, planos semaforicos e defasagens. O VISSIM ainda permite o usuário inserir na modelagem da rede estacionamentos, o que requer como dado de entrada o posicionamento destes, frequência de entrada e saída das vagas e tempo de permanência.

3.2.2 Medidas-alvo e Medidas de Desempenho

Num processo de calibração, os valores dos parâmetros são ajustados de modo que os valores simulados e observados de uma determinada variável fiquem satisfatoriamente similares. Tais medidas são denominadas neste trabalho de medidas-alvo, que podem ou não ser a própria medida de desempenho que se deseja simular, o que geralmente ocorre. HOLLANDER E LIU (2008) afirmam que esses tipos de dados incluem medidas como tempo de viagem, velocidades e comprimentos de fila. Além destes, outras medidas como atraso e número de paradas podem ser utilizadas como medidas de desempenho.

Existem outras variáveis que podem e devem ser utilizadas como alvo de calibração que não são de interesse final do modelador quanto ao desempenho do tráfego. Um exemplo de tal medida-alvo é o fluxo de saturação, que pode ser utilizado na calibração dos parâmetros *bx_add* e *bx_mult* de Wiedemann, já que estes representam os *headways* de *following*. Outros exemplos de medidas alvo podem ser o perfil de aceleração de um veículo a uma determinada velocidade, o volume de tráfego em um *link* e a quantidade de mudanças de faixa em um trecho. Medidas de desempenho como tempos de viagem e atraso também podem ser utilizadas como medidas-alvo, desde que seu uso seja interessante para a calibração dos parâmetros em ajuste.

Como dito anteriormente, o uso de medidas de desempenho como tempo de viagem e tamanho de fila para calibrar parâmetros como brecha crítica pode não ser a melhor opção, uma vez que outros parâmetros influenciam estas medidas de desempenho. Dessa forma, acredita-se que se for possível isolar o efeito do parâmetro para uma medida de desempenho, a calibração terá mais consistência. Um exemplo de medida-alvo que pode ser empregada para a calibração da brecha crítica é o tempo de espera do primeiro veículo da fila. Tal abordagem está

sendo atualmente investigada em trabalhos do Grupo de Pesquisa em Transporte, Trânsito e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará (GTTEMA-UFC).

São muitos os trabalhos publicados na literatura internacional que apresentam divergências com relação às medidas de desempenho utilizadas. Por exemplo, no que diz respeito ao alvo de calibração, alguns estudos se baseiam em dados desagregados da trajetória dos veículos (BRACKSTONE *et al.*, 2002), ao passo que outros se baseiam em variáveis macroscópicas do fluxo de tráfego (MENNENI *et al.*, 2008). No tráfego rodoviário, é comum se utilizar como medidas alvo de calibração as três variáveis macroscópicas básicas do tráfego ininterrupto (fluxo, velocidade e densidade) e suas relações.

A escolha entre os dois métodos de calibração (com variáveis agregadas ou desagregadas) deve ser guiada pelos objetivos de estudo. Em trabalhos cujo objetivo é simular o comportamento microscópico de cada veículo com o maior nível de detalhamento possível, a utilização de dados desagregados deve ser empregada. Isto acontece principalmente nos trabalhos de modelagem de emissão de poluentes (JIE *et al.*, 2013) e de segurança viária (CUNTO E SACCOMANNO, 2008), nos quais os perfis de aceleração de cada veículo são de grande interesse. Já para análises cujos objetivos são a modelagem de variáveis agregadas da corrente de tráfego, como velocidade média, a utilização de variáveis macroscópicas traz a vantagem da simplicidade de uso e coleta.

No que diz respeito ao fluxo de saturação, é importante ressaltar que a calibração de parâmetros baseada nesta medida-alvo deve ser realizada para qualquer rede urbana, pois esta variável tem impacto direto na capacidade e no nível de serviço das interseções. Por isto, alguns autores recomendam iniciar a calibração tendo como alvo a capacidade, independentemente da medida de desempenho interesse (BARCELÓ, 2010; DOWLING *et al.*, 2004).

Segundo HOLLANDER E LIU (2008), todos os estudos revisados por eles usaram dados agregados para comparar os cenários simulados com o cenário real, o que não considera o comportamento individual de condutores e veículos. Quando um modelo é calibrado com dados agregados, há um risco de o resultado ter um poder de representação comportamental limitado. A principal justificativa para tal calibração é a ideia de que a simulação já é composta de submodelos que são embasados em teorias comportamentais bem fundamentadas, e que o usuário de uma simulação só precisa verificar se o modelo funciona bem para uma determinada situação de interesse atual.

MENNENI (2008) ainda cita a *trajetória dos veículos* e a distância relativa *versus* velocidade relativa como medidas desagregadas usadas para a calibração. A primeira pode ser

utilizada para avaliar a estabilidade dos modelos de *car-following*, minimizando, os erros entre os *headways* obtidos em campo e no simulador.

Com relação à modelagem do tráfego urbano, boa parte dos trabalhos utilizaram como medida de desempenho os tempos de viagem e velocidade média, podendo destacar PARK E SCHNEEBERGER (2003), KIM *et al.* (2005) e PARK E QI (2005). Merece destaque o trabalho de JIE *et al.* (2013), que utilizaram os perfis de velocidade e aceleração dos veículos como medida-alvo, realizando calibração e validação estatística.

3.3 Escolha das medidas de ajuste (*goodness-of-fit*)

As medidas de ajuste, ou medidas de erro, são utilizadas para a comparação dos valores observados e simulados durante o processo de calibração e de simulação. Tais medidas podem variar de acordo com a natureza dos dados, tamanho da amostra e objetivo de análise. A Tabela 3 apresenta algumas das medidas utilizadas na bibliografia revisada.

Segundo HOLLANDER E LIU (2008), a maioria das medidas irá identificar pobres ajustes entre as tendências centrais das amostras de comparação, enquanto outras medidas também são sensíveis à dispersão. Algumas medidas como o Erro Percentual, Erro Médio e Erro Médio Normalizado, deixam os erros com tamanhos semelhantes, mas com sinais diferentes entre eles, o que pode "mascarar" a magnitude dos erros. Tais medidas são úteis para a detecção de um desvio sistemático (para mais ou para menos), mas devem ser evitados num processo de calibração.

Algumas medidas, como EMA e EMAN, usam o valor absoluto da diferença entre as medidas observadas e simuladas, dando, dessa forma, pesos iguais para todos os erros. Outras medidas, como EQ, REQM e REQMN, dependem da diferença dos quadrados dos erros, o que anula o efeito dos sinais e dá mais importância a erros maiores. O EPAM é semelhante ao EMAN, contudo, mostra uma comparação em termos percentuais, o que pode ser interessante a depender da medida de desempenho. Ainda segundo HOLLANDER E LIU (2008), no contexto da engenharia de tráfego, penalizar erros pequenos não é aconselhável. Isso pode levar a um modelo muito específico, enrijecido, já que pequenas flutuações em torno de média são comuns no fenômeno de tráfego. Dessa forma, usar os erros quadráticos são mais apropriados, já que estes dão mais ênfase aos maiores erros.

Tabela 3: Exemplos de Medidas de Ajuste (*Goodness-of-fit*).

| Nome | Medida de Ajuste |
|--|--|
| Erro Percentual (EP) | $\frac{x_i - y_i}{y_i}$ |
| Erro Médio (EM) | $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)$ |
| Erro Médio Normalizado (EMN) | $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i - y_i}{y_i}$ |
| Erro Médio Absoluto (EMA) | $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - y_i $ |
| Erro Médio Absoluto Normalizado (EMAN) | $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ x_i - y_i }{y_i}$ |
| Erro Percentual Absoluto Média (EPAM) | $\frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ x_i - y_i }{y_i}$ |
| Erro Quadrático (EQ) | $\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2$ |
| Raiz Erro Quadrático Médio (REQM) | $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$ |
| Raiz Erro Quadrático Médio Normalizado (REQMN) | $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_i}{y_i}\right)^2}$ |

Fonte: Adaptada de HOLLANDER E LIU (2008).

3.4 Calibração automatizada: Algoritmos Genéticos

Durante as décadas de 1950 e 1960, cientistas estudaram sistemas de otimização com a ideia de que a Teoria da Evolução pudesse ser utilizada para solucionar esses tipos de problemas no âmbito da engenharia. Naquela época, os sistemas desenvolvidos tinham como base a ideia de que populações formadas por um conjunto de soluções para um problema

poderiam evoluir de acordo com a teoria da evolução darwiniana, de acordo com processos inspirados na seleção natural de indivíduos e na mutação de genes.

Os AG tornaram-se um método popular de otimização desde que foi introduzido por Holland, na década de 70. Ao simular processos evolutivos naturais, um AG pode efetivamente, de acordo com o problema, buscar soluções baseadas na população, em vez de uma única solução, e empregar heurísticas para desenvolver soluções melhores. A facilidade de reiniciar a pesquisa iterativa a partir de uma variedade de pontos de partida faz com que o AG tenha boas respostas contra o aprisionamento em um ótimo local, tornando mais eficaz que demais métodos de busca convencionais (MA E ABDULHAI, 2002). Dessa forma, o AG realiza uma busca multidirecional, mantendo uma população de potenciais soluções e incentivando a formação de informação e intercâmbio entre as gerações de soluções.

Para que tudo isso ocorra, os AG utilizam um conjunto de soluções iniciais (cromossomos) que, após diversas operações, evoluem até que se encontre um conjunto de soluções (indivíduos) de maior aptidão, segundo algum critério de avaliação específico. Assim, a cada geração os indivíduos são avaliados segundo uma medida de ajuste, denominada *fitness*, que mede o quão boa é uma determinada solução em teste. As medidas de ajuste mais utilizadas em AG foram descritas no item anterior. Os indivíduos que apresentam o menor erro (melhor *fitness*), perpetuam seus genes (valores dos parâmetros) para gerações posteriores através de operadores como *elitismo*, *crossover*, mutação e predação (MEDEIROS, 2012). Dentre as vantagens do AG que o tornam uma técnica disseminada pode-se destacar a facilidade de implementação devido à simplicidade das operações genéticas.

Apesar de apresentar diversas vantagens para o processo de calibração, muitos autores tem recorrido ao AG de forma única e exclusiva no processo de calibração, onde na verdade esta é uma ferramenta de otimização. Fatores como interação entre os parâmetros, características do fenômeno, efeito isolado dos parâmetros devem ser considerados pelo entendimento do analista, contudo, muitos autores julgam o modelo calibrado quando a calibração automatizada e simultânea do AG apresenta uma boa medida de ajuste.

Para facilitar o entendimento, se faz necessário definir alguns termos usados quando se trabalha com AG. Os *genes* representam as variáveis do problema, constituindo a menor parte de um cromossomo. No caso da simulação desta pesquisa, os *genes* representam os valores dos parâmetros de calibração e os *indivíduos* representam uma possível solução, composto por seus *genes*. Uma *população* é definida com um conjunto de *indivíduos* que compõe uma *geração*. A cada *geração* a *população* é modificada (evoluída) de forma a buscar a melhor solução.

3.4.1 Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

Os parâmetros dos AG mais utilizados são o *Tamanho da população*, o *Número de máximas gerações*, *Elitismo*, *Cruzamento (Crossover)*, *Mutação e Predação*. Esta seção introduz brevemente o conceito de cada um desses parâmetros assim como a abordagem da literatura com relação à utilização deles.

A *população* é formada por um determinado número de indivíduos, ou seja, um conjunto de possíveis soluções dentro de um intervalo pré-estabelecido. Uma população com poucos indivíduos ocasiona um espaço de busca reduzido, podendo conduzir o AG a um mínimo local prematuramente, ao passo que um número muito elevado pode elevar consideravelmente o tempo de processamento computacional, uma vez que o cálculo do *fitness*, por geração, será muito maior. Dentre a literatura revisada, foram encontradas populações com 20, 30, 40 e 100 indivíduos (BESSA JR E SETTI (2012), KIM *et al* (2005), CUNHA *et al* (2009) e EGAMI (2006), respectivamente).

O *Número (máximo) de gerações* é o número máximo de populações testadas. De acordo com a literatura analisada, o tamanho da população e o número de máximas de gerações varia para cada tipo de aplicação, sendo recomendado avaliar experimentalmente no seu objeto de estudo. Vale ressaltar que o número de gerações multiplicado pelo tamanho da população é um indicador do tamanho do espaço de busca a ser coberto. CUNHA *et al* (2009) utilizaram 50 gerações para os 40 indivíduos, BESSA JR E SETTI (2012) e KIM *et al* (2005) utilizaram 100 gerações (para 20 e 30 indivíduos, respectivamente) e EGAMI (2006) 350 gerações para 100 indivíduos.

O *Elitismo* consiste em escolher o(s) melhor(es) indivíduos para que eles passem intactos para próxima geração. O *cruzamento* ou *crossover*, por sua vez, consiste na troca de material genético entre o melhor indivíduo de uma geração e os demais, e representa o principal operador de geração de novas possíveis soluções (indivíduos). É através do *crossover* que um novo indivíduo é gerado a partir de outros dois indivíduos da geração passada.

Por meio do elitismo pretende-se que as características dos melhores indivíduos sejam transmitidos para gerações futuras, fazendo com que o *fitness* seja constantemente melhorado ou pelo menos seja estabilizado. A cada geração, vários *cruzamentos* são realizados, de forma que, caso seja adotado um valor baixo de *crossover*, haverá pouco aproveitamento do material genético do restante da população e, em contrapartida, um valor alto irá dar pouca diversidade à busca, pois aumenta a probabilidade dos indivíduos da próxima geração serem muito parecidos com o melhor indivíduo, ocasionando uma convergência prematura. Um valor

bastante encontrado na literatura é um *crossover* de 50%, sendo esta a probabilidade do gene ser herdado do melhor indivíduo

Através do parâmetro *Predação* são eliminados os indivíduos menos aptos e inseridos novos indivíduos com genes aleatórios na população, aumentando a renovação do material genético. Essa alteração não garante que o novo indivíduo seja melhor que o indivíduo que foi predado, já que o novo é gerado aleatoriamente. A predação pode ocorrer sob uma taxa estipulada pelo usuário e em um período definido de gerações. Os valores mais encontrados para a taxa de predação foram 20 ou 30%, representando a proporção de indivíduos da geração a serem predados.

Por fim, o parâmetro *Mutação* tem como objetivo inserir material genético novo, substituindo *genes* dos indivíduos por outros gerados ao acaso. Esse processo faz com que gerações seguintes continuem evoluindo e que materiais genéticos perdidos nos cruzamentos ou nas predações tenham a chance de ser incorporados novamente. Uma taxa alta de mutação faz com que as populações fiquem com diversidade muito alta, ao passo que um valor muito pequeno pode tornar o AG estagnado numa solução não muito boa. Os valores mais usuais de taxa de mutação encontrados foram 10, 20 e 30%.

3.5 Validação dos modelos

A eficácia e eficiência de uma simulação, no âmbito de avaliações estratégicas de tráfego, estão na capacidade desta representar de forma satisfatória a realidade. Considera-se o modelo validado quando, utilizando-se um conjunto de dados diferente do empregado na calibração, a diferença entre os valores simulados e os valores observados das medidas de desempenho encontra-se dentro do limite desejado.

Existem diversas formas e metodologias para validar modelos de simulação, diferindo-se basicamente quanto ao tipo de dados, cenários, medidas de desempenho e medidas de ajustes. Uma das estratégias mais utilizadas é a validação a partir de um segundo conjunto de dados pertencente ao mesmo cenário utilizado na etapa de calibração. Outra forma de se validar o modelo é aplicá-lo a um cenário distinto do utilizado na calibração, podendo ser, por exemplo, um horário com diferentes níveis de demanda veicular.

Segundo TOLEDO e KOUTSOPOULOS (2004), apesar da crescente popularidade dos modelos de simulação de tráfego, pouca atenção tem sido dada na literatura quanto ao processo de validação. Na maioria dos casos, percebe-se que as medidas de desempenho utilizadas na etapa de calibração são as mesmas utilizadas no processo de validação. Porém, é

aconselhável para esta última etapa a verificação de uma ou mais medidas de desempenho que não foram utilizadas na fase de calibração, visando obter uma maior confiança na capacidade de representação do modelo (MEDEIROS, 2012).

HOLLANDER E LIU (2008) identificaram em seu trabalho diversas abordagens para a etapa de validação. O primeiro método identificado foi uma validação visual, realizada, por exemplo, nos trabalhos de PARK E QI (2005) e TOLEDO E KOUTSOPOULOS (2004). O procedimento consiste em inspecionar, de forma gráfica, as diversas simulações do modelo de forma a identificar algum comportamento incomum. Muitos autores concordam que a validação visual pode ser uma maneira eficiente de se detectar erros, contudo, esta não pode substituir os métodos com base em critérios quantitativos.

O tipo de validação mais comum se dá por meio das medidas de ajuste, comparando um tipo de erro entre as medidas de desempenho simuladas e observadas, como defendido por TOLEDO E KOUTSOPOULOS (2004). BARCELO E CASAS (2004) utilizaram validação estatística, organizando os dados simulados e observados como duas séries temporais e em seguida, comparando estas duas séries.

Ainda com relação à validação estatística, boa parte dos trabalhos analisados utilizam os testes para comparação das duas amostras (simulada e observada)s, podendo citar como exemplo TOLEDO E KOUTSOPOULOS (2004), BARCELO E CASAS (2004), PARQUE E QI (2005) e PARQUE E SCHNEEBERGER (2004). Estas são ferramentas que testam a hipótese nula de que os dados simulados e observados têm as mesmas propriedades, geralmente a média populacional. A técnica mais comum é o teste-t de duas amostras (HOLLANDER E LIU, 2008).

Na fase de validação, alguns autores usam testes estatísticos rigorosos. HOLLANDER E LIU (2008) veem isso como desnecessário, pois a incerteza sobre os dados de entrada (por exemplo, a demanda de viagens) é muito elevada, e o nível de precisão dos *outputs* é desconhecido. Ainda segundo os autores o processo simplificado de comparação dos dados simulados e observados utilizado na calibração pode também ser utilizado para a validação (ou vice-versa). Esta não é a opinião do autor desta pesquisa de dissertação: se não há confiança por parte do analista no intervalo de estimação para a média da variável simulada, não deve haver nenhuma confiança na estimativa pontual da mesma.

O requisito básico que cada modelo de simulação calibrado deve satisfazer é que ele pode ser validado com êxito com um novo conjunto de dados do mesmo tipo de cenário. Por exemplo, um modelo que foi calibrado com dados de volume (demanda) e de comprimento da fila (oferta) de um conjunto de cruzamentos deve passar pela etapa de validação usando

novos dados destas variáveis utilizando o mesmo conjunto de interseções e o mesmo horário de análise.

Um padrão mais elevado de validação é alcançado se puder ser confirmado que o modelo supostamente calibrado pode fornecer boas estimativas de outras medidas de desempenho que não foram utilizadas na calibração. Por exemplo, se o modelo calibrado através do comprimento da fila também puder dar boas estimativas de atraso, há mais confiança na qualidade do modelo. Mas, na prática, as relações entre as diferentes dimensões da própria modelagem de tráfego nem sempre são confiáveis o suficiente para atingir tal padrão (HOLLANDER E LIU, 2009). Um exemplo deste tipo de aplicação - com validação para medidas de desempenho diferentes - é o trabalho de LACERDA E NETO (2014), que calibraram os modelos de *car-following* tendo como alvo o fluxo de saturação e obtiveram sucesso na validação através da comparação entre os tempos de viagem.

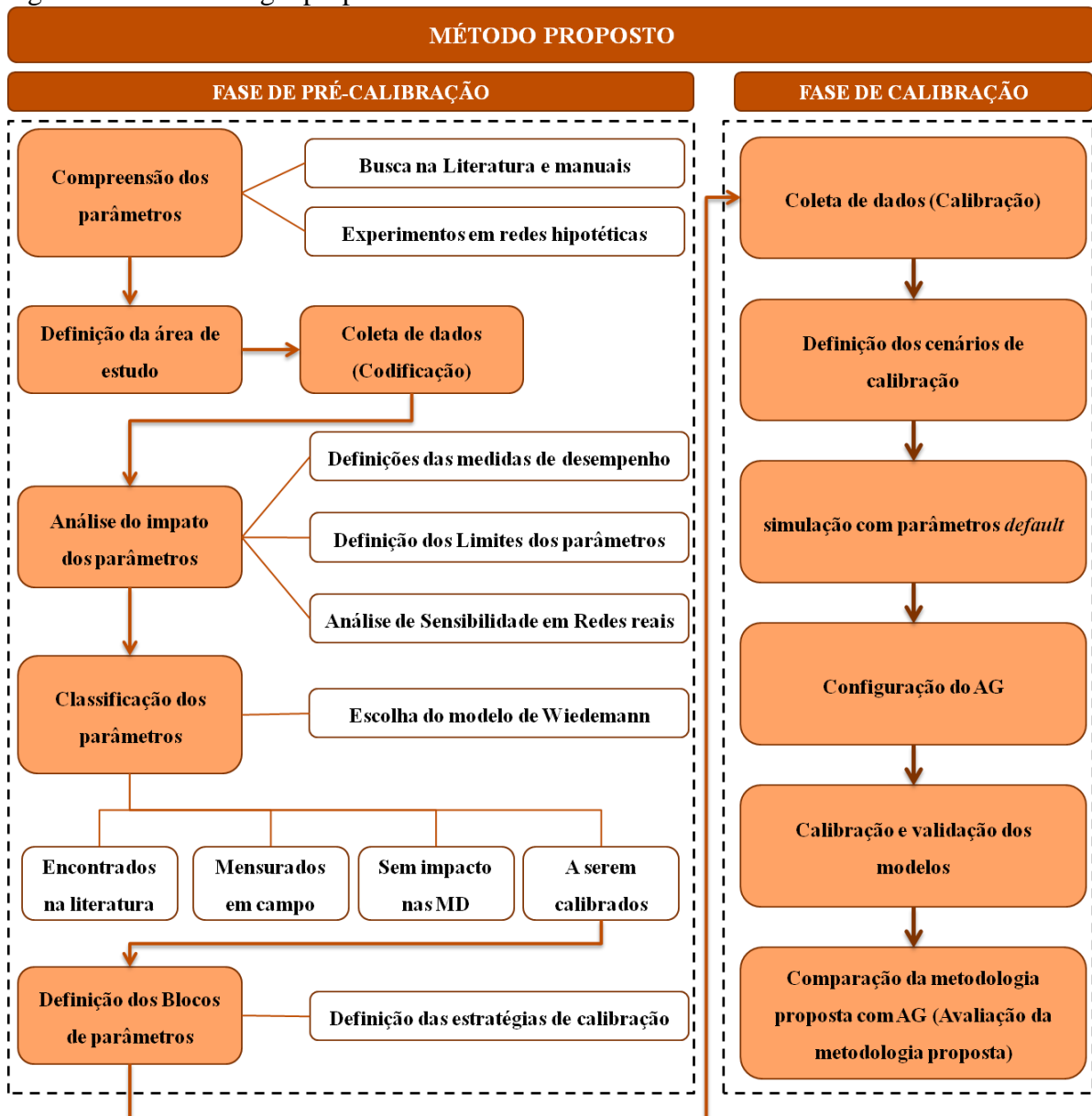
4 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta é constituída por duas fases, apresentadas na Figura 10. A primeira fase é a de *Pré-calibração*, na qual os principais objetivos são compreender o significado e a relevância dos parâmetros, classificá-los e definir quais serão os blocos de parâmetros a serem calibrados. A primeira etapa é denominada de *Compreensão dos parâmetros*, na qual os parâmetros dos diferentes modelos são compreendidos de acordo com sua função na modelagem. Para essa etapa, os parâmetros são listados e o conceito de cada um é buscado na literatura, seja no próprio manual do *software* ou em trabalhos publicados. Para os parâmetros que não puderam ser compreendidos com o auxílio da literatura, realizaram-se experimentos em redes hipotéticas específicas para cada parâmetro, de forma a analisar visualmente e quantitativamente o efeito do mesmo.

Uma vez compreendidos os parâmetros, faz-se necessário avaliar o impacto de cada um nas medidas de desempenho selecionadas. Na etapa de *Análise do Impacto dos parâmetros* são utilizadas redes reais com dados obtidos de campo, logo, as etapas que precedem esta são a *Definição da Área de Estudo* e a *Coleta de Dados (Codificação)*. Esta coleta de dados é focada nos dados das variáveis necessárias para a codificação da rede, tais como dados relativos à demanda veicular, tempos semaforicos, dados de transporte público, geometria e aspectos físicos da rede, dentre outros. As redes utilizadas nesta fase de *Pré-calibração* foram as mesmas utilizadas na fase de *Calibração*.

Após a codificação das redes, é possível, então, a realização da *Análise do Impacto dos Parâmetros*. Nesta etapa, são definidas as Medidas de Desempenho a serem utilizadas, os limites de valores de cada parâmetro, finalizando com a realização de análises de sensibilidade dos parâmetros de interesse. A análise do impacto dos parâmetros embasa a escolha de qual modelo de Wiedemann será utilizado para o estudo, uma vez que são analisados o efeito dos 10 parâmetros do W99 em comparação aos três do W74, além de permitir a identificação dos parâmetros dos outros modelos que exercem influência direta ou indireta no movimento longitudinal dos veículos.

Figura 10 – Metodologia proposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para analisar o impacto dos parâmetros, são realizadas dois tipos de análise de sensibilidade para cada modelo. A primeira delas consiste em variar um parâmetro por vez, mantendo-se os demais com valores *default*, tendo portanto o objetivo de se avaliar o efeito isolado do parâmetro nas medidas de desempenho. Como esta abordagem traz a grande limitação de não considerar a dependência entre os parâmetros, realiza-se uma segunda análise de sensibilidade baseada na comparação de duas combinações de valores dos parâmetros: uma combinação para o motorista “cauteloso”, e outra para o motorista “agressivo”.

Ainda sobre as análises de sensibilidade, é importante ressaltar que muitos trabalhos realizam testes estatísticos de igualdade de médias para avaliar a relevância de um parâmetro

na medida de desempenho (LOWNES E MACHEMEHL, 2006). Há uma desvantagem nesta abordagem, que é o fato de que significância estatística não implica em significância prática (WASHINGTON, 2000). Em outras palavras, as médias podem ser estaticamente diferentes, porém a diferença entre elas pode não ser relevante para a aplicação em estudo. Por esta razão, neste trabalho são utilizados intervalos de confiança (IC) para avaliar o tamanho do efeito do parâmetro nas medidas de desempenho, pois além do IC também fornecer o resultado do teste de igualdade de médias – bastando observar se o valor zero pertence ao intervalo, ele também fornece uma estimativa intervalar da diferença entre as médias, ou seja, do tamanho do efeito do parâmetro, com o grau de confiança e precisão escolhidos pelo analista.

A quinta etapa é a *Classificação dos parâmetros*, onde os parâmetros de cada modelo são classificados de acordo com o proposto por HOLLANDER E LIU (2008), ou seja, são agrupados os parâmetros que já tiveram seu valor definido em estudos anteriores, parâmetros que podem ser medidos diretamente em campo, parâmetros que não exercem influência para a modelagem empregada (no caso, análise de fluidez em ambiente urbano) e aqueles que não se encontram em nenhum desses três grupos, portanto, compõem o grupo dos parâmetros que precisam ser calibrados.

Do grupo de parâmetros que precisam ser calibrados, define-se os blocos de parâmetros e a estratégia de calibração de cada bloco, baseados nos métodos discutidos na revisão bibliográfica. Sendo assim, são definidas as medidas-alvo de cada bloco de parâmetro e a natureza dos dados (nível de agregação, tamanho da amostra, etc), as medidas de ajuste que são utilizadas para a calibração desses parâmetros, o tipo de calibração, podendo ser de forma isolada ou simultânea, manual ou automatizada.

A segunda fase é denominada de *Calibração*, cujo principal objetivo é consolidar a metodologia proposta de calibração do microssimulador e aplicá-la nas redes de corredores arteriais definidos para esta análise. Ainda nessa fase, a metodologia proposta será comparada com um processo de calibração automatizado e simultâneo por Algoritmos Genéticos (AG).

A primeira etapa da fase de *Calibração* é a *Coleta de Dados (Calibração)*, onde serão planejados e coletados os dados referentes às medidas-alvo para calibração e validação e as medidas de desempenho. É importante ressaltar que o método geral engloba duas etapas de coletas de dados, a primeira na fase de *Pré-Calibração*, referente aos dados necessários para a codificação das redes, visando auxiliar a etapa de *Análise do Efeito dos Parâmetros*, enquanto a segunda na fase de *Calibração*, inerente aos dados de Medidas de Desempenho, Medidas-Alvo e demais dados necessários para a calibração e validação dos modelos.

A segunda etapa já é mais focada no processo de calibração propriamente dito, denominada *Definição dos Cenários de Calibração*. Com a implantação do método, diferentes blocos de parâmetros foram encontrados, com diferentes estratégias de calibração, sendo elas manuais ou automatizadas. Nesta etapa são definidos os cenários de calibração de forma que seja possível observar a diferença das medidas de ajuste à medida que cada bloco de parâmetro seja calibrado, partindo da rede *default* até a calibração do último bloco. Dando continuidade, a terceira etapa é a *Simulação com Parâmetros Default*, que tem como principal objetivo permitir uma análise do quão representativos são os valores *default* dos parâmetros dos modelos, além de avaliar a consistência nos dados coletados.

Como alguns blocos de parâmetros são calibrados com Algoritmos Genéticos, a etapa seguinte trata-se justamente da *Configuração do AG*, com base nos cenários definidos na etapa anterior. Uma vez definidos os cenários de calibração e finalizada a configuração do AG, a etapa seguinte é a de *Calibração e Validação dos Modelos*, onde todos os blocos de parâmetros são calibrados e os AG executados de acordo com os cenários definidos.

Uma vez calibrados os parâmetros, os mesmos são validados de acordo com os distintos métodos descritos na revisão desta pesquisa. Dessa forma, serão utilizados subtrechos distintos e outras amostras de dados para verificar, tanto espacialmente quanto temporalmente, a adequabilidade dos parâmetros definidos e calibrados. Ainda nesta etapa, outras medidas de desempenho serão comparadas de forma a dar uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

O método conclui-se com a *Análise das Estratégias de Calibração*, atingindo o objetivo principal desta pesquisa. Nesta etapa, todo o procedimento é analisado e os diferentes métodos de calibração dos parâmetros são comparados de forma quantitativa e qualitativa, com base no entendimento de cada parâmetro, do fenômeno em análise e nos valores encontrados em cada método de calibração. De forma mais específica, os valores obtidos pelos parâmetros, em função de cada método - automatizado e simultâneo em comparação com manual e sequenciado) - será analisado de acordo com as medidas de ajuste definidas.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Fase de pré-calibração

A fase de pré-calibração inicia-se com a compreensão dos parâmetros de cada modelo comportamental do VISSIM. Nessa primeira etapa, todos os questionamentos levantados no capítulo de revisão dos modelos comportamentais foram analisados através de redes hipotéticas e experimentos específicos. A segunda etapa trata da definição da área de estudo seguida da etapa de coleta de dados necessários para a codificação das redes que serão utilizadas em todo este estudo de caso.

A etapa seguinte trata da análise do impacto dos parâmetros nas medidas de desempenho. Para o caso do modelo de *car-following*, foi identificado qual dos modelos (W74 ou W99) é mais indicado para modelagem do tráfego urbano e quais os efeitos de cada parâmetro, incluindo os parâmetros que não fazem parte do modelo original de Wiedemann (1974). O mesmo foi realizado para os parâmetros dos demais modelos de *lane-changing*, *lateral movements*, *gap-acceptance*.

Dando continuidade, a quinta etapa trata da classificação dos parâmetros. A conclusão desta etapa dará embasamento para a seleção dos blocos de parâmetros a serem calibrados e as principais estratégias de calibração de cada um deles, permitindo, assim, o início da fase de *Calibração*.

5.1.1 Compreensão dos parâmetros

A etapa de *Compreensão dos parâmetros* se faz necessária para o esclarecimento dos questionamentos levantados na etapa de revisão bibliográfica sobre os parâmetros do microsimulador. Para cada parâmetro, foram criadas redes hipotéticas e experimentos específicos para auxiliar no entendimento dos mesmos.

5.1.1.1 Parâmetros de *car-following*

Com relação aos parâmetros de *car-following*, os parâmetros de Wiedemann foram compreendidos na revisão da literatura, restando, então, questionamentos sobre os 9 parâmetros que não estão nos modelos de Wiedemann. Com relação aos parâmetros de *LAD*, segundo MILLER (2009), o *MinLAD* só é utilizado se os veículos são autorizados a conduzir lado a lado em uma mesma faixa, como o caso de carros e bicicletas. Contudo, observou-se que este

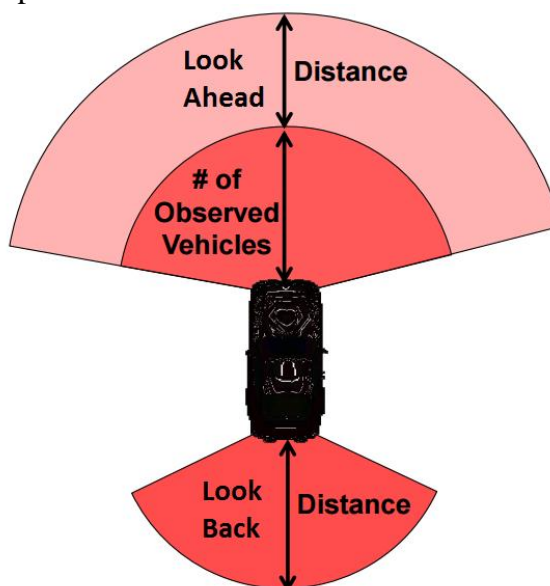
parâmetro pode influenciar medidas de desempenho como a velocidade média mesmo quando veículos não estão conduzindo lado a lado em uma mesma faixa. Para essa verificação, redes hipotéticas foram criadas e foram avaliadas as diferenças entre os tempos de viagem. Mesmo não havendo ultrapassagens em uma mesma faixa, o parâmetro *MinLAD* apresentou diferenças, embora insignificantes, no valor dos tempo de viagem.

Isso ocorre porque o condutor levará em consideração inicialmente o número de veículos à sua frente (*OV*), seguido pelo *MinLAD* e o *MaxLAD*. Tomando como exemplo o valor *default* de 4 veículos a serem observados, o *MinLAD* só irá interferir no *following* caso o seu valor ultrapasse a posição do 4º veículo à frente. Esta medida, no meio urbano (espaçamento pequeno entre os veículos), com parâmetros *default* de W74 e W99, está em torno de 35m. Qualquer outro valor abaixo deste não terá influência, pois o que estará prevalecendo é a posição do 4º veículo à frente (parâmetro *OV*), e não mais o *MinLAD*.

Caso o número de veículos observados seja 2, por exemplo, o valor de *MinLAD* que pode impactar nas medidas de desempenho já é menor, em torno de 20m, haja vista que a posição do 2º veículo à frente é quem irá ditar o comportamento de *following*. É importante ressaltar que não existe um valor fixo de *MinLAD* que influencie as medidas de desempenho em função do número de veículos observados. Isso varia com os demais parâmetros de *following* (*ax*, *bx_add*, etc) e com as condições da rede - se a rede encontra-se congestionada, o espaçamento entre os veículos é menor, por exemplo. A Figura 11 ilustra a situação entre o número de veículos observados e o *MinLAD*.

O fato de o manual indicar que o valor do *MinLAD* deve ser maior que zero para o caso de veículos trafegando lateralmente na mesma faixa, como bicicletas, significa que caso o condutor atinja o valor de *OV* (por *default* 4), ele será forçado a olhar mais à frente, de acordo com o valor estipulado no *MinLAD*. Por exemplo, supondo que duas bicicletas estejam trafegando ao lado do veículo, ele só irá observar mais dois veículos à sua frente, já que o valor de *OV* é 4. Isso pode fazer com que o condutor não reaja a tempo a determinados objetos que estejam mais distantes. Sendo assim, faz-se necessário aumentar o valor de *MinLAD*, para 30m por exemplo, para que ele seja sempre forçado a observar, no mínimo, essa distância e não somente os 4 veículos do *OV*. A Figura 11 ilustra o comportamento dos veículos com os parâmetros do *LAD*.

Figura 11 – Comportamento do *Look ahead distance* e *Look back distance*



Fonte: PTV (2010).

O *Temporary Lack of Attention (TLA)* não é específico para cada tipo de fenômeno/obstáculo, como por exemplo, reação ao semáforo. Dessa forma, o valor da frequência se aplica à quantidade de condutores na rede. Os parâmetros estão ligados somente às acelerações e desacelerações, não contemplando, por exemplo, movimentos laterais. Sendo assim, se o veículo não está em uma situação de frenagem de emergência, nem em uma desaceleração controlada por um obstáculo permanente, nem em final de pista ou em uma área de velocidade reduzida, a aceleração/desaceleração é definida como zero, com duração determinada pelo parâmetro *duration*, simulando a falta de atenção (ou falta de reação) dos condutores sob um percentual especificado pelo parâmetro *probability*.

O parâmetro *standstill distance for static obstacles* não apresentou dúvidas com relação ao seu conceito. A sessão a seguir aborda os questionamentos referentes aos parâmetros dos modelos de *lane-changing*, *lateral movements* e *gap acceptance*.

5.1.1.2 Parâmetros de Lane changing

Com relação aos parâmetros de mudança de faixa, aqueles que apresentaram questionamentos com relação ao seu papel na modelagem do tráfego foram o *lane change distance*, *min. headway front/rear* e *safety distance reduction factor*. Os esclarecimentos desses parâmetros encontram-se abaixo.

Em um experimento controlado, foram vistos as acelerações dos veículos para diferentes valores de *lane change distance* e percebeu-se que, caso o valor seja pequeno (50m,

por exemplo), o veículo já inicia a desaceleração com uma taxa mais alta que a mínima. Em determinados casos, dependendo da velocidade inicial do veículo, o mesmo não conseguia parar a tempo, mesmo iniciando a frenagem com a desaceleração máxima.

Com relação ao *min. headway front/rear*, o que prevalece no VISSIM 8.0 é a distância entre os veículos após a mudança de faixa, assim como nas versões 6.0 e 7.0 do *software*. Dessa forma, dependendo do valor do *min. headway front/rear*, o condutor irá avaliar se o espaçamento modelado pelo *car-following* é suficiente para realizar a mudança de faixa. Dependendo do valor deste parâmetro, o veículo pode se inserir mais facilmente na corrente de tráfego da faixa vizinha, impactando no movimento longitudinal dos veículos que nela se encontram.

O parâmetro *safety distance reduction factor* surge então para facilitar as mudanças de faixa, reduzindo o valor da distância de segurança para permitir as manobras. O valor deste parâmetro é multiplicado pela distância de segurança original. Logo, caso o valor seja 0,6, a distância de segurança para mudanças de faixa será 60% da original. Caso o valor seja 1,0, essa distância será igual (já que a original será multiplicada por 1), e caso seja 0,0, isso faz com que não haja distância de segurança para mudança de faixa, e os veículos farão manobras muito agressivas.

5.1.2 Definição da área de estudo

Para a aplicação do método proposto nesta pesquisa, foram utilizados dois corredores de Fortaleza com características distintas, sendo o primeiro deles um trecho da Av. Santos Dumont, uma via arterial unidirecional com duas faixas de tráfego misto que encontra-se numa das regiões mais adensadas da cidade, com uso do solo predominantemente comercial. O trecho escolhido da Av. Santos Dumont, é composto por nove interseções em nível, das quais cinco são semaforizadas, limitando-se a oeste pela Rua João Cordeiro e a leste pela avenida Barão de Studart, totalizando cerca de 1,2km de extensão. O trecho conta ainda com quatro pontos de parada de ônibus. A Figura 12 apresenta uma imagem da localização do trecho escolhido da Av. Santos Dumont. Para fins de calibração e validação, o trecho escolhido da Av. Santos Dumont foi subdividido em dois subtrechos com aproximadamente a mesma extensão.

Figura 12 – Corredor arterial Av. Santos Dumont

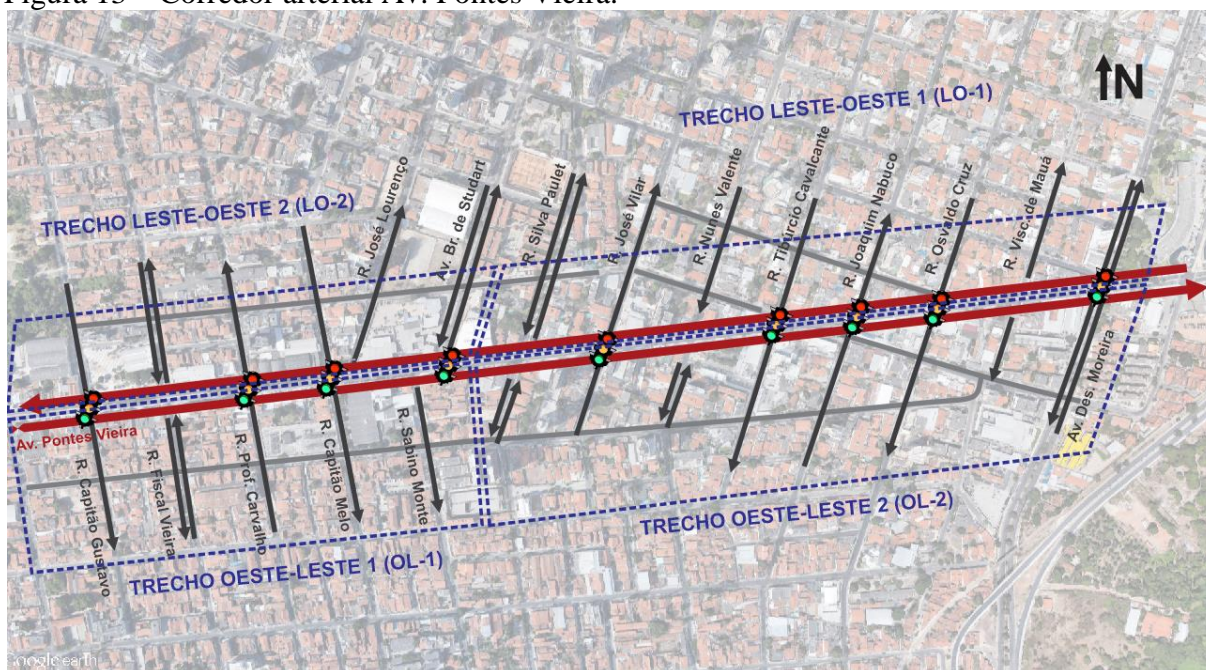


Fonte: Elaborada pelo autor.

O segundo corredor é composto por um trecho da Av. Pontes Vieira, uma via arterial com 1,5 km de extensão e sentido duplo de circulação, com duas faixas de tráfego por sentido separadas por um canteiro central. Um dos motivos para a escolha do corredor da Av. Pontes Vieira foi o fato deste trecho (cerca de 1,5km) possuir todos os semáforos operando na mesma subárea e com tempo fixo durante o período da coleta, permitindo assim que a simulação represente fidedignamente a operação semafórica.

O trecho em análise da Av. Pontes Vieira tem um uso predominantemente comercial e trata-se de um importante corredor de ligação leste-oeste da cidade de Fortaleza. O trecho conta com 16 interseções em nível, sendo nove semaforizadas, limitadas a oeste pela R. Capitão Gustavo e a leste pela Av. Desembargador Moreira, seis pontos de parada de ônibus por sentido e nenhum retorno permitido ao longo da avenida. Além disso, é importante ressaltar que em nenhuma das interseções não semaforizadas é permitido cruzar a Av. Pontes Vieira, ou seja, o canteiro central só é aberto nos cruzamentos semaforizados. O item a seguir detalha a coleta de dados inicial realizada para a codificação das redes no simulador. A Figura 13 apresenta a localização do trecho escolhido da Av. Pontes Vieira.

Figura 13 – Corredor arterial Av. Pontes Vieira.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3 Coleta de dados para a Codificação

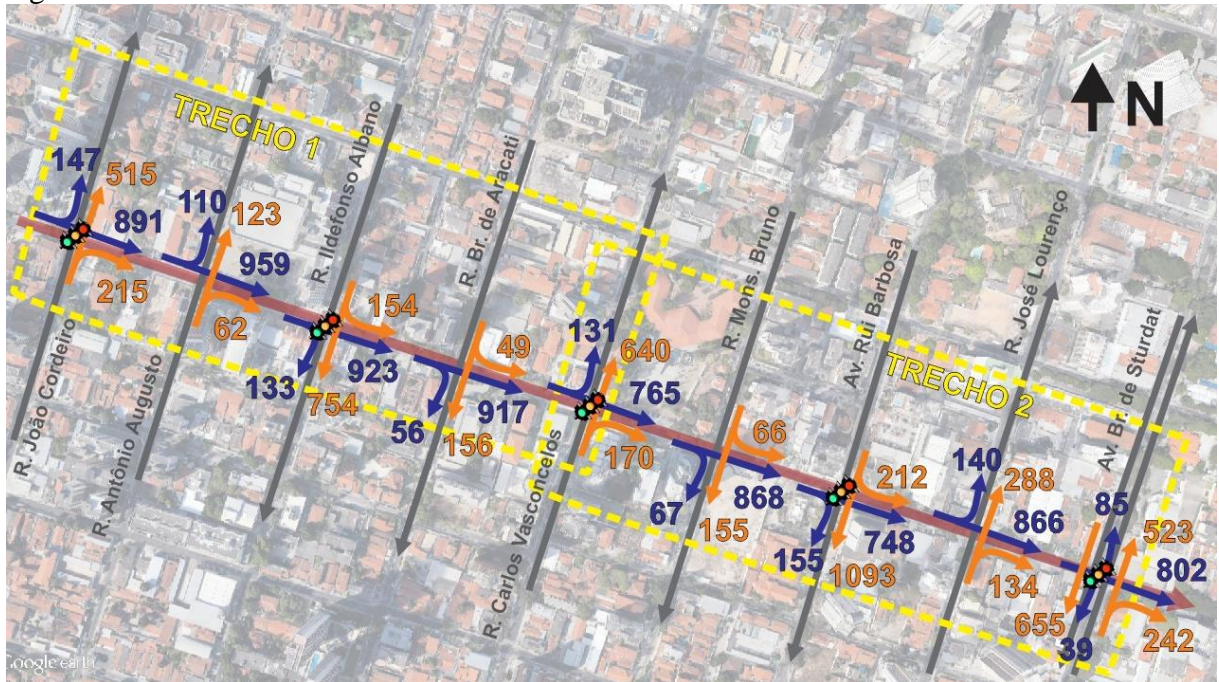
A coleta de dados inicial realizada nesta pesquisa tem seu foco voltado para a codificação das redes no simulador. A codificação dessas redes dá embasamento para a etapa seguinte de *Análise do efeito dos parâmetros*, na qual foram utilizadas as duas redes aqui descritas. Para cada um dos corredores escolhidos (Av. Santos Dumont e Av. Pontes Vieira), foram coletados dados relativos à demanda veicular, tempos semafóricos, linhas de transporte público e *headways* dos coletivos e, por fim, características físicas das redes como largura de faixas, posição de pontos de parada, dentre outros. Os dados obtidos em campo para cada um dos corredores são descritos a seguir.

5.1.3.1 Demanda Veicular e Planos semafóricos

Os dados de demanda veicular direcional foram coletados através de contadores manuais, em todas as interseções dos corredores escolhidos, com períodos de agregação de 15 minutos. Para a Av. Santos Dumont, as coletas foram realizadas no período da manhã (de 7h às 8h) de uma quarta-feira, dia 30 de abril de 2014, enquanto para a Av. Pontes Vieira, as coletas foram realizadas em duas quartas-feiras, dias 19 e 26 de outubro de 2016, no período de 7h às 9h. Além dos contadores manuais para os volumes direcionais, foram realizadas contagens classificatórias através de câmeras posicionadas em pontos específicos ao longo dos trechos

definidos. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos para a Av. Santos Dumont, com os volumes agregados na hora de coleta (7h às 8h). Os dados relativos à Av. Pontes Vieira encontram-se no Apêndice A, com agregações a cada 15 minutos, para os dois dias de coleta.

Figura 14 – Volumes coletados Av. Santos Dumont



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados relativos às programações dos semáforos foram obtidos junto ao Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR), os quais continham todas as informações de repartições de verde, ciclos semafóricos, diagrama de estágios e defasagens entre os semáforos. Nos dias das coletas dos dados, coordenadores acompanharam com um cronômetro todas as programações enviadas pelo CTAFOR.

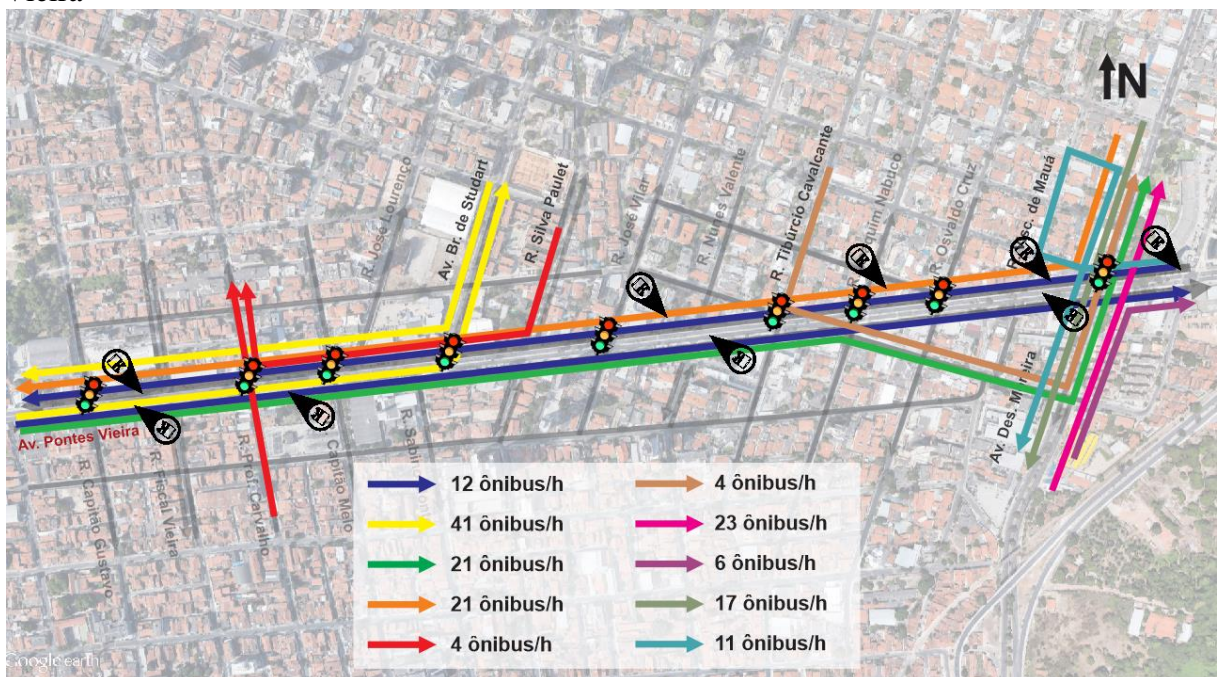
5.1.3.2 Transporte Público

Os dados relativos ao transporte público necessários para a codificação da rede são os *headways*, rotas dos coletivos e posição dos pontos de parada. Todos os dados foram fornecidos pela Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR). Com relação à Av. Santos Dumont, só haviam linhas de transporte público no próprio corredor arterial, percorrendo todo o trecho escolhido, e na Av. Barão de Studart (via correspondente à extremidade leste do trecho escolhido). A Av. Santos Dumont conta com 10 linhas de transporte

público, resultando num *headway* médio de 1min e 18s, correspondendo a cerca de 42 ônibus/hora.

Para a Av. Pontes Vieira, diferentes rotas foram identificadas por diferentes linhas de transporte público. A Figura 15 apresenta o *headway* médio de cada rota encontrada, assim como a posição dos pontos de parada. Em resumo, o trecho com maior concentração de ônibus desta avenida é o localizado entre a R. Capitão Gustavo e a Av. Barão de Studart, com uma média de 78 ônibus/hora.

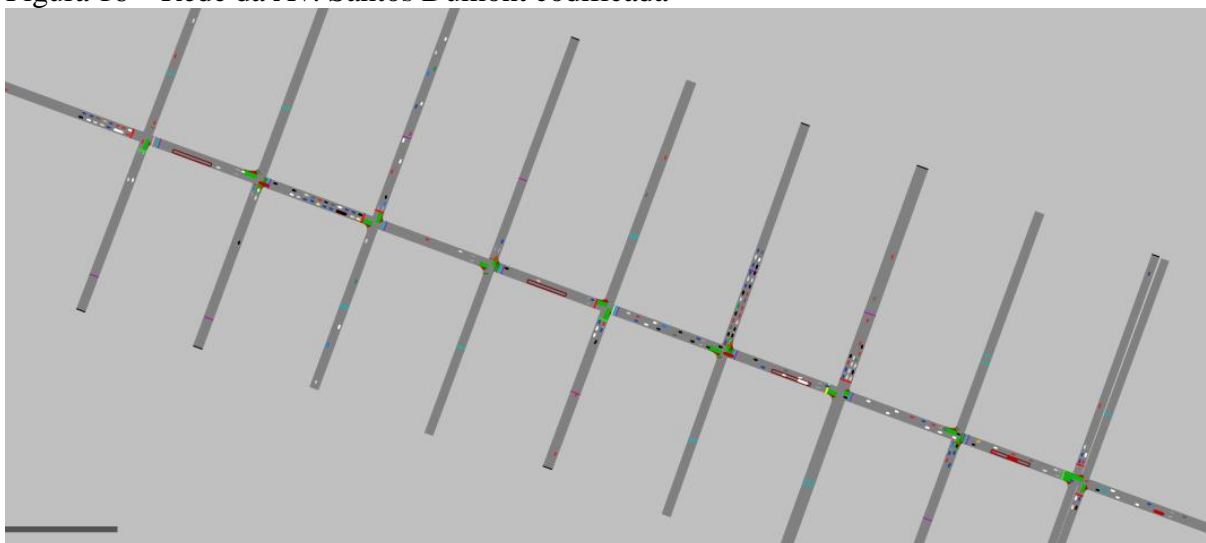
Figura 15 – Rotas, *headways* e localização dos pontos de parada dos ônibus da Av. Pontes Vieira



Fonte: Elaborada pelo autor.

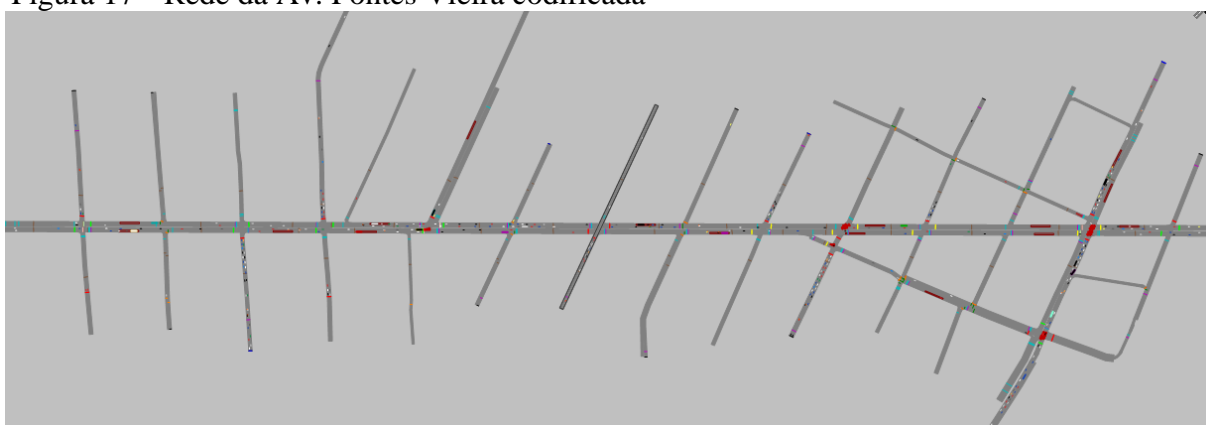
Após coletados os dados nesta etapa, as redes de ambos os corredores foram codificadas no microsimulador VISSIM. As Figura 16 e Figura 17 apresentam uma imagem do simulador do corredor da Av. Santos Dumont e da Av. Pontes Vieira, respectivamente.

Figura 16 – Rede da Av. Santos Dumont codificada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Rede da Av. Pontes Vieira codificada



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.4 Análise do efeito dos parâmetros nas medidas de desempenho

Inicialmente foram definidas as medidas de desempenho a serem consideradas para a análise dos efeitos dos parâmetros. Por se tratar da análise de fluidez em tráfego urbano, foram definidas como medida de desempenho as velocidades médias nos diferentes trechos dos corredores e atrasos nas interseções. A Análise de Sensibilidade foi realizada de acordo com os parâmetros dos modelos, sendo eles: modelo de *Wiedemann 74*, *Wiedemann 99*, demais parâmetros de *car-following*, modelo de *lane-changing*, modelo de *lateral movements* e modelos de *gap-acceptance*. No total, 50 parâmetros foram avaliados de acordo com seus limites mínimo e máximo e, para cada limite de cada parâmetro, 10 simulações de 1h e 5min foram realizadas, sendo 5min de *warm-up*, totalizando 1.000 simulações para cada corredor

arterial. O conjunto de sementes aleatórias foi mantido constante entre os níveis dos parâmetros.

Para automatizar o processo de análise de sensibilidade, foi desenvolvido uma rotina computacional no programa *Python 2.7*. A análise de sensibilidade para a rede da Av. Santos Dumont se deu no trecho 2 destacado na Figura 12, enquanto, para a Av. Pontes Vieira, no sentido oeste-leste de todo o corredor. Para cada uma das redes, foram coletados tempos de viagem (por conseguinte velocidade média) e o atraso na interseção de entrada de cada rede, todos com nível de agregação de 15 minutos. Sendo assim, para cada limite de cada parâmetro foram simulados 4 valores de tempo de viagem, velocidade média e atraso, já que as simulações eram de 1h e 5min, totalizando 40 observações para cada parâmetro, pois foram feitas 10 replicações por cenário de simulação. Esse número foi escolhido para se valer do teorema do limite central na construção dos intervalos de confiança, para relaxar a premissa de normalidade da variável média das diferenças pareadas da medida de desempenho entre os cenários.

As análises de sensibilidade foram feitas inicialmente para cada parâmetro isoladamente, mantendo os demais com valor *default*, e, em seguida, a fim de avaliar a interação entre os parâmetros, foram criados perfis de motoristas cautelosos e agressivos para cada um dos modelos analisados. Por fim, foram utilizados intervalos de confiança (IC) para avaliar o tamanho do efeito de cada parâmetro nas medidas de desempenho, assim como verificar o teste de igualdade de médias.

5.1.4.1. Parâmetros de *car-following*

A primeira decisão que o usuário do VISSIM precisa tomar para a modelagem de *car-following* é qual algoritmo utilizar. Embora o manual recomende o W74 para o tráfego urbano e o W99 para o tráfego de rodovias, ele não oferece razões para esta recomendação. Para melhor avaliar esta sugestão, realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 ao CC9 do W99, que são parâmetros adicionais trazidos pelo algoritmo com relação ao W74. Dessa forma, foram realizadas as análises de sensibilidade para o modelo de *car-following*, conforme descrito no capítulo da metodologia proposta.

Para a análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, cada parâmetro foi variado em dois níveis, com os valores limites retirados do trabalho de LOWNES E MACHEMEHL (2006), tomando-se cuidado em alocar os níveis ao devido tipo de motorista. Os valores utilizados foram os seguintes. Motorista cauteloso: CC3 = -15s (máx); CC4 = -2,0 (máx); CC5 = 2,0 (máx); CC6 = 20m/s² (máx); CC7 = 0,15m/s² (mín); CC8 = 2,0m/s² (mín) e CC9 =

0,65m/s² (mín). Motorista agressivo: CC3 = -4,0s (mín); CC4 = -0,1s (mín); CC5 = 0,1 (mín); CC6 = 2,0m/s² (mín); CC7 = 0,5m/s² (máx); CC8 = 3,5m/s² (máx) e CC9 = 2,3m/s² (máx). A Tabela 4 e a Tabela 5 mostram os resultados das análises de sensibilidade empregadas para a Av. Santos Dumont (Trecho 2) e Av. Pontes Vieira (Sentido oeste/leste), respectivamente.

Tabela 4 – Análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 a CC9 do W99 (Av. Santos Dumont)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Veloc. Média (Km/h) | IC (95%) Veloc. Média (Km/h) | |
|---------------------------------|-------|-------|------------------------|---------------------------------|------|
| CC3 (-8,0s) | Baixo | -4,0 | 20,0 | -1,0 | 0,0 |
| | Alto | -15,0 | 19,5 | | |
| CC4 / CC5 (±0,35) | Baixo | ±0,10 | 19,4 | -1,3 | -0,2 |
| | Alto | ±2,00 | 18,6 | | |
| CC6 (11,44m/s ²) | Baixo | 2,0 | 19,8 | -0,3 | 0,3 |
| | Alto | 20,0 | 19,8 | | |
| CC7 (0,25m/s ²) | Baixo | 0,15 | 19,7 | -0,3 | 0,5 |
| | Alto | 0,50 | 19,8 | | |
| CC8 (3,5m/s ²) | Baixo | 2,0 | 19,3 | 0,0 | 1,1 |
| | Alto | 3,50 | 19,9 | | |
| CC9 (1,5m/s ²) | Baixo | 0,65 | 19,6 | -0,3 | 0,6 |
| | Alto | 2,30 | 19,8 | | |
| Motorista Cauteloso | | --- | 19,6 | 1,9 | 2,4 |
| Motorista Agressivo | | --- | 21,6 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise de sensibilidade da Av. Santos Dumont, os valores de velocidade média com os parâmetros todos com valor *default* foram 19,9 km/h e 16,9 s, respectivamente. Na análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, a maior diferença entre as médias amostrais das velocidades médias foi de apenas 1,4 km/h, o que para o trecho em estudo (0,5 km), representa uma diferença de tempo de viagem de apenas 6,0 segundos. Vale notar que todos os IC incluíram o zero, menos para o parâmetro CC4/CC5, porém com limite inferior praticamente zero (0,2 km/h). O maior valor dos extremos dos IC foi de -1,3 km/h, para o CC4/CC5, o que é uma diferença relativamente pequena frente aos intervalos das classes de níveis de serviço do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010). No que diz respeito ao atraso veicular médio, a maior diferença encontrada foi de 1,0 s/veíc, e os IC para todos os parâmetros mostram intervalos bastante estreitos e próximos de zero, o que indica que em termos práticos não houve efeito dos parâmetros nesta medida de desempenho.

Tabela 5 – Análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 a CC9 do W99 (Av. Pontes Vieira)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Veloc. Média (Km/h) | IC (95%) Veloc. Média (Km/h) | |
|---------------------------------|-------|-------|------------------------|---------------------------------|------|
| CC3 (-8,0s) | Baixo | -4,0 | 28,5 | -1,6 | -0,9 |
| | Alto | -15,0 | 27,2 | | |
| CC4 / CC5 (±0,35) | Baixo | ±0,10 | 28,2 | -0,8 | -0,1 |
| | Alto | ±2,00 | 27,7 | | |
| CC6 (11,44m/s ²) | Baixo | 2,0 | 28,2 | -0,4 | 0,3 |
| | Alto | 20,0 | 28,1 | | |
| CC7 (0,25m/s ²) | Baixo | 0,15 | 27,8 | -0,2 | 0,7 |
| | Alto | 0,50 | 28,0 | | |
| CC8 (3,5m/s ²) | Baixo | 2,0 | 28,1 | -0,5 | 0,2 |
| | Alto | 3,50 | 27,9 | | |
| CC9 (1,5m/s ²) | Baixo | 0,65 | 28,0 | -0,2 | 0,4 |
| | Alto | 2,30 | 28,0 | | |
| Motorista Cauteloso | | --- | 27,1 | 1,5 | 2,0 |
| Motorista Agressivo | | --- | 28,7 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise de sensibilidade da Av. Pontes Vieira, os valores de velocidade média com os parâmetros todos com valor *default* foram 27,9 km/h e 13,9 s, respectivamente. Na análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, a maior diferença entre as médias amostrais das velocidades médias foi de apenas 1,6 km/h, o que para o trecho em estudo (1,5 km), representa uma diferença de tempo de viagem de apenas 11,0 segundos. Vale notar que todos os IC incluíram o zero, menos para os parâmetros CC3 e CC4/CC5, porém com limite inferior entre 0 e 1 (0,9 e 0,1 km/h, respectivamente). O maior valor dos extremos dos IC foi de -1,6 km/h, para o CC3, o que é uma diferença relativamente pequena frente aos intervalos das classes de níveis de serviço do HCM (TRB, 2010). No que diz respeito ao atraso veicular médio, a maior diferença encontrada foi de 1,5 s/veíc., e os IC's para todos os parâmetros mostram intervalos bastante estreitos e próximos de zero, o que indica que em termos práticos não houve efeito dos parâmetros nesta medida de desempenho.

Para a análise de sensibilidade de comparação dos tipos de motoristas, o IC da velocidade média resultou numa diferença média de 2,0 km/h, ou de aproximadamente 9 segundos, para a Av. Santos Dumont, e 1,6 km/h para a Av. Pontes Vieira, equivalente a cerca de 12 segundos. Tendo em vista que os valores dos níveis dos parâmetros foram relativamente distantes dos valores *default*, e ainda que a combinação dos parâmetros maximizam o nível de agressividade e de prudência considerando os limites de cada parâmetro, os resultados das análises de sensibilidade mostram que a utilização do mais complexo modelo W99 do VISSIM

não traz benefícios para estudos de simulação de velocidade média e atraso médio em vias arteriais urbanas como a analisada neste experimento.

Ainda sobre o modelo de *car-following*, foram realizadas as mesmas análises de sensibilidade para os parâmetros do modelo de W74 e para os demais nove parâmetros que não estão nos modelos de Wiedemann. Para o caso dos parâmetros do modelo W74, foram definidos como limites os valores encontrados por KIM E RILLET (2005) como prováveis, sendo eles $ax = [1-4]$ m, $bx_add = [1-10]$ m e $bx_mult = [1-10]$. Os resultados para a Av. Santos Dumont e Av. Pontes Vieira encontram-se na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6 – Análise de sensibilidade do modelo W74 de *car-following* para Av. Santos Dumont

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | |
|---------------------------------|-------|--------|----------------------|----------------------------|------|
| ax (2,0 m) | Baixo | 1,0 m | 20,3 | -4,9 | -3,2 |
| | Alto | 4,0 m | 15,8 | | |
| bx_add (2,0 m) | Baixo | 1,0 m | 20,3 | -9,3 | -8,3 |
| | Alto | 10,0 m | 11,4 | | |
| bx_mult (3,0) | Baixo | 1,0 | 20,3 | -6,2 | -4,4 |
| | Alto | 10,0 | 14,4 | | |
| Cauteloso | --- | --- | 10,7 | 11,8 | 12,6 |
| Agressivo | --- | --- | 22,7 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados, é notório o impacto representativo dos três parâmetros nas medidas de desempenho. O bx_add foi o que apresentou maior amplitude nos valores das médias das velocidades, em ambos os corredores analisados. Para a rede da Av. Santos Dumont, a velocidade média *default* simulada foi 19,5 km/h, e os parâmetros ax , bx_add e bx_mult apresentaram, nos seus valores máximos, diferenças de 23%, 71% e 35%, respectivamente, enquanto para a Av. Pontes Vieira, que teve como valor *default* 28,3 km/h, as diferenças foram de 4%, 34% e 10%, mostrando que o primeiro corredor é bem mais sensível a esses parâmetros.

Tabela 7 – Análise de sensibilidade do modelo W74 de *car-following* para Av. Pontes Vieira

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | |
|---------------------------------|-------|--------|----------------------|----------------------------|------|
| ax (2,0 m) | Baixo | 1,0 m | 28,4 | -1,7 | -0,8 |
| | Alto | 4,0 m | 27,12 | | |
| bx_add (2,0 m) | Baixo | 1,0 m | 28,6 | -7,9 | -6,6 |
| | Alto | 10,0 m | 21,1 | | |
| bx_mult (3,0) | Baixo | 1,0 | 28,9 | -3,6 | -2,3 |
| | Alto | 10,0 | 25,7 | | |
| Cauteloso | --- | --- | 18,9 | 10,1 | 11,2 |
| Agressivo | --- | --- | 29,3 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Avaliando os resultados dos motoristas cautelosos e agressivos, observa-se, para a Av. Santos Dumont, que a velocidade média para o agressivo é mais que o dobro da velocidade do cauteloso, enquanto o atraso é praticamente 10 vezes maior para o cauteloso em comparação ao *default*. No caso da Av. Pontes Vieira, a velocidade do motorista agressivo foi aproximadamente 60% maior e o atraso do cauteloso estava na ordem de 3,5 vezes o atraso *default*.

Para os demais parâmetros de *car-following* que não estão nos modelos de Wiedemann, os limites foram definidos com base na literatura ou em valores usuais em campo, de acordo com o entendimento do fenômeno em análise. Para os parâmetros que não puderam ser encontrados na literatura ou ter valores estipulados com base no conhecimento do fenômeno, foi adotado a metade do valor *default* para os valores baixos e o dobro do valor *default* para os valores altos. Os limites dos parâmetros encontram-se na Tabela 8.

Com relação aos parâmetros de *LAD* e *LBD*, quanto maior os valores, mais cautelosos serão os condutores, já que tendem a reagir mais antecipadamente. Portanto, os valores baixos desses parâmetros configuram motoristas agressivos. Para o caso do *MinLAD*, o valor baixo é o próprio valor *default*, que é 0,0 m e o valor alto foi estipulado de acordo com o manual, que sugere em torno de 40 m. O valor baixo do *MaxLAD* foi estabelecido segundo o aceitável por GAO (2008), sendo 90 m, e o valor alto foi colocado 410 m, representando a mesma diferença entre o *default* e o mínimo. O valor baixo do *OV* foi estipulado de acordo com MILLER (2009), com o valor de 2, e valor alto de 6, por considerar que este já é um valor elevado para a visibilidade do condutor. Os parâmetros de *MinLBD* e *MaxLBD* seguiram a mesma lógica dos parâmetros de *LAD*, porém, para o valor máximo do *MaxLBD*, foi utilizado o valor do dobro do *default*.

Tabela 8 – Valores limites dos parâmetros de *car-following* e indicação do comportamento agressivo (vermelho) e cauteloso (verde)

| Parâmetro | Valor <i>default</i> | Baixo | Alto |
|---|----------------------|------------------|------------------|
| <i>Min. Look Ahead Distance (MinLAD)</i> | 0,00 m | --- | 40 m |
| <i>Max. Look Ahead Distance (MaxLAD)</i> | 250,00 m | 90 m | 410 m |
| <i>Observed Vehicles (OV)</i> | 4,00 | 2,00 | 6,00 |
| <i>Min. Look Back Distance (MinLBD)</i> | 0,00 m | --- | 40 m |
| <i>Max. Look Back Distance (MaxLBD)</i> | 150,00 m | 90 m | 300 m |
| <i>Duration Temporary lack of attention</i> | 0,00 s | --- | 1,00 s |
| <i>Probability Temporary lack of attention</i> | 0,00 % | --- | 10,00 % |
| <i>Smooth Closeup behavior</i> | Desabilitado | --- | Habilitado |
| <i>Standstill distance for static obstacles</i> | Desabilitado | Habilitado 0.5 m | Habilitado 1.0 m |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os parâmetros de *TLA*, os valores *default* já representam os valores baixos, pois tratam-se de zeros. Como não há "falta de atenção", considerou-se que os valores baixos desses parâmetros configuram condutores agressivos, ao passo que àqueles motoristas com valores altos foram considerados cautelosos. O valor alto foi definido de acordo com WARREN (2016), com 1,0 s de tempo de *lack* com uma frequência de 10% dos condutores.

O parâmetro *smooth closeup behavior*, quando habilitado, apresenta taxas de desacelerações constantes, fazendo com que o condutor desacelere mais suavemente. Por esse motivo, a situação de desabilitado configurou-se como a do condutor agressivo. O parâmetro *standstill distance for static obstacles* segue o mesmo raciocínio do parâmetro *ax* de Wiedemann, ou seja, quanto maiores as distâncias, mais cautelosos são os condutores. Para esse parâmetro, considerou-se como valor baixo 0,5 m, por considerar que esta distância é a mínima factível em campo, e o valor alto de 1,0m, sendo o dobro do valor *default*. A Tabela 9 apresenta os valores das análises de sensibilidade realizadas.

Para a análise de sensibilidade da Av. Santos Dumont, os valores de velocidade média com todos os parâmetros com valor *default* foram 21,3 km/h e 16,1 s, respectivamente. De acordo com os resultados das análises de sensibilidade, percebe-se que os parâmetros de *LAD* não exercem influência significativa nos valores de velocidade média. Da mesma forma, os parâmetros do *LBD* e o *standstill distance for static obstacles* não exerceram impacto significativo nas medidas de desempenho. O parâmetro com maior impacto foi o *TLA*, apesar do IC conter o valor zero, e como esperado, quanto maior o seu valor de duração e probabilidade, mais reduzida é a capacidade da rede, aumentando tempos de viagem e atrasos. Além disso, o parâmetro *smooth closeup behavior* não apresentou o zero no intervalo de confiança para o atraso.

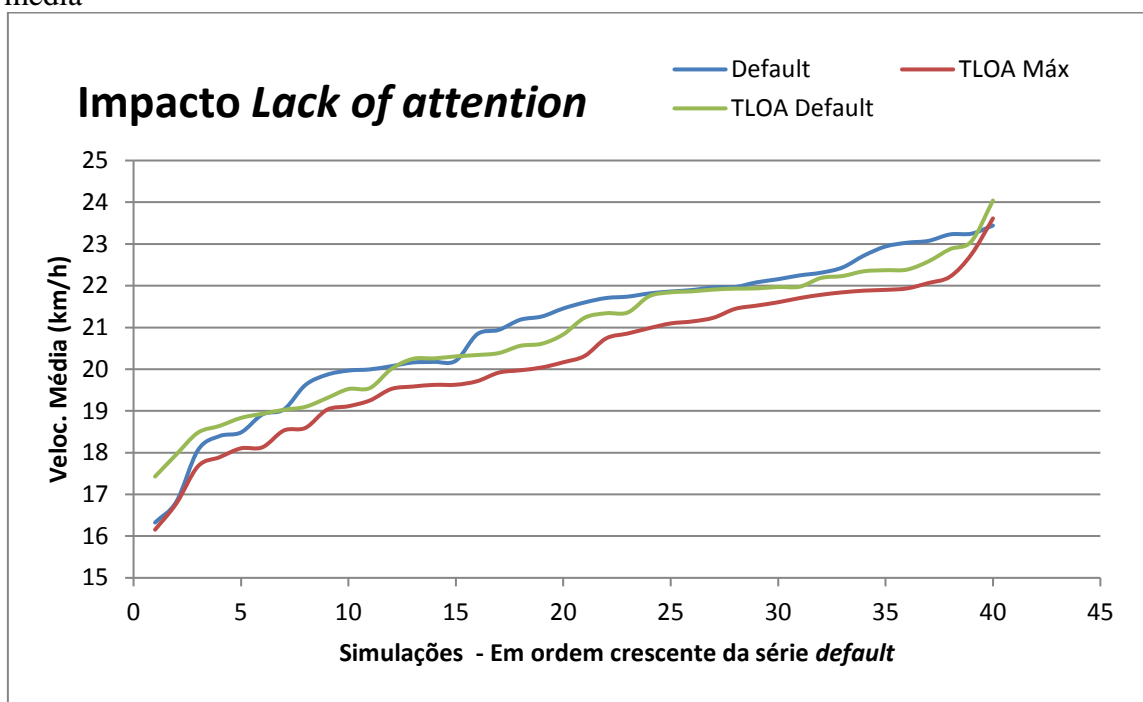
Tabela 9 – Análise de sensibilidade dos demais parâmetros de *car-following* (Av. Santos Dumont)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | |
|--|-------|------------------|-------------------|-------------------------------|-----|
| Min. Look Ahead Distance (0,00 m) | Baixo | 0,0 m | 21,3 | -0,3 | 0,6 |
| | Alto | 40 m | 21,4 | | |
| Max. Look Ahead Distance (250,0 m) | Baixo | 90 m | 21,6 | -0,4 | 0,2 |
| | Alto | 410 m | 21,5 | | |
| Observed Vehicles (4,00) | Baixo | 2,00 | 21,3 | -0,5 | 0,5 |
| | Alto | 6,00 | 21,3 | | |
| Min. Look Back Distance (0,00 m) | Baixo | 0,0 m | 21,3 | 0,0 | 0,0 |
| | Alto | 40 m | 21,3 | | |
| Max. Look Back Distance (150,00 m) | Baixo | 90 m | 21,1 | -0,3 | 0,5 |
| | Alto | 300 m | 21,2 | | |
| Dur Temporary lack of attention (0,00 s) Prob Temporary lack of attention (0,0 %) | Baixo | 0,00 s 00,0 % | 21,3 | -1,8 | 0,3 |
| | Alto | 1,00 s 10,0 % | 20,2 | | |
| Smooth Closeup behavior (<i>Desabilitado</i>) | Baixo | Desab | 19,5 | -1,2 | 0,0 |
| | Alto | | | | |
| Standstill dist for static obst (<i>Desabilitado</i>) | Baixo | Hab 0,5m | 21,3 | -0,3 | 0,4 |
| | Alto | Hab 1,0m | 21,4 | | |
| Cauteloso | | ---- | 20,3 | 0,8 | 1,5 |
| Agressivo | | ---- | 21,3 | | |
| Cauteloso (com TLOA <i>default</i>) | | ---- | 20,8 | 0,3 | 0,9 |
| Agressivo (com TLOA <i>default</i>) | | ---- | 21,3 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como os parâmetros de *TLOA* foram os que tiveram uma maior diferença em relação ao valor *default*, resolveu-se avaliar os condutores cauteloso e agressivo com e sem a presença (*default*) destes parâmetros. Ao considerar esses parâmetros, o motorista cauteloso apresentou uma velocidade média de 20,3 km/h, que comparada com o valor *default* de 21,3 km/h, representa uma redução de 1,0 km/h. O valor para o motorista agressivo não apresentou diferenças consideráveis, já que tem o seu valor de *TLOA* igual ao valor *default*. Para comprovar o impacto desses parâmetros, o motorista cauteloso com o *TLOA* em *default*, apresentou uma redução de apenas 3% (0,6 km/h) na velocidade média, comprovando que esse parâmetro é dominante em relação aos demais. O gráfico da Figura 18 ilustra esses resultados ordenados em ordem crescente.

Figura 18 – Gráfico da influência do parâmetro *Temporary lack of attention* na velocidade média



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o gráfico da Figura 18, percebe-se que variando todos os demais parâmetros e mantendo apenas os dois de *TLOA* com valor *default* (curva verde), os resultados obtidos se aproximam bastante da curva com todos os parâmetros em valor *default* (curva azul). Ao levar em consideração os parâmetros de *Lack of attention*, todas as médias caem (curva vermelha).

Os resultados para a rede da Av. Pontes Vieira foram similares aos da Av. Santos Dumont em termos proporcionais e encontram-se no Apêndice B. A única diferença que merece destaque foi que o parâmetro *smooth closeup behavior* não apresentou impacto significativo para o atraso, como ocorreu com a rede da Av. Santos Dumont. Da mesma forma, os parâmetros de *TLOA* foram os que apresentaram o impacto mais representativo, porém, da mesma forma da rede da Av. Santos Dumont, o zero estava contido nos IC.

5.1.4.2 Parâmetros de lane-changing

Para o modelo de *lane-changing* foi utilizado o mesmo procedimento dos demais parâmetros de *car-following*. A Tabela 10 apresenta os limites dos parâmetros definidos, assim como a definição de cauteloso ou agressivo de cada parâmetro, sendo o primeiro representado pelas células de cor verde e o segundo pelas células de cor vermelha. Para os parâmetros

relacionados às desacelerações dos veículos, quanto mais altos forem os valores das desacelerações máximas e aceitáveis, mais agressivos serão os condutores. Dessa forma, para os parâmetros *maximum deceleration (own e trailing vehicle)*, *accepted deceleration (own e trailing vehicle)* e *maximum deceleration for cooperative braking*, os valores baixos configuram um condutor cauteloso e os valores altos condutores agressivos. O parâmetro *-l m/s² per distance* teve seu valor baixo aplicável ao condutor agressivo pois quanto menor é esse valor, maior será a taxa de desaceleração a cada metro percorrido, fazendo com que a desaceleração aumente mais bruscamente, tornando o condutor mais agressivo.

Para o parâmetro *waiting time before diffusion* não foi alocado um valor alto pois julgou-se o valor *default* de 60 s já suficientemente alto para situações reais. Para o valor mínimo, estipulou-se como valor de 20 s. Como este parâmetro retira o veículo da simulação caso esse não consiga mudar de faixa, seu principal objetivo é que um veículo não bloqueie uma faixa por um tempo excessivo. Logo, entende-se que para tempos mais curtos, menor será o impacto negativo na capacidade, o que acontece com presença com motoristas mais agressivos. Para o parâmetro *min. headway (front/rear)*, semelhante aos parâmetros de *car-following*, quanto maior o *headway*, mais cauteloso é o condutor, sendo portanto o valor baixo aplicado à condutores agressivos. PARK E SCHNEEBERGER (2003) utilizaram este parâmetro com um valor máximo de 7,0 m. Porém, como essa distância é bastante alta para a realidade do tráfego urbano, adotou-se o valor de 3,0 m como valor máximo.

Para o parâmetro *safety distance reduction factor*, quanto menor seu valor, maior será a redução da distância de segurança. Logo, o valor baixo desse parâmetro representa uma redução da distância de segurança maior do que o valor alto, configurando motoristas agressivos. O parâmetro *overtake reduced speed areas* só é passível de ser habilitado ou desabilitado. Caso desabilitado, o condutor não leva em consideração as áreas de redução de velocidade durante uma mudança de faixa, comportamento entendido como agressivo.

Tabela 10 – Valores limites dos parâmetros de *car-following* e indicação do comportamento agressivo (vermelho) e cauteloso (verde)

| Parâmetros | | Valor <i>default</i> | Baixo | Alto |
|--|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Maximum deceleration | Own | -4,0 m/s ² | -2,0 m/s ² | -6,0 m/s ² |
| | Trailing Vehicle | -3,0 m/s ² | -1,5 m/s ² | -6,0 m/s ² |
| -1m/s ² per distance | Own | 100,0 m | 50,0 m | 200,0 m |
| | Trailing Vehicle | 100,0 m | 50,0 m | 200,0 m |
| Accepted deceleration | Own | -1,0 m/s ² | -0,5 m/s ² | 2,0 m/s ² |
| | Trailing Vehicle | -1,0 m/s ² | -0,5 m/s ² | 2,0 m/s ² |
| Waiting time before diffusion | | 60,0 s | 20,0 s | --- |
| Min. Headways (front/rear) | | 0,5 m | --- | 3,0 m |
| Safety distance reduction factor | | 0,6 | 0,2 | 0,8 |
| Maximum deceleration for cooperative braking | | -3,0 m/s ² | -1,5 m/s ² | -6,0 m/s ² |
| Overtake reduced speed areas | | Desabilitado | Habilitado | |
| Advanced merging | | Habilitado | Desabilitado | |
| Consider subsequent static routing decisions | | Desabilitado | Habilitado | |
| Cooperative lane change | | Desabilitado | Habilitado | |
| Maximum speed difference | | 10,80 Km/h | 5,0 Km/h | 20,0 Km/h |
| Maximum collision time | | 10,00 s | 5,0 s | 15,0 s |
| Lateral correction of rear end position | | Desabilitado | Habilitado | |
| Maximum Speed | | 3,0 Km/h | 1,5 Km/h | 6,0 Km/h |
| Active during time period from | | 1,0 s | 0,5 s | 2,0 s |
| After lane change start | | 10,0 s | 5,0 s | 20,0 s |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O parâmetro *advance merging*, como o próprio manual sugere, caso habilitado, proporciona mudanças de faixas mais facilitadas. Dessa forma, estando desabilitado, entende-se que configura-se como um motorista cauteloso, já que tem mudanças de faixa mais dificultadas. Para o *cooperative lane change*, entende-se que a situação desabilitada diminui a quantidade de mudanças de faixa, logo, proporciona maior fluidez à corrente de tráfego. Assim, o valor desabilitado foi atribuído ao condutor agressivo. Para os parâmetros do *cooperative lane change*, quanto mais difícil a mudança de faixa, ou seja, quanto menor forem os parâmetros de *max. speed difference* e *max. collision time*, mais agressivos serão os condutores.

Por fim, os para os parâmetros de *lateral correction*, caso habilitado, o veículo irá mover-se lateralmente, e terá um processo de mudança de faixa mais demorado, configurando-se em condutor cauteloso. Quanto maior o *max. speed*, mais veículos sofrerão efeito do *lateral correction*, portanto, mais cautelosos serão. Com relação ao intervalo de tempo (parâmetros *from* e *until*), quanto maior for este, mais demorada ocorrerá a correção lateral, logo, mais cautelosos serão. A Tabela 11 apresenta os valores das análises de sensibilidade realizadas inicialmente para a Av. Santos Dumont.

Tabela 11 – Análise de sensibilidade dos parâmetros de *lane changing* (Av. Santos Dumont)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | |
|---|-------|-----------------------|-------------------|-------------------------------|------|
| | | | | | |
| Max. deceleration (Own) (-4,0 m/s ²) | Baixo | -2,0 m/s ² | 18,9 | 0,1 | 1,2 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 19,8 | | |
| Max. decel. (Trailing Vehc.) (-3,0 m/s ²) | Baixo | -1,5 m/s ² | 19,8 | -0,6 | 0,2 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 19,5 | | |
| -1m/s ² per distance (Own) (100,0 m) | Baixo | 50,0 m | 19,1 | 0,1 | 0,8 |
| | Alto | 200,0 m | 19,7 | | |
| -1m/s ² per distance (Trailing Vehicle) (100,0 m) | Baixo | 50,0 m | 19,5 | 0,0 | 0,1 |
| | Alto | 200,0 m | 19,5 | | |
| Accepted decel. (Own) (-1,0 m/s ² m) | Baixo | -0,5 m/s ² | 19,5 | 0,0 | 0,0 |
| | Alto | 2,0 m/s ² | 19,5 | | |
| Accep. decel. (T. Vehic.) (-1,0 m/s ² m) | Baixo | -0,5 m/s ² | 19,5 | 0,0 | 0,0 |
| | Alto | 2,0 m/s ² | 19,5 | | |
| Waiting time before diffusion (60,0 s) | Baixo | 20,0 s | 20,0 | -0,8 | 0,0 |
| Min. Headways (front/rear) (0,5 m) | Alto | 3,0 m | 18,8 | -1,1 | -0,1 |
| Safety dist. reduction factor (0,6) | Baixo | 0,2 | 19,9 | -0,8 | 0,0 |
| | Alto | 0,8 | 19,5 | | |
| Max. Decel. for cooperative braking (-3,0 m/s ²) | Baixo | -1,5 m/s ² | 19,9 | -0,9 | 0,0 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 19,2 | | |
| Overtake red. speed areas (Desabilitado) | --- | Hab | 19,5 | 0,0 | 0,0 |
| Advanced merging (Habilitado) | --- | Desab | 19,3 | -0,2 | 0,6 |
| Cooperative lane change (Desabilitado) | --- | Hab | 19,7 | 0,0 | 0,3 |
| Maximum speed difference (10,80 Km/h) | Baixo | 5,0 Km/h | 19,5 | -0,1 | 0,4 |
| | Alto | 20,0 Km/h | 19,7 | | |
| Maximum collision time (10,00 s) | Baixo | 5,0 s | 19,7 | -0,1 | 0,1 |
| | Alto | 15,0 s | 19,7 | | |
| Lateral correction (Desabilitado) | --- | Hab | 19,5 | -0,1 | 0,1 |
| Maximum Speed (3,0 Km/h) | Baixo | 1,5 Km/h | 14,5 | -0,7 | 0,9 |
| | Alto | 6,0 Km/h | 14,3 | | |
| Active during time period from (1,0 s) | Baixo | 0,5 s | 13,8 | -0,5 | 0,9 |
| | Alto | 2,0 s | 14,1 | | |

| | | | | | |
|--|-------|--------|------|------|-----|
| <i>Active during time period until</i> (10,0 s) | Baixo | 5,0 s | 13,9 | -0,9 | 0,6 |
| | Alto | 20,0 s | 13,7 | | |
| Cauteloso | | ---- | 14,5 | 6,9 | 8,0 |
| Agressivo | | ---- | 21,7 | | |
| Cauteloso (Sem Lateral Correction) | | ---- | 20,4 | 1,2 | 1,6 |
| Agressivo (Sem Lateral Correction) | | ---- | 21,7 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise de sensibilidade da Av. Santos Dumont, os valores de velocidade média com os parâmetros todos com valor *default* foram 19,5 km/h e 16,1 s, respectivamente. Na análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, a maior diferença entre as médias amostrais das velocidades médias foi de 6,3 km/h (Tabela 11), o que para o trecho em estudo (0,5 km), representa uma diferença de tempo de viagem de 46 segundos, o que pode ser considerado uma variação considerável. Contudo, vale notar os únicos parâmetros nos quais os IC não incluíram o zero, foram o *max. deceleration (own)* e *-1 m/s² per distance (own)*, contudo, com o valor inferior do IC bem próximo de zero (0,1 km/h).

O maior valor dos extremos dos IC foi de -1,1 km/h, para o *min. headway front/rear*, o qual exerce uma influência indireta nos movimentos longitudinais dos veículos. Apesar de seu IC conter o zero, os parâmetros de *lateral correction* apresentaram a maior diferença entre as médias das velocidades, na ordem de 13 e 14 km/h, em comparação com o valor *default* de 19,5 km/h. O fato destes parâmetros apresentarem alto impacto é devido os mesmos serem habilitados juntamente com o parâmetro *keep lateral distance to vehicles on next lane(s)*, do modelo de *lateral movements*.

No que diz respeito ao atraso veicular médio, a maior diferença encontrada foi de 2,7 s/veíc., e os IC para todos os parâmetros mostram intervalos bastante estreitos e próximos de zero, o que indica que em termos práticos não houve efeito dos parâmetros nesta medida de desempenho.

Tendo em vista o impacto dos parâmetros de *lateral correction*, realizou-se duas análises distintas para os condutores cautelosos e agressivos, sendo uma com esses parâmetros desabilitados (*default*). Ao considerar esses parâmetros, o motorista cauteloso apresentou uma velocidade média de 14,5 km/h, que ao comparada com o valor *default* de 19,5 km/h, representa uma redução de 5,0 km/h ou 26%. O valor para o nível agressivo não apresentou diferenças consideráveis, já que tem o seu valor igual ao valor *default*. Para comprovar o impacto desses parâmetros, o motorista cauteloso com o *lateral correction* desabilitado, apresentou uma

diferença de 5% (0,9 km/h), comprovando que esse parâmetro é dominante em relação aos demais.

A Av. Pontes Vieira apresentou resultados proporcionalmente diferentes em comparação com a Av. Santos Dumont, apresentados na Tabela 12. Além dos parâmetros de *max. Deceleration (own)* e *-1 m/s² per distance (own)*, que não apresentaram o zero dentro do IC, a rede da Av. Pontes Vieira também apresentou desigualdade de médias nas velocidades para os parâmetros *max deceleration (trailing vehc)*, *min. headway fornt/rear*, *safety dist. reduction factor* e *advanced merging*. Para a análise de sensibilidade da Av. Santos Dumont, os valores de velocidade média e atraso com os parâmetros todos com valor *default* foram 28,3 km/h e 13,3 s, respectivamente.

Tabela 12 – Análise de sensibilidade dos parâmetros de *lane-changing* (Av. Pontes Vieira)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | |
|---|-------|-----------------------|-------------------|-------------------------------|------|
| Max. deceleration (Own) (-4,0 m/s ²) | Baixo | -2,0 m/s ² | 27,8 | 0,3 | 0,9 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 28,5 | | |
| Max. decel. (Trailing Vehc.) (-3,0 m/s ²) | Baixo | -1,5 m/s ² | 28,0 | 0,3 | 0,8 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 28,5 | | |
| -1m/s ² per distance (Own) (100,0 m) | Baixo | 50,0 m | 28,0 | 0,1 | 0,6 |
| | Alto | 200,0 m | 28,4 | | |
| -1m/s ² per distance (Trailing Vehicle) (100,0 m) | Baixo | 50,0 m | 28,2 | 0,0 | 0,4 |
| | Alto | 200,0 m | 28,4 | | |
| Accepted decel. (Own) (-1,0 m/s ² m) | Baixo | -0,5 m/s ² | 28,3 | -0,2 | 0,2 |
| | Alto | 2,0 m/s ² | 28,3 | | |
| Accep. decel. (T. Vehic.) (-1,0 m/s ² m) | Baixo | -0,5 m/s ² | 28,3 | -0,1 | 0,3 |
| | | 2,0 m/s ² | 28,3 | | |
| Waiting time before diffusion (60,0 s) | Baixo | 20,0 s | 28,4 | -0,2 | 0,1 |
| Min. Headways (front/rear) (0,5 m) | Alto | 3,0 m | 27,2 | -1,4 | -0,7 |
| Safety dist. reduction factor (0,6) | Baixo | 0,2 | 29,0 | -1,6 | -0,8 |
| | Alto | 0,8 | 27,8 | | |
| Max. Decel. for cooperative braking (-3,0 m/s ²) | Baixo | -1,5 m/s ² | 27,9 | -0,1 | 0,5 |
| | Alto | -6,0 m/s ² | 28,1 | | |
| Overtake red. speed areas (Desabilitado) | --- | Hab | 28,3 | 0,0 | 0,0 |
| Advanced merging | --- | Desab | 27,5 | 0,3 | 1,2 |

| | | | | | |
|---|-------|-----------|------|------|------|
| (Habilitado) | | | | | |
| Cooperative lane change (Desabilitado) | --- | Hab | 28,2 | -0,3 | 0,1 |
| Maximum speed difference (10,80 Km/h) | Baixo | 5,0 Km/h | 28,2 | -0,1 | 0,2 |
| | Alto | 20,0 Km/h | 28,3 | | |
| Maximum collision time (10,00 s) | Baixo | 5,0 s | 28,2 | -0,2 | 0,2 |
| | Alto | 15,0 s | 28,2 | | |
| Lateral correction (Desabilitado) | --- | Hab | 28,3 | -0,1 | 0,1 |
| Maximum Speed (3,0 Km/h) | Baixo | 1,5 Km/h | 25,3 | -0,4 | 0,2 |
| | Alto | 6,0 Km/h | 25,2 | | |
| Active during time period from (1,0 s) | Baixo | 0,5 s | 25,1 | -0,5 | 0,1 |
| | Alto | 2,0 s | 24,9 | | |
| After lane change start (10,0 s) | Baixo | 5,0 s | 24,9 | -0,6 | 0,4 |
| | Alto | 20,0 s | 24,8 | | |
| Cauteloso | ---- | | 16,1 | 12,8 | 13,9 |
| Agressivo | ---- | | 29,2 | | |
| Cauteloso (Sem Lateral Correction) | ---- | | 24,8 | 4,2 | 5,2 |
| Agressivo (Sem Lateral Correction) | ---- | | 29,2 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os três primeiros parâmetros relativos às desacelerações dos veículos, apesar do IC não conter o zero, o limite inferior é bem próximo deste valor, na ordem de 0,3 km/h, assim como no parâmetro *AM*. Assim como na rede da Av. Santos Dumont, o parâmetro *min. headway front/rear* apresentou um dos maiores valores de extremo de IC, com -1,4 km/h, juntamente com o parâmetro de *safety dist. reduction factor*. O efeito significativo desses parâmetros é esperado já que os mesmos interferem na distância de segurança de Wiedemann, afetando no movimento longitudinal dos veículos.

As maiores diferenças de médias também se deram para os parâmetros de *lateral correction*, devido à influência dos parâmetros do modelo de *lateral movements*. Logo, da mesma forma, um motorista cauteloso também foi criado mantendo esses parâmetros com valor *default*, comprovando a forte influência deles nas medidas de desempenho. Em comparação com a velocidade média obtida com todos os parâmetros *default* (28,3 km/h), o motorista cauteloso com os parâmetros de *lateral correction* habilitados apresentou uma diferença de 43% (12,2 km/h), enquanto o motorista cauteloso com estes parâmetros em *default* apresentou uma diferença de 12% (3,5 km/h).

5.1.4.3. *Parâmetros de Gap Acceptance*

A análise de sensibilidade dos parâmetros de *gap acceptance* não foi realizada nesta etapa da pesquisa devido à estrutura das redes em análise. Em ambos os corredores arteriais, todas as interseções não semaforizadas apresentam uma interseção semaforizada na interseção à montante, o que faz com que os veículos provenientes das vias secundárias aceitem os *headways* ditados pela operação dos semáforos. Além disso, é sabido que os parâmetros de aceitação de brechas exercem um impacto muito maior nas vias secundárias do que no corredor arterial principal.

Como o modelo aceitação de brechas representa a facilidade da inserção dos veículos na via principal, isto pode impactar a velocidade média da corrente. Dessa forma, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade após as redes serem calibradas, a fim de confirmar esta hipótese e verificar o efeito dos parâmetros de aceitação de brechas.

5.1.5 *Classificação dos parâmetros*

Como dito anteriormente, a classificação dos parâmetros será feita em quatro grupos distintos, tendo como foco aqueles que exercem uma relação de dependência com o movimento longitudinal dos veículos. Inicialmente serão classificados os parâmetros que tiveram seus valores definidos anteriormente em estudos semelhantes e, em seguida, os parâmetros que podem ser medidos diretamente em campo. A terceira classificação é formada pelos parâmetros que não tem influência ou impacto na modelagem em análise e por fim, os parâmetros que não se encaixarem em nenhuma das três classificações serão definidos como parâmetros a serem calibrados.

5.1.5.1. *Parâmetros de car-following*

Com relação aos parâmetros de *car-following*, percebeu-se que a utilização dos parâmetros do modelo W99 não trouxe grandes contribuições para estimação de tempos de viagem e atraso em interseções. Dessa forma, para o processo de calibração será utilizado o modelo W74. O primeiro parâmetro deste modelo (ax) é um parâmetro que pode ser medido diretamente em campo devido sua facilidade de coleta, já que este representa a distância entre os veículos quando estão parados. Os demais parâmetros (bx_add e bx_mult) apresentaram forte influência nas velocidades médias e atraso, logo, como estes não tiveram valores precisos encontrados em estudos anteriores, comporão o grupo de parâmetros a serem calibrados.

Com relação aos demais parâmetros de *following*, àqueles relacionados ao *LAD* e *LBD* e o parâmetro *standstill distance for static obstacles* não apresentaram impacto significativo nas medidas de desempenho. Dessa forma, estes parâmetros, comporão o grupo dos parâmetros que não exercem influência nas medidas de desempenho. Além disso, vale ressaltar que estes dois parâmetros tem maior influência quando se deseja modelar o comportamento lateral dos veículos (*lateral movements*), o que não se insere no escopo da pesquisa. O parâmetro *smooth closeup behavior* não apresentou o zero no seu IC, mas os extremos do intervalo estavam bem próximos de zero. Como trata-se de um parâmetro que só pode ser habilitado ou desabilitado, optou-se por mantê-lo com valor *default* (desabilitado), como o próprio manual sugere.

Os parâmetros relacionados ao *TLA* apresentaram impacto representativo nas medidas de desempenho. Por não haver na literatura estudos anteriores sobre esses dois parâmetros, estes pertencerão ao grupo de parâmetros a serem calibrados. A Tabela 13 apresenta a classificação dos parâmetros de *car-following*.

Tabela 13 – Classificação dos parâmetros de *car-following*

| Grupo de Parâmetros | Parâmetros |
|--|---|
| Medidos diretamente em campo | <i>ax</i> (W74) |
| Parâmetros sem impacto nas Medidas de Desempenho | <i>Min. Look ahead distance</i> <i>Max. Look ahead distance</i> <i>Observed Vehicles</i> <i>Min. Look back distance</i> <i>Max. Look back distance</i> <i>Standstill distance for static obstacles</i> |
| Parâmetros a serem calibrados | <i>bx_add</i> (W74) <i>bx_mult</i> (W74) <i>Duration Temporary lack of attention (TLA)</i> <i>Frequency Temp. lack of attention (TLA)</i> |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.5.2. Parâmetros de *lane-changing*

No que se refere aos parâmetros de mudança de faixa, percebe-se que aqueles correspondentes às acelerações dos veículos apresentaram comportamentos diferentes para as duas redes. Este resultado pode ter ocorrido devido às configurações distintas das avenidas em termos de congestionamento, fazendo com que esses parâmetros sejam mais sensíveis em uma rede do que na outra. De fato, esses parâmetros afetam os perfis de aceleração e desaceleração dos condutores, mas, de acordo com os resultados, essas alterações não foram tão consideráveis

para a velocidade média. Dentre os parâmetros que envolvem a aceleração e desaceleração dos veículos, estão os *max. deceleration (own e trailing vehc)*, *-1 m/s² per distance (own e trailing vehc)*, *accepted deceleration (own e trailing vehc)* e *max. Decel. for cooperative braking*.

O parâmetro *waiting time before diffusion* é um parâmetro difícil de ser observado em campo e não teve impacto significativo em nenhuma das medidas de desempenho. Outro parâmetro que apresentou resultados distintos para as duas redes foi o *advanced merging*. No caso deste parâmetro, é conveniente utilizar o valor *default* (habilitado), já que este representa comportamentos mais realísticos do que os propiciados no caso do parâmetro estar desabilitado, como o próprio manual sugere. Logo, fará parte dos parâmetros com valores definidos com base na literatura.

Por fim, os últimos parâmetros que não apresentaram impacto significativo nas medidas de desempenho foram os parâmetros de *cooperative lane change*, os quais, inclusive, não tiveram mudança alguma no atraso em interseções. Dessa forma, estes parâmetros também irão compor o grupo dos parâmetros que não afetam as medidas de desempenho. O parâmetro *overtake reduced speed areas* será considerado no grupo de parâmetros que também não exercem influência, haja vista que a rede em análise não apresenta áreas com redução de velocidade. Dois parâmetros tiveram impacto significativo, o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduced factor*, pois ambos impactam na distância de *following* dos veículos. Os parâmetros relacionados ao *lateral correction* apresentaram grande efeito, contudo, estes são influenciados por outro modelo comportamental (*lateral movements*) que é utilizado para o caso de veículos poderem ultrapassar, ou trafegar lado-a-lado, em uma mesma faixa. Sendo assim, apenas os primeiros dois parâmetros irão compor o grupo de parâmetros a serem calibrados. A Tabela 14 apresenta o resumo da classificação dos parâmetros de mudança de faixa.

Tabela 14 – Classificação dos parâmetros de *lane-changing*

| Grupo de Parâmetros | Parâmetros |
|--|--|
| Baseados na literatura | <i>Advanced merging</i> |
| Parâmetros sem impacto nas Medidas de Desempenho | Parâmetros relacionados às acelerações dos veículos <i>Max. Decel. for cooperative braking</i> <i>Overtake reduced speed areas</i> Parâmetros do <i>Cooperative lane change</i> |
| Parâmetros irrelevantes para o estudo | <i>Overtake reduced speed areas</i> Parâmetros do <i>Lateral correction</i> |
| Parâmetros a serem calibrados | <i>Min. Headways (front/rear)</i> <i>Safety distance reduction factor</i> |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.6 Definição dos blocos de parâmetros

Uma vez compreendido o efeito de cada parâmetro, é possível criar os blocos de parâmetros a serem calibrados assim como suas estratégias de calibração. Inicialmente, um parâmetro de forte influência para as medidas de desempenho é a velocidade desejada dos diferentes veículos. Devido à facilidade de coleta, este parâmetro será medido diretamente em campo. Além da velocidade desejada, o tempo médio de parada dos ônibus também é um parâmetro que exerce influência nas medidas de desempenho e terá seu valor coletado em campo.

No que se refere aos parâmetros de *car-following*, o primeiro deles que necessita ser estimado é o ax , tendo como melhor estratégia a medição direta em campo, devido à sua facilidade de coleta. Os parâmetros bx_add e bx_mult do modelo de W74 afetam diretamente a distância de *following* dos veículos, portanto serão calibrados tendo como medida-alvo o fluxo de saturação.

Para os demais quatro parâmetros que exercem influência na velocidade média do corredor, sendo eles os dois de *temporary Lack of attention (car-following)* e *min. headway front/rear* e *safety distance reduction factor (lane-changing)*, não foram encontradas na literatura estratégias de coleta ou de calibração. Assim, estes parâmetros serão calibrados de forma automatizada com auxílio de um AG codificado em *Python* versão 2.7. Como esses últimos 4 parâmetros apresentam um impacto bem menor em comparação com os parâmetros do modelo de Wiedemann 74, a calibração com o AG permitirá avaliar se haverá realmente contribuição relevante trazida por eles na modelagem das velocidades médias dos corredores arteriais. A Tabela 15 apresenta um resumo dos parâmetros que serão calibrados e suas respectivas estratégias de calibração.

Tabela 15 – Blocos de parâmetros e suas estratégias de calibração

| Parâmetros | Estratégia de Calibração / Medidas-Alvo |
|--|---|
| Velocidade Desejada Tempo médio de parada <i>ax</i> (W74) | Medição em campo |
| <i>bx_add</i> (W74) <i>bx_mult</i> (W74) | Calibração manual tendo Fluxo de Saturação como medida-alvo |
| <i>Dur. Temporary lack of attention (Car-following)</i> <i>Prob. Temporary lack of attention (Car-following)</i> <i>Min. Headway front/rear (Lane-changing)</i> <i>Safety Dist. Red. Factor (Lane-changing)</i> | Calibração automatizada com AG |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Fase de calibração

Uma vez definidos os blocos de parâmetros e suas respectivas estratégias de calibração, a fase de *Calibração* se inicia com a coleta de dados voltados para as medidas-alvo, medidas de desempenho e demais variáveis que irão compor o processo de calibração e validação. Dando continuidade, na etapa de *Definição dos cenários de calibração* serão definidas quais as diferentes configurações de calibração de forma a comparar os diferentes métodos empregados. Em seguida tem-se início a fase de *Simulação com parâmetros default*, onde serão verificados a consistência de todos os dados coletados e o quão representativa é a rede com parâmetros *default*.

A fase de calibração procede com a etapa de *Configuração do AG*, seguida pelas etapas de *Calibração e Validação dos modelos*, onde todas as estratégias serão aplicadas, finalizando com a etapa de *Análise das estratégias de calibração*, a fim de ver as contribuições trazidas pelos diferentes métodos empregados.

5.2.1 Coleta de dados para Calibração

Para essa fase de calibração, foram coletados, para ambos os corredores em análise, dados relativos à velocidade média e velocidade de fluxo livre, fluxo de saturação, distância de parada entre veículos, equivalente ao parâmetro *ax* de Wiedemann, tempo médio de parada de ônibus e dados relativos à aceleração dos veículos. Todos os dados foram coletados juntamente com os dados apresentados na fase anterior, para que, dessa forma, haja uma maior consistência

entre as variáveis e dados envolvidos. Todos os métodos assim como os dados obtidos são apresentados nos itens a seguir.

5.2.1.1. Velocidade Média e Velocidade de Fluxo Livre

Para a Av. Santos Dumont, os tempos de viagem foram obtidos através de veículos-teste, nos quais condutores percorriam todo o trecho da avenida registrando parciais de tempo em determinados pontos de controle, sendo eles as extremidades do trecho (à oeste a R. João Cordeiro e à Leste a Av. Br. de Studart) e a interface entre o subtrecho 1 e subtrecho 2 (R. Carlos Vasconcelos). Utilizando dois veículos-teste, em ambos os trechos foram obtidas 14 observações de tempo de viagem para o período de 7h às 8h, resultando numa média de 111 s, equivalente a uma velocidade média (no espaço) de 15,7 km/h, e desvio padrão de 26 s para o subtrecho 1, e média de 127 s, equivalente a 14,1 km/h de velocidade média (no espaço), e desvio padrão de 25 s para o subtrecho 2.

Com relação à Av. Pontes Vieira, o tempo de viagem dos veículos foi obtido através de dois métodos distintos. O primeiro método foi a partir de veículos-testes, tendo como pontos de controle as interseções das extremidades oeste e leste (R. Capitão Gustavo e Av. Desembargador Moreira, respectivamente) e um ponto central de interface dos dois subtrechos, no cruzamento com a Av. Barão de Studart. Para cada dia de coleta foram utilizados 6 veículos-testes, cada um com um motorista e um pesquisador, totalizando 12 pesquisadores.

O segundo método de obtenção dos tempos de viagem foi o registro de placas de automóveis da cor preta nos mesmos pontos de controle dos veículos-teste. Para o registro de placas havia um pesquisador por faixa coletando placas em cada ponto de controle, registrando os 4 dígitos numéricos das placas dos veículos da cor preta. Como haviam duas faixas por sentido, cada ponto de controle contava com quatro pesquisadores, totalizando 12 para os 3 pontos de controle.

Para o primeiro dia de coleta, com relação aos dados obtidos a partir dos veículos-teste, para o sentido oeste-leste foram obtidos 34 observações de tempo de viagem durante as duas horas de coleta e 31 observações para o sentido oposto. Para os dados obtidos das pesquisas de placas, no sentido oeste-leste foram registradas 991 placas, das quais 273 puderam ser pareadas em 2 pontos de controle distintos, representando 27% de aproveitamento dos dados. Para o sentido leste-oeste, 873 placas foram registradas, com 229 pares registrados, representando 26%. A Tabela 16 apresenta o resumo dos dados obtidos para o primeiro dia de coleta, já transformados para velocidade média (no espaço), agregados em intervalos de 15

minutos, para os dois métodos de coleta no sentido oeste-leste, enquanto a Tabela 17 apresenta as mesmas informações para o sentido oposto.

Tabela 16: Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas e veículos-teste no sentido oeste-leste, dia 19/10

| Velocidades Médias - Pesquisa de Placas e veículos-teste - Sentido O/L (19/10) | | | | | | |
|---|---------|-----------------|--------------|---------|-----------------|--------------|
| Intervalo | PC1-PC2 | | | PC2-PC3 | | |
| | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão |
| 7h00-7h15 | 11 | 27 | 12 | 11 | 31 | 14 |
| 7h15-7h30 | 12 | 23 | 7 | 22 | 35 | 15 |
| 7h30-7h45 | 10 | 21 | 6 | 23 | 23 | 10 |
| 7h45-8h00 | 13 | 21 | 3 | 27 | 21 | 9 |
| 8h00-8h15 | 12 | 19 | 3 | 26 | 23 | 9 |
| 8h15-8h30 | 17 | 24 | 6 | 32 | 24 | 9 |
| 8h30-8h45 | 16 | 21 | 5 | 20 | 24 | 11 |
| 8h45-9h00 | 14 | 25 | 7 | 24 | 26 | 10 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 17: Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas no sentido L-O, dia 19/10

| Velocidades Médias - Pesquisa de Placas - Sentido L/O (19/10) | | | | | | |
|--|---------|-----------------|--------------|---------|-----------------|--------------|
| Intervalo | PC1-PC2 | | | PC2-PC3 | | |
| | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão |
| 7h00-7h15 | 19 | 15,2 | 4,7 | 19 | 24,3 | 10,9 |
| 7h15-7h30 | 27 | 16,4 | 4,8 | 19 | 24,6 | 6,7 |
| 7h30-7h45 | 23 | 17,5 | 4,7 | 21 | 27,3 | 9,2 |
| 7h45-8h00 | 24 | 21,0 | 8,0 | 12 | 26,2 | 4,6 |
| 8h00-8h15 | 30 | 20,5 | 5,3 | 17 | 21,2 | 6,2 |
| 8h15-8h30 | 16 | 20,5 | 4,9 | 16 | 24,3 | 6,1 |
| 8h30-8h45 | 31 | 16,3 | 4,9 | 18 | 23,1 | 6,0 |
| 8h45-9h00 | 29 | 15,2 | 4,6 | 17 | 21,6 | 5,4 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os mesmos métodos foram replicados para o segundo dia de pesquisa, obtendo-se dos veículos-teste 32 observações para cada sentido de circulação. Para os dados obtidos das pesquisas de placas, no sentido oeste-leste foram registradas 965 placas, das quais 229 puderam ser pareadas em 2 pontos de controle distintos, representando 24% de aproveitamento dos dados. Para o sentido leste-oeste, 969 placas foram registradas, com 229 pares registrados, representando 24%. As tabelas com resumo dos dados deste dia encontram-se no Apêndice C.

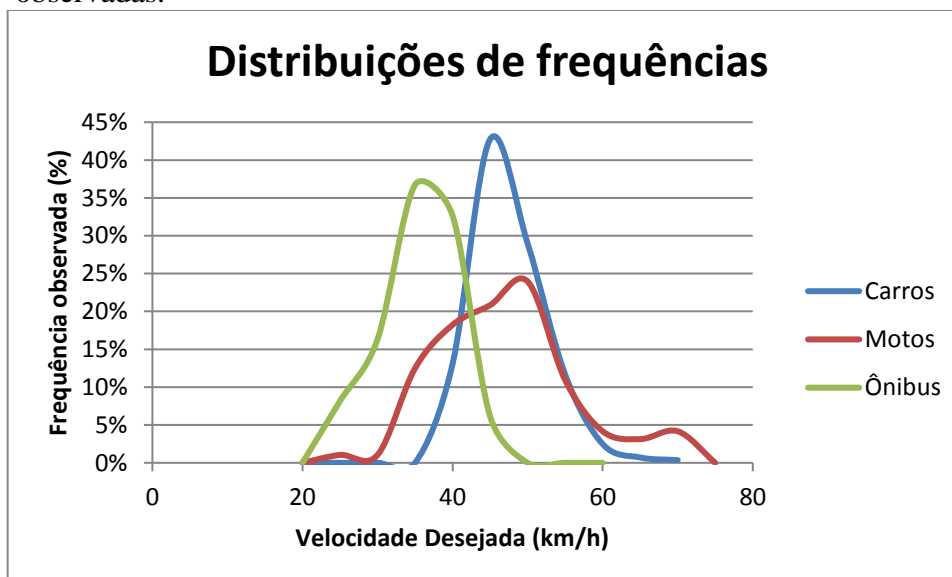
A medição da velocidade desejada se deu através de um *Pocket Radar*, modelo *Classic PR1000*, um aparelho que mede a velocidade instantânea dos veículos emitindo pequenos pulsos de onda de rádio em um feixe invisível focado, de forma semelhante a um feixe de lanterna. Para a medição das velocidades, apontava-se o dispositivo para os veículos que não tinham nenhuma impedância à sua frente e registrava-se o tipo de veículo e a velocidade encontrada. A coleta ocorreu apenas para o primeiro dia, tendo os resultados apresentados na Tabela 18. O Gráfico da Figura 19 apresenta a distribuição de frequência das velocidades desejadas dos veículos *carro*, *moto* e *ônibus*.

Tabela 18 – Velocidades desejadas coletas em campo

| Tipo de Veículo | N | Veloc. Média | DesvPad |
|-----------------|-----|--------------|---------|
| Motos | 192 | 45,3 | 9,0 |
| Carros | 429 | 46,8 | 7,0 |
| Ônibus | 49 | 42,3 | 5,2 |
| Caminhões | 5 | 43,6 | 7,0 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Distribuições de frequência das velocidades desejadas observadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o VISSIM já apresenta as distribuições *default* para a velocidade desejada, optou-se por utilizar as existentes no *software*, alocando a distribuição de 40 km/h para os ônibus e caminhões – com limites entre 40 e 45 km/h e de 50 km/h para os veículos leves – com limites entre 45 e 58 km/h. A distribuição *default* para todos os tipos de veículos é 50 km/h.

5.2.1.2. Fluxo de Saturação

Para ambos os corredores, o fluxo de saturação (FS) foi coletado de acordo com o Método 1 do Manual do DENATRAN (2014). Para a Av. Santos Dumont, o FS foi coletado no cruzamento com a R. Carlos Vasconcelos na faixa norte (faixa da esquerda), devido uma menor influência dos ônibus. Toda a coleta foi manual com auxílio de cronômetros. Foram coletados os *headways* para 15 ciclos semafóricos, resultando em 15 observações de FS, tendo como média 1476 veículos por hora (vph) e desvio padrão de 130 vph.

Para a Av. Pontes Vieira, o FS foi obtido no cruzamento com a Av. Barão de Studart, com o auxílio de filmagens aéreas obtidas com um *Drone*. Foram coletados os fluxos de saturação médios de cada faixa das aproximações leste e oeste. A Figura 20 abaixo apresenta uma imagem retirada de um dos vídeos do *Drone*.

Figura 20 – Imagem do vídeo do *Drone* utilizado para obtenção de Fluxos de Saturação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a aproximação leste, foram observados 24 ciclos semafóricos, correspondendo, portanto, a 24 observações de FS. Para a aproximação oeste, como as faixas norte e sul operavam em estágios diferentes do semáforo, foram obtidos 23 ciclos para a faixa norte e 17 ciclos para a faixa sul. O resumo dos dados obtidos para cada aproximação e cada faixa encontra-se na Tabela 19. A coleta de fluxo de saturação foi realizada em somente um dia

de pesquisa, já que a variável em análise não deve apresentar mudança significativa de um dia para outro.

Tabela 19 – Resumo dos Fluxos de Saturação obtidos em campo para Av. Pontes Vieira

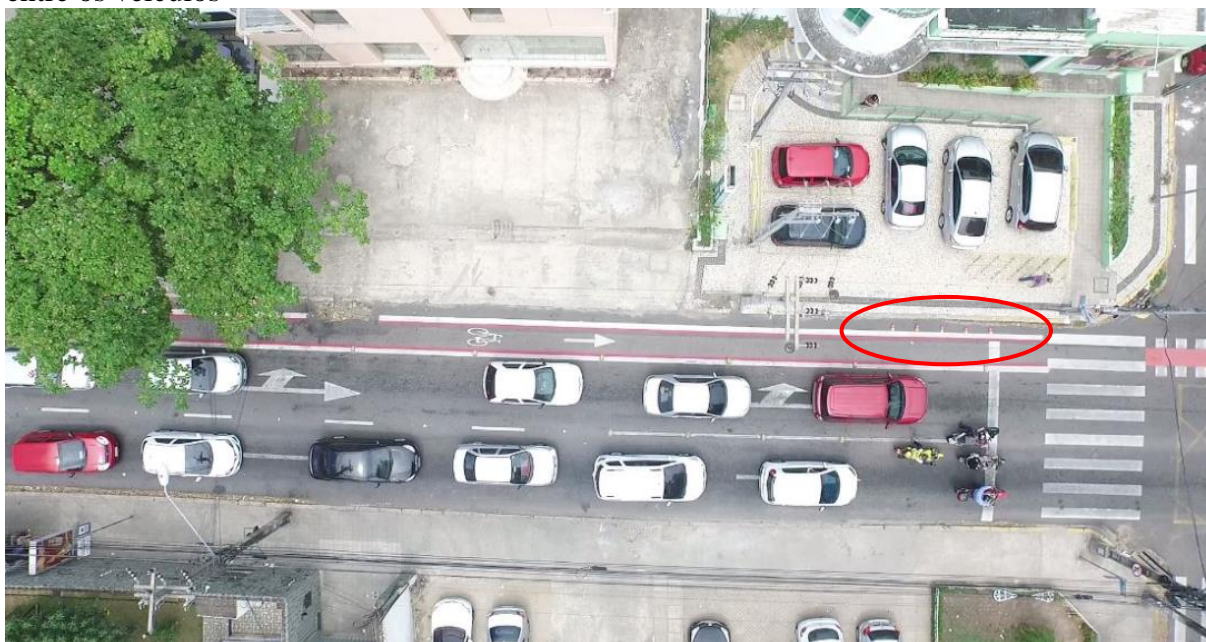
| Aproximação | Faixa | N | Média FS (vph) | DesvPad FS (vph) |
|-------------|-------|----|----------------|------------------|
| Leste | Norte | 24 | 1317 | 198 |
| | Sul | 24 | 1544 | 222 |
| Oeste | Norte | 23 | 1470 | 175 |
| | Sul | 17 | 1477 | 160 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1.3. Distância entre veículos parados

A distância média entre os veículos parados, equivalente ao parâmetro ax do VISSIM, foi coletada através de filmagens aéreas obtidas através de um *Drone* na avenida Santos Dumont, no cruzamento com a R. Carlos Vasconcelos. Com o auxílio de mini-cones foram feitas marcações na via a cada metro, as quais auxiliaram na definição da escala da imagem. A Figura 21 apresenta um exemplo de uma imagem obtida pelo *Drone*, com destaque para os mini-cones espaçados de um metro.

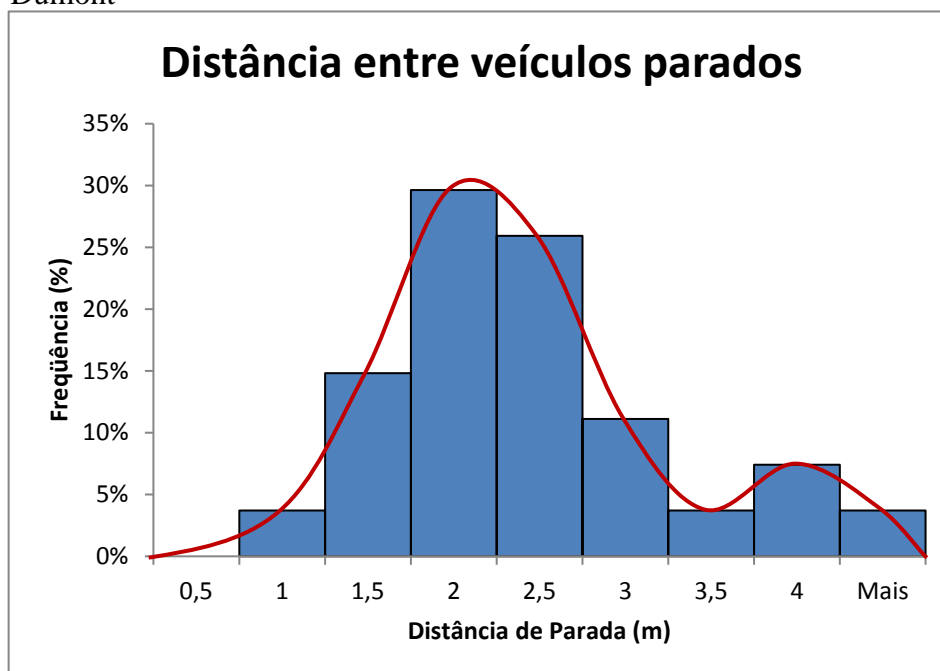
Figura 21 – Imagem do vídeo do *Drone* utilizado para obtenção da distância média de parada entre os veículos



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com as imagens foram obtidas 54 observações de distância de parada, o que resultou em uma média de 2,2 m e um desvio padrão de 0,8 m. É importante ressaltar que o simulador apresenta como *default* o valor de 2,0 m (médio) para o *ax*, seguindo uma distribuição Normal com desvio padrão de 1,0 m que não pode ser alterado pelo usuário, truncada entre os valores 1,0 e 3,0 metros. A Figura 22 apresenta o histograma das distâncias de parada obtidas em campo para a Av. Santos Dumont. O resultado desta coleta foi utilizado também para a rede da Av. Pontes Vieira devido às características semelhantes das duas vias arteriais.

Figura 22 – Histograma das distâncias de parada obtidas na Av. Santos Dumont



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1.4. Transporte Público - Tempos de viagem e tempos de parada.

Com relação à Av. Pontes Vieira, os dados referentes ao transporte público foram obtidos através da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR), através do registro de placas nas extremidades do trecho e câmeras em 4 pontos de parada ao longo do trecho em análise, sendo dois em cada sentido de circulação. De posse dos registros de placas foi possível obter o tempo de viagem médio dos ônibus entre os pontos de parada e, através dos vídeos, foi possível observar as variáveis tempo médio na parada, quantidade de passageiros embarcando e desembarcando por linha e tempo de abertura e fechamento de portas. Para o escopo deste

trabalho, dados referentes aos passageiros (como tempo de embarque/desembarque) não foram considerados. A Tabela 20 abaixo apresenta um resumo das velocidades médias operacionais (considerando tempo parado e tempo em percurso) dos ônibus para o primeiro dia de coleta, agregado por intervalos de 15 minutos.

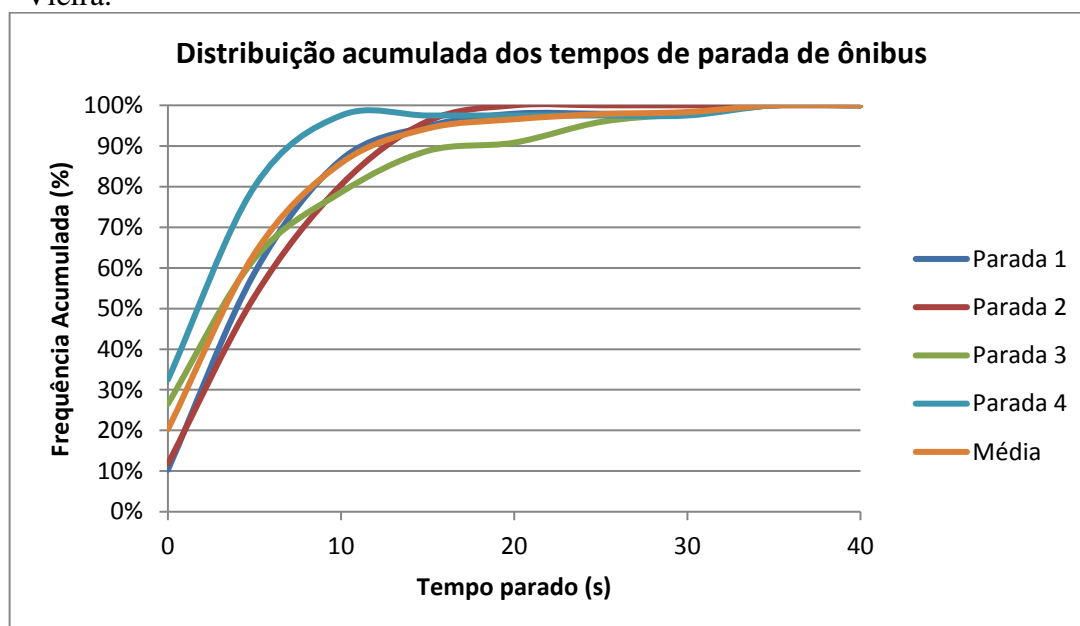
Tabela 20 – Velocidades Médias dos ônibus na Av. Pontes Vieira

| Intervalo | Sentido O-L | | Sentido L-O | |
|-----------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | N | Veloc. Média (km/h) | N | Veloc. Média (km/h) |
| 7h00-7h15 | 3 | 8,9 | 1 | 15,8 |
| 7h15-7h30 | 3 | 10,7 | 1 | 15,0 |
| 7h30-7h45 | 3 | 11,2 | 3 | 11,4 |
| 7h45-8h00 | 4 | 10,6 | 2 | 13,7 |
| 8h00-8h15 | 1 | 9,0 | 1 | 18,2 |
| 8h15-8h30 | 3 | 12,4 | 1 | 15,4 |
| 8h30-8h45 | 3 | 10,1 | 6 | 18,8 |
| 8h45-9h00 | 1 | 11,5 | 0 | --- |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tempos na parada foram obtidos de quatro pontos de parada por meio das filmagens. Para esta variável, como dito na revisão bibliográfica desta pesquisa, o VISSIM incorpora uma distribuição de tempo, que pode ser empírica ou Normal. Assim, os dados foram colocados em um gráfico de distribuição acumulada para que pudesse ser incorporado no simulador. A Figura 23 apresenta a distribuição acumulada dos tempos medidos em cada ponto.

Figura 23 – Distribuição acumulada dos tempos de parada dos ônibus na Av. Pontes Vieira.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como as quatro curvas apresentavam um padrão semelhante, com a média em torno de 10 s, optou-se por utilizar a curva média dos quatro pontos de parada (curva da cor laranja). Vale ressaltar que a distribuição *default* do VISSIM é uma distribuição Normal variando de 0 a 40 s, com média de 20 s e desvio padrão de 2 s. Os dados obtidos nos pontos de parada da Av. Pontes Vieira foram utilizados também para a Av. Santos Dumont, utilizando como premissa as características semelhantes das duas vias.

5.2.2 Definição dos cenários de calibração

Antes de definir quais os cenários de calibração, foi necessário definir quais trechos e horários seriam usados para calibração e para a validação. Para a Av. Santos Dumont, dentre os dois subtrechos disponíveis para análise, optou-se por utilizar o subtrecho 2 para a calibração dos modelos e o subtrecho 1 para a validação, ambos com dados coletados no mesmo dia. Com relação à Av. Pontes Vieira, haviam 2 dias de coleta para a rede completa. Para o primeiro dia de coleta, observou-se inconsistência nos dados de volume com altas discrepâncias entre os intervalos de 15 minutos no período de 8h às 9h. No segundo dia de coleta, três dos nove semáforos apresentaram problema no período de 7h às 8h, o que causou um comportamento atípico do tráfego na via. Dessa forma, optou-se por utilizar os dados do período de 7h às 8h do primeiro dia de coleta para a calibração e o período de 8h às 9h do segundo dia para a validação.

Com relação aos cenários de calibração, os mesmos seguiram a lógica dos blocos de parâmetros definidos, partindo da simulação com parâmetros *default*, a fim de se verificar o quão representativa estavam as redes sem esforços de calibração e verificar possíveis erros da etapa de codificação. Além disto, a simulação *default* gera um erro de estimação da medida de desempenho que pode servir como valor base para se avaliar a contribuições da calibração dos parâmetros na redução de tal erro. Num passo seguinte, partiu-se para a inclusão dos parâmetros de transporte público, coletados em campo, sendo eles a velocidade desejada dos ônibus e as distribuições dos tempos na parada, verificando-se um novo erro em relação às velocidades médias. Em seguida, incorporou-se a velocidade desejada e verificou-se um novo erro, seguido do *ax*.

Para ambas as redes, após inserir os valores dos parâmetros de transporte público, velocidades desejadas e *ax*, partiu-se para a calibração dos parâmetros *bx_add* e *bx_mult* tendo como medida-alvo o fluxo de saturação. Dessa forma, para ambos os corredores, criou-se uma segunda rede na qual extrapolou-se o volume nas aproximações que serviram para medir o FS, retirando-se todas as impedâncias e dispositivos de controle à montante e à jusante do local de

coleta. Isso se fez necessário para que o regime esteja sempre em saturação e que portanto os veículos trafeguem em regime de *following* ao passarem pela faixa de retenção.

Após calibrados os parâmetros *bx_add* e *bx_mult*, verificou-se o novo erro em relação às velocidades médias coletadas. Em seguida, usou-se o AG para a calibração dos últimos quatro parâmetros, sendo eles os dois de *TLOA* (*car-following*), o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduction factor* (*lane-changing*). Para verificar os mesmos erros e compará-los com a calibração completamente automatizada, seis cenários foram considerados para o AG, representados em resumo na Tabela 21.

O cenário zero representa o processo de calibração completamente manual e sequenciado, mantendo os demais parâmetros de *TLOA* e *lane-changing* com valores *default*. Do cenário 1 ao cenário 3 aumenta-se a participação do AG nos resultados, onde no cenário 1 os parâmetros *bx_add* e *bx_mult* são encontrados através do AG, no cenário 2, além dos *bx*'s, o *ax* é encontrado pelo AG e no cenário 3 inclui-se a Velocidade Desejada para ser estimada através do AG, todos mantendo os demais quatro parâmetros em *default*. Nos dois últimos cenários são avaliados as possíveis contribuições trazidas incluindo os quatro últimos parâmetros (dois de *TLOA* e dois de *lane-changing*) no processo de calibração. Sendo assim, no cenário 4 avalia-se a inclusão dos demais 4 parâmetros com AG, mantendo os quatro primeiros com os valores encontrados manualmente e o cenário 5 todos os parâmetros são encontrados com o auxílio do AG.

Tabela 21 – Cenários de calibração do AG

| Parâmetro / Cenário | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----|
| Velocidade Desejada | Calibração Manual | Calibração Manual | Calibração Manual | AG | Calibração Manual | AG |
| <i>ax</i> | Calibração Manual | Calibração Manual | AG | AG | Calibração Manual | AG |
| <i>bx_add</i> | Calibração Manual | AG | AG | AG | Calibração Manual | AG |
| <i>bx_mult</i> | Calibração Manual | AG | AG | AG | Calibração Manual | AG |
| <i>Dur. Lack of attention</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | AG | AG |
| <i>Prob. Lack of attention</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | AG | AG |
| <i>Min. Headway front/rear</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | AG | AG |
| <i>Safety Dist. Reduc. Factor</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | <i>Default</i> | AG | AG |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 Simulação com parâmetros default

Dando início à calibração dos modelos, a simulação com parâmetros *default* se faz necessária para avaliar a representatividade dos parâmetros, avaliar possíveis inconsistências nos dados nas redes codificadas, além de verificar o erro inicial das medidas-alvo e medidas de desempenho. Nesta etapa, para cada corredor arterial foram realizadas 30 simulações de 1h e 5min cada, sendo os primeiros 5min de aquecimento da rede, tendo como *output* o FS nas respectivas interseções coletadas e a velocidade média nos trechos coletados.

Para a comparação entre os valores simulados e observados em campo utilizou-se o Erro Percentual (EP), já que nesta etapa se fazia necessário saber se o erro era positivo ou negativo, permitindo observar se as variáveis estavam sendo sub ou superestimadas pelo simulador. Os resultados para a rede da Av. Santos Dumont (subtrecho 2) e Av. Pontes Vieira (primeiro dia de coleta, 7h às 8h) são apresentados na Tabela 22 e na Tabela 23, respectivamente.

De acordo com os resultados, em ambos os corredores, o simulador superestimou a velocidade média e o FS (com exceção de 3 dos 16 valores de velocidade média da Av. Pontes Vieira). Dessa forma, para a calibração dos parâmetros de *car-following*, foram aumentados os valores em relação ao *default* para que aumentasse a distância entre os veículos, aumentando, conseqüentemente, o *headway* de saturação e diminuindo o valor do FS. A seção seguinte apresenta a etapa de configuração do AG, necessária para o início da calibração dos parâmetros e modelos.

Tabela 22 – Resultado das simulações com parâmetros *default* da Av. Santos Dumont.

| Variável | Valor Coletado | Valor Simulado | Erro Percentual (%) |
|--------------------|----------------|----------------|---------------------|
| Velocidade Média | 14,1 km/h | 20,4 km/h | 31% |
| Fluxo de Saturação | 1476 vph | 2052 vph | 28% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 23 – Resultados das simulações com parâmetros *default* da Av. Pontes Vieira

| Subtrecho | VM Coletada (km/h) | VM simulada (km/h) | Erro Percentual (EP) |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| OL-1 | 14,04 | 20,76 | 32% |
| | 15,00 | 20,97 | 28% |
| | 15,86 | 20,22 | 22% |
| | 18,28 | 20,30 | 10% |
| OL-2 | 22,04 | 27,21 | 19% |
| | 23,16 | 26,92 | 14% |
| | 25,30 | 26,55 | 5% |
| | 25,54 | 27,61 | 7% |
| LO-1 | 23,77 | 23,05 | -3% |
| | 21,48 | 23,88 | 10% |
| | 19,79 | 22,01 | 10% |
| | 20,10 | 22,40 | 10% |
| LO-2 | 26,06 | 23,43 | -11% |
| | 26,51 | 22,15 | -20% |
| | 19,68 | 20,53 | 4% |
| | 18,76 | 21,17 | 11% |
| Erro Percentual Médio (EPM) | | | 9% |

| Faixa de tráfego | FS coletado (vph) | FS simulado (vph) | Erro Percentual (EP) |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| OL_sul | 1477 | 1735 | 15% |
| OL_norte | 1470 | 2240 | 34% |
| LO_sul | 1544 | 2051 | 25% |
| LO_norte | 1317 | 2038 | 35% |
| Erro Percentual Médio (EPM) | | | 27% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.4 Configuração do AG

Como dito anteriormente, o AG utiliza uma função de ajuste para avaliar a aptidão (*fitness*) dos indivíduos e gerações. A função selecionada foi o erro percentual absoluto médio (EPAM), já que esse desconsidera o efeito de sinais que podem mascarar o tamanho do erro obtido. Para o caso da Av. Santos Dumont, como só existe apenas um valor de velocidade média, o *fitness* do AG tem como alvo este valor. Contudo, a Av. Pontes Vieira apresenta 16 valores de velocidade média (2 subtrechos x 2 sentidos x 4 intervalos de 15 minutos) e, neste caso, o *fitness* foi a média dos 16 EPAM.

Dando continuidade, após definido a medida de ajuste, definiu-se os limites de busca de cada parâmetro a ser calibrado, utilizando-se praticamente os mesmos limites aplicados nas análises de sensibilidade envolvidas neste trabalho. Sendo assim, os limites para

os parâmetros foram: Velocidade desejada [30km/h ; 70km/h], ax [1,0s ; 4,0s], bx_add e bx_mult [1,0 ; 8,0], $Dur. TLA$ [0,0s ; 1,0s], $Prob. TLA$ [0,0% ; 10,0%], $Min. headway front/rear$ [0,5s ; 3,0s] e $Safety Dist. reductionn factor$ [0,2 ; 0,8]. Os únicos valores diferentes foram os de bx_add e bx_mult pois optou-se por colocar um limites de busca menores (mais realistas) do que o utilizado na análise de sensibilidade.

Os valores dos parâmetros de controle e dos operadores genéticos foram definidos com base nos resultados e conclusões encontrados por MEDEIROS (2012), que realizou uma análise de sensibilidade destes parâmetros. A Tabela 24 apresenta os valores utilizados nesta pesquisa e os valores utilizados por MEDEIROS (2012).

Tabela 24 – Parâmetros e operadores do AG utilizados

| Parâmetros e Operadores | Utilizados na pesquisa | Utilizados por MEDEIROS (2012) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Número de Indivíduos | 10 | 30 |
| Número de gerações | 20 | 30 |
| Replicações | 5 | 1 |
| Diversidade | 2 | 2 |
| Taxa de mutação | 20% | 10% |
| Taxa de predação | 20% | 20% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado, alguns valores utilizados nesta pesquisa divergem dos valores utilizados por MEDEIROS (2012). Como pode se perceber nas simulações realizadas com parâmetros *default*, existe uma variabilidade maior nos resultados replicados de um mesmo indivíduo quando comparado com aquela encontrada por MEDEIROS (2012). Dessa forma, optou-se por aumentar o número de replicações de 1 para 5 e, para que as otimizações sejam computacionalmente e temporariamente viáveis reduziu-se a quantidade de indivíduos de 30 para 10. Com relação ao número de gerações, optou-se por utilizar 20 em vez de 30 pois, na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, o valor de convergência ocorria antes da 20ª geração. Por fim, para dar uma maior variabilidade genética nas gerações, optou-se por utilizar a taxa de mutação de 20% em vez de 10%. Com essas configurações, 20 gerações com 10 indivíduos e 5 replicações para cada um, resultam num total de 1.000 simulações para cada cenário de cada corredor arterial. Como existem 5 cenários para cada corredor arterial, para esta pesquisa foram realizadas 10.000 simulações, todas de 1h e 5min de duração, sendo 5min o tempo de aquecimento.

5.2.5 Calibração e Validação dos Modelos

5.2.5.1. Calibração dos Modelos

Para a calibração manual dos modelos, seguiu-se os cenários definidos anteriormente, utilizando-se sempre de 30 replicações para cada cenário simulado, tendo como medida de ajuste o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM). Inicialmente os parâmetros *bx_add* e *bx_mult* foram calibrados em redes isoladas, tendo os valores dos parâmetros de transporte público, velocidades desejadas e *ax* coletados em campo. Em seguida, para cada bloco de parâmetros, uma simulação com 30 replicações foi realizada, observando sempre o valor do EPAM. Os resultados para a Av. Santos Dumont encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados obtidos da calibração manual da Av. Santos Dumont

| Parâmetros modificados | | | | Medidas de Desempenho | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------|
| Transp. Público | <i>ax</i> | <i>bx_add</i> | <i>bx_mult</i> | FS Simul (vph) | FS Coletado (vph) | EPAM (%) | VM Simul (km/h) | VM Coletada (km/h) | EPAM (%) |
| <i>Default</i> | 2,0 (<i>Default</i>) | 2,0 (<i>Default</i>) | 3,0 (<i>Default</i>) | ---- | 1476 | ---- | 20,4 | 14,1 | 31% |
| <i>Coletado</i> | 2,0 (<i>Default</i>) | 2,0 (<i>Default</i>) | 3,0 (<i>Default</i>) | ---- | | ---- | 20,6 | | 32% |
| <i>Coletado</i> | 2,2 (<i>Coletado</i>) | 2,0 (<i>Default</i>) | 3,0 (<i>Default</i>) | 2052 | | 28% | 20,7 | | 32% |
| <i>Coletado</i> | 2,2 (<i>Coletado</i>) | 5,0 (<i>Calibrado</i>) | 5,0 (<i>Calibrado</i>) | 1540 | | 4% | 15,0 | | 6% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 25, o erro inicial com todos os parâmetros *default* era de 31% para a velocidade média. Após incorporar o valor coletados dos parâmetros de transporte público, sendo eles a velocidade desejada dos ônibus (40 km/h) e as distribuições dos tempos de parada, o erro aumentou levemente para 32%. Isso aconteceu pois, com os valores *default*, o simulador superestimou as velocidades médias, logo, ao mudar o tempo de parada médio dos ônibus de 20 s (distribuição *default*) para 10 s (média da distribuição encontrada em campo), a velocidade média da corrente aumentou em 0,1km/h, aumentando o valor do erro. Após incluir o valor coletado de *ax*, o erro se manteve. Isso se deve à proximidade do valor coletado para o valor *default* (sendo 2,2 e 2,0 m, respectivamente). Após os valores de *bx_add* e *bx_mult* terem sido calibrados numa rede isolada (encontrando valor de 5,0 para cada

um), o EPAM para o FS foi de 4% e, ao inserir os valores desse parâmetro na rede em análise, a velocidade média teve um melhor ajuste, com um EPAM de 6%.

Partindo para a análise com AG, a Tabela 26 apresenta os melhores indivíduos (soluções) para cada cenário de simulação apresentado na Tabela 21. Para o cenário 1 do AG, o EPAM encontrado pelo foi de 12,8%, com *bx_mult* consideravelmente diferente do encontrado na calibração manual e sequenciada (cenário zero). Para o cenário 2, o AG encontrou valores relativamente próximos do cenário zero, porém, com um EPAM na ordem de 13%; Já no cenário 3, os valores de *ax* e *bx_mult* foram bastante destoantes, mantendo o erro na mesma ordem dos demais cenários de AG (12%).

Tabela 26 – Melhores soluções encontradas pelo AG para a Av. Santos Dumont

| Parâmetro / Cenário | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
| Velocidade Desejada | 50 Manual | 50 Manual | 50 Manual | 50 AG | 50 Manual | 40 AG |
| <i>ax</i> | 2,2 Manual | 2,2 Manual | 2,4 AG | 1,3 AG | 2,2 Manual | 2,5 AG |
| <i>bx_add</i> | 5,0 Manual | 5,1 AG | 4,2 AG | 5,0 AG | 5,0 Manual | 3,3 AG |
| <i>bx_mult</i> | 5,0 Manual | 3,7 AG | 4,0 AG | 7,5 AG | 5,0 Manual | 4,6 AG |
| <i>Dur. Lack of attention</i> | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,7 AG | 0,6 AG |
| <i>Prob. Lack of attention</i> | 0,0% Default | 0,0% Default | 0,0% Default | 0,0% Default | 2,7% AG | 5,3% AG |
| <i>Min. Headway front/rear</i> | 0,5 Default | 0,5 Default | 0,5 Default | 0,5 Default | 0,5 AG | 1,8 AG |
| <i>Safety Dist. Reduc. Factor</i> | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,2 AG | 0,5 AG |
| EPAM (%) | 6,0% | 12,8% | 13,1% | 12,3% | 10,3% | 10,9% |

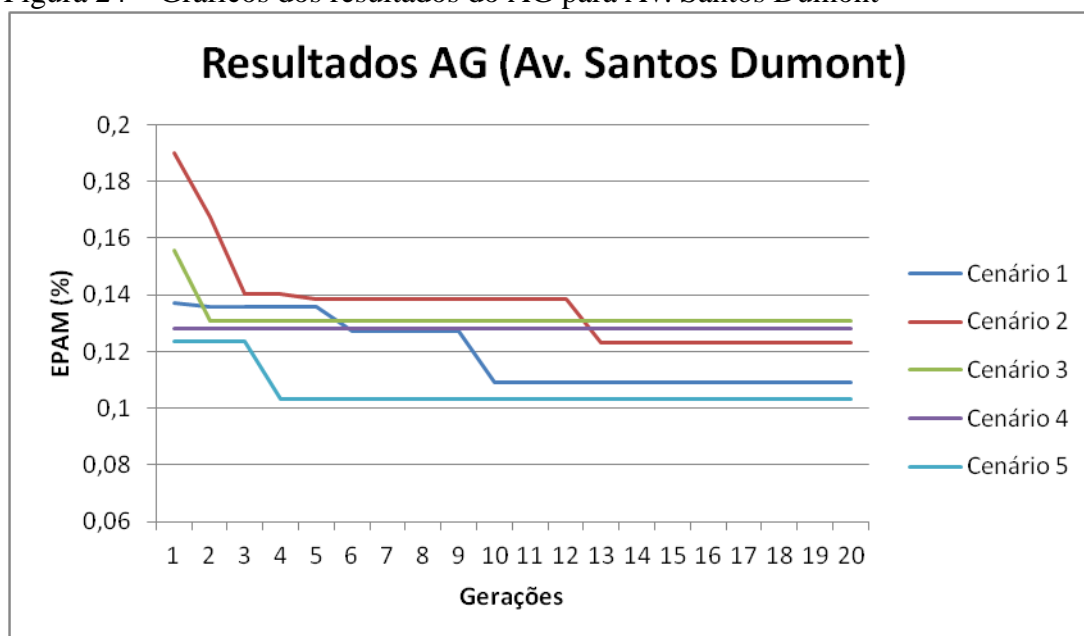
Fonte: Elaborada pelo autor.

O menor erro encontrado pelo AG foi, de fato, o do cenário 4, no qual somente os parâmetros que não se tinha estimativas foram deixados para o algoritmo otimizá-los, depois que os valores dos primeiros quatro parâmetros já haviam sido informados ao VISSIM. Contudo, o erro do cenário deste cenário (10,3%) ainda foi maior do que o encontrado manualmente (6%), cenário no qual deixa-se os 4 últimos parâmetros em *default*.

O gráfico da Figura 24 apresenta os resultados dos erros dos melhores indivíduos de todas as gerações para os 5 cenários de calibração. Em termos da convergência, o cenário 4

apresentou o melhor resultado já na 1ª geração, o cenário 3 na 2ª geração, cenário 5 na 4ª geração, cenário 1 na 10ª geração e o cenário 2 na 13ª geração.

Figura 24 – Gráficos dos resultados do AG para Av. Santos Dumont



Fonte: Elaborada pelo autor.

A rede da Av. Pontes Vieira, além de ser mais complexa, tem como alvo a média de 16 valores de velocidade média. O método de calibração foi o mesmo adotado para a Av. Santos Dumont, calibrando inicialmente os parâmetros *bx_add* e *bx_mult* em uma rede isolada, mantendo os valores de transporte público, velocidades desejadas e *ax* de acordo com os coletados em campo. Dessa forma, com os parâmetros *default*, o EPAM para o FS era de 27%, e, após a calibração, o menor erro encontrado foi de 10%, com os valores de *bx_add* = *bx_mult* = 5.0, sendo os mesmos valores encontrados para a rede da Av. Santos Dumont. Os resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados da calibração dos parâmetros *bx_add* e *bx_mult* para a Av. Pontes Vieira.

| Faixa de tráfego | FS coletado (vph) | FS <i>default</i> (vph) | EPAM (%) | FS calibrado (vph) | EPAM (%) |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------|--------------------|------------|
| OL_sul | 1477 | 1735 | 15% | 1331 | 11% |
| OL_norte | 1470 | 2240 | 34% | 1660 | 11% |
| LO_sul | 1544 | 2051 | 25% | 1445 | 7% |
| LO_norte | 1317 | 2038 | 35% | 1460 | 10% |
| Erro Percentual Médio (EPM) | | | 27% | | 10% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Partindo dos mesmos cenários de calibração realizados para a Av. Santos Dumont, a Tabela 28 apresenta os resultados obtidos para cada subtrecho. Com a rede com parâmetros *default*, o EPAM geral foi de 14%, sendo o EPAM de cada trecho (oeste-leste 1 e 2 e leste-oeste 1 e 2) com valores de 23%, 11%, 8% e 12%, respectivamente. Ao inserir os parâmetros de transporte público, o EPAM geral subiu para 19%, assim como ocorreu na rede da Av. Santos Dumont, na qual o EPAM subiu levemente de 31 para 32%. Ao inserir o valor coletado de *ax*, o erro teve uma leve diminuição, ficando com 18% e, por fim, após se inserir os valores calibrados de *bx_add* e *bx_mult*, o EPAM geral resultou em 14%, mesmo valor da rede *default*.

Tabela 28 – Resultados da calibração manual da Av. Pontes Vieira

| SubTrecho | VM Coletada (km/h) | VM default (km/h) | EPA M (%) | VM (km/h) Transp. Público | EPAM (%) | VM (km/h) ax = 2,2 | EPAM (%) | VM (km/h) bx_add = 5,0 bx_mult = 5,0 | EPA M (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|------------|---------------------------|----------|--------------------|----------|---|-----------|
| OL-1 | 14,04 | 20,76 | 32% | 22,75 | 38% | 23,05 | 39% | 19,29 | 27% |
| | 15,00 | 20,97 | 28% | 23,06 | 35% | 23,45 | 36% | 19,27 | 22% |
| | 15,86 | 20,22 | 22% | 22,75 | 30% | 22,14 | 28% | 19,43 | 18% |
| | 18,28 | 20,30 | 10% | 23,01 | 21% | 22,41 | 18% | 20,04 | 9% |
| EPAM OL-1 (%) | | | 23% | 31% | | 30% | | 19% | |
| OL-2 | 22,04 | 27,21 | 19% | 28,61 | 23% | 28,89 | 24% | 27,15 | 19% |
| | 23,16 | 26,92 | 14% | 29,78 | 22% | 30,04 | 23% | 27,58 | 16% |
| | 25,30 | 26,55 | 5% | 29,42 | 14% | 29,39 | 14% | 27,18 | 7% |
| | 25,54 | 27,61 | 7% | 30,08 | 15% | 29,93 | 15% | 27,45 | 7% |
| EPAM OL-2 (%) | | | 11% | 19% | | 19% | | 12% | |
| LO-1 | 23,77 | 23,05 | 3% | 24,35 | 2% | 24,16 | 2% | 20,35 | 17% |
| | 21,48 | 23,88 | 10% | 24,83 | 13% | 24,32 | 12% | 20,77 | 3% |
| | 19,79 | 22,01 | 10% | 23,45 | 16% | 23,20 | 15% | 18,58 | 7% |
| | 20,10 | 22,40 | 10% | 23,52 | 15% | 23,37 | 14% | 15,86 | 27% |
| EPAM LO-1 (%) | | | 8% | 11% | | 10% | | 13% | |
| LO-2 | 26,06 | 23,43 | 11% | 27,29 | 5% | 26,22 | 1% | 24,97 | 4% |
| | 26,51 | 22,15 | 20% | 27,28 | 3% | 27,82 | 5% | 23,94 | 11% |
| | 19,68 | 20,53 | 4% | 26,28 | 25% | 26,21 | 25% | 23,34 | 16% |
| | 18,76 | 21,17 | 11% | 25,31 | 26% | 24,71 | 24% | 22,51 | 17% |
| EPAM LO-2 (%) | | | 12% | 15% | | 14% | | 12% | |
| EPAM GERAL (%) | | | 14% | 19% | | 18% | | 14% | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como esperado, os diferentes trechos apresentaram diferentes ajustes de acordo com a calibração dos parâmetros. O melhor ajuste se deu para o trecho OL-1, no qual o erro caiu de 23% para 19%, ao passo que o pior ajuste se deu para o trecho LO-1, onde o erro passou de 8% para 13%. Os demais trechos mantiveram seus erros. Analisando a rede como um todo,

o trecho LO-1 é o trecho mais carregado, com maiores filas e congestionamentos, e apresentou uma maior sensibilidade aos parâmetros modificados. O mesmo não ocorreu para os outros 3 trechos que, ou mantiveram seus erros médios ou melhoraram. Partindo para a calibração com o AG, os mesmos cenários da Av. Santos Dumont foram executados, tendo os resultados apresentados na Tabela 29.

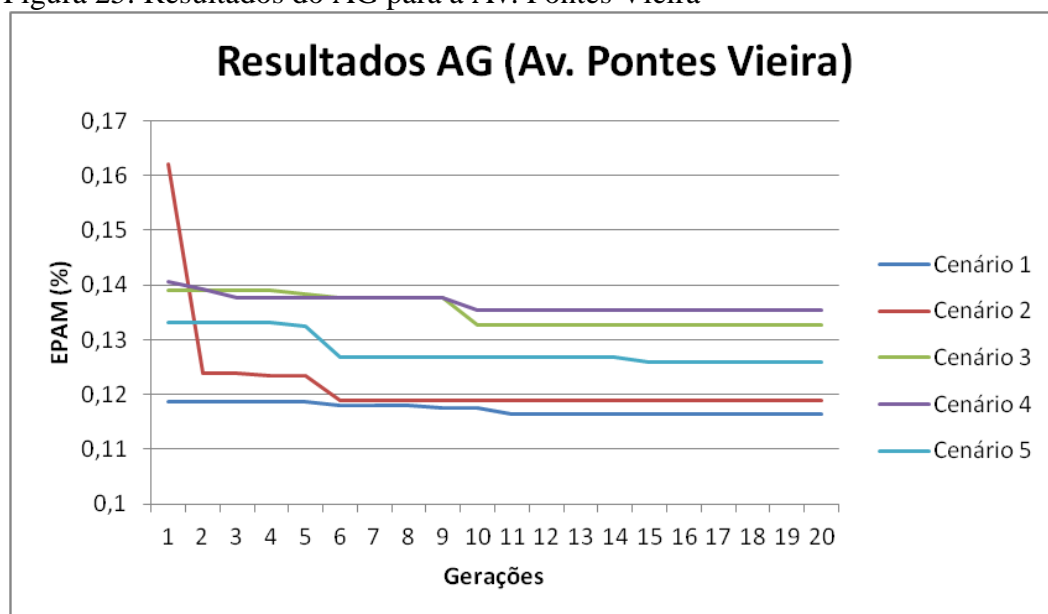
Tabela 29 – Resultados da calibração com AG da Av. Pontes Vieira

| Parâmetro / Cenário | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
| Velocidade Desejada | 50 Manual | 50 Manual | 50 Manual | 40 AG | 50 Manual | 40 AG |
| <i>ax</i> | 2,2 Manual | 2,2 Manual | 3,9 AG | 1,2 AG | 2,2 Manual | 2,1 AG |
| <i>bx_add</i> | 5,0 Manual | 6,9 AG | 3,3 AG | 3,3 AG | 5,0 Manual | 2,5 AG |
| <i>bx_mult</i> | 5,0 Manual | 1,6 AG | 4,6 AG | 2,1 AG | 5,0 Manual | 3,0 AG |
| <i>Dur. Lack of attention</i> | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,0 Default | 0,5 AG | 0,7 AG |
| <i>Prob. Lack of attention</i> | 0,0% Default | 0,0% Default | 0,0% Default | 0,0% Default | 0,1% AG | 1,0% AG |
| <i>Min. Headway front/rear</i> | 0,5 Default | 0,5 Default | 0,5 Default | 0,5 Default | 2,8 AG | 1,4 AG |
| <i>Safety Dist. Reduc. Factor</i> | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,6 Default | 0,8 AG | 0,7 AG |
| EPAM (%) | 14,0% | 13,5% | 11,9% | 11,9% | 12,6% | 11,6% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O menor erro encontrado pelo AG foi o cenário 5, com todos os parâmetros calibrados pelo AG, seguido pelo cenário 4, com todos os parâmetros calibrados manualmente com valores fixados e os demais usando AG. O gráfico da Figura 25 apresenta os resultados dos erros de todas as gerações para os 5 cenários de calibração. No geral, os resultados da Av. Pontes Vieira demoraram mais para convergir do que os resultados da Av. Santos Dumont.

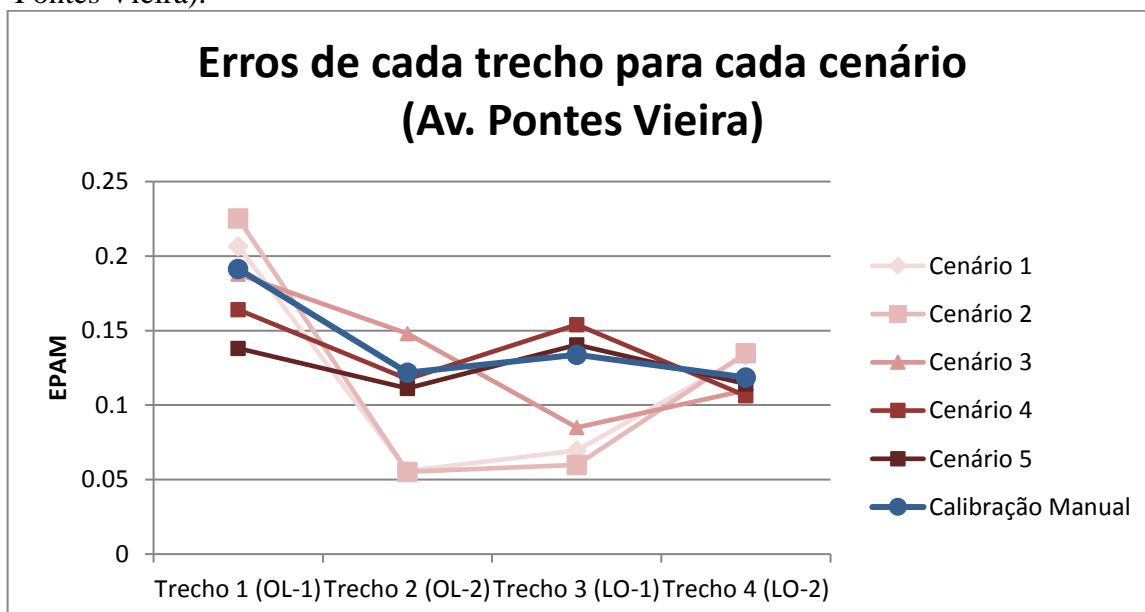
Figura 25: Resultados do AG para a Av. Pontes Vieira



Fonte: Elaborada pelo autor.

Diferentemente do ocorrido com a Av. Santos Dumont, todos os cenários do AG apresentaram um EPAM menor que o da calibração manual (14%), porém muito próximos. Esses resultados serão mais discutidos no item seguinte. Para avaliar o erro individual de cada trecho, o gráfico da Figura 26 apresenta o EPAM de cada trecho para cada cenário do AG, dispostos em escalas de cores vermelhas (cenário 1 na cor mais clara e cenário 5 na cor mais escura) e para a calibração manual sequenciada (em azul).

Figura 26 – Gráfico comparativo dos erros de cada trecho para cada cenário do AG (Av. Pontes Vieira).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como se pode observar pelo gráfico, o subtrecho 1 apresentou redução no erro médio à medida que os cenários foram sendo simulados, da mesma forma como ocorreu na calibração manual sequenciada (Ver Tabela 28). Os trechos 2 e 3 apresentaram um aumento no erro percentual com a simulação dos cenários, também semelhante à calibração manual e, por fim, o trecho 4 apresentou uma leve redução no erro percentual do cenário 1 para o cenário 5, assim como na calibração manual.

Dando continuidade, na fase de pré-calibração levantou-se a hipótese de que os parâmetros de *gap-acceptance* não fariam impacto significativo nas redes calibradas. Dessa forma, realizou-se uma análise de sensibilidade para o principal parâmetro desse modelo, o *min. time gap*, do submodelo de *Regras de Prioridade*, para os valores de 3.0s (*default*), 3.5s, 4.0s, 4.5s e 5.0s. Para cada valor foram realizadas 10 simulações de 1h e 5min cada e foi realizado um intervalo de confiança para a comparação com os resultados obtidos da rede calibrada com *min. timme gap* e *safety dist. reduction fator* em *default*. Os resultados para a Av. Santos Dumont e Av. Pontes Vieira, levando em consideração a velocidade média, encontram-se na Tabela 30 e na Tabela 31, respectivamente. Para o caso da Av. Pontes Vieira, utilizou-se a velocidade média da hora para cada um dos quatro trechos em vez dos intervalos de 15min.

Tabela 30 – Resultados da Análise de sensibilidade do Min. Time Gap para Av. Santos Dumont.

| <i>Min. Time Gap</i> | VM Calibrada | VM Simulada | IC (95%) | |
|----------------------|--------------|-------------|----------|-----|
| 3,0 | 15,0 | 15,0 | 0,0 | 0,0 |
| 3,5 | | 15,3 | -0,8 | 0,3 |
| 4,0 | | 15,3 | -0,9 | 0,4 |
| 4,5 | | 16,0 | -0,7 | 1,6 |
| 5,0 | | 15,6 | -0,6 | 0,6 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando os resultados das análises de sensibilidade, observou-se que a variação do parâmetro *Min. Time Gap* não apresentou impacto significativo na velocidade média das vias arteriais, como já era esperado. Isso justifica o fato destes parâmetros não terem entrado no processo da calibração. Em praticamente todos os IC o zero está incluso, e naqueles que não estão, o limite inferior ficou na ordem de 0,1 km/h. Outro fato confirmado é que a possível interferência desses parâmetros nos corredores arteriais está do fato da inserção dos veículos provenientes das vias secundárias. De uma forma geral, com o aumento da brecha crítica, a velocidade média da corrente aumentou, já que os veículos provenientes das vias secundárias

tinham mais dificuldade de se inserir na via principal. O item a seguir descreve o processo de validação dos modelos.

Tabela 31 – Resultados da Análise de sensibilidade do *Min. Time Gap* para Av. Pontes Vieira

| Trecho | VM Coletada (km/h) | Min. Time Gap | VM Simulada (km/h) | IC (95%) | |
|--------|--------------------|---------------|--------------------|----------|------|
| OL-1 | 19,5 | 3,5 | 19,9 | -0,2 | 0,3 |
| | | 4,0 | 20,0 | -0,2 | 0,3 |
| | | 4,5 | 19,8 | -0,4 | 0,2 |
| | | 5,0 | 19,7 | -0,4 | 0,0 |
| OL-2 | 27,3 | 3,5 | 27,1 | -0,7 | -0,1 |
| | | 4,0 | 27,2 | -0,6 | 0,0 |
| | | 4,5 | 27,2 | -0,7 | 0,1 |
| | | 5,0 | 27,5 | -0,2 | 0,3 |
| LO-1 | 18,9 | 3,5 | 18,6 | -0,4 | 0,0 |
| | | 4,0 | 18,6 | -0,5 | -0,1 |
| | | 4,5 | 18,8 | -0,3 | 0,2 |
| | | 5,0 | 18,8 | -0,3 | 0,1 |
| LO-2 | 23,7 | 3,5 | 24,0 | -0,3 | 0,6 |
| | | 4,0 | 23,5 | -0,7 | 0,1 |
| | | 4,5 | 24,1 | -0,5 | 1,1 |
| | | 5,0 | 23,7 | -0,7 | 0,4 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.5.2. Validação dos Modelos

A validação dos modelos se deu de forma distinta para os dois corredores em análise. Para a Av. Santos Dumont, a validação realizada foi em um trecho distinto do calibrado, enquanto na Av. Pontes Vieira a validação foi feita em um horário distinto do horário de calibração.

Na Av. Santos Dumont, a calibração foi feita para o subtrecho 2 (trecho entre a R. Carlos Vasconcelos e Av. Br. de Studart) e a validação se deu no subtrecho 1 (trecho entre a R. João Cordeiro e R. Carlos Vasconcelos). Na Av. Pontes Vieira, a rede foi calibrada com dados do dia 19 de outubro de 2016 no período de 7h às 8h e foi validada com dados de 26 de outubro de 2016 no período de 8h às 9h.

Para a Av. Santos Dumont, foram realizadas 30 simulações para os cenários da rede com todos os parâmetros com valores em *default*, a rede calibrada com os 4 parâmetros calibrados manualmente e sequenciados (velocidade desejada, *ax*, *bx_add* e *bx_mult*) e, por fim,

o cenário equivalente ao cenário 5 do AG, com os 4 parâmetros iniciais calibrados manualmente e os 4 últimos calibrados com o AG. Os resultados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados da Validação da Av. Santos Dumont (Trecho 1)

| Parâmetros modificados | | | | | | | Medida de Desempenho | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------|----------|
| <i>ax</i> | <i>bx_add</i> | <i>bx_mult</i> | <i>Dur. Lack</i> | <i>Prob. Lack</i> | <i>Min. Headway</i> | <i>Safety Dist Reduc Fact</i> | VM Simulada (km/h) | VM Coletada (km/h) | EPAM (%) |
| 2,0 <i>Default</i> | 2,0 <i>Default</i> | 3,0 <i>Default</i> | 0,0 <i>Default</i> | 0,0% <i>Default</i> | 0,5 <i>Default</i> | 0,6 <i>Default</i> | 21,00 | 15,6 | 26,0% |
| 2,2 Calib | 5,0 Calib | 5,0 Calib | 0,0 <i>Default</i> | 0,0% <i>Default</i> | 0,5 <i>Default</i> | 0,6 <i>Default</i> | 16,10 | | 3,2% |
| 2,2 Calib | 5,0 Calib | 5,0 Calib | 0,7 AG | 2,7% AG | 0,5 AG | 0,2 AG | 13,2 | | 18,6% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A validação com os parâmetros calibrados manualmente apresentou um EPAM de 3,2%, considerado muito bom para a análise. De acordo com os resultados, ao inserir os 4 parâmetros a mais do AG (os dois de *TLA*, o *Min. headway front/rear* e o *Safety distance reduction factor*), o erro aumentou de 3,2% para 18,6%, assim como ocorreu na etapa de calibração, passando de 6% para 10,31%. O mesmo procedimento foi realizado para a Av. Pontes Vieira, a qual os resultados encontram-se na Tabela 33.

A validação com os parâmetros calibrados manualmente apresentou um EPAM geral de 12%, o que pode ser considerado aceitável frente à complexidade da rede. De acordo com os resultados, ao inserir os 4 parâmetros a mais do AG (os dois de *TLA*, o *min. headway front/rear* e o *safety distance reduction factor*), o erro diminuiu de 12% para 9%, diferentemente do que ocorreu com a rede da Av. Santos Dumont. Os valores calibrados pelo AG para os parâmetros de *lane-changing* ficaram próximos ou iguais aos máximos estipulados para eles, sendo 2,8 m para o *min. headway front/rear* (valor máximo é 3,0 m) e 0,8 para o *safety Distance reduction factor*, igual ao valor máximo, o que pode ser condizente com o fenômeno de tráfego. Um valor alto de *min. headway front/rear* sugere cautela para o motorista, já que este aceitará distâncias maiores de *following*. Da mesma forma, um valor alto de *safety distance reduction factor*, no caso 0,8, sugere que a distância de segurança seja reduzida somente em 20% para manobras de mudança de faixa.

Tabela 33 – Resultados da Validação da Av. Pontes Vieira (Dia 26 de 8h às 9h)

| Trecho | Horário | VM Coletada (km/h) | VM default (km/h) | EPAM (%) | VM Cenário Zero (km/h) | EPAM (%) | VM Cenário 5 (km/h) | EPAM (%) |
|-----------------------|-------------|--------------------|-------------------|------------|------------------------|------------|---------------------|------------|
| OL-1 | 8h00 - 8h15 | 10,1 | 20,63 | 51% | 19,07 | 47% | 18,27 | 45% |
| | 8h15 - 8h30 | 11,1 | 20,91 | 47% | 20,41 | 45% | 19,43 | 43% |
| | 8h30 - 8h45 | 17,0 | 18,15 | 6% | 14,81 | -15% | 13,67 | -25% |
| | 8h45 - 9h00 | 14,0 | 16,99 | 18% | 11,57 | -21% | 10,75 | -30% |
| EPAM OL-1 (%) | | | | 30% | | 14% | | 8% |
| OL-2 | 8h00 - 8h15 | 18,7 | 28,44 | 34% | 28,17 | 34% | 27,24 | 31% |
| | 8h15 - 8h30 | 17,6 | 28,20 | 38% | 28,31 | 38% | 27,79 | 37% |
| | 8h30 - 8h45 | 22,5 | 25,69 | 13% | 27,61 | 19% | 26,99 | 17% |
| | 8h45 - 9h00 | 22,4 | 25,34 | 12% | 26,16 | 14% | 25,64 | 13% |
| EPAM OL-2 (%) | | | | 24% | | 26% | | 24% |
| LO-1 | 8h00 - 8h15 | 18,6 | 23,86 | 22% | 22,40 | 17% | 22,05 | 16% |
| | 8h15 - 8h30 | 23,3 | 23,91 | 2% | 22,13 | -5% | 21,53 | -8% |
| | 8h30 - 8h45 | 21,1 | 23,68 | 11% | 21,56 | 2% | 21,34 | 1% |
| | 8h45 - 9h00 | 21,7 | 23,80 | 9% | 21,97 | 1% | 21,69 | 0% |
| EPAM LO-1 (%) | | | | 11% | | 4% | | 2% |
| LO-2 | 8h00 - 8h15 | 22,3 | 23,02 | 3% | 23,92 | 7% | 23,79 | 6% |
| | 8h15 - 8h30 | 22,4 | 21,83 | -3% | 22,56 | 1% | 21,67 | -3% |
| | 8h30 - 8h45 | 21,4 | 22,06 | 3% | 24,83 | 14% | 23,56 | 9% |
| | 8h45 - 9h00 | 23,4 | 22,73 | -3% | 23,79 | 2% | 22,66 | -3% |
| EPAM LO-2 (%) | | | | 0% | | 6% | | 2% |
| EPAM GERAL (%) | | | | 16% | | 12% | | 9% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Visando obter uma maior capacidade de representação do modelo, realizou-se a comparação da velocidade média dos ônibus para o trecho em análise. Como dito anteriormente, foram registradas as placas dos ônibus nas extremidades da rede, assim como o instante de passagem, permitindo calcular a velocidade média dos coletivos. Para o sentido oeste-leste, os dados não foram representativos pois existem 2 rotas de ônibus, uma seguindo pela Av. Pontes Vieira e outra seguindo pela R. Isaac Amaral e Av. Desembargador Moreira. Porém, para o sentido leste-oeste, foi possível a obtenção dos dados. De acordo com o valor calculado, a velocidade média dos ônibus no sentido LO foi de 15,3 km/h. Com a rede calibrada e validada, a velocidade média obtida do simulador para os ônibus foi de 15,5 km/h, apresentando um erro percentual de apenas 1,5%.

O resultado da comparação da velocidade média dos ônibus reforça o processo de validação dos modelos, uma vez que a velocidade média dos coletivos é afetada não somente pela corrente de tráfego, onde atuam os parâmetros de todos os modelos comportamentais, como também dos parâmetros relacionados ao tempo de parada dos veículos, que foram

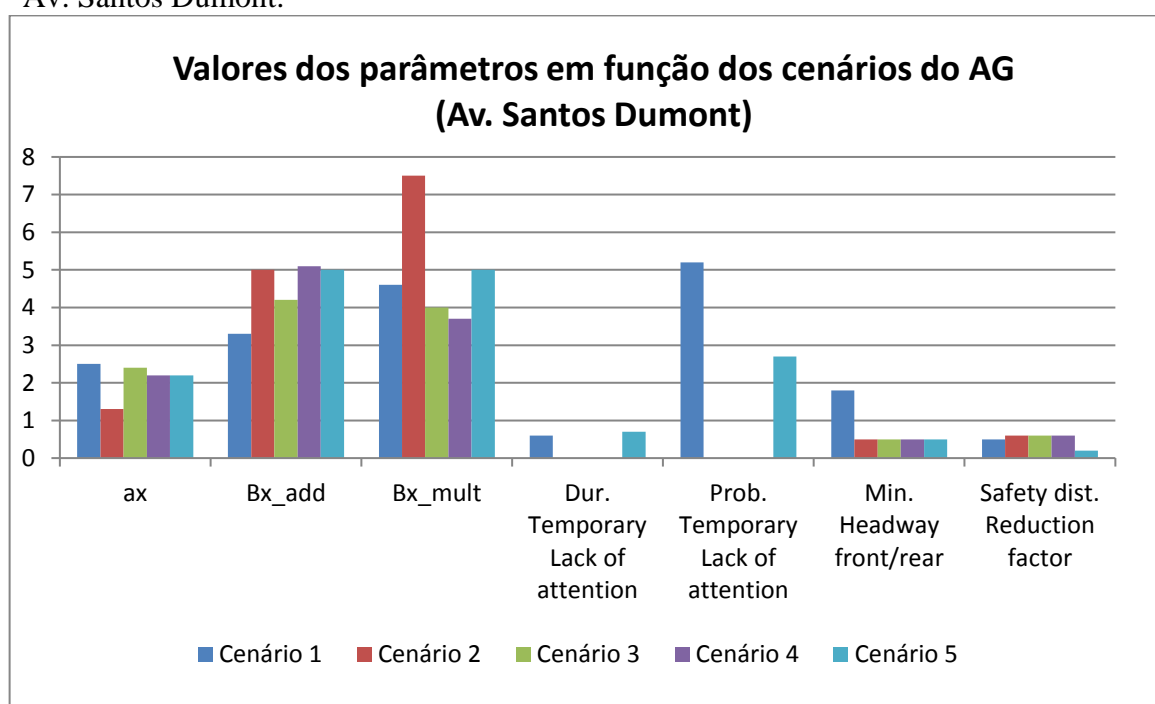
coletados em campo e inseridos no processo de modelagem. A etapa seguinte apresenta uma análise de todos os resultados obtidos pelos diferentes métodos de calibração.

5.2.6 Análise das estratégias de calibração

O processo de calibração manual e sequenciado aplicado para os dois corredores arteriais apresentou bons resultados no que diz respeito à modelagem das velocidades médias. Apesar de ser um processo dado por tentativa e erro, os parâmetros calibrados demonstraram erros aceitáveis para a modelagem desta medida de desempenho.

No caso da Av. Santos Dumont, a calibração manual apresentou um erro médio percentual menor do que o encontrado pelo AG. Sendo assim, para avaliar os métodos aplicados nesta pesquisa, se faz necessário, primeiramente, verificar os valores obtidos dos parâmetros. Para o caso da Av. Santos Dumont, com exceção do cenário 2, no qual o AG encontrou valores não muito condizentes para os parâmetros de W74 (ax muito baixo e bx 's muito altos), os demais cenários apresentaram valores relativamente aceitáveis para a modelagem. O gráfico da Figura 27 apresenta uma comparação dos parâmetros obtidos pela calibração manual e pelo AG, para a Av. Santos Dumont, com exceção do parâmetro de velocidade desejada.

Figura 27 – Gráfico com valores dos parâmetros em função dos cenários do AG para a Av. Santos Dumont.

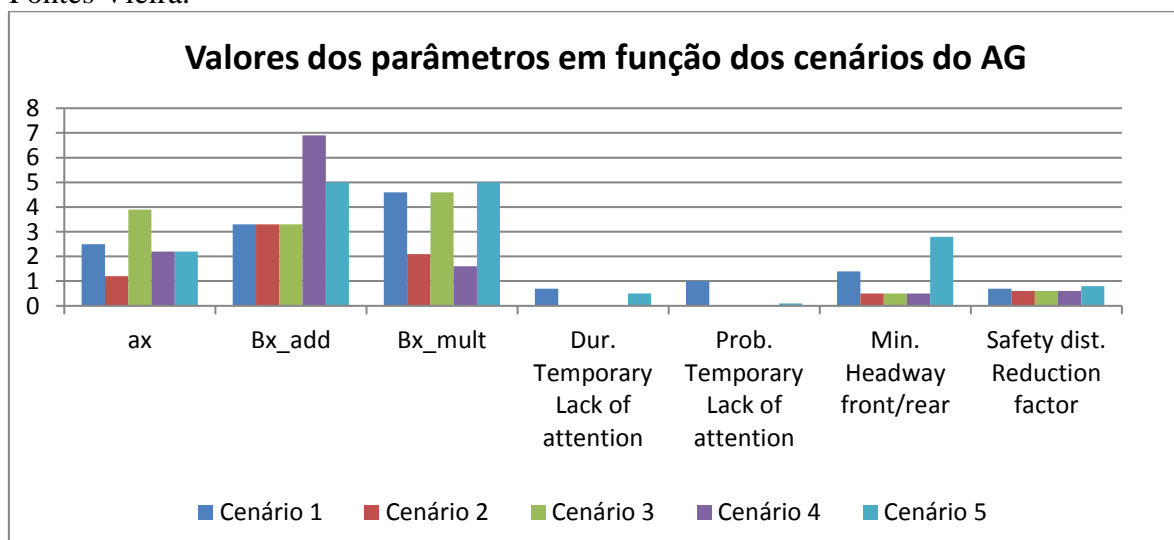


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o parâmetro *ax*, o valor coletado em campo foi de 2,2 m, equivalente a 10% a mais do valor *default* e o AG, no seu cenário com toda a calibração simultânea (cenário 1), encontrou o valor ótimo de 2,1 m para esse parâmetro, sendo 5% maior que o valor *default*. Da mesma forma, o parâmetro *bx_add* se apresentou 2,5 vezes maior que o *default* na calibração manual e, na calibração automatizada, o valor obtido foi 1,65 vezes maior. O *bx_mult* foi o que apresentou maior variação entre os cenários, o qual na calibração manual apresentou valor de cerca de 1,7 vezes o valor *default* e na automatizada um valor de 1,5 vezes, porém, no cenário 2 do AG, o valor desse parâmetro atingiu 2,5 vezes o valor *default*. A calibração automatizada também encontrou valores relativamente altos para o *prob. TLA* e *min. headway front rear*, no qual, para esse último, um valor de 3,6 vezes o valor *default*. A grande variação dos parâmetros contrapõe-se à pequena variação dos erros (10,31% o menor e 13,06% o maior), dando indícios de que o AG pode encontrar combinações não condizentes para a realidade com bom valores de *fitness*.

Ao analisar a Av. Pontes Vieira, todos os erros dos cenários do AG foram menores que o obtido da calibração manual, porém, as oscilações dos erros ao longo dos cenários foram semelhantes aos da calibração manual. Ao passo que os trechos 1 e 3 melhoraram seus resultados, os trechos 2 e 4 pioraram. Isso já era esperado pois, da mesma forma como se deu na calibração, os 4 trechos apresentavam diferentes características tanto espacialmente quanto ao longo do tempo, fazendo com que determinados trechos, em determinados intervalos de tempo, fossem mais sensíveis às variações dos parâmetros. O gráfico da Figura 28 apresenta os valores dos parâmetros para os diferentes cenários do AG para a Av. Pontes Vieira.

Figura 28 – Gráfico com valores dos parâmetros em função dos cenários do AG para a Av. Pontes Vieira.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando inicialmente os três parâmetros do W74, nota-se uma grande variação dos parâmetros *ax* e *bx_mult* ao longo dos 5 cenários, e um valor bastante destoante de *bx_add* no cenário 4. Um fato interessante foram os resultados do cenário 1 (completamente automatizado), nos quais esses parâmetros tiveram valores bem próximo ao *default*, sendo 2,1 m para *ax* (*default* 2,0 m), 3,3m para *bx_add* (*default* é 2,0m) e 4,6 para *bx_mult* (*default* 3,0), correspondendo a uma variação máxima de 1,65 vezes. Isso mostra que para essa rede os quatro últimos parâmetros tiveram uma grande influência, o que nota-se, inclusive na validação, na qual a adição desses parâmetros trouxe benefícios para determinados trechos.

Analisando, para os dois corredores, os resultados obtidos no cenário 1 (processo completamente automatizado e simultâneo), o AG encontrou valores próximos de *ax*, sendo 2,1 m para a Av. Santos Dumont e 2,5 m para a Av. Pontes Vieira, o que é um resultado satisfatório, levando em consideração o conceito deste parâmetro - espera-se que ele não varie muito em redes com condutores com mesmo padrão. Além do *ax*, o AG encontrou o mesmo valor de velocidade desejada para ambos os corredores (40 km/h). Em contrapartida, os valores encontrados de *bx_add* e *bx_mult* foram relativamente diferentes, sendo o *bx_add* 2,5 m para Av. Santos Dumont e 3,3 m para Av. Pontes Vieira (diferença de cerca de 30%), e o *bx_mult* de 3,0 para Av. Santos Dumont e 4,6 para Av. Pontes Vieira (diferença de cerca de 50%). De acordo com o fenômeno, como esses parâmetros ditam a distância de *following*, espera-se que para vias com características semelhantes eles tenham valores próximo. Quando estes foram calibrados tendo como medida-alvo o fluxo de saturação, os valores encontrados para esses dois parâmetros foram os mesmo para os dois corredores, o que demonstra uma maior confiabilidade nos resultados obtidos utilizando este método.

Para os demais parâmetros, o AG só apresentou uma grande diferença de um corredor para outro no parâmetro *prob. TLA*, sendo 5,2% para Av. Pontes Vieira e 1% para Av. Santos Dumont. Quando fixou-se os parâmetros encontrados manualmente, a variação deste parâmetro também foi alta, comparando as duas redes, sendo 2,7% para Av. Santos Dumont e 0,1% para Av. Pontes Vieira. Um fato que o AG desconhece é que os dois parâmetros de *TLA* devem ser analisados conjuntamente, pois um dita a frequência com o que o outro vai ocorrer. Dessa forma, um alto valor de duração de *TLA* com uma baixa frequência de ocorrência, pode ter o mesmo impacto de um baixo valor de duração com uma alta frequência.

Os parâmetros de *lane-changing* apresentaram valores próximos no cenário 1, sendo 1,8 m e 1,4 m os valores de *min. headway front/rear* para Av. Santos Dumont e Av. Pontes Vieira, respectivamente, e 0,5 e 0,7 para o *safety dist. reduction factor*, respectivamente. O mesmo não ocorreu para o cenário 5, justificando, mais uma vez, a diferença de impacto

desses parâmetros neste cenário para os dois corredores, o qual aumentou o EPAM da Av. Santos Dumont em relação à calibração manual sequenciada e diminuiu o EPAM para a Av. Pontes Vieira.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões da pesquisa

Partindo da problemática da ausência de uma metodologia de calibração satisfatória para modelar as velocidades médias em corredores arteriais urbanos, esta pesquisa de mestrado teve como objetivo principal a consolidação de um método de calibração para esta realidade que não seja embasado somente no método de calibração completamente automatizado e simultâneo. Apesar desta pesquisa ter como foco a medida de desempenho velocidade média, utilizando o microssimulador VISSIM, o aspectos gerais do método podem ser aplicados para a modelagem de qualquer medida de desempenho de tráfego, inclusive para o caso do tráfego ininterrupto.

A etapa inicial deste processo foi a compreensão dos parâmetros dos modelos comportamentais disponíveis no *software* (à exceção dos modelos de escolha de rota). Sendo assim, tendo como foco os movimentos longitudinais dos veículos, analisou-se cada parâmetro com relação ao seu conceito e a forma que o mesmo atua nas medidas-alvo e de desempenho. Nessa etapa foi necessária uma vasta revisão bibliográfica, uma vez que o manual do *software* omite boa parte do funcionamento desses parâmetros. Sendo assim, com auxílio de trabalhos passados, contato com desenvolvedores do *software* e testes em redes hipotéticas, compreendeu-se os 50 parâmetros analisados nesta pesquisa, dando mais atenção àqueles que mais impactavam no comportamento de *following* dos veículos.

A etapa seguinte foi a análise do impacto desses parâmetros na medida de desempenho velocidade média. Realizou-se uma análise de sensibilidade de cada parâmetro isoladamente, mantendo todos os demais com valor *default*, seguido de uma análise de sensibilidade com uma combinação desses parâmetros, dentro de cada modelo, criando perfis de condutores cautelosos e agressivos, considerando, dessa forma, a relação entre os parâmetros de forma mais realista. Um dos desafios desta etapa foi a definição dos limites dos parâmetros, já que muitos nunca tinham sido abordados na literatura. Assim, além do uso da literatura e de críticas a cerca de trabalhos encontrados, estipulou-se esses limites com base no conhecimento do autor e do grupo de pesquisa GTTEMA.

A realização das duas etapas iniciais permitiu atingir os dois primeiros objetivos específicos desta pesquisa. Uma vez realizada as análises de sensibilidade, verificou-se que o uso do modelo de *car-following* W99, para estimativa de velocidade média em vias arteriais urbanas, não trouxe benefícios em comparação com o modelo W74. Na análise de sensibilidade

realizada, todos os demais parâmetros do W99 que não estão disponíveis no W74 apresentaram impacto insignificante nos valores das velocidades médias.

Para o segundo objetivo específico, dos 50 parâmetros analisados dos 4 modelos disponíveis, verificou-se que 7 eram relevantes para o estudo, sendo os três do modelo de W74, dois parâmetros extras de *car-following* (*Dur. TLA* e *Prob. TLA*) e dois de *lane-changing* (*min. headway front/rear* e *safety distance reduction factor*). O baixo impacto dos parâmetros de *gap-acceptance* foi confirmado com uma análise de sensibilidade realizada após a calibração das redes, variando um dos principais parâmetros, *min. time gap*, de 3 a 5s. Os parâmetros de *lateral movements* exerceram um grande impacto na velocidade média, porém, tais parâmetros não tinham tanta relação com os movimentos longitudinais dos veículos e, devido à complexidade, não foram considerados nessa pesquisa.

A etapa seguinte consistiu na classificação dos parâmetros a fim de determinar os blocos de parâmetros a serem calibrados. Dessa forma, além dos 7 parâmetros dos modelos comportamentais, acrescentou-se a *velocidade desejada* no grupo daqueles a serem considerados no processo de calibração. Sendo assim, três blocos distintos foram formados, com diferentes estratégias de calibração. Os parâmetros *velocidade desejada* e *ax*, devido a sua facilidade de obtenção em campo, tiveram seus valores definidos com base nos dados coletados. Os parâmetros *bx_add* e *bx_mult* tiveram o fluxo de saturação como medida-alvo e, os demais quatro parâmetros, foram calibrados por meio de Algoritmos Genéticos. A definição dos blocos de parâmetros e suas estratégias correspondem ao terceiro e quarto objetivos específicos desta pesquisa, respectivamente.

A etapa seguinte foi de coleta de dados, a qual foi dividida em relação aos dados necessários para a codificação das redes e para a calibração dos modelos. O planejamento desta etapa foi de fundamental importância, uma vez que muitas variáveis se correlacionavam e precisavam ser coletadas simultaneamente, além da quantidade elevada de pesquisadores de campo. Optou-se por utilizar duas redes distintas para se ter mais confiabilidade no processo e nos resultados obtidos, além de permitir a análise de cenários diferentes. Apesar de algumas intercorrências, os métodos de coleta mostraram-se eficientes, sendo a contagem manual para os volumes direcionais, uso de câmeras para dados de transporte público e composição veicular, coleta de fluxo de saturação com uso com filmagens aéreas (usando *Drone*) e cronômetros, coleta de distâncias entre veículos parados também com auxílio de *Drone*, coleta de tempos de viagem através de registro de placas e veículos-teste e, por fim, coleta de velocidades desejadas com radares com ondas de rádio. Uma exceção nos métodos bem sucedidos foi a coleta de aceleração dos veículos, que registrou valores bem diferentes daqueles utilizados no *software*.

Sendo assim, propõe-se, para essa etapa, que a coleta das acelerações usando o OBD seja com um veículo desimpedido, fora do regime de *following*.

O método teve continuidade com a calibração dos parâmetros e modelos. Inicialmente verificou-se, através de simulações com parâmetros *default*, a adequabilidade das redes codificadas e a consistência nos dados coletados. Em ambas as redes, tanto a velocidade média quanto o fluxo de saturação tiveram seus valores inicialmente superestimados pelo microsimulador, o que possibilitou identificar um padrão nos modelos em *default* e dar um direcionamento para a calibração destes. Sendo assim, partiu-se para a definição dos cenários de calibração.

A calibração manual e sequenciada se deu de acordo com os blocos definidos, nos quais a *velocidade desejada* utilizada, com base nos valores coletados em campo, foi de 50 km/h, o *ax* de 2,2 m e os valores de *bx_add* e *bx_mult* ambos iguais a 5,0 para os dois corredores analisados. No caso da Av. Santos Dumont, o EPAM das velocidades médias para a rede em *default* foi de 31%, passando para 32% com a inserção dos valores de *velocidade desejada* e *ax*, e 6% após se definir os valores de *bx_add* e *bx_mult*. Para o fluxo de saturação, o EPAM final foi de 4%. Com relação à Av. Pontes Vieira, o EPAM geral para a rede *default* foi de 14%, passando para 18% quando se adicionou os valores de *velocidade desejada* e *ax*, voltando a ficar em 14% após a inserção de *bx_add* e *bx_mult*. O EPAM para o fluxo de saturação da Av. Pontes Vieira foi de 10%. Apesar de aceitáveis, os erros para a Av. Pontes Vieira foram maiores devido à complexidade da rede e as diferentes configurações de demanda dos quatro trechos analisados, fazendo com que determinados trechos fossem mais sensíveis à variação dos parâmetros. Além disso, o fato dos valores de *bx_add* e *bx_mult* terem sido os mesmos para as duas redes reforça a validação dos valores encontrados.

A calibração automatizada e simultânea se deu com cinco cenários distintos, sendo o primeiro com todos os oito parâmetros calibrados simultaneamente e o quinto com os quatro parâmetros iniciais definidos com os valores encontrados na calibração manual. Para o caso da Av. Santos Dumont, os EPAM dos cinco cenários foram maiores que o da calibração manual (6%), porém, com uma pequena variação entre os cenários, variando de 10,3% a 12,8%. Para a Av. Pontes Vieira, os EPAM encontrados pelo AG foram levemente menores que o encontrado na calibração manual (14%), também com pouca variação entre os cenários, estando entre 11,6% e 13,5%. Em contrapartida, com relação aos valores dos parâmetros, houve uma variação considerável entre os cenários do AG e entre os dois processos de calibração, o que nos faz concluir que o AG pode dar bons valores de *fitness*, porém com combinações improváveis dos parâmetros.

A etapa de validação se deu de forma distinta para os dois corredores. Para a Av. Santos Dumont, a validação ocorreu em um subtrecho diferente do utilizado na calibração. Aplicados os valores obtidos da calibração manual, o EPAM encontrado para a velocidade média foi de apenas 3,2%, o que se configura como um resultado muito bom para a análise. Para a Av. Pontes Vieira, a validação se deu para o mesmo trecho, porém com dados de outro dia de coleta. Aplicando inicialmente os valores obtidos da calibração manual, o EPAM geral foi de 12%, um valor que, devido à complexidade da rede e em comparação com o EPAM da rede *default* (16%), configura-se aceitável para o processo de validação. Ao se incorporar os valores dos quatro últimos parâmetros encontrados pelo AG (parâmetros de *TLA* e *lane-changing*), a rede da Av. Santos Dumont apresentou uma piora na estimativa da velocidade média (passando de 3,2% para 18,6%), mas a Av. Pontes Vieira diminuiu o erro, passando de 12% para 9%. Esses padrões também foram encontrados na etapa de calibração, mostrando que o modelo calibrado se comportou como esperado quando se utilizou cenários distintos na validação.

A realização da calibração e validação das duas redes distintas através de processos de calibração distintos, sendo um manual e sequenciado e outro automatizado e simultâneo, atinge o quinto e último objetivo específico desta pesquisa. O primeiro processo de calibração se mostrou satisfatório, uma vez que resultou em erros de estimativa de velocidade média aceitáveis para os dois corredores, principalmente para a Av. Santos Dumont. A calibração automatizada e simultânea, apesar de encontrar erros de estimativa satisfatórios, não traz tanta confiabilidade na combinação dos valores dos parâmetros calibrados. Esta conclusão é corroborada pelo fato de que os erros são bem próximos para os cinco cenários de AG com valores de parâmetros bem distintos.

Por fim, é interessante ressaltar que, de forma geral, a metodologia apresentada nesta pesquisa de mestrado pode ser aplicado em outros contextos, ou seja, para a estimativa de outras medidas desempenho de outros tipos de elementos viários, inclusive com a utilização de outro *software* de simulação. Acredita-se, portanto, que partindo da compreensão dos conceitos dos parâmetros e modelos e da análise do impacto destes no fenômeno que se deseja modelar, é possível e aconselhável identificar blocos de parâmetros a serem estimados separadamente.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa aqui desenvolvida apresenta uma metodologia de calibração do microssimulador VISSIM para vias arteriais urbanas, tendo como objetivo estimar a velocidade

média. Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se, inicialmente, aplicar a metodologia utilizando outro pacote computacional, como o *TransModeler* e o *AIMSUM*, simuladores consolidados no meio técnico-científico, avaliando, não somente a capacidade de representação desses simuladores, como, também, a confiabilidade do método aqui desenvolvido.

Nesta pesquisa, o modelo de *lateral movements* não foi considerado no processo de calibração. Apesar de reconhecer o acentuado impacto de seus parâmetros na velocidade média, esta pesquisa teve como foco os parâmetros que influenciam o movimento longitudinal dos veículos. Dessa forma, propõe-se aplicar esta metodologia incorporando esse modelo, analisando, não somente o movimento longitudinal dos veículos, mas também as interações laterais ao longo do corredor. Os perfis de aceleração e potência dos veículos também precisam ser melhor investigados e considerados.

A medida de desempenho analisada nesta pesquisa foi a velocidade média, a variável mais utilizada para representar o desempenho operacional do tráfego de vias urbanas. Contudo, propõe-se que a metodologia aqui desenvolvida seja aplicada para outras medidas de desempenho como atraso e número de paradas.

O método proposto nesta pesquisa foi comparado com o método de calibração automatizado por algoritmos genéticos. Propõe-se, para trabalhos futuros, avaliar outros métodos de otimização.

Por fim, apesar de ter sido considerado no processo de calibração, a modelagem do transporte público não foi o foco desta pesquisa de mestrado. Diante do contexto regional e nacional, é sabido a grande importância do desenvolvimento de corredores multimodais nas principais capitais brasileiras. Dessa forma, propõe-se que esta metodologia seja aplicada para modelar um corredor multimodal, com mais foco no transporte público e não-motorizado, os quais possuem características peculiares e distintas das dos automóveis.

REFERÊNCIAS

AGHABAYK, K.; SARVI, M.; YOUNG, W.; KAUTZSCH, L. A novel methodology for evolutionary calibration of vissim by multi-threading. **Australasian Transport Research Forum**, 2013 Proceedings. Brisbane, Australia.

AHMED. Exploring New Bus Priority Methods at Isolated Vehicle Actuated Junctions. **Transportation Research Procedia**, 2014.

ASAMER, J.; VAN ZUYLEN, H. J.; HELMANN, B. Calibrating car-following parameters for snowy road conditions in the microscopic traffic simulator VISSIM. **IET Int. Transp.Systems**, Vol. 7, n. 1, p. 114-121, 2013.

BARCELÓ, J. **Fundamentals Traffic Simulations. International Series in Operations Research & Management Science**, v.145, Ed. Springer, 2010.

BARCELO, J.; CASAS, J. **Methodological notes on the calibration and validation of microscopic traffic simulation models**. In: 83^o TRB Annual Meeting, Washington, DC (2004).

BESSA JR; SETTI, J. R. **Relações Fluxo-Velocidade para Rodovias de Pista Simples no Brasil**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 2012.

BRACKSTONE, M.; SULTAN, B.; Mcdonald, M. Motor-way Driver Behavior: Studies on Car-following. **Transportation Research Record Part F**. Vol. 5, p. 31-46, 2002.

BRILON, W.; KOENIG, R.; TROUTBECK, R. Useful estimation procedures for critical gaps. **Transportation Research Record Part A: Policy and Practice**, [S.l.], abril de 1999. Volume 33, Issues 3-4, p. 161-186.

CASSIANO, Demostenis Ramos. **Avaliação das emissões poluentes de um veículo flex em percurso real urbano e rodoviário no ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas ao Desenvolvimento do Semiárido, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 143 fl, 2016.

CALEFFI, F.; MOISAN, Y.; Cybis, H.B.B.; Michel, F.; Hirsch, F. Simulação de alternativas operacionais de um segmento especial de autoestrada através do software Vissim. **Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Joinville, 2012.

CHAGAS, Luciano Aparecido. **Critérios para definição de elementos de projeto de estações de corredores de BRT**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 166 fl, 2014.

CINTRA, M. **Os custos dos congestionamentos na cidade de São Paulo**. Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, FGV-EESP. Abril de 2014.

BESSA JR., J.; CUNHA, A. L.; SETTI, J. R. **Genetic Algorithm for the Calibration of Vehicle Performance Models of Microscopic Traffic Simulators**. Departamento de

Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brazil, 2009.

CUNTO, F.; SACCOMANNO, F. F. Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections. **Accident Analysis and Prevention**, n. 40, p. 1171-1179, 2008.

DENATRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. Volume V – Sinalização Semafórica, 2014.

DOWLING, R.; SKABARDONIS, A.; HALKIAS, J.; Mchale, G.; ZAMMIT, G. Guidelines for Calibration of Microsimulation Models. **Transportation Research Record**, n. 1876, p. 1-9, 2004.

EGAMI, C. Y. **Adaptação do HCM-2000 para Determinação do Nível de Serviço em Rodovias de Pista Simples Sem Faixas Adicionais no Brasil**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ELEFTERIADOU, L. **An introduction to traffic flow theory**. Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, USA. Ed. Springer, 2014.

FELLENDORF, M.; VORTISCH, P. **Traffic Simulation with VISSIM. Fundamentals of Traffic Simulation**. International Series in Operations Research and Management Science, Cap. 2, Ed. Springer, 2010.

FHWA. **Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software**. Federal Highway Administration, 2004.

GAO, Y. **Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models**. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.

GAZIS, D.; HERMAN, R.; ROTHERY, R. W. Non-linear follow-the Leader models of traffic flow. **Oper Res** 9:545-567, 1961.

GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Record Part B**, 15B: 105-111, 1981.

GIPPS, P. G. A model for the structure of lane changing decisions. **Transportation Research**, 20B: 403-414, 1986.

GOMES, G.; MAY, A.; HOROWITZ, R. Calibration of VISSIM for a Congested Freeway. **California PATH Research Report**, 2004.

HALATI, A.; LIEU, H.; WLAKER, S. CORSIM – Corridor traffic simulation model. In: **Traffic congestion and traffic safety in the 21st century: challenges, innovations and opportunities**, Chicago. Proceedings... Chicago: American Society of Civil Engineering, p.570–576, 1997.

HIDAS, P. Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. **Transportation Research Part C** 10, p. 351-371, 2002.

HOLLANDER, Y.; LIU, R. The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. **Transportation**, v. 35, p. 347–362, 2008.

HOSSAIN, M. J. **Calibration of the microscopic traffic flow simulation model VISSIM for urban conditions in Dhaka city**. Master thesis, University of Karlsruhe, Germany, 2004.

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

JIE, L.; ZUYLEN, H., V.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. **Transportation Research Part C**, no. 31, p. 172-184, 2013.

JIANG, X.; BARED, J.; MANESS, M.; HALE, D. Traffic performance analysis of dynamic merge control using 1 micro-simulation. **Transportation Research Record**, Novembro 2014.

KIM, S. J.; KIM, W.; RILLET, L.R. Calibration of Microsimulation Models Using Nonparametric Statistical Techniques. **Transportation Research Record**, n. 1935, p.111-119, 2005.

KIM, J.; MAHMASSAMI, H. S. Correlated Parameters in Driving Behavior Models. **Transportation Research Record**, n. 2249, p 62-77, 2011.

LACERDA, V. M.; NETO, M. M. C. Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do vissim para vias arteriais urbanas. **Anais do XXVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Curitiba, PR, 2014.

LOWNES, N.; MACHEMEHL, R. Sensitivity of Simulation Capacity to Modification of VISSIM Driver Behavior Parameters. **Transportation Research Record**, n. 1988, p. 102-110, 2006.

MA, T.; ABDULHAI, B. Genetic Algorithm-based Optimization Approach and Generic Tool for Calibration Traffic Microscopic Simulation Parameters. **Transportation Research Record** 1800, p. 6-15, 2002.

MA, T.; AHN, S. Comparisons of Speed–Spacing Relations Under General Car Following Versus Lane Changing. Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University. **Transportation Research Record**, n. 2088, p. 138-147, 2008.

MAIA, F. V. B. **Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microssimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 104 fl, 2007.

MANIJUNATHA, P.; VORTISCH P. P.; MATHEW, T. V. Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic, **Transportation Research Board 92nd Annual Meeting**, Washington D. C., 2013.

MATSUHASHI, N.; HYODO, T.; TAKAHASHI, Y. Image processing analysis on motorcycle oriented mixed traffic flow in Vietnam. **Proceedings of Eastern Asia society for transportation studies (EAST)**, vol 5, Tokyo, pp 929–944, 2005.

MEDEIROS, André Luis. **Aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de redes viárias urbanas microssimuladas** / André Luis Medeiros – 2012. 90 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

MEDEIROS, A. L.; NETO, M. M. C.; LOUREIRO, C.F.; BESSA-JR, J. E. Calibração de Redes Viárias Urbanas Microssimuladas com o uso de Algoritmos Genéticos. **Anais do XXVII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Belém, PA, 2013.

MENNENI, S.; SUN, C., VORTISCH, P. Microsimulation Calibration Using Speed–Flow Relationships. **Transportation Research Record**, n. 2088, p. 1-9, 2008.

MILLER, D. M. **Developing a procedure to identify parameters for calibration of a VISSIM model**. Georgia Institute of Technology - Maio 2009.

OLIVEIRA, M. L.; CYBIS, H. B. B. **Revisão da Experiência de Calibração do Software VISSIM Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira**. VIII SEPROSUL – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana. Bento Gonçalves, Brasil, 2008.

PANWAI, S., DIA, H. Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. **IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**, p. 314-325, 2005.

PARK, B. B.; SCHNEEBERGER, J. D. Microscopic Simulation model calibration and Validation. Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. **Transportation Research Record**, n. 1856, p. 185–192, 2003.

PARK, B. B.; QI, H. M. Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. **Transportation Research Record**, no. 1934, p. 208-217, 2005.

PERON, Luciano. **Contribuição metodológica para aplicação de prioridade semafórica condicional em corredores de ônibus**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP. 120 fl, 2015.

PIPES, L. A. **An operational analysis of traffic dynamics**. J. Appl Phys 24(3): 274-281, 1953.

POYARES, C. N. **Critérios para Análise dos Efeitos de Políticas de Restrição ao Uso de Automóveis em Áreas Centrais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transportes, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

PTV. **PTV Vision Training - VISSIM Advanced II**, 2010. Disponível em: <ftp://its.cutr.usf.edu/VISSIM%20Training%20Docs/Presentation/Presentations/Freeway-Fundamentals.pdf>. Acesso em 02 de Dezembro de 2015.

PTV. **VISSIM 6.0. Manual do Usuário**. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany, 2014.

PTV. **VISSIM Fórum - LinkedIn**. Disponível em: https://www.linkedin.com/grp/post/2524087-251652670?goback=%2Egna_2524087. Acesso em 02 de Dezembro de 2015.

RAFF, M. S.; HART, J. W. **A volume warrant for urban stop signs**. Eno foundation for highway traffic control: Saugatuck, Connecticut, 1950.

RAJ, G. G.; SEKHAR, C. R.; VELMURUGANC, S. Micro simulation based performance evaluation of Delhi bus rapid transit corridor. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, 104, 825–834, 2013.

RAKHA, H., GAO, J. **Calibration of steady-state car-following models using macroscopic loop detector data**. Virginia Tech Transportation Institute, Washington, USA, 2008.

TOLEDO, T.; KOUTSOPOULOS, H. N. Statistical Validation of Traffic Simulation Models. In **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 142-150, 2004.

TRB. **HIGHWAY CAPACITY MANUAL**. **Transportation Research Board**, Nacional Research Council, Washington, D.C., U.S.A., 2010.

VITI, Francesco; WOLPUT, Bart; TAMPÈRE, Chris M.J. **Dynamic Modeling of VISSIM Critical Gap Parameter at Unsignalized Intersections**, 2013.

WARREN, A. Calibration of microsimulation models to field-measured saturation flow rates on signalized arterials. In **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 142-150, 2016.

WASHINGTON, S. Conducting Statistical Tests of Hypotheses: Five Common Misconceptions. **Transportation Research Record (TRR)** 1665. Paper No. 99-1186, 2000.

WIEDEMANN, R. **Simulation des Verkehrsflusses**. Dissertação do Instituts fuer Verkehrswesen, Heft 8, Uniersitaet Karlsruhe, 1974. Desde 2009 – Karlsruher Institue fuer Technologie.

WIEDEMANN, R.; REITER, U. **Microscopic Traffic Simulation - The Simulation System Mission – Background and Actual State**, 1992.

APÊNDICE A: TABELAS COM DADOS DE DEMANDA DA AV. PONTES VIEIRA

Dados do dia 19 de Outubro de 2016

| Capitão Gustavo | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|-----|-------|-----|---|---|-------|-------|------|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 24 | 102 | 21 | 147 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 284 | 0 | 284 | 0 | 257 | 7 | 264 |
| 7:15 - 7:30 | 26 | 103 | 23 | 152 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 281 | 0 | 281 | 0 | 234 | 14 | 248 |
| 7:30 - 7:45 | 25 | 113 | 20 | 158 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 306 | 0 | 306 | 0 | 239 | 13 | 252 |
| 7:45 - 8:00 | 20 | 113 | 33 | 166 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 307 | 0 | 307 | 0 | 226 | 9 | 235 |
| 8:00 - 8:15 | 27 | 94 | 22 | 143 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 308 | 0 | 308 | 0 | 215 | 14 | 229 |
| 8:15 - 8:30 | 23 | 107 | 34 | 164 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 296 | 0 | 296 | 0 | 269 | 13 | 282 |
| 8:30 - 8:45 | 22 | 107 | 32 | 161 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 294 | 0 | 294 | 0 | 289 | 13 | 302 |
| 8:45 - 9:00 | 27 | 105 | 25 | 157 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 273 | 0 | 273 | 0 | 269 | 26 | 295 |
| | 16% | 68% | 17% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 95% | 5% | 100% |

| Fiscal Vieira | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|----|------|-------|-----|----|------|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 272 | 16 | 288 | 0 | 274 | 12 | 286 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 269 | 23 | 292 | 0 | 237 | 7 | 244 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 7 | 7 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 288 | 19 | 307 | 0 | 258 | 11 | 269 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 7 | 7 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 268 | 30 | 298 | 0 | 230 | 11 | 241 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 7 | 7 | 0 | 275 | 27 | 302 | 0 | 230 | 12 | 242 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 11 | 11 | 0 | 267 | 25 | 292 | 0 | 267 | 12 | 279 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 270 | 22 | 292 | 0 | 284 | 16 | 300 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 261 | 20 | 281 | 0 | 283 | 11 | 294 |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 92% | 8% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

| Prof. Carvalho | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|---|-------|-----|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|-------|------|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 38 | 249 | 8 | 295 | 0 | 279 | 38 | 317 | 0 | 332 | 0 | 332 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 16 | 205 | 12 | 233 | 0 | 249 | 18 | 267 | 0 | 307 | 0 | 307 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 19 | 211 | 22 | 252 | 0 | 259 | 27 | 286 | 0 | 318 | 0 | 318 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 19 | 276 | 11 | 306 | 0 | 285 | 36 | 321 | 0 | 336 | 0 | 336 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 9 | 255 | 22 | 286 | 0 | 357 | 32 | 389 | 0 | 329 | 0 | 329 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 13 | 210 | 19 | 242 | 0 | 288 | 32 | 320 | 0 | 328 | 0 | 328 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 13 | 165 | 12 | 190 | 0 | 208 | 15 | 223 | 0 | 359 | 0 | 359 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 6 | 166 | 10 | 182 | 0 | 238 | 18 | 256 | 0 | 365 | 0 | 365 |
| | | | | | 7% | 88% | 6% | 100% | 0% | 91% | 9% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| Rui Barbosa | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-----|-----|-------|-----|---|---|-------|-------|------|----|-------|-------|-----|-----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 87 | 139 | 31 | 257 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 | 0 | 203 | 0 | 303 | 37 | 340 |
| 7:15 - 7:30 | 87 | 139 | 31 | 257 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 213 | 0 | 213 | 0 | 284 | 35 | 319 |
| 7:30 - 7:45 | 87 | 139 | 31 | 257 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 322 | 0 | 322 | 0 | 192 | 66 | 258 |
| 7:45 - 8:00 | 58 | 116 | 27 | 201 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218 | 0 | 218 | 0 | 167 | 3 | 170 |
| 8:00 - 8:15 | 77 | 130 | 29 | 236 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 240 | 0 | 167 | 17 | 184 |
| 8:15 - 8:30 | 61 | 105 | 23 | 189 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242 | 0 | 242 | 0 | 213 | 9 | 222 |
| 8:30 - 8:45 | 56 | 134 | 28 | 218 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 280 | 0 | 280 | 0 | 238 | 16 | 254 |
| 8:45 - 9:00 | 52 | 113 | 20 | 185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 251 | 0 | 251 | 0 | 217 | 47 | 264 |
| | 31% | 57% | 12% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 89% | 11% | 100% |

| José Lourenço | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|-----|-------|-------|---|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 | 33 | 236 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 213 | 33 | 246 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 365 | 33 | 398 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 357 | 48 | 405 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 428 | 41 | 469 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 197 | 42 | 239 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 281 | 41 | 322 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249 | 21 | 270 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | 0% | 88% | 12% | 100% | | | | |

| Sabino Monte | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 216 | 12 | 228 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 204 | 9 | 213 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 205 | 11 | 216 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 180 | 16 | 196 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 199 | 11 | 210 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 187 | 10 | 197 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 205 | 10 | 215 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 226 | 7 | 233 |
| | | | | | | | | | 0% | 95% | 5% | 100% | | | | |

| Barão de Studart | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|----|------|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|-----|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 51 | 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 185 | 7 | 192 | 108 | 202 | 0 | 310 | |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 49 | 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 197 | 7 | 204 | 107 | 213 | 0 | 320 | |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 82 | 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 259 | 9 | 268 | 100 | 222 | 0 | 322 | |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 58 | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 265 | 9 | 274 | 110 | 196 | 0 | 306 | |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 74 | 74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 244 | 20 | 264 | 100 | 207 | 0 | 307 | |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 58 | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 251 | 14 | 265 | 108 | 187 | 0 | 295 | |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 62 | 62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 252 | 14 | 266 | 116 | 222 | 0 | 338 | |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 54 | 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 240 | 18 | 258 | 129 | 225 | 0 | 354 | |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | | | | | | 0% | 95% | 5% | 100% | 34% | 66% | 0% | 100% |

| Silva Paulet | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|---|----|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 | 8 | 8 | 0 | 226 | 2 | 228 | 0 | 220 | 4 | 224 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 248 | 3 | 251 | 0 | 197 | 4 | 201 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 11 | 11 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 248 | 2 | 250 | 0 | 222 | 6 | 228 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 14 | 14 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 274 | 6 | 280 | 0 | 188 | 3 | 191 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 276 | 6 | 282 | 0 | 173 | 8 | 181 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 9 | 9 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 243 | 4 | 247 | 0 | 173 | 8 | 181 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 7 | 7 | 0 | 253 | 3 | 256 | 0 | 202 | 3 | 205 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|---|----|----|------|------|----|----|------|------|----|-----|----|------|----|-----|----|------|
| 8:4 | 9:0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 7 | 7 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 262 | 6 | 268 | 0 | 195 | 3 | 198 |
| | | | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 98% | 2% | 100% | 0% | 98% | 2% | 100% |

| José Vilar | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|---|---|-------|-----|---|-----|-------|-------|------|----|-------|-------|------|----|-------|----|------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | | |
| 7:0 | 7:1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | - | 5 | - | 0 | 0 | 0 | 11 | 157 | 14 | 182 | 0 | 222 | 36 | 258 | 0 | 244 | 0 | 244 |
| 7:1 | 7:3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 25 | 131 | 8 | 164 | 0 | 200 | 35 | 235 | 0 | 201 | 0 | 201 |
| 7:3 | 7:4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | - | 5 | - | 0 | 0 | 0 | 21 | 171 | 15 | 207 | 0 | 227 | 43 | 270 | 0 | 227 | 0 | 227 |
| 7:4 | 8:0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 28 | 172 | 16 | 216 | 0 | 237 | 18 | 255 | 0 | 196 | 0 | 196 |
| 8:0 | 8:1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | - | 5 | - | 0 | 0 | 0 | 23 | 137 | 12 | 172 | 0 | 265 | 39 | 304 | 0 | 211 | 0 | 211 |
| 8:1 | 8:3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 27 | 138 | 9 | 174 | 0 | 232 | 23 | 255 | 0 | 194 | 0 | 194 |
| 8:3 | 8:4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | - | 5 | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 110 | 11 | 139 | 0 | 214 | 24 | 238 | 0 | 214 | 0 | 214 |
| 8:4 | 9:0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 11 | 98 | 12 | 121 | 0 | 246 | 27 | 273 | 0 | 231 | 0 | 231 |
| | | | | | | | 12% | 81% | 7% | 100% | 0% | 88% | 12% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| Nunes Valente | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|---|---|-------|-------|---|---|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------|----|----|------|------|----|----|------|------|----|------|----|------|----|-----|----|------|
| 7:0 0 - 5 | 7:1 5 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 13 | 13 | 0 | 245 | 0 | 245 | 0 | 245 | 9 | 254 |
| 7:1 5 - 0 | 7:3 0 | - | 0 | 14 | 14 | 0 | 0 | 23 | 23 | 0 | 238 | 0 | 238 | 0 | 193 | 6 | 199 |
| 7:3 0 - 5 | 7:4 5 | - | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 22 | 22 | 0 | 270 | 0 | 270 | 0 | 257 | 5 | 262 |
| 7:4 5 - 0 | 8:0 0 | - | 0 | 21 | 21 | 0 | 0 | 46 | 46 | 0 | 276 | 0 | 276 | 0 | 205 | 7 | 212 |
| 8:0 0 - 5 | 8:1 5 | - | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 21 | 21 | 0 | 247 | 0 | 247 | 0 | 178 | 9 | 187 |
| 8:1 5 - 0 | 8:3 0 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 32 | 32 | 0 | 245 | 0 | 245 | 0 | 185 | 8 | 193 |
| 8:3 0 - 5 | 8:4 5 | - | 0 | 19 | 19 | 0 | 0 | 25 | 25 | 0 | 235 | 0 | 235 | 0 | 215 | 10 | 225 |
| 8:4 5 - 0 | 9:0 0 | - | 0 | 12 | 12 | 0 | 0 | 22 | 22 | 0 | 246 | 0 | 246 | 0 | 209 | 6 | 215 |
| | | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 97% | 3% | 100% |

| Tibúrcio Cavalcante | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------|----|-----|-------|-----|---|---|-------|-------|---|-----|-------|-------|---|-----|-------|-----|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:0 0 - 5 | 7:1 5 | 35 | 88 | 22 | 145 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 224 | 0 | 224 | 0 | 249 | 4 | 253 |
| 7:1 5 - 0 | 7:3 0 | 46 | 117 | 18 | 181 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 221 | 0 | 221 | 0 | 235 | 5 | 240 |
| 7:3 0 - 5 | 7:4 5 | 44 | 94 | 23 | 161 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249 | 0 | 249 | 0 | 254 | 6 | 260 |
| 7:4 5 - 0 | 8:0 0 | 49 | 112 | 18 | 179 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 258 | 0 | 258 | 0 | 224 | 7 | 231 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|------|---|---|---|---|---|----|------|----|------|----|-----|----|------|
| 8:0 0 - 5 | 8:1 | 45 | 130 | 12 | 187 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 250 | 0 | 236 | 4 | 240 |
| 8:1 5 - 0 | 8:3 | 52 | 108 | 7 | 167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 235 | 0 | 235 | 0 | 198 | 13 | 211 |
| 8:3 0 - 5 | 8:4 | 40 | 113 | 20 | 173 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218 | 0 | 218 | 0 | 228 | 9 | 237 |
| 8:4 5 - 0 | 9:0 | 40 | 91 | 21 | 152 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 233 | 0 | 233 | 0 | 264 | 3 | 267 |
| | | 26% | 63% | 11% | 100% | | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 97% | 3% | 100% |

| Isaac Amaral | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|---|---|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:0 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 235 | 69 | 304 | |
| 7:1 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218 | 81 | 299 | |
| 7:3 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 206 | 73 | 279 | |
| 7:4 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 236 | 76 | 312 | |
| 8:0 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248 | 80 | 328 | |
| 8:1 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 60 | 261 | |
| 8:3 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 72 | 273 | |
| 8:4 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242 | 68 | 310 | |
| | | | | | | | | | | | | | | 0% | 76% | 24% | 100% |

| Joaquim Nabuco | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---|---|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|----|-------|-------|------|----|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:0 - 7:1 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 27 | 168 | 31 | 226 | 0 | 182 | 12 | 194 | 0 | 209 | 0 | 209 | |
| 7:1 - 7:3 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 25 | 210 | 33 | 268 | 0 | 228 | 8 | 236 | 0 | 228 | 0 | 228 | |
| 7:3 - 7:4 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 21 | 181 | 27 | 229 | 0 | 222 | 12 | 234 | 0 | 214 | 0 | 214 | |
| 7:4 - 8:0 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 31 | 235 | 27 | 293 | 0 | 213 | 8 | 221 | 0 | 207 | 0 | 207 | |
| 8:0 - 8:1 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 30 | 161 | 35 | 226 | 0 | 241 | 19 | 260 | 0 | 226 | 0 | 226 | |
| 8:1 - 8:3 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 25 | 156 | 34 | 215 | 0 | 275 | 13 | 288 | 0 | 200 | 0 | 200 | |
| 8:3 - 8:4 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 33 | 154 | 24 | 211 | 0 | 132 | 9 | 141 | 0 | 204 | 0 | 204 | |
| 8:4 - 9:0 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 125 | 20 | 163 | 0 | 219 | 23 | 242 | 0 | 230 | 0 | 230 | |
| | | | | | 12% | 76% | 13% | 100% | 0% | 94% | 6% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% | |

| Osvaldo Cruz | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----|----|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:0 - 7:1 0 - 5 | 8 | 82 | 23 | 113 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248 | 0 | 248 | 0 | 148 | 6 | 154 | |
| 7:1 - 7:3 5 - 0 | 17 | 72 | 13 | 102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 184 | 0 | 184 | 0 | 159 | 5 | 164 | |
| 7:3 - 7:4 0 - 5 | 14 | 73 | 23 | 110 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 217 | 0 | 217 | 0 | 239 | 1 | 240 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|------|---|---|---|---|----|------|----|------|----|-----|----|------|
| 7:4 5 - 0 | 8:0 | 30 | 48 | 20 | 98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 192 | 0 | 192 | 0 | 235 | 3 | 238 |
| 8:0 0 - 5 | 8:1 | 26 | 70 | 20 | 116 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 235 | 0 | 235 | 0 | 300 | 0 | 300 |
| 8:1 5 - 0 | 8:3 | 15 | 72 | 22 | 109 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 179 | 0 | 179 | 0 | 220 | 8 | 228 |
| 8:3 0 - 5 | 8:4 | 38 | 61 | 13 | 112 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 219 | 0 | 219 | 0 | 277 | 2 | 279 |
| 8:4 5 - 0 | 9:0 | 31 | 91 | 18 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 | 0 | 203 | 0 | 309 | 3 | 312 |
| | | 20% | 63% | 17% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 98% | 2% | 100% |

| Visconde de Mauá | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|----|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:0 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 185 | 1 | 186 | 0 | 286 | 5 | 291 | |
| 7:1 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 209 | 6 | 215 | 0 | 232 | 5 | 237 | |
| 7:3 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 9 | 210 | 0 | 265 | 12 | 277 | |
| 7:4 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 222 | 9 | 231 | 0 | 228 | 9 | 237 | |
| 8:0 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 235 | 4 | 239 | 0 | 263 | 15 | 278 | |
| 8:1 5 - 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 188 | 3 | 191 | 0 | 254 | 8 | 262 | |
| 8:3 0 - 5 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 220 | 5 | 225 | 0 | 208 | 7 | 215 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|----|------|----|-----|----|------|
| 8:4 | 9:0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 219 | 4 | 223 | 0 | 312 | 6 | 318 |
| | | | | | | | | | | | 0% | 98% | 2% | 100% | 0% | 97% | 3% | 100% |

| Desembargador Moreira | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-----|----|-------|-----|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↗ | ↑ | ↘ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↗ | ↑ | ↘ | Total | ↖ | ↑ | ↘ | Total | |
| 7:0 - 7:1 0 - 5 | 7 | 123 | 25 | 155 | 0 | 206 | 45 | 251 | 112 | 174 | 11 | 297 | 0 | 273 | 6 | 279 | |
| 7:1 - 7:3 5 - 0 | 15 | 154 | 25 | 194 | 0 | 195 | 36 | 231 | 90 | 165 | 5 | 260 | 0 | 224 | 10 | 234 | |
| 7:3 - 7:4 0 - 5 | 9 | 173 | 33 | 215 | 0 | 223 | 54 | 277 | 108 | 199 | 10 | 317 | 0 | 250 | 12 | 262 | |
| 7:4 - 8:0 5 - 0 | 12 | 109 | 40 | 161 | 0 | 168 | 32 | 200 | 117 | 189 | 10 | 316 | 0 | 267 | 10 | 277 | |
| 8:0 - 8:1 0 - 5 | 16 | 159 | 40 | 215 | 0 | 220 | 39 | 259 | 204 | 324 | 28 | 556 | 0 | 238 | 19 | 257 | |
| 8:1 - 8:3 5 - 0 | 9 | 119 | 31 | 159 | 0 | 188 | 39 | 227 | 63 | 165 | 7 | 235 | 0 | 207 | 15 | 222 | |
| 8:3 - 8:4 0 - 5 | 16 | 156 | 25 | 197 | 0 | 192 | 39 | 231 | 25 | 90 | 7 | 122 | 0 | 214 | 15 | 229 | |
| 8:4 - 9:0 5 - 0 | 12 | 127 | 32 | 171 | 0 | 159 | 25 | 184 | 71 | 102 | 7 | 180 | 0 | 271 | 19 | 290 | |
| <p style="text-align: center;">7% 76% 17% 100% 0% 84% 16% 100% 33% 63% 4% 100% 0% 95% 5% 100%</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dados do dia 26 de Outubro de 2016

| Capitão Gustavo | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|---|---|-------|-------|---|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↘ | Total | ↖ | ↑ | ↘ | Total | ↖ | ↑ | ↘ | Total | ↖ | ↑ | ↘ | Total |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|------|---|---|---|---|----|------|----|------|----|-----|----|------|
| 7:00 - 7:15 | 18 | 90 | 22 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 302 | 0 | 302 | 0 | 263 | 8 | 271 |
| 7:15 - 7:30 | 25 | 113 | 24 | 162 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 290 | 0 | 290 | 0 | 240 | 10 | 250 |
| 7:30 - 7:45 | 18 | 102 | 36 | 156 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 256 | 0 | 256 | 0 | 223 | 8 | 231 |
| 7:45 - 8:00 | 34 | 121 | 29 | 184 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 300 | 0 | 300 | 0 | 334 | 10 | 344 |
| 8:00 - 8:15 | 13 | 120 | 26 | 159 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 275 | 0 | 275 | 0 | 230 | 12 | 242 |
| 8:15 - 8:30 | 24 | 94 | 21 | 139 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 241 | 0 | 241 | 0 | 213 | 9 | 222 |
| 8:30 - 8:45 | 17 | 95 | 23 | 135 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 281 | 0 | 281 | 0 | 301 | 10 | 311 |
| 8:45 - 9:00 | 20 | 76 | 23 | 119 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 287 | 0 | 287 | 0 | 324 | 9 | 333 |
| | 14% | 68% | 17% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

| Fiscal Vieira | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|----|------|-------|-----|----|------|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 18 | 18 | 0 | 0 | 8 | 8 | 0 | 254 | 1 | 255 | 0 | 240 | 15 | 255 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 9 | 9 | 0 | 274 | 5 | 279 | 0 | 256 | 13 | 269 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 29 | 29 | 0 | 0 | 9 | 9 | 0 | 280 | 3 | 283 | 0 | 266 | 12 | 278 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 33 | 33 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 302 | 6 | 308 | 0 | 257 | 8 | 265 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 23 | 23 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 191 | 0 | 191 | 0 | 276 | 6 | 282 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 24 | 24 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 214 | 4 | 218 | 0 | 266 | 9 | 275 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 19 | 19 | 0 | 0 | 9 | 9 | 0 | 253 | 4 | 257 | 0 | 258 | 8 | 266 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 265 | 2 | 267 | 0 | 316 | 9 | 325 |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 99% | 1% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

| Prof. Carvalho | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|---|-------|-----|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 12 | 234 | 12 | 258 | 0 | 369 | 35 | 404 | 0 | 411 | 0 | 411 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 11 | 203 | 16 | 230 | 0 | 266 | 34 | 300 | 0 | 435 | 0 | 435 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|----|-----|----|------|----|-----|----|------|----|------|----|------|
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 11 | 248 | 13 | 272 | 0 | 399 | 29 | 428 | 0 | 484 | 0 | 484 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 16 | 251 | 16 | 283 | 0 | 426 | 30 | 456 | 0 | 393 | 0 | 393 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 6 | 186 | 13 | 205 | 0 | 253 | 26 | 279 | 0 | 327 | 0 | 327 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 6 | 144 | 9 | 159 | 0 | 254 | 14 | 268 | 0 | 347 | 0 | 347 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 2 | 158 | 13 | 173 | 0 | 205 | 9 | 214 | 0 | 335 | 0 | 335 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 117 | 16 | 151 | 0 | 297 | 24 | 321 | 0 | 217 | 0 | 217 |
| | | | | | 5% | 89% | 7% | 100% | 0% | 93% | 7% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| Rui Barbosa | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-----|-----|-------|-----|---|---|-------|-------|------|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 50 | 59 | 44 | 153 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 158 | 0 | 158 | 0 | 163 | 8 | 171 |
| 7:15 - 7:30 | 72 | 124 | 33 | 229 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 161 | 0 | 161 | 0 | 241 | 7 | 248 |
| 7:30 - 7:45 | 66 | 67 | 13 | 146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 282 | 0 | 282 | 0 | 222 | 13 | 235 |
| 7:45 - 8:00 | 117 | 132 | 40 | 289 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 302 | 0 | 302 | 0 | 313 | 7 | 320 |
| 8:00 - 8:15 | 38 | 47 | 16 | 101 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97 | 0 | 97 | 0 | 128 | 1 | 129 |
| 8:15 - 8:30 | 46 | 71 | 10 | 127 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 189 | 0 | 189 | 0 | 172 | 11 | 183 |
| 8:30 - 8:45 | 65 | 60 | 17 | 142 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218 | 0 | 218 | 0 | 227 | 11 | 238 |
| 8:45 - 9:00 | 70 | 139 | 29 | 238 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 193 | 0 | 193 | 0 | 258 | 8 | 266 |
| | 37% | 48% | 14% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

| José Lourenço | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|----|-------|-------|---|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 254 | 20 | 274 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 274 | 45 | 319 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|------|---|---|---|--|
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 251 | 30 | 281 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 298 | 29 | 327 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 274 | 32 | 306 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 270 | 25 | 295 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 245 | 23 | 268 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 253 | 29 | 282 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | | | | | | | | | | 0% | 90% | 10% | 100% | | | | |

| Sabino Monte | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|----|-----|-------|-------|-----|----|-------|--|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 214 | 9 | 223 | |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 7 | 208 | |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 224 | 8 | 232 | |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 228 | 9 | 237 | |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 | 16 | 219 | |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 230 | 11 | 241 | |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 188 | 4 | 192 | |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 247 | 13 | 260 | |
| | | | | | | | | | | 0% | 96% | 4% | 100% | | | | |

| Barão de Studart | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|---|----|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 37 | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 219 | 8 | 227 | 94 | 233 | 0 | 327 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 59 | 59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 258 | 7 | 265 | 108 | 218 | 0 | 326 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|------|------|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 66 | 66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 264 | 8 | 272 | 118 | 210 | 0 | 328 | |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 65 | 65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248 | 8 | 256 | 119 | 227 | 0 | 346 | |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 57 | 57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 230 | 19 | 249 | 129 | 194 | 0 | 323 | |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 56 | 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 239 | 21 | 260 | 129 | 240 | 0 | 369 | |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 58 | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 214 | 16 | 230 | 85 | 179 | 0 | 264 | |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 53 | 53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248 | 9 | 257 | 130 | 245 | 0 | 375 | |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | | | | | | 0% | 95% | 5% | 100% | 34% | 66% | 0% | 100% |

| Silva Paulet | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|----|------|-------|-----|----|------|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 225 | 4 | 229 | 0 | 218 | 7 | 225 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 270 | 3 | 273 | 0 | 199 | 4 | 203 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 259 | 1 | 260 | 0 | 197 | 4 | 201 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 12 | 12 | 0 | 0 | 7 | 7 | 0 | 262 | 8 | 270 | 0 | 219 | 6 | 225 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 230 | 3 | 233 | 0 | 175 | 6 | 181 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 229 | 3 | 232 | 0 | 219 | 7 | 226 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 7 | 7 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 256 | 3 | 259 | 0 | 188 | 6 | 194 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 8 | 8 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 251 | 3 | 254 | 0 | 213 | 5 | 218 |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 99% | 1% | 100% | 0% | 97% | 3% | 100% |

| José Vilar | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|---|---|-------|-----|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 14 | 126 | 11 | 151 | 0 | 243 | 34 | 277 | 0 | 231 | 0 | 231 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 22 | 183 | 9 | 214 | 0 | 213 | 27 | 240 | 0 | 191 | 0 | 191 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|-----|-----|----|------|----|-----|-----|------|----|------|----|------|
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 33 | 183 | 16 | 232 | 0 | 257 | 31 | 288 | 0 | 233 | 0 | 233 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 27 | 183 | 12 | 222 | 0 | 214 | 33 | 247 | 0 | 225 | 0 | 225 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 23 | 178 | 12 | 213 | 0 | 210 | 38 | 248 | 0 | 190 | 0 | 190 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 25 | 144 | 11 | 180 | 0 | 217 | 20 | 237 | 0 | 206 | 0 | 206 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 122 | 4 | 144 | 0 | 238 | 28 | 266 | 0 | 232 | 0 | 232 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 113 | 16 | 147 | 0 | 204 | 17 | 221 | 0 | 231 | 0 | 231 |
| | | | | | 12% | 82% | 6% | 100% | 0% | 89% | 11% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| Nunes Valente | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|----|------|-------|-----|----|------|-------|-------|------|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 26 | 26 | 0 | 246 | 0 | 246 | 0 | 232 | 9 | 241 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 11 | 11 | 0 | 0 | 17 | 17 | 0 | 254 | 0 | 254 | 0 | 224 | 7 | 231 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 31 | 31 | 0 | 263 | 0 | 263 | 0 | 231 | 13 | 244 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 14 | 14 | 0 | 0 | 47 | 47 | 0 | 241 | 0 | 241 | 0 | 202 | 6 | 208 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 13 | 13 | 0 | 0 | 35 | 35 | 0 | 259 | 0 | 259 | 0 | 189 | 3 | 192 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 14 | 14 | 0 | 0 | 33 | 33 | 0 | 234 | 0 | 234 | 0 | 231 | 5 | 236 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 18 | 18 | 0 | 0 | 27 | 27 | 0 | 243 | 0 | 243 | 0 | 181 | 9 | 190 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 18 | 18 | 0 | 233 | 0 | 233 | 0 | 243 | 13 | 256 |
| | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

| Tibúrcio Cavalcante | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|----|----|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 59 | 40 | 15 | 114 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 239 | 0 | 239 | 0 | 252 | 4 | 256 |
| 7:15 - 7:30 | 65 | 67 | 26 | 158 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218 | 0 | 218 | 0 | 240 | 5 | 245 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|------|---|---|---|---|----|------|----|------|----|-----|----|------|
| 7:30 - 7:45 | 58 | 60 | 19 | 137 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 255 | 0 | 255 | 0 | 254 | 4 | 258 |
| 7:45 - 8:00 | 83 | 51 | 16 | 150 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 254 | 0 | 254 | 0 | 276 | 6 | 282 |
| 8:00 - 8:15 | 63 | 54 | 19 | 136 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 210 | 0 | 210 | 0 | 183 | 5 | 188 |
| 8:15 - 8:30 | 56 | 46 | 19 | 121 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 241 | 0 | 241 | 0 | 280 | 10 | 290 |
| 8:30 - 8:45 | 62 | 51 | 8 | 121 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 223 | 0 | 223 | 0 | 187 | 6 | 193 |
| 8:45 - 9:00 | 50 | 39 | 15 | 104 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 214 | 0 | 214 | 0 | 253 | 6 | 259 |
| | 48% | 39% | 13% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 98% | 2% | 100% |

| Isaac Amaral | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|---|---|-------|-------|-----|-----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 236 | 72 | 308 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 98 | 299 |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 236 | 75 | 311 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 239 | 72 | 311 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 221 | 72 | 293 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 224 | 79 | 303 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 187 | 74 | 261 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 222 | 69 | 291 |
| | | | | | | | | | | | | | 0% | 74% | 26% | 100% |

| Joaquim Nabuco | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|---|-------|-----|-----|----|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 14 | 122 | 23 | 159 | 0 | 160 | 4 | 164 | 0 | 175 | 0 | 175 |
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 17 | 169 | 26 | 212 | 0 | 250 | 9 | 259 | 0 | 199 | 0 | 199 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|----|-----|-----|------|----|-----|----|------|----|------|----|------|
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 6 | 173 | 13 | 192 | 0 | 243 | 11 | 254 | 0 | 247 | 0 | 247 |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 17 | 173 | 19 | 209 | 0 | 212 | 12 | 224 | 0 | 220 | 0 | 220 |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 25 | 239 | 23 | 287 | 0 | 219 | 8 | 227 | 0 | 162 | 0 | 162 |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 13 | 135 | 20 | 168 | 0 | 218 | 17 | 235 | 0 | 306 | 0 | 306 |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 33 | 125 | 32 | 190 | 0 | 199 | 11 | 210 | 0 | 159 | 0 | 159 |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 15 | 117 | 19 | 151 | 0 | 218 | 18 | 236 | 0 | 231 | 0 | 231 |
| | | | | | 9% | 80% | 11% | 100% | 0% | 95% | 5% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| Oswaldo Cruz | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-----|-----|-------|-----|---|---|-------|-------|------|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 13 | 91 | 19 | 123 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 204 | 0 | 204 | 0 | 233 | 0 | 233 |
| 7:15 - 7:30 | 20 | 60 | 19 | 99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 208 | 0 | 208 | 0 | 159 | 1 | 160 |
| 7:30 - 7:45 | 13 | 65 | 23 | 101 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 232 | 0 | 232 | 0 | 258 | 2 | 260 |
| 7:45 - 8:00 | 16 | 57 | 29 | 102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 183 | 0 | 183 | 0 | 221 | 4 | 225 |
| 8:00 - 8:15 | 24 | 68 | 13 | 105 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 209 | 0 | 209 | 0 | 194 | 4 | 198 |
| 8:15 - 8:30 | 28 | 64 | 25 | 117 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 209 | 0 | 209 | 0 | 195 | 1 | 196 |
| 8:30 - 8:45 | 15 | 64 | 15 | 94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 191 | 0 | 191 | 0 | 231 | 4 | 235 |
| 8:45 - 9:00 | 18 | 61 | 16 | 95 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 209 | 0 | 209 | 0 | 245 | 4 | 249 |
| | 18% | 63% | 19% | 100% | | | | | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 99% | 1% | 100% |

| Visconde de Mauá | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 195 | 3 | 198 | 0 | 290 | 9 | 299 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 7:15 - 7:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 224 | 5 | 229 | 0 | 238 | 12 | 250 | |
| 7:30 - 7:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 214 | 6 | 220 | 0 | 242 | 1 | 243 | |
| 7:45 - 8:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 207 | 6 | 213 | 0 | 274 | 14 | 288 | |
| 8:00 - 8:15 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 215 | 8 | 223 | 0 | 265 | 11 | 276 | |
| 8:15 - 8:30 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 195 | 13 | 208 | 0 | 267 | 8 | 275 | |
| 8:30 - 8:45 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 211 | 8 | 219 | 0 | 224 | 6 | 230 | |
| 8:45 - 9:00 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 201 | 8 | 209 | 0 | 239 | 6 | 245 | |
| | | | | | | | | | | 0% | 97% | 3% | 100% | 0% | 97% | 3% | 100% |

| Desembargador Moreira | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|----|-------|-------|-----|----|-------|
| Hora | Norte | | | | Sul | | | | Leste | | | | Oeste | | | |
| | ↗ | ↑ | ↖ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total | ↗ | ↑ | ↖ | Total | ↖ | ↑ | ↗ | Total |
| 7:00 - 7:15 | 8 | 123 | 26 | 157 | 0 | 239 | 47 | 286 | 120 | 203 | 6 | 329 | 0 | 292 | 9 | 301 |
| 7:15 - 7:30 | 6 | 178 | 31 | 215 | 0 | 245 | 60 | 305 | 125 | 206 | 13 | 344 | 0 | 230 | 8 | 238 |
| 7:30 - 7:45 | 8 | 134 | 25 | 167 | 0 | 118 | 25 | 143 | 101 | 167 | 7 | 275 | 0 | 219 | 6 | 225 |
| 7:45 - 8:00 | 10 | 126 | 27 | 163 | 0 | 197 | 40 | 237 | 123 | 183 | 15 | 321 | 0 | 277 | 12 | 289 |
| 8:00 - 8:15 | 10 | 126 | 32 | 168 | 0 | 205 | 30 | 235 | 77 | 168 | 11 | 256 | 0 | 216 | 9 | 225 |
| 8:15 - 8:30 | 17 | 97 | 26 | 140 | 0 | 178 | 30 | 208 | 87 | 184 | 15 | 286 | 0 | 269 | 8 | 277 |
| 8:30 - 8:45 | 13 | 136 | 37 | 186 | 0 | 226 | 33 | 259 | 77 | 153 | 12 | 242 | 0 | 208 | 13 | 221 |
| 8:45 - 9:00 | 12 | 142 | 31 | 185 | 0 | 212 | 39 | 251 | 111 | 172 | 14 | 297 | 0 | 239 | 9 | 248 |
| | 6% | 77% | 17% | 100% | 0% | 84% | 16% | 100% | 35% | 61% | 4% | 100% | 0% | 96% | 4% | 100% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B: TABELA COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS DEMAIS PARÂMETROS DE CAR-FOLLOWING PARA AV. PONTES VIEIRA

Análise de sensibilidade dos demais parâmetros de *car-following* (Av. Pontes Vieira)

| Parâmetro (<i>default</i>) | Nível | Valor | Velocidade (Km/h) | IC (95%) Velocidade (Km/h) | | Atraso (s) | IC (95%) Atraso (s) | |
|--|-------|------------------|-------------------|----------------------------|-----|------------|---------------------|------|
| | | | | | | | | |
| Min. Look Ahead Distance (0,00 m) | Baixo | 0,0 m | 28,3 | -0,1 | 0,4 | 13,3 | -0,3 | 0,2 |
| | Alto | 40 m | 28,4 | | | 13,3 | | |
| Max. Look Ahead Distance (250,0 m) | Baixo | 90 m | 28,5 | -0,8 | 0,0 | 13,8 | -0,9 | -0,1 |
| | Alto | 410 m | 28,1 | | | 13,2 | | |
| Observed Vehicles (4,00) | Baixo | 2,00 | 28,4 | -0,5 | 0,0 | 13,6 | -0,6 | 0,0 |
| | Alto | 6,00 | 28,1 | | | 13,3 | | |
| Min. Look Back Distance (0,00 m) | Baixo | 0,0 m | 28,3 | 0,0 | 0,0 | 13,3 | 0,0 | 0,0 |
| | Alto | 40 m | 28,3 | | | 13,3 | | |
| Max. Look Back Distance (150,00 m) | Baixo | 90 m | 28,4 | -0,3 | 0,2 | 13,3 | -0,2 | 0,3 |
| | Alto | 300 m | 28,3 | | | 13,3 | | |
| Dur Temporary lack of attention (0,00 s) Prob Temporary lack of attention (0,0 %) | Baixo | 0,00 s 00,0 % | 28,3 | -0,5 | 0,3 | 13,3 | -0,6 | 0,2 |
| | Alto | 1,00 s 10,0 % | 28,2 | | | 13,1 | | |
| Smooth Closeup behavior (Desabilitado) | Baixo | Desab | 28,3 | -0,6 | 0,2 | 13,3 | 1,0 | 1,7 |
| | Alto | | 28,1 | | | 14,7 | | |
| Standstill dist for static obst (Desabilitado) | Baixo | Hab 0,5m | 28,3 | -0,2 | 0,4 | 13,3 | -0,3 | 0,3 |
| | Alto | Hab 1,0m | 28,4 | | | 13,3 | | |
| Cauteloso Agressivo | | ---- | 27,8 | 0,5 | 0,9 | 15,3 | -1,1 | -0,9 |
| | | ---- | 28,4 | | | 14,2 | | |
| Cauteloso (com TLOA <i>default</i>) Agressivo (com TLOA <i>default</i>) | | ---- | 27,9 | 0,4 | 0,8 | 15,2 | -1,0 | -0,9 |
| | | ---- | 28,4 | | | 14,2 | | |

Fonte: Elaborada pelo autor

APÊNDICE C: TABELAS COM VELOCIDADES MÉDIAS COLETADAS NO DIA 26/10 NA AV. PONTES VIEIRA

Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas no sentido oeste-leste, dia 26/10

| Velocidades Médias - Pesquisa de Placas - Sentido O/L (26/10) | | | | | | |
|--|---------|-----------------|--------------|---------|-----------------|--------------|
| Intervalo | PC1-PC2 | | | PC2-PC3 | | |
| | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão |
| 7h00-7h15 | 15 | 18,1 | 8,9 | 9 | 21,6 | 7,7 |
| 7h15-7h30 | 19 | 15,3 | 6,8 | 12 | 21,0 | 6,2 |
| 7h30-7h45 | 16 | 14,1 | 5,8 | 13 | 18,7 | 3,5 |
| 7h45-8h00 | 17 | 13,6 | 4,5 | 14 | 19,4 | 4,1 |
| 8h00-8h15 | 22 | 12,1 | 5,9 | 11 | 20,6 | 5,4 |
| 8h15-8h30 | 10 | 13,2 | 7,2 | 18 | 19,8 | 6,5 |
| 8h30-8h45 | 12 | 19,3 | 5,7 | 18 | 23,6 | 4,1 |
| 8h45-9h00 | 14 | 14,4 | 4,1 | 15 | 25,8 | 8,6 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Velocidades Médias obtidas pelos veículos-teste no sentido oeste-leste, dia 26/10

| Velocidades Médias - Veículos testes - Sentido O/L (26/10) | | | | | |
|---|---|-----------------|---------|-----------------|------------|
| Intervalo | N | PC1-PC2 | | P2-PC3 | |
| | | Média VM (km/h) | DesvPad | Média VM (km/h) | DesvPad TV |
| 7h00-7h15 | 6 | 21 | 4 | 19 | 5 |
| 7h15-7h30 | 4 | 23 | 7 | 18 | 4 |
| 7h30-7h45 | 3 | 17 | 2 | 15 | 4 |
| 7h45-8h00 | 4 | 14 | 1 | 16 | 1 |
| 8h00-8h15 | 2 | 14 | 1 | 16 | 5 |
| 8h15-8h30 | 4 | 14 | 2 | 15 | 2 |
| 8h30-8h45 | 3 | 15 | 4 | 21 | 6 |
| 8h45-9h00 | 6 | 17 | 4 | 20 | 3 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Velocidades Médias obtidas pela pesquisa de placas no sentido leste-oeste, dia 26/10

| Velocidades Médias - Pesquisa de Placas - Sentido L/O (26/10) | | | | | | |
|--|---------|-----------------|--------------|---------|-----------------|--------------|
| Intervalo | PC1-PC2 | | | PC2-PC3 | | |
| | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão | N | Média VM (km/h) | Desv. Padrão |
| 7h00-7h15 | 1 | 14,7 | --- | 12 | 28,5 | 12,3 |
| 7h15-7h30 | 17 | 19,4 | 6,0 | 23 | 29,8 | 16,3 |
| 7h30-7h45 | 20 | 17,7 | 5,4 | 22 | 23,4 | 9,5 |
| 7h45-8h00 | 25 | 19,8 | 4,7 | 30 | 21,7 | 8,6 |
| 8h00-8h15 | 21 | 19,8 | 4,9 | 12 | 26,9 | 10,9 |
| 8h15-8h30 | 19 | 26,0 | 8,5 | 18 | 25,0 | 10,6 |
| 8h30-8h45 | 26 | 25,2 | 10,3 | 20 | 24,0 | 9,0 |
| 8h45-9h00 | 24 | 23,2 | 5,9 | 19 | 25,7 | 10,9 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Velocidades Médias obtidas pelos veículos-teste no sentido leste-oeste, dia 26/10

| Velocidades Médias - Veículos testes - Sentido L/O (26/10) | | | | | |
|---|---|-----------------|---------|-----------------|------------|
| Intervalo | N | PC1-PC2 | | P2-PC3 | |
| | | Média VM (km/h) | DesvPad | Média VM (km/h) | DesvPad TV |
| 7h00-7h15 | 6 | 20 | 4 | 33 | 11 |
| 7h15-7h30 | 3 | 20 | 6 | 19 | 0 |
| 7h30-7h45 | 3 | 17 | 4 | 16 | 0 |
| 7h45-8h00 | 3 | 16 | 3 | 26 | 14 |
| 8h00-8h15 | 4 | 18 | 4 | 23 | 12 |
| 8h15-8h30 | 2 | 20 | 6 | 32 | 17 |
| 8h30-8h45 | 5 | 19 | 3 | 22 | 11 |
| 8h45-9h00 | 6 | 21 | 3 | 32 | 14 |

Fonte: Elaborada pelo autor.