

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CAROLINA DE MEDEIROS MIRANDA

GUSTAVO MORIGGI FROHLICH

MARCELO TOSHIO OTSUBO

PEDRO HENRIQUE SABINO FERREIRA

GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL

ESTUDO DE UM TRECHO DA AVENIDA DOS AUTONOMISTAS NA CIDADE DE
OSASCO E COMPARAÇÃO COM O MODELO DE SÃO PAULO

São Paulo
2018

CAROLINA DE MEDEIROS MIRANDA
GUSTAVO MORIGGI FROHLICH
MARCELO TOSHIO OTSUBO
PEDRO HENRIQUE SABINO FERREIRA

GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL
ESTUDO DE UM TRECHO DA AVENIDA DOS AUTONOMISTAS NA CIDADE DE
OSASCO E COMPARAÇÃO COM O MODELO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
ao curso de Engenharia civil, da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Feriancic

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Miranda, Carolina

Gestão Semaforica em Tempo Real: Estudo de um trecho da Av. dos Autonomistas na cidade de Osasco e comparação com o modelo de São Paulo / C. Miranda, G. Frohlich, M. Otsubo, P. Ferreira -- São Paulo, 2018.
168 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.TRÁFEGO RODOVIÁRIO (MODELOS;SIMULAÇÃO) 2.SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTES I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t. III.Frohlich, Gustavo IV.Otsubo, Marcelo V.Ferreira, Pedro

CAROLINA DE MEDEIROS MIRANDA
GUSTAVO MORIGGI FROHLICH
MARCELO TOSHIO OTSUBO
PEDRO HENRIQUE SABINO FERREIRA

GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL
ESTUDO DE UM TRECHO DA AVENIDA DOS AUTONOMISTAS NA CIDADE DE
OSASCO E COMPARAÇÃO COM O MODELO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
ao curso de Engenharia civil, da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de bacharel em engenharia civil.

São Paulo. 10 de Dezembro de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Feriancic

Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

Eng. Me. Luciano Peron

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais uma etapa concluída.

A nossos pais e irmãos, pelo suporte, incentivo e apoio que nos deram durante essa jornada; possibilitando alcançar nossos objetivos.

A nossos namorados, Ingrid, Mirella, Nayara e Victor, grandes incentivadores, pelo amor, carinho e dedicação constantes em todos os momentos ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. Gabriel Feriancic pela confiança, incansável dedicação e aprendizado obtido com a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte pelo apoio nos momentos de dificuldade, pela constante preocupação e incentivo sempre.

Ao Prof. Dr. Miguel Luiz Bucalem por nos trazer conhecimentos da gestão e integração dos serviços públicos no funcionamento de uma cidade.

À GPO Sistran Engenharia, em especial a Cláudia Mascarenhas e a Luciano Peron, e à Logit Engenharia Consultiva, particularmente a Thiago Meira e a Vinícius Pietrantonio, pela disponibilidade e auxílio no processo de calibração do modelo.

À EMTU que nos disponibilizou dados para a realização da simulação, à CET pela apresentação dos estudos e simulações muito úteis ao trabalho e ao COI do município de Osasco, com especial agradecimento a Maria Aparecida Pinho Camargo Barbosa, por compartilhar o modo de uso de ferramentas para o controle do tráfego em tempo real na cidade de Osasco.

Aos nossos amigos de graduação pelo apoio e por estarem sempre ao nosso lado, nos momentos de aflição, risadas, estudos, aulas e conversas, dos quais temos boas recordações.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para nossa formação.

RESUMO

O trabalho teve como objetivo analisar os impactos da aplicação de gestão semafórica em tempo real, tanto por meio de modelagem e microssimulação de tráfego da Av. dos Autonomistas, entre a Av. João Batista e o cruzamento com a Av. Franz Voegeli, quanto por meio de casos nacionais e internacionais da aplicação desta solução. Como primeira etapa, foi construído, calibrado e validado um modelo da área de estudos, em Osasco, com o auxílio do software de microssimulação VISSIM e da estatística GEH, bem como de trabalhos acerca de trechos com características similares à avenida estudada. Depois desta etapa, o objetivo era verificar aplicabilidade da gestão semafórica em tempo real em termos locais (na Av. dos Autonomistas), o que não foi possível por falta de licença do software, porém pôde-se simular a solução de ondas verdes em tempo fixo. Por fim, em termos globais, pensando nas dificuldades de aplicação em cidades, foram analisadas as cidades de Osasco, com o software SCATS e Toronto e São Paulo, com o SCOOT. Também foram avaliados os impactos em: fluidez, segurança, meio ambiente e priorização de veículos.

Palavras chave: Microssimulação, Calibração, VISSIM, Semáforos inteligentes, Gestão semafórica em tempo real.

ABSTRACT

This graduation thesis, as main goal, analyzed the impacts of applying Adaptive Traffic Control Systems (ATCS) trough modelling and microsimulation of Autonomistas Avenue's traffic, between João Batista Avenue and intersection with Franz Voegeli Avenue, and also, trough studying national and international cases. As first step, the study area model was built, calibrated and validated, supported by microsimulation software VISSIM and GEH statistics and other studies on sections with similar features to the studied avenue. After this step, the intention was to verify the applicability of ATCS to local terms (Autonomistas Avenue); this wasn't possible because a license to use BALANCE and EPICS software was lacking however the green wave with fixed time solution could be simulated. Lastly, at global terms, difficulties of applying ATCS in cities were studied by Osasco, São Paulo and Toronto's case. Impacts in fluidity, safety, environment and vehicle prioritization were also evaluated.

Key words: Microsimulation, Calibration, VISSIM, ATCS, Smart traffic lights.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Hierarquia funcional das vias urbanas | 22 |
| Figura 2.2 - Aproximações e área de conflito..... | 25 |
| Figura 2.3 - Classes de movimentos | 26 |
| Figura 2.4 - Tipos de interseções em níveis diferentes: trombeta, diamante, trevo completo, semidirecional, direcional e trevo parcial (sentido horário, a partir da fotografia do canto superior esquerdo)..... | 28 |
| Figura 2.5 - Interconexão do tipo Giratório | 29 |
| Figura 2.6 - Critério do número de ramos: interseções de três ramos, quatro ramos e ramos múltiplos (da esquerda para direita) | 29 |
| Figura 2.7 - Critério das soluções adotadas: gota, canalizada, rótula vazada e rótula (sentido horário, a partir da fotografia do canto superior esquerdo) | 30 |
| Figura 2.8 - Exemplo de diagrama de estágios | 33 |
| Figura 2.9 - Distâncias percorridas pelo veículo nas aproximações..... | 34 |
| Figura 2.10 - Exemplo de diagrama de intervalos luminosos..... | 38 |
| Figura 2.11 - Exemplo de tempo de ciclo conforme o horário do dia | 40 |
| Figura 2.12 - Rede aberta e rede fechada | 42 |
| Figura 2.13 - Defasagem em relação a uma interseção de referência..... | 44 |
| Figura 2.14 - Relação dos atrasos em cada via em função da defasagem dos semáforos..... | 45 |
| Figura 2.15 - Defasagem ótima para vias de mão dupla..... | 45 |
| Figura 2.16 - Diagrama tempo-espacó para via de mão única..... | 46 |
| Figura 2.17 - Diagrama tempo-espacó para via de mão dupla | 46 |
| Figura 2.18 - Esquema de detecção por laço indutivo | 50 |
| Figura 2.19 - Exemplo de aplicação dos laços virtuais..... | 50 |
| Figura 2.20 - Modelo de funcionamento de um sistema de gestão em tempo real dos semáforos..... | 51 |
| Figura 2.21 - Estrutura do Sistema de Transportes modelado pelo Vissim..... | 59 |
| Figura 2.22 - Modelo psicofísico do car-following..... | 60 |
| Figura 2.23 - Influência de 100% de veículos aversos ao risco (azul) ou menos alertas (laranja) na capacidade da via..... | 62 |
| Figura 3.1 - Ilustração de diversos polos geradores de viagens próximos à avenida | 70 |
| Figura 3.2 - Trecho de estudos na avenida dos autonomistas | 70 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.3 - Município de Osasco: (Esquerda) Carregamento do sistema de transporte individual; (Direita) Carregamento do sistema de transporte coletivo | 71 |
| Figura 4.1 - Comparação entre os volumes reais e os volumes extraídos do modelo | 85 |
| Figura 4.2 - Comparação das velocidades | 85 |
| Figura 4.3 - Comparação entre os volumes reais e os volumes extraídos do modelo | 86 |
| Figura 4.4 - Níveis de serviço ao longo do trecho no modelo | 87 |
| Figura 4.5 - Evolução da redução de veículos em razão do rodízio em São Paulo .. | 90 |
| Figura 4.6 - Teste de sensibilidade | 91 |
| Figura 4.7 - Relação entre tempo de viagem e demanda da via | 91 |
| Figura 4.8 - Diagrama fundamental de tráfego real de uma via real | 92 |
| Figura 5.1 - Óbitos por tipo de usuário na cidade de São Paulo em 2017 | 102 |
| Figura 5.2 - Comparação dos ciclos semafóricos..... | 107 |
| Figura 5.3 - Resumo da avaliação dos resultados | 108 |
| Figura A.0.1 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 1 | 127 |
| Figura A.0.2 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 2 | 128 |
| Figura A.0.3 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 3 | 129 |
| Figura A.0.4 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 4 | 130 |
| Figura A.0.5 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 5 | 131 |
| Figura A.0.6 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 6 | 132 |
| Figura B.0.1 - Movimentos do ponto 4 | 134 |
| Figura B.0.2 - Movimentos do ponto 5 | 135 |
| Figura B.0.3 - Movimentos do ponto 6 | 136 |
| Figura B.0.4 - Movimentos do ponto 7 | 138 |
| Figura B.0.5 - Movimentos do ponto 8 | 139 |
| Figura B.0.6- Movimentos do ponto 9 | 140 |
| Figura B.0.7 - Movimentos do ponto 10 | 141 |
| Figura C.0.1 - Posicionamento dos semáforos no trecho de estudo e a configuração dos pontos de contagem | 144 |
| Figura C.0.2 - Movimentos no ponto 5 (semáforo 1)..... | 145 |
| Figura C.0.3 - Movimentos no semáforo 2 | 146 |
| Figura C.0.4 - Movimento no semáforo 3 | 147 |
| Figura C.0.5 - Movimentos semáforo 4 | 148 |

| | |
|--|-----|
| Figura C.0.6 - Movimentos Semáforo 5..... | 149 |
| Figura C.0.7 - Movimentos semáforo 6 | 150 |
| Figura C.0.8 - Movimento semáforo 7 | 151 |
| Figura C.0.9 - Movimentos semáforo 8 | 152 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Hierarquia das vias em áreas urbanas e áreas rurais | 20 |
| Tabela 2.2 - Características de cruzamentos na hierarquia funcional..... | 21 |
| Tabela 2.3 - Exemplos de classes de movimentos | 27 |
| Tabela 2.4 - Comparação entre os softwares de gestão semafórica em tempo real. | 54 |
| Tabela 4.1 - Síntese dos dados e das fontes utilizadas. | 73 |
| Tabela 4.2 - Proporção dos veículos adotada no modelo. | 77 |
| Tabela 4.3 - Resultados das simulações para calibrar bxadd | 82 |
| Tabela 4.4 - Resultados das simulações para calibrar bxmult | 83 |
| Tabela 4.5 - As 10 combinações que geraram os menores valores de GEH. | 83 |
| Tabela 4.6 - Tempos de viagens no trecho estudado. | 84 |
| Tabela 4.7 - Tempos de viagens resultantes do modelo..... | 84 |
| Tabela 4.8 - Nível de serviço para carros em vias urbanas no HCM. | 87 |
| Tabela 4.9 - Resultados de tempo de viagem do modelo | 87 |
| Tabela 4.10 - Indicadores resultados da simulação do modelo (Velocidade reduzida) | 94 |
| Tabela 4.11 - Relação dos tempos de viagem e atrasos | 94 |
| Tabela 4.12 - Defasagens calculadas (θ_{ij}) | 95 |
| Tabela 4.13 - Indicadores resultados das simulações do modelo (Onda Verde) | 95 |
| Tabela 4.14 - Indicadores resultados do modelo com aumento de 15% na demanda | 96 |
| Tabela 4.15 - Comparação de Indicadores resultados do modelo | 97 |
| Tabela 5.1 - Estimativa de emissão veicular no Estado de São Paulo..... | 103 |
| Tabela 5.2 – Comparação entre casos | 116 |
| Tabela B.0.1 - Contagem de veículos na HPM do ponto 4 | 134 |
| Tabela B.0.2 - Contagem de veículos na HPM do ponto 5 | 135 |
| Tabela B.0.3 - Contagem de veículos na HPM do ponto 6 | 137 |
| Tabela B.0.4 - Contagem de veículos na HPM do ponto 7 | 138 |
| Tabela B.0.5 - Contagem de veículos na HPM do ponto 8 | 139 |
| Tabela B.0.6 - Contagem de veículos na HPM do ponto 9 | 140 |
| Tabela B.0.7 - Contagem de veículos na HPM do ponto 10..... | 142 |
| Tabela C.0.1 - Dados Semáforo 1 | 145 |
| Tabela C.0.2 - Dados Semáforo 2 | 146 |

| | |
|---|-----|
| Tabela C.0.3 - Dados Semáforo 3 | 147 |
| Tabela C.0.4 - Dados semáforo 4 | 148 |
| Tabela C.0.5 - Dados Semáforo 5 | 149 |
| Tabela C.0.6 - Dados semáforo 6 | 150 |
| Tabela C.0.7 - Dados semáforo 7 | 151 |
| Tabela C.0.8 - Dados Semáforo 8 | 152 |
| Tabela D.0.1 - Linhas de ônibus e dados do modelo | 154 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| Av | Avenida |
| Art | Artigo |
| ATCS | Adaptive Traffic Control System |
| AVM | Atraso Veicular Médio |
| BEM | Bilhete Eletrônico Municipal |
| BOM | Bilhete Ônibus Metropolitano |
| CET | Companhia de Engenharia de Tráfego |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CFV | Comprimento de Fila de Veículos |
| COI | Centro de Operações Integradas |
| CONTRAN | Conselho Nacional de Trânsito |
| CNG | Congestionamento |
| CTA | Central de Tráfego em Área |
| CTB | Código de Trânsito Brasileiro |
| DENATRAN | Departamento Nacional de Trânsito |
| DMF | Desvio Padrão Móvel do Fluxo de Tráfego |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| EMTU | Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo |
| FGV | Fundação Getúlio Vargas |
| GEH | Geoffrey E. Havers |
| HPA | Hora-Pico de Almoço |
| HPM | Hora-Pico da Manhã |
| HPT | Hora-Pico da Tarde |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IBOPE | Instituto Brasileiro de Opinião e Estatística |
| IVO | Índice de Velocidade Operacional |
| MTSS | Main Traffic Signal System |
| O/D | Origem e Destino |
| NPV | Número de Paradas de Veículos |
| PAV | Percentual de Atraso Veicular |
| PMMU | Plano Municipal de Mobilidade Urbana |
| POLI | Escola Politécnica da Universidade de São Paulo |
| PrT | Transporte Privado |
| PT | Transporte Público |

| | |
|--------------|---|
| PTV | Planung Transport Verkehr |
| RMSP | Região Metropolitana de São Paulo |
| SCATS | Sydney Coordinated Adaptive Traffic System |
| SCOOT | Split Cycle and Offset Optimization Technique |
| USP | Universidade de São Paulo |
| VO | Velocidade Operacional |
| W74 | Versão melhorada do modelo de Wiedemann de 1974 |
| W99 | Versão melhorada do modelo de Wiedemann de 1999 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1. JUSTIFICATIVA | 16 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.2.1. <i>Objetivos gerais</i> | 18 |
| 1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 19 |
| 2.1. ENGENHARIA DE TRÁFEGO..... | 19 |
| 2.1.1. <i>Classificação das vias</i> | 19 |
| 2.1.2. <i>Condições de oferta</i> | 24 |
| 2.1.3. <i>Movimentos de aproximações e interseções</i> | 25 |
| 2.1.4. <i>Sinalização Semaforica</i> | 30 |
| 2.1.5. <i>Coordenação semafórica</i> | 41 |
| 2.2. GESTÃO DE TRÁFEGO..... | 47 |
| 2.2.1. <i>Medidas de desempenho de tráfego</i> | 47 |
| 2.2.2. <i>Gestão de tráfego em tempo real</i> | 49 |
| 2.3. MODELAGEM DE TRÁFEGO | 55 |
| 2.3.1. <i>Macromodelos</i> | 56 |
| 2.3.2. <i>Mesomodelos</i> | 57 |
| 2.3.3. <i>Micromodelos</i> | 57 |
| 2.3.4. <i>Modelagem de tráfego no Vissim</i> | 58 |
| 2.3.5. <i>Calibração e validação de modelos de microssimulação</i> | 66 |
| 3. ÁREA DE ESTUDOS | 69 |
| 3.1. O MUNICÍPIO DE OSASCO | 69 |
| 3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS | 69 |
| 4. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE MICROSSIMULAÇÃO | 73 |
| 4.1. DADOS | 73 |
| 4.1.1. <i>Geometria da Via</i> | 74 |
| 4.1.2. <i>Contagem de veículos</i> | 74 |
| 4.1.3. <i>Tempos semafóricos</i> | 75 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.4. Pontos e linhas de ônibus..... | 75 |
| 4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO | 75 |
| 4.2.1. Geometria da Via..... | 75 |
| 4.2.2. Vehicle Inputs | 76 |
| 4.2.3. Vehicle Routes..... | 77 |
| 4.2.4. Proporção de veículos | 77 |
| 4.2.5. Semáforos | 77 |
| 4.2.6. Área de Conflito | 78 |
| 4.2.7. Driving Behavior | 78 |
| 4.2.8. Contadores | 79 |
| 4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO..... | 79 |
| 4.3.1. Parâmetros a serem calibrados | 80 |
| 4.3.2. Método de calibração e resultados | 82 |
| 4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO | 86 |
| 4.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO | 86 |
| 4.6. CENÁRIOS AVALIADOS..... | 88 |
| 4.6.1. Teste de sensibilidade (configuração semafórica atual) | 89 |
| 4.6.2. Velocidade reduzida | 92 |
| 4.6.3. Onda verde..... | 94 |
| 4.6.4. Considerações gerais | 96 |
| 4.7. APLICAÇÃO EM TEMPO REAL | 97 |
| 4.7.1. Cenários propostos para teste de gestão em tempo real | 97 |
| 4.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO..... | 99 |
| 5. GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL EM CIDADES | 100 |
| 5.1. IMPORTÂNCIA DA COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA | 100 |
| 5.1.1. Fluidez do trânsito | 100 |
| 5.1.2. Segurança | 101 |
| 5.1.3. Meio ambiente | 103 |
| 5.1.4. Priorização de veículos..... | 104 |
| 5.2. CASO INTERNACIONAL - TORONTO..... | 105 |
| 5.2.1. Áreas da Demonstração | 105 |
| 5.2.2. Resultados da Avaliação | 106 |
| 5.2.3. Custos e Benefícios..... | 108 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.4. <i>Expansão do SCOOT</i> | 109 |
| 5.2.5. <i>Problemas Detectados Atualmente</i> | 110 |
| 5.3. CASO DE OSASCO | 111 |
| 5.4. CASO DE SÃO PAULO | 112 |
| 5.4.1. <i>Visita à CET</i> | 112 |
| 5.4.2. <i>Resultados com a implantação de semáforos em tempo real</i> | 114 |
| 5.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CASOS TRÊS CASOS..... | 114 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 117 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |
| APÊNDICE A – CÁLCULO DO GEH..... | 125 |
| ANEXO A - INVENTÁRIO FÍSICO DO SISTEMA VIÁRIO..... | 126 |
| ANEXO B – CONTAGEM DOS VEÍCULOS | 133 |
| ANEXO C – DADOS SEMAFÓRICOS..... | 143 |
| ANEXO D – DADOS DOS PONTOS E LINHAS DE ÔNIBUS | 153 |
| ANEXO E – ENTREVISTA COM O NÚCLEO DE SIMULAÇÃO DA CET ... | 157 |
| ANEXO F – ENTREVISTA COM O CENTRO DE OPERAÇÕES INTEGRADAS DA CIDADE DE OSASCO | 163 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A popularidade do automóvel e a urbanização das cidades trouxeram um grande problema para a sociedade: os congestionamentos. Desde o governo de Juscelino Kubitschek, o automóvel foi ganhando espaço na vida das pessoas, e o acesso a esse meio de transporte se tornou mais fácil com o passar do tempo, possibilitando existir 43 milhões de veículos (carros, caminhões e ônibus) circulantes no Brasil (SINDIPEÇAS, 2018).

Esse incentivo ao uso do automóvel no país, aliado a um espraiamento das cidades brasileiras, devido a uma falta de planos estratégicos e à extrema valorização imobiliária dos centros das cidades, proporcionou um grande número de movimentos pendulares que geram uma demanda acima da capacidade dos sistemas viários existentes em certos momentos do dia, fazendo com que eles operem saturados ou supersaturados, gerando imensas filas de veículos (congestionamentos).

Esse tempo perdido no trânsito afeta diretamente a qualidade de vida das pessoas, a economia e o meio ambiente. Segundo pesquisa do IBOPE (2010), os paulistanos perdem, em média, 2 h e 42 min por dia nessas grandes filas de veículos. Segundo CINTRA (2014), só em 2012, os congestionamentos causaram uma perda em torno de 40,1 bilhões de reais, na cidade de São Paulo. Além disso, os veículos despejaram, no ano de 2016, cerca de 40,3 milhões de toneladas de CO_2 na atmosfera, no estado de São Paulo, segundo a CETESB (2016).

Portanto, se conseguirmos uma melhora, mesmo que pequena, no tempo despendido nas ruas, dentro de veículos, pelas pessoas, o impacto positivo em diversos setores será imenso.

Dentro desse contexto está a gestão do tráfego das cidades, que tem como objetivo gerir o sistema para que ele trabalhe da maneira mais eficiente possível e minimize o tempo de trajeto das pessoas da sua origem ao seu destino.

Pontos chaves da gestão de tráfego são: temporização de semáforos, velocidade máxima da via, sentido das vias, entre inúmeros outros fatores.

No âmbito semafórico, a gestão de tráfego tradicional funciona de uma forma mais estática, ou seja, alguns fatores influenciadores da capacidade viária são definidos segundo alguns critérios, normalmente baseados em séries históricas observadas (volume e composição de tráfego, número de acidentes, etc.).

Há alguns anos já estão sendo implantados sistemas de gestão de tráfego em tempo real (também chamados de *Adaptive Traffic Control Systems - ATCS*) ao redor do mundo, porém ainda há poucas cidades (em sua maioria, grandes cidades), atualmente, que apresentam esse sistema em grande parte do seu sistema viário. Alguns exemplos de cidades que implantaram esse sistema são Los Angeles, Sydney, Moscou e Viena.

Onde esse sistema de gestão “inteligente” foi implantado, pôde-se observar melhorias significativas no trânsito nas vias da cidade, como redução do tempo perdido nos veículos, redução no número de acidentes, entre outras (VILANOVA, 2005).

Tradicionalmente, o cálculo do tempo de ciclo de cada semáforo é feito utilizando alguns planos ao longo do dia, de acordo com o volume de veículos de cada via da intersecção. A utilização de planos diferentes busca atender à variação do volume de tráfego ao longo do dia e entre os diversos dias da semana. Essa programação de tempo é feita eletronicamente e é feita manualmente, portanto há uma limitação no número de planos e deve-se haver uma margem de segurança para acontecimentos não esperados, como variação do clima, acidentes, obras, etc. Essas limitações geram um tempo de ciclo maior do que o necessário em diversos momentos do dia, o que aumenta o tempo perdido das pessoas e pode causar um maior número de acidentes, porque, segundo NETO (2016), quando as pessoas ficam paradas no semáforo durante um tempo excessivo, a probabilidade desrespeitar a sinalização semafórica aumenta.

Ao se utilizar a gestão em tempo real da temporização semafórica, pode-se haver um número muito maior de “planos” de ciclos ao longo do dia, já que eles são calculados e implementados de forma automática, sendo alterados de acordo com a demanda naquele exato momento, portanto não são necessárias margens de segurança para demandas inesperadas.

Nas cidades brasileiras, esse sistema de gestão ainda está muito pouco presente, porém já pode-se encontrar semáforos “inteligentes” (com gestão em tempo real) em alguns cruzamentos brasileiros. Na maior cidade brasileira, São

Paulo, dos 5742 cruzamentos semaforizados existentes, somente 105 operam em tempo real (DUARTE, 2016).

Essa pequena porcentagem de semáforos inteligentes pode, parcialmente, ser explicada pelo investimento financeiro e complexidade relativamente grandes para implantação do sistema de gestão em tempo real, portanto há a necessidade de demonstrar as grandes vantagens do sistema para que seja justificado esse esforço para mudança do sistema tradicional. A demonstração dessas vantagens pode ser feita por meio de estudos de caso, que mostram os resultados em lugares que já implantaram esse sistema, por meio de simulações computacionais em locais que apresentam problemas de tráfego, porém não têm gestão em tempo real.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Analizar os impactos que a possível implantação da gestão semafórica em tempo real pode gerar em cidades com problemas recorrentes de congestionamentos.

1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se, inicialmente, construir um modelo de microssimulação de um trecho da Avenida dos Autonomistas em Osasco, entre o cruzamento com a Av. João Batista até o cruzamento com a Av. Franz Voegeli, que represente o cenário atual e, assim, possibilite a avaliação da implementação da gestão semafórica em tempo real no trecho por meio de indicadores de tráfego como: atraso veicular médio, comprimento de filas e velocidade operacional média.

Além disso, o projeto visa apresentar uma discussão a respeito das dificuldades de se implantar esse sistema de gestão em cidades e elaborar um estudo de caso comparativo entre os municípios de São Paulo e Osasco, bem como o cenário internacional, exemplificado pela cidade de Toronto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENGENHARIA DE TRÁFEGO

De modo simplificado, entende-se que a engenharia de tráfego tem como finalidade estabelecer um sistema viário que garanta mobilidade e acessibilidade adequada a população, um transporte eficiente de bens, um controle dos impactos ambientais e sociais provenientes do tráfego no meio urbano, tudo isso de modo econômico para garantir uma gestão eficiente de recursos (PIETRANTONIO, 2018).

Dessa forma, diversas atividades são pertinentes ao engenheiro de tráfego, tais como:

- a) Estudo de circulação nas vias;
- b) Classificação das vias, usualmente feita por meio de uma hierarquização funcional, mas com a municipalização do trânsito decretada no *Art.24 do Código de Trânsito Brasileiro - CTB (Lei nº 9.503 de 23 de Setembro de 1997)*; está sendo mais comum o uso de políticas que se adequem às peculiaridades do meio urbano local;
- c) Elaboração de projetos de sinalização de modo a garantir segurança, conforto e fluidez adequados aos usuários das vias;
- d) Controle semafórico;
- e) Elaborar estratégias de tráfego em situações especiais como em grandes eventos (Fórmula 1, jogos de futebol, shows internacionais, entre outros);
- f) Modificar o sistema viário existente com o estudo das soluções cabíveis (proibições de conversões à esquerda e de estacionar veículos junto à via, são alguns exemplos);
- g) Estudos dos impactos de grandes empreendimentos no sistema viário.

2.1.1. Classificação das vias

Conforme apresentado anteriormente, a classificação das vias é um dos passos fundamentais no planejamento do processo viário, uma vez que dentro das atribuições de um engenheiro de tráfego está incluso o dimensionamento ou a

organização de um sistema viário que atenda as demandas da população de acordo com toda a complexidade do assunto.

Nesse contexto, visando minimizar os impactos decorrentes dos possíveis conflitos quanto à operação de um sistema viário, construiu-se um método de classificação de hierarquia funcional que se configura como o modelo principal adotado no Brasil.

2.1.1.1. Hierarquia do sistema viário

O DNIT (2010) classifica as vias de modo funcional, segundo uma hierarquia bem definida, para o atendimento dos deslocamentos dentro de um sistema viário. Dessa forma, essa classificação adota como principais critérios a mobilidade e a acessibilidade, onde o primeiro representa a facilidade de se deslocar e o segundo a facilidade de conectar a origem de uma viagem com o seu destino.

Em termos gerais de classificação do sistema viário, designamos como meio urbano as instalações com mais de 5.000 habitantes e de área rural aquelas com menos de 5.000 habitantes. A tabela 2.1 apresenta a hierarquia dos sistemas funcionais, tanto em regiões consideradas urbanas, quanto nas rurais.

Tabela 2.1 - Hierarquia das vias em áreas urbanas e áreas rurais

| Áreas Urbanas | Áreas Rurais |
|--|---|
| Arterial Sistema Arterial Principal Sistema Arterial Secundário | Arterial Sistema Arterial Principal Sistema Arterial Primário Sistema Arterial Secundário |
| Coletor Sistema Coletor | Coletor Sistema Coletor Primário Sistema Coletor Secundário |
| Local Sistema Local | Local Sistema Local |

Fonte: DNER (1974).

Como os estudos que serão feitos nesse projeto serão de cidades adensadas, a questão de áreas rurais não será ressaltada, mas destaca-se que as informações necessárias podem ser exploradas no *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais - DNER - 1999*.

Com relação à hierarquia das vias, o anexo I do Código de Trânsito Brasileiro, faz as seguintes definições:

Via de trânsito rápido: Aquela caracterizada por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessias de pedestres em nível

Via arterial: Aquela caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade;

Via coletora: Aquela destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade;

Via local: Aquela caracterizada por interseções em nível não semafORIZADOS, destinada apenas ao acesso local ou áreas restritas.

De modo simplificado pode-se destacar as características que geralmente são encontradas nos cruzamentos das vias que atende a hierarquia funcional:

Tabela 2.2 - Características de cruzamentos na hierarquia funcional

| | LOCAL | COLETORA | ARTERIAL | EXPRESSA |
|----------|---|--|--|---|
| LOCAL | Interseções sem controle de tráfego | | | |
| COLETORA | Interseções com sinalização de prioridade | Interseções semafORIZADAS (todos os movimentos permitidos) | | |
| ARTERIAL | Não deve ocorrer | Interseções semafORIZADAS (alguns movimentos proibidos) | Interseções semafORIZADAS (alguns movimentos proibidos) | |
| EXPRESSA | Não deve ocorrer | Não deve ocorrer | Cruzamento em desnível (ou conexão por ramais de acesso) | Cruzamento em Desnível Seções de Entrelaçamento |

Fonte: PIETRANTONIO (2018).

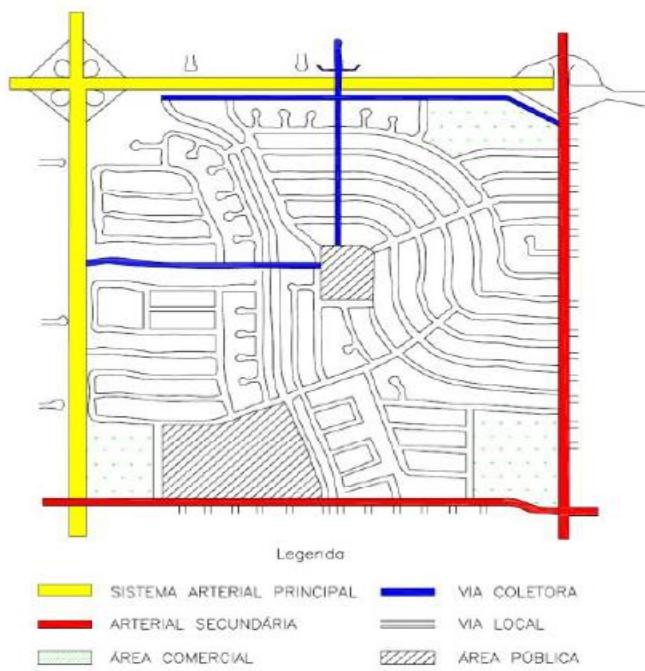
De modo complementar, o Art. 61 do CTB estabelece em regiões onde não há sinalização regulamentadora no meio urbano, a velocidade máxima da via como:

- a) **Via de trânsito rápido:** 80 km/h;
- b) **Via arterial:** 60 km/h;
- c) **Via coletora:** 40 km/h;
- d) **Via local:** 30 km/h.

Os sistemas arteriais principal e secundário, coletor e local serão aprofundados nos tópicos que virão a seguir, entretanto para ilustrar cada um

desses sistemas, destaca-se um exemplo da hierarquia funcional das vias conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1 - Hierarquia funcional das vias urbanas



Fonte: DNIT (2010).

2.1.1.1. Sistema Arterial principal

O sistema arterial principal é aquele que alimenta os principais centros de atividades urbanas, apresentando um volume de tráfego superior aos demais, bem como a característica de acomodar viagens longas, também pela grande extensão de suas vias. Embora seja de extrema importância em um sistema viário, ele representa apenas uma pequena parcela da rede viária.

O sistema arterial principal também é responsável por interligar o sistema com as principais rodovias sejam elas federais, estaduais ou municipais e geralmente apresenta rotas de ônibus urbanas e intermunicipais.

Além disso, devido à natureza das viagens atendidas nesse sistema, quase todas as suas vias apresentam controle de acesso, total ou parcial. Pertencem a esse sistema as vias de trânsito rápido (ou expressas) e as vias arteriais primárias.

2.1.1.1.2. Sistema Arterial Secundário

É o sistema que conecta as vias urbanas com o sistema arterial principal, apresenta extensão intermediária, atende às viagens com grau de mobilidade um pouco inferior e distribui o tráfego por áreas menores do que o sistema principal.

Além disso, ele pode acomodar linhas de ônibus e prover a continuidade entre as vias e atender todos os casos de sistema arterial que não sejam os movimentos mais importantes.

2.1.1.1.3. Sistema Coletor

A principal função do sistema coletor é captar o tráfego das vias locais das áreas residenciais e o conduzi-lo ao sistema arterial. Dessa forma, ele constitui uma malha contínua com as artérias, permite, em algumas de suas vias, o trânsito de ônibus e têm como características o tráfego em baixas velocidades.

Por fim, deve-se controlar as interseções com as vias locais e coletores, com o uso de semáforos ou sinais de paradas obrigatórias na via local, ou, no caso de cruzamento entre dois sistemas coletores, aquele com menor volume de tráfego.

2.1.1.1.4. Sistema Local

É o sistema que proporciona acesso às propriedades no meio local, de modo que apresente a menor velocidade de tráfego dentre todos os sistemas, geralmente não contêm rotas de ônibus no meio urbano e deve formar uma rede de ligação com o sistema coletor.

2.1.1.2. *Classificação urbanística*

De fato, a classificação funcional é um elemento concebido de modo a minimizar os conflitos existentes nas vias, entretanto essa classificação apresenta uma série de problemas como a concentração do tráfego nas vias principais, o que leva a um conjunto de impactos no ambiente construído, alterações indesejadas (ou desejadas) no uso do solo, entre outros. Outro exemplo é a não consideração de questões urbanísticas, tais como: entradas de veículos nas edificações, tráfego de pedestres e bicicletas (PIETRANTONIO, 2018).

Dessa forma, existem outras formas de classificação das vias, por exemplo, utilizando conceitos urbanísticos, uma vez que já foi citado que o crescimento da população, bem como as atividades econômicas de uma cidade, está atrelado à malha viária existente e sua projeção para cenários futuros.

No caso da cidade de São Paulo é utilizado um conceito de que vai além dos deslocamentos da população e associa-se ao plano de desenvolvimento da cidade, segundo a lei 16.050/2014 que dispõe da Política de Desenvolvimento Urbano, o Sistema de planejamento Urbano e o Plano Diretor Estratégico.

2.1.2. Condições de oferta

As condições de oferta da via são influenciadas por diversos fatores, e a classificação da via, como já mencionado, de certa forma as leva em consideração. Há dois tipos básicos de condições de oferta: operação em fluxo contínuo (ou ininterrupto) e operação em fluxo descontínuo (ou interrompido).

2.1.2.1. Fluxo contínuo

A condição de fluxo contínuo é aquela na “qual as condições operacionais são determinadas pela interação entre veículos dentro da corrente de tráfego” (PIETRANTONIO, 2018), ou seja, as possíveis paralisações ocorrem devido somente a razões internas ao fluxo do tráfego, como por exemplo, um acidente. Essa condição é observada normalmente em rodovias, porém há vias arteriais que apresentam condições de fluxo contínuo.

2.1.2.2. Fluxo descontínuo

A condição de fluxo descontínuo é aquela na “qual as condições operacionais são dominadas por interrupções periódicas causadas por elementos externos à corrente de tráfego (usualmente dispositivos de sinalização ou outras correntes de tráfego preferenciais)” (PIETRANTONIO, 2018).

Nas vias urbanas, há a predominância desta condição de tráfego, já que existem inúmeras interseções entre fluxos conflitantes, como será explicado adiante.

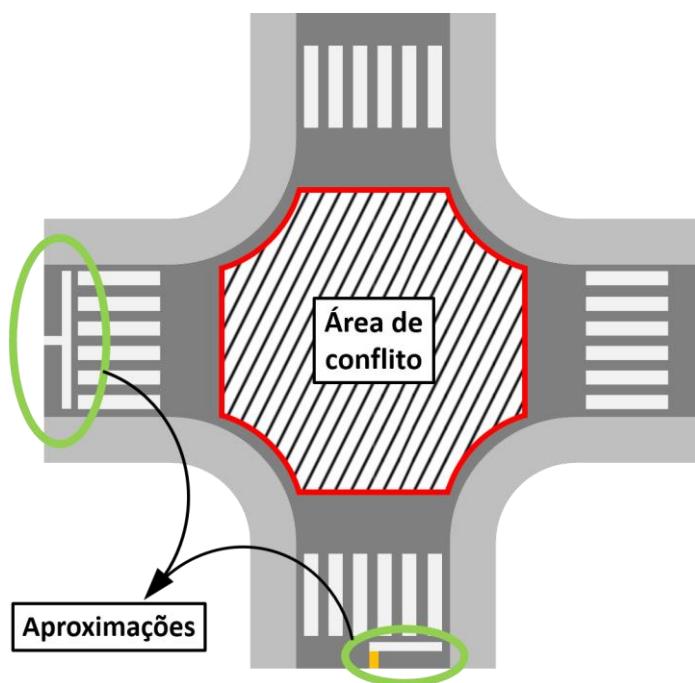
2.1.3. Movimentos de aproximações e interseções

Para introduzir os conceitos de sinalização semafórica, é necessário evidenciar mais algumas definições que irão auxiliar na determinação do tipo de sinalização semafórica a ser utilizada.

2.1.3.1. Movimentos e aproximações

Segundo o DENATRAN (2014), o termo movimento "é usado para identificar o fluxo de veículos que têm a mesma origem e mesmo destino, e/ou o fluxo de pedestres que se deslocam na mesma direção, mas não necessariamente no mesmo destino". De uma forma mais simplista, pode-se considerar que um movimento seja cada um dos possíveis trajetos que se pode realizar em uma interseção ou em um trecho viário em meio de quadra. Antes de prosseguir, duas outras definições são necessárias para o entendimento das classificações dos movimentos: em primeiro lugar, temos as aproximações, que são os trechos da via por onde os veículos chegam à interseção; em segundo lugar, define-se as áreas de conflito, as quais são as regiões da interseção onde ocorre a interferência de movimentos veiculares a partir de diferentes aproximações. Na Figura 2.2 retrata-se de maneira visual os conceitos apresentados anteriormente.

Figura 2.2 - Aproximações e área de conflito



Fonte: Elaboração própria.

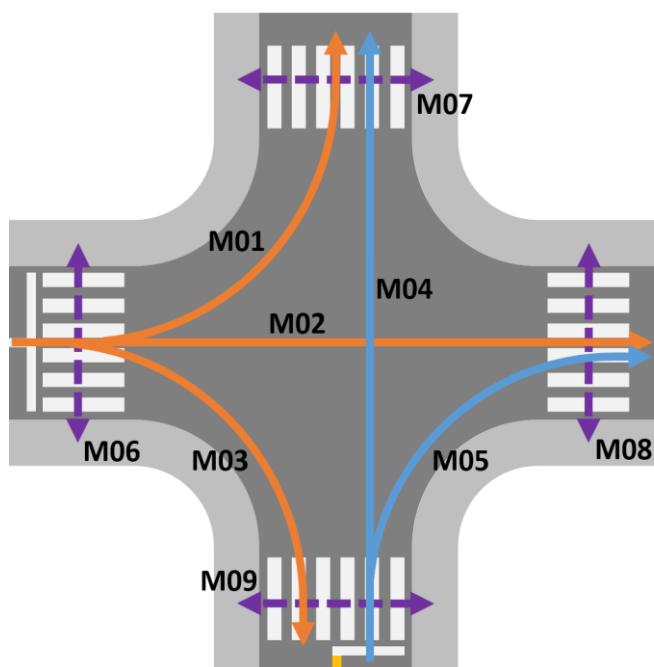
Pode se classificar os movimentos quanto à interação dos seus trajetos. Dessa forma, os movimentos podem ser:

- Convergentes, quando possuem diferentes aproximações, mas destinos iguais;
- Divergentes, quando possuem a mesma aproximação, mas destinos diferentes;
- Interceptantes, quando têm aproximações e destinos diferentes e os trajetos se cruzam em algum ponto;
- Não-interceptantes, quando têm aproximações e destinos diferentes, mas os trajetos não se cruzam.

Em algumas ocasiões, para se evitar colisões e acidentes, realiza-se o controle semafórico nas aproximações da área de conflito. Agregam-se os movimentos em duas categorias a fim de estudar o efeito do controle semafórico. Assim, os movimentos podem ser conflitantes, se forem convergentes ou interceptantes; ou não-conflitantes, se forem divergentes ou não-interceptantes.

Como se pode notar no exemplo da Figura 2.3, há 9 movimentos possíveis na interseção. Os movimentos de 1 a 5 são movimentos veiculares, enquanto os de 6 a 9 são movimentos de pedestres.

Figura 2.3 - Classes de movimentos



Fonte: Elaboração própria.

Segundo a classificação apresentada anteriormente, é possível resumir as classes presentes na imagem com a tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Exemplos de classes de movimentos

| Mov. | M01 | M02 | M03 | M04 | M05 |
|------|------|------|------|------|------|
| M01 | | Div | Div | Conv | NInt |
| M02 | Div | | Div | Int | Conv |
| M03 | Div | Div | | NInt | NInt |
| M04 | Conv | Int | NInt | | Div |
| M05 | NInt | Conv | NInt | Div | |

Fonte: Elaboração própria

Legenda: Conv = Convergentes; Div = Divergentes; Int = Interceptantes; NInt = Não Interceptantes

2.1.3.2. Interseções

Segundo o DNIT (2005), uma interseção é a área em que duas ou mais vias se unem ou se cruzam, onde todo o espaço é destinado a facilitar os movimentos dos veículos que por ela circulam. As interseções são elementos de descontinuidade em uma rede viária e representam situações críticas que devem ser tratadas de forma especial. No projeto de interseções, deve-se assegurar a circulação ordenada dos veículos e manter o nível de serviço da via, garantindo a segurança nas áreas em que as suas correntes de tráfego sofrem a interferência de outras correntes, internas ou externas. Há dois tipos de interseções: em nível e em níveis diferentes.

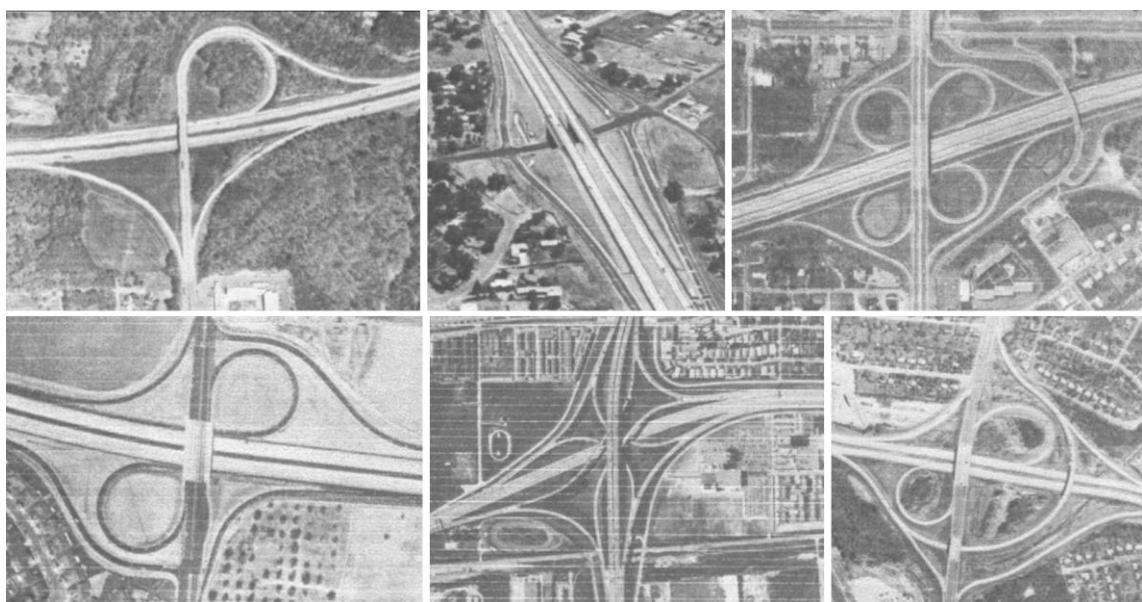
2.1.3.2.1. Interseções em níveis diferentes

As interseções em níveis diferentes podem ter ou não troca de fluxos de tráfego entre as vias que se interceptam. Quando não há troca de fluxo de tráfego, denomina-se cruzamento em níveis diferentes sem ramos e designa-se passagem

superior quando a via principal passar sobre a secundária ou passagem inferior quando a via principal passar sob a secundária. No caso de troca de fluxo de tráfego, chama-se de interconexão e são classificadas em sete tipos básicos:

- a) Interconexão em “T” ou “Y”: quando a interconexão possui três ramos. Há um caso especial, quando uma das correntes de tráfego de um ramo executar giro próximo de 270º e é denominada de “trombeta”;
- b) Diamante: quando a via principal apresenta uma saída à direita antes e uma entrada à direita após o cruzamento, para cada sentido;
- c) Trevo completo: quando os movimentos de conversão à esquerda são feitos por laços e à direita por conexões externas aos laços;
- d) Trevo parcial: quando há eliminação de um ou mais ramos de um trevo completo, restando pelo menos um laço;
- e) Direcional: quando os principais movimentos de conversão à esquerda são realizados com ramos direcionais. No caso de todos os movimentos serem feitos por ramos direcionais, a interconexão diz-se totalmente direcional;
- f) Semidirecional: quando os principais movimentos de conversão à esquerda são realizados por ramos semidirecionais;
- g) Giratório: quando há utilização de rótula na via secundária.

Figura 2.4 - Tipos de interseções em níveis diferentes: trombeta, diamante, trevo completo, semidirecional, direcional e trevo parcial (sentido horário, a partir da fotografia do canto superior esquerdo)



Fonte: DNIT (2005).

Figura 2.5 - Interconexão do tipo Giratório



Fonte: DNIT (2005).

2.1.3.2.2. Interseções em nível

As interseções em nível podem ser classificadas em função do número de ramos, das soluções adotadas e do controle de sinalização. Segundo o primeiro critério, os tipos de interseções podem ser: de três ramos ou “T”, de quatro ramos e de ramos múltiplos (o caso de cinco ou mais ramos). Na Figura 2.6, tem-se ilustrações dos tipos descritos.

Figura 2.6 - Critério do número de ramos: interseções de três ramos, quatro ramos e ramos múltiplos (da esquerda para direita)

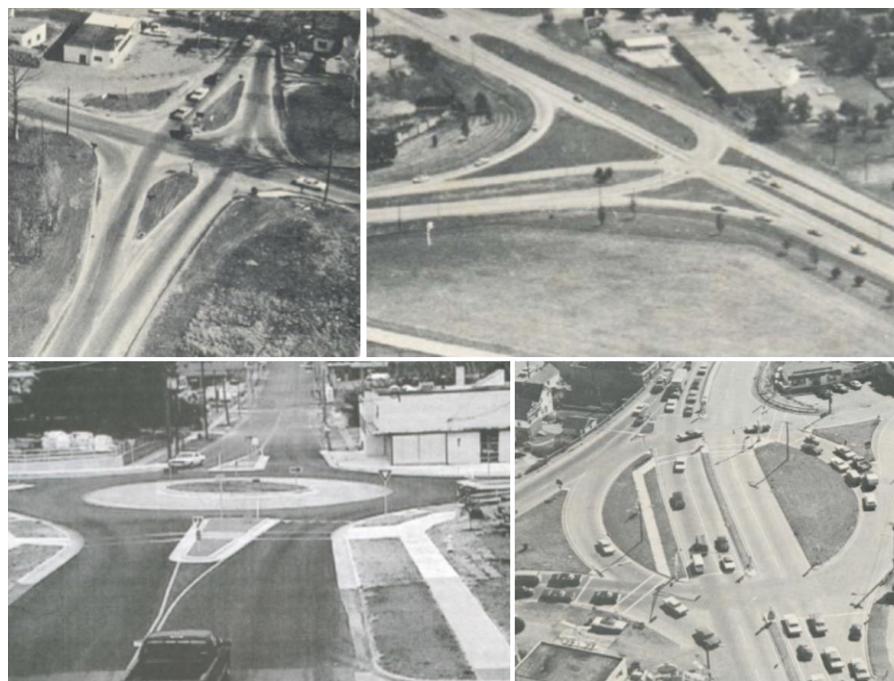


Fonte: BERNADIS (2018).

Pelo segundo critério, é preciso verificar quais foram às soluções adotadas para se evitar conflito de movimentos na interseção. Dependendo do volume de

tráfego nas vias envolvidas, uma ou outra solução é necessária. Na Figura 2.7 podem-se verificar os tipos de interseções por esse critério, os quais são: mínima (sinalização horizontal e vertical, apenas),gota, canalizada, rótula (ou rotatória) e rótula vazada, respectivamente, seguindo o sentido horário a partir do canto superior esquerdo.

Figura 2.7 - Critério das soluções adotadas: gota, canalizada, rótula vazada e rótula (sentido horário, a partir da fotografia do canto superior esquerdo)



Fonte: DNIT (2005).

Por último, segundo o terceiro critério, são consideradas a presença ou ausência de sinalização semafórica (luminosa). No primeiro caso, conta-se apenas com sinalização horizontal e vertical; no segundo, com semáforos.

2.1.4. Sinalização Semafórica

Segundo DENATRAN (2014), a sinalização semafórica é o subsistema de sinalização viária que apresenta indicações luminosas para transmitir mensagens específicas aos usuários da via pública. Dessa forma, ela regulamenta o direito de passagem ou sobre situações especiais na via.

Além disso, a sinalização semafórica pode ser dividida segundo a sua função da seguinte forma:

- a) **Sinalização semafórica de regulamentação:** Apresenta a função de controlar uma seção ou intersecção de via, por meio de sinalização semafórica luminosa, onde o sinal transmitido concede as orientações que os condutores de veículos, bem como os pedestres devem adotar. Com isso, altera-se o direito de passagem entre veículos e/ou pedestres de modo seguro para o trecho adiante;
- b) **Sinalização semafórica de advertência:** Apresenta a função de advertir o condutor sobre possíveis elementos perigosos na via, de modo que ele seja estimulado a reduzir sua velocidade e adotar medidas de precaução para seguir no trecho adiante.

No escopo desse projeto só será abordado a sinalização semafórica de regulamentação, onde existem inúmeros tipos de semáforos como: veicular, veicular direcional, pedestres e ciclistas.

Embora existam diferenças entre cada um deles, será detalhado apenas o tipo veicular que se configura como o principal modelo de sinalização existente na região de estudos.

Entretanto, vale salientar que os semáforos de pedestres que também são comuns em algumas seções do projeto, apresentam os focos luminosos vermelho e verde, que operam de modo análogo ao de veículos.

2.1.4.1. Focos luminosos do semáforo de veículos

Os semáforos veiculares se configuram como elementos que garantem ou restringem o direito de passagem dos veículos. Para atender a essas funções a sinalização apresenta três focos luminosos básicos: o Verde, o Amarelo e o Vermelho; que representam as seguintes orientações básicas para os condutores:

- a) **Verde:** Quando a sinalização apresenta a cor verde significa que o condutor pode seguir sua trajetória normalmente, de modo que sejam feitos os movimentos consistentes com a via ou interseção;
- b) **Amarelo:** A cor amarela indica que o condutor deve parar o seu veículo, ao menos que não haja mais tempo hábil para realizar essa ação de modo seguro. Neste caso, ele deve prosseguir trajeto;

c) **Vermelho:** A cor vermelha representa o impedimento do condutor de prosseguir sua trajetória, de modo que essa condição só será alterada quando aparecer a cor verde no semáforo.

Dessa forma, os semáforos para veículos são elementos que apresentam a função de permitir ou proibir a passagem de veículos na via por meio do uso da sinalização verde e vermelha, respectivamente. Entretanto é necessário o uso de uma cor intermediária, no caso o amarelo, que garanta uma interrupção menos brusca do movimento dos veículos na via e, por consequência, um maior grau segurança aos usuários.

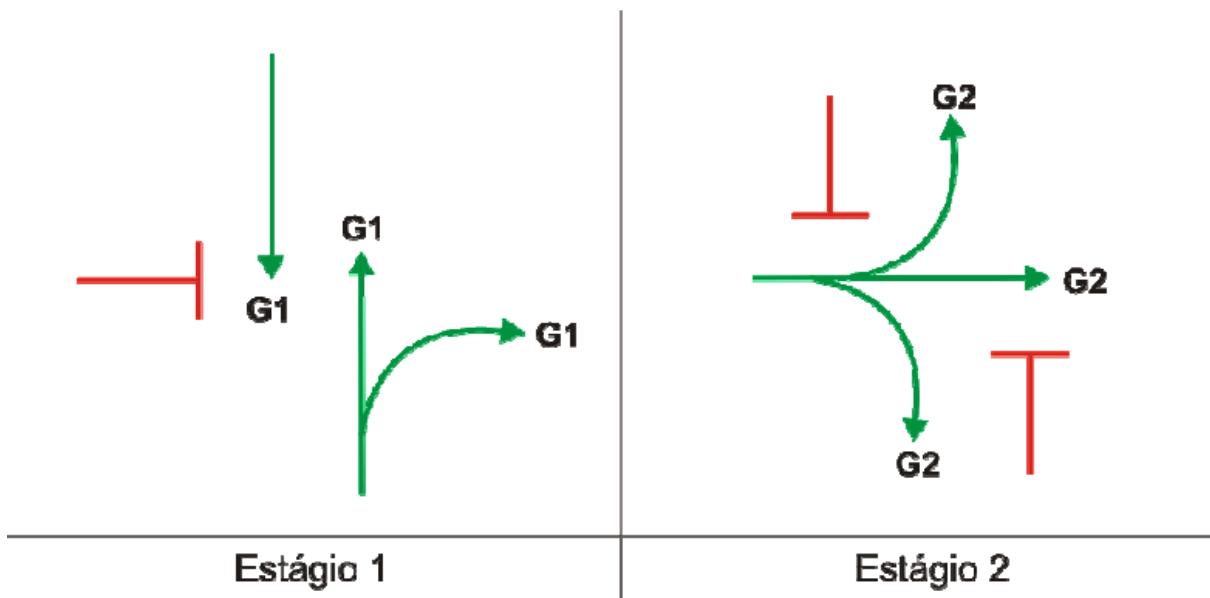
2.1.4.2. *Estágio*

Define-se estágio como o intervalo de tempo que um ou mais grupos de tráfego recebem o direito de prosseguir trajeto de modo simultâneo. Dessa forma, o período de estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

2.1.4.2.1. Diagrama de estágio

O diagrama de estágios é a representação gráfica dos movimentos que podem ser realizados em cada estágio do ciclo. Ele ilustra pela cor verde quais movimentos estão autorizados e pela cor vermelho quais estão proibidos, em cada estágio do ciclo.

Figura 2.8 - Exemplo de diagrama de estágios



Fonte: DENATRAN (2014).

2.1.4.3. Entreverdes

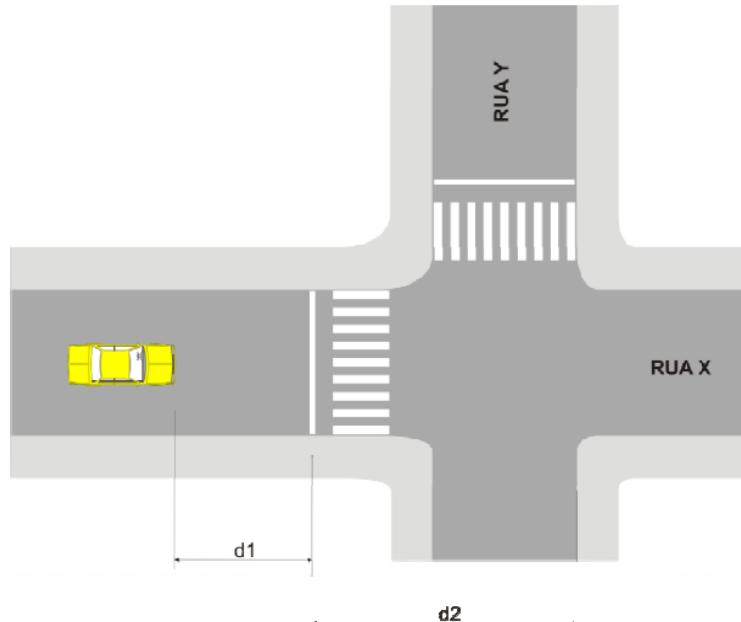
Define-se entreverdes como o intervalo de tempo equivalente ao final do verde de um estágio e início do verde do estágio subsequente, de modo que, seja a soma dos tempos de amarelo e vermelho geral (ou de segurança). Dessa forma, o período entreverdes se configura como o intervalo de segurança total.

Destaca-se que, como o período de entreverdes é um valor de segurança, ele se configura como um número fixo que não deve ser alterado, mesmo em planos semafóricos diferentes.

2.1.4.3.1. Tempos de amarelo

O tempo de amarelo corresponde ao tempo necessário para que um condutor que trafega com a velocidade máxima da via consiga reagir a mudança do foco luminoso e frear o veículo antes de encontrar a linha de retenção. A figura 2.9 mostra que a distância até a linha de retenção, d_1 , bem como a distância entre a linha de retenção e o término da área de conflito, d_2 .

Figura 2.9 - Distâncias percorridas pelo veículo nas aproximações



Fonte: DENATRAN (2014).

O cálculo do tempo de amarelo pode ser feito pela expressão 1.

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm i.g)} \quad (1)$$

Onde:

- t_{pr} = tempo de percepção e reação do condutor (geralmente, adota-se 1s);
- v = Velocidade sinalizada na via ou a sua determinação pela regulamentação estabelecida pelo CTB no critério de hierarquização funcional das vias, valor em m/s;
- a_{ad} = Máxima taxa de frenagem admissível em via plana (geralmente, adota-se 3m/s²);
- i = inclinação da via na aproximação do semáforo, sendo positivo em rampas ascendentes e negativo em descendentes, valores em m/m;
- g = aceleração da gravidade (9,81m/s²).

Destaca-se que o tempo de amarelo não deve ser superior a três segundos para vias com velocidade limite igual ou inferior a 40km/h, superior a quatro segundos naquelas com velocidades entre 50 e 60km/h e superior a cinco segundos quando a velocidade limite for 70km/h.

Complementarmente, o tempo máximo de amarelo não deve ser superior a cinco segundos independente da velocidade da via. No caso em que a equação 1 tiver resultado superior a cinco segundos, adota-se o tempo de amarelo igual a cinco segundos e o tempo restante é destinado ao tempo de vermelho geral, que também compõe o tempo de entreverdes.

2.1.4.3.2. Tempo de vermelho geral ou segurança

O tempo de vermelho geral é o tempo necessário para que o veículo que ultrapassou a linha de retenção saia da zona de conflito com segurança. No diagrama de intervalos luminosos esse período se configura como uma interseção dos períodos de vermelho de dois estágios diferentes, mostrando que o condutor que já ultrapassou a linha de retenção e visualizou o foco luminoso vermelho, não estará no percurso do usuário da via que vai ganhar a permissão de prosseguir trajeto.

O cálculo do tempo de vermelho geral pode ser feito pela seguinte expressão:

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \quad (2)$$

Onde:

v = Velocidade sinalizada na via ou a sua determinação pela regulamentação estabelecida pelo CTB no critério de hierarquização funcional das vias, valor em m/s;

c = comprimento do veículo (geralmente, adota-se 5m);

d_2 = comprimento equivalente à trajetória entre a linha de retenção e o término da área de conflito, valores em m.

2.1.4.4. Ciclo

O ciclo corresponde a sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica, ou seja, corresponde à soma dos tempos de estágios programados para o controle de tráfego local.

O tempo de ciclo é uma variável que depende predominantemente do tempo de entreverdes, também conhecido como tempo de perdido e da taxa de ocupação

da via. Uma forma teórica de calcular o tempo de ciclo foi demonstrada por WEBSTER (1958):

$$T_c = \frac{T_p}{1 - \sum Y_i} \quad (3)$$

Com:

$$Y_i = \frac{F_i}{FS_i} \quad (4)$$

Onde:

T_{pi} = Tempo perdido ou tempo de entreverdes, em segundos;

F = Fluxo na via ou demanda na via;

FS = Fluxo de Saturação da via;

Y = Taxa de ocupação dos grupos de movimentos críticos do estágio.

Embora seja um modelo consistente em termos teóricos, na prática os tempos resultantes implicam em congestionamentos. Dessa forma, Webster considerou uma série de componentes aleatórios que podem interferir no trânsito por meio de tempos de folga. Assim, utilizando-se tempos de folgas na equação 3 ele chegou no seguinte modelo de tempo ótimo de ciclo:

$$T_c = \frac{1.5.T_p + 5}{1 - \sum Y_i} \quad (5)$$

2.1.4.5. Tempos de verde

Conhecendo-se o tempo de entreverdes dos estágios, bem como o tempo de ciclo de uma programação semafórica é possível conhecer o tempo de verde, denominado por Webster como tempo de verde efetivo, pela seguinte expressão:

$$T_{v,efet,i} = (T_c - T_p) \cdot \frac{Y_i}{\sum Y_i} \quad (6)$$

Onde:

$T_{v,efet,i}$ = Tempo de verde efetivo do estágio i, em segundos;

T_c = Tempo de ciclo, em segundos;

T_p = Tempo perdido ou tempo de entreverdes, em segundos;

Y_i = Taxa de ocupação do grupo de movimentos críticos do estágio i.

Outra possível maneira de calcular o tempo de verde efetivo é seguindo o conceito do grau de saturação máxima da via, pela seguinte expressão:

$$T_{v,efet,i} = p_i \cdot T_c \quad (7)$$

Onde:

$T_{v,efet,i}$ = Tempo de verde efetivo do estágio i, em segundos;

T_c = Tempo de ciclo, em segundos;

p_i = Fração de verde requerida para o estágio i.

2.1.4.5.1. Tempo de verde mínimo

O tempo de verde mínimo é o menor intervalo de verde que pode ser utilizado, de modo que além de atender às demandas do tráfego local, seja suficiente para que os usuários passem pela via sem que haja um risco demasiado de acidentes.

Os valores do verde mínimos de segurança variam de 10 a 20 segundos, não sendo permitidos valores inferiores a 10 segundos. Seus valores dependem da classificação hierárquica da via, do volume de veículos, da largura da transversal, da composição do tráfego e da presença de pedestres.

2.1.4.5.2. Tempo de verde máximo

O tempo de verde máximo é determinado de modo que não se prolongue demasiadamente o tempo de espera de pedestres e/ou veículos que estão nos movimentos conflitantes. Seu dimensionamento depende das características do tráfego e da via.

2.1.4.6. Diagrama de intervalos luminosos

Considera-se intervalo luminoso o período em que a configuração luminosa dos semáforos permanece inalterada. Dessa forma, o diagrama de intervalos luminosos representa a duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio de barras horizontais, de modo a associar os grupos semafóricos correspondentes.

Figura 2.10 - Exemplo de diagrama de intervalos luminosos

| DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS | | | | | | | |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| INSTANTE (s) | 0 | 30 | 34 | 36 | 74 | 78 | 80 |
| G1 | | | | | | | |
| G2 | | | | | | | |
| INTERVALOS | 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 |
| DURAÇÃO (s) | 30 | 4 | 2 | | 38 | 4 | 2 |
| % CICLO | 38 | 5 | 2 | | 48 | 5 | 2 |
| ESTÁGIOS | 1 | | | | 2 | | |

Fonte: DENATRAN (2014).

2.1.4.7. Plano semafórico

O plano semafórico é o conjunto de elementos que caracteriza a programação semafórica de uma interseção ou seção de via em um determinado período do dia. O diagrama de estágios e os intervalos luminosos são partes constituintes do plano semafórico.

Em uma seção ou interseção semafORIZADA, pode haver controladores semafóricos monoplano e multiplano. Além disso, esse segundo modelo pode operar obedecendo a uma série histórica conforme tabelas horárias ou valer-se de controle que se adapta a demanda da via.

2.1.4.7.1. Monoplano

O modelo monoplano estabelece uma configuração de estágios e ciclos constantes ao longo da hora e do dia. Entretanto, apresenta-se como um modelo pouco utilizado atualmente, visto que é praticamente impossível encontrar uma região com intensidade de trânsito constante ao longo do tempo.

No caso em que se utiliza o modelo monoplano, opta-se por dimensionar o plano semafórico de acordo com a solicitação de maior demanda, para que no pior dos casos o trânsito seja administrado adequadamente.

Por um lado, esse modelo consegue atender adequadamente a condição mais crítica, por outro, ele gera ociosidades no restante do dia.

Segundo NETO (2016), essas ociosidades são indesejáveis, pois quando há espera demasiada por parte de motoristas e pedestres que estão no fluxo oposto, ocorre um sério risco de eles ultrapassarem o sinal vermelho e se exporem a acidentes.

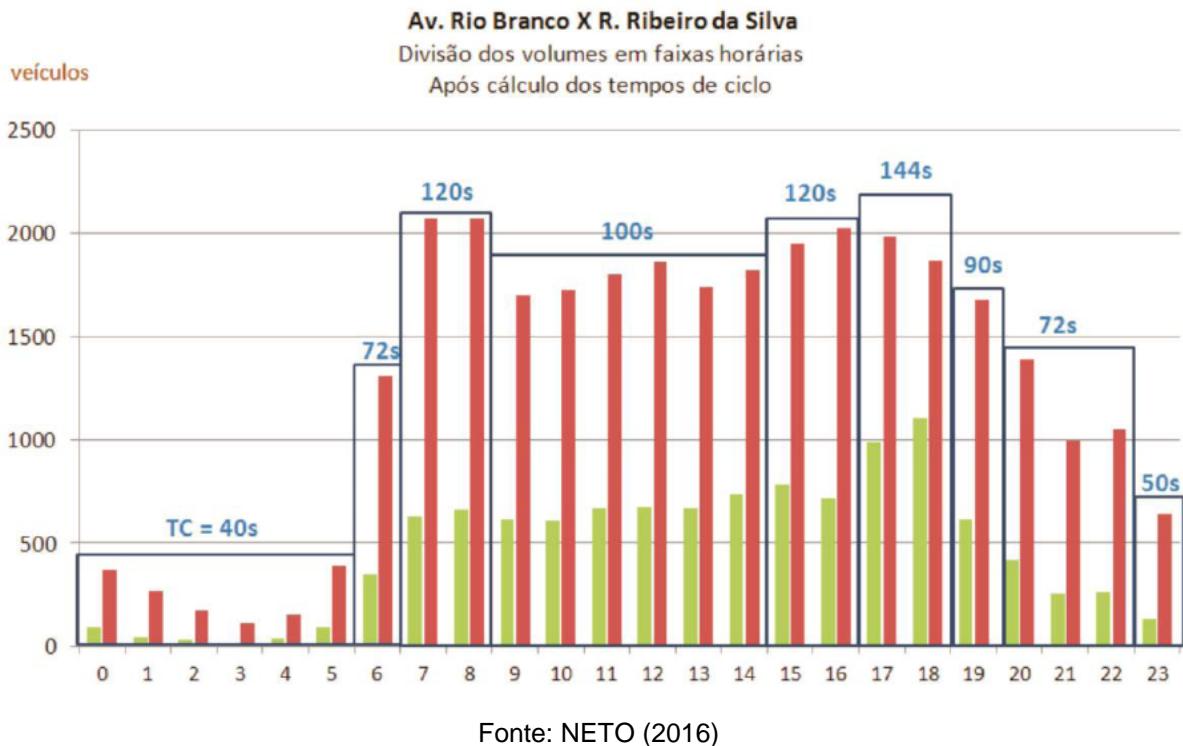
2.1.4.7.2. Multiplano

Por haver ociosidades e riscos de acidentes consideráveis no modelo monoplano, opta-se, na maioria dos casos, por estabelecer uma configuração multiplano. Este modelo considera as variações do trânsito para estabelecer uma série de cenários ótimos.

A configuração multiplano com o uso da tabela horária estabelece uma série de cenários com demandas semelhantes, seja em relação à hora do dia, ou em relação ao dia da semana, fim de semana, entre outros.

A figura 2.11 mostra um exemplo do uso de um gráfico que apresenta a demanda de veículos em uma interseção de acordo com a hora do dia e a determinação dos tempos de ciclo em cada plano semafórico com características semelhantes.

Figura 2.11 - Exemplo de tempo de ciclo conforme o horário do dia



2.1.4.7.3. Controle atuado

Essa forma de controle é chamada de atuada, pois não utiliza previsões de tráfego por meio de uma tabela horária, mas sim dispositivos de detecção que fazem a contagem de veículos e atualizam constantemente os dados de demanda.

Dessa forma, por ser um elemento que atualiza os seus dados e não utiliza uma previsão estatística da demanda, esse sistema consegue trabalhar com menores intervalos de segurança, o que reduz o tempo de ciclo de um cruzamento e reduz as ociosidades do sistema, garantindo maior fluidez e segurança.

Por não apresentar os planos semafóricos pré-determinados, utilizam-se os parâmetros simples como tempos de ciclo, tempo de verde, entreverdes, verde mínimo e máximo, para determinar as configurações dos focos luminosos e assim determinar o modelo semafórico ideal para um cruzamento isolado.

2.1.4.7.4. Controle em tempo real

Assim como o controle atuado o controle em tempo real utiliza dispositivos de detecção para a contagem de veículos na via e varia os tempos semafóricos de modo a melhor se adaptar ao padrão existente.

Entretanto, o sistema em tempo real necessariamente precisa ser centralizado, ou seja, os dados coletados pelos detectores são processados em um computador central que, por meio de um software, faz os cálculos dos tempos semafóricos necessários (NETO, 2016).

Outro ponto de destaque é que o sistema em tempo real utiliza um padrão que beneficia toda uma área de controle e não somente um cruzamento fixo como no controle atuado.

De modo análogo ao sistema atuado, o controle em tempo real minimiza folgas e ociosidades, o que aumenta a segurança e fluidez, embora em alguns cruzamentos o tempo de ciclo possa estar um pouco acima do valor ótimo para beneficiar a rede como um todo.

2.1.5. Coordenação semafórica

A coordenação semafórica é uma estratégia de gestão tráfego que melhora o desempenho da circulação de veículos, uma vez que estabelece diretrizes para que o tráfego em uma rede aberta ou fechada tenha maior fluidez.

Conforme PIETRANTONIO (2018), o aumento da densidade de semáforos e a saturação das vias no ambiente urbano faz com que seja cada vez mais importante o emprego da coordenação semafórica, em especial em redes de maior porte.

Segundo dados presentes no DENATRAN (1984), a sincronização de semáforos próximos pode gerar reduções na ordem de 50 a 80% em relação aos atrasos e números de paradas nas seções semafORIZADAS.

Todos esses aspectos permitem mostrar a importância da coordenação semafórica que será apresentada nos tópicos a seguir.

2.1.5.1. Tipos de sistemas de coordenação semafórica

Nos sistemas de coordenação semafórica podem ser utilizados dois tipos de controle, em rede aberta ou em rede fechada.

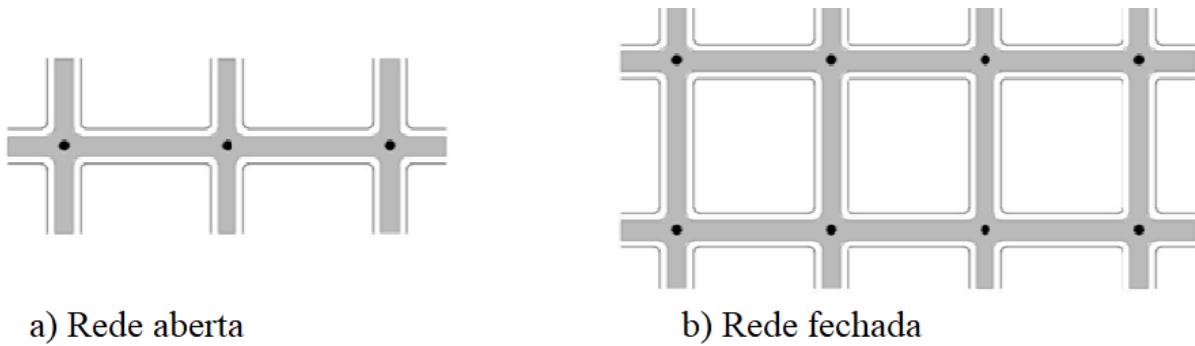
No primeiro caso, utiliza-se um sistema de controle que prioriza uma via com várias interseções. Por esse motivo, costuma ser empregado em uma via arterial, de

modo que se estabeleça uma progressão contínua da corrente de tráfego, por meio de defasagens entre os semáforos que caracterizam uma “onda verde”.

Essa denominação vem do fato de que os veículos trafegando com uma velocidade conhecida passarem por interseções sucessivas sem ter seu movimento interrompido por sinalização com foco luminoso vermelho.

Já no segundo caso, considera-se um conjunto de interseções pertencentes a diferentes vias de modo que se utilizam defasagens consistentes para que toda a rede se beneficie.

Figura 2.12 - Rede aberta e rede fechada



Fonte: DENATRAN (2014)

No escopo deste projeto será detalhada apenas a coordenação em rede aberta baseada em ondas verdes, uma vez que a região de estudos é o de uma via arterial e pretende-se priorizar o fluxo nela.

2.1.5.2. *Ondas Verdes*

2.1.5.2.1. Requisitos mínimos

Como já citado, a coordenação baseada em ondas verdes gera uma sequência de liberações de movimentos em cruzamentos sucessivos de modo a garantir que os veículos consigam passar por essas interseções sem interrupções. Segundo NETO (2016), são necessários dois requisitos mínimos para esse tipo de coordenação semafórica, são eles:

- a) Todos os controladores de tempo devem seguir uma mesma referência de tempo;

- b) Todos os controladores devem operar com o mesmo intervalo de ciclo (em alguns casos pode acontecer dos semáforos possuírem ciclos diferentes, mas nesse caso eles devem ser múltiplos exatos).

No primeiro caso, a utilização de uma mesma referência de tempo garante que os controladores estarão sincronizados. Já no segundo, pode-se entender que se os semáforos coordenados não tivessem o mesmo intervalo de ciclo, com o passar do tempo os controladores iriam liberar os movimentos de modo desordenado.

Entretanto, ressalta-se que, mesmo que o ciclo seja igual entre semáforos, a coordenação pode englobar modelos multiplanos, ou seja, que mudam a programação conforme a demanda, seja ela estimada por dados estatísticos ou por contagem dos veículos.

Outro ponto de destaque é que alguns cruzamentos podem apresentar valores de ciclo acima dos valores ótimos de modo que a rede seja beneficiada como um todo e não somente uma interseção isolada. Assim, calculados os tempos ótimos, adota-se para a rede o valor de ciclo correspondente ao cruzamento com maior demanda.

2.1.5.2.2. Defasagem

Tendo a mesma referência de tempo e o mesmo período de ciclo é fundamental que se estabeleça uma defasagem entre interseções adjacentes. Seu valor é positivo quando está no trecho à frente da interseção de referência e negativo do contrário. Dentre as possíveis formas de efetuar os cálculos em vias de mão única, PIETRANTONIO (2018), destaca:

- a) Defasagem para períodos com baixa demanda de tráfego:

$$\Theta_{ij} = t_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (8)$$

- b) Defasagem para condições de maior demanda:

$$\Theta_{ij} = t_{ij} - t_{sj} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} - \frac{n_j}{S_j} \quad (9)$$

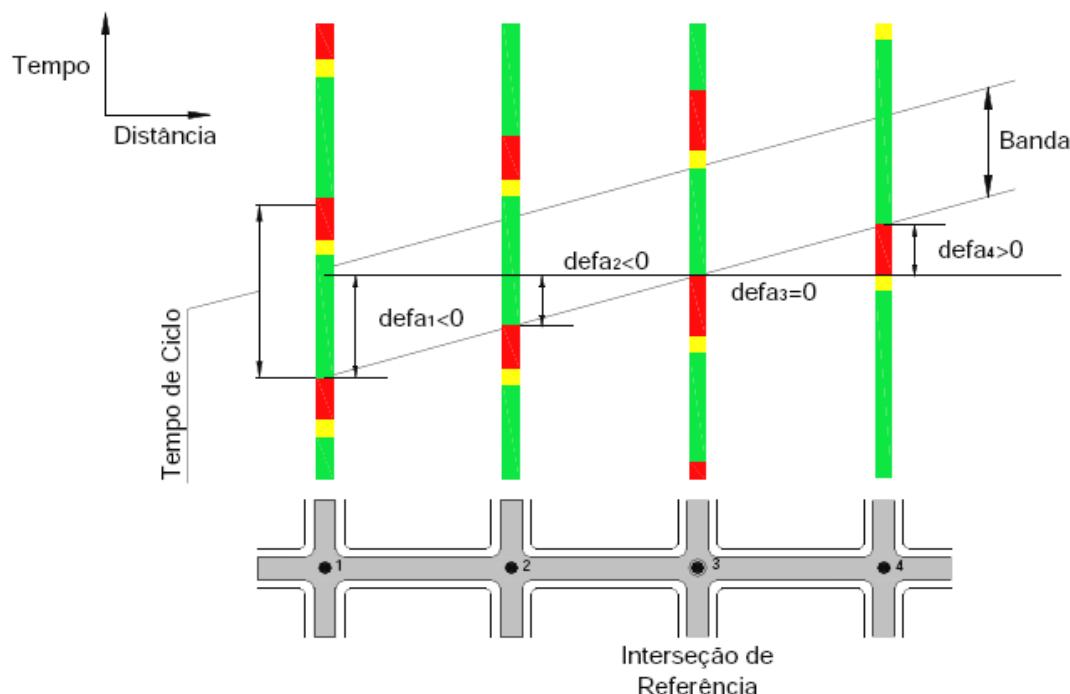
- c) Defasagem para sistemas saturados:

$$\Theta_{ij} = \frac{L_{ij}-Z_j}{V_{ij}} - \frac{Z_j}{W_{sj}} \quad (10)$$

Onde:

- θ_{ij} = Tempo de defasagem entre os cruzamentos i e j, valores em s;
- t_{ij} = Tempo de viagem entre interseções adjacentes, valores em s;
- t_{sj} = tempo de dissipação de filas em j, valores em s;
- L_{ij} = Distância entre interseções adjacentes, valores em m;
- V_{ij} = Velocidade média entre interseções adjacentes, valores em m/s;
- n_j = Fila no vermelho à jusante, valores em número de veículos;
- S_j = Fluxo de saturação da via, valores em número de veículos/s;
- Z_j = Extensão da fila, valores em m;
- W_{sj} = Velocidade de dissipação da fila em j, valores em m/s.

Figura 2.13 - Defasagem em relação a uma interseção de referência

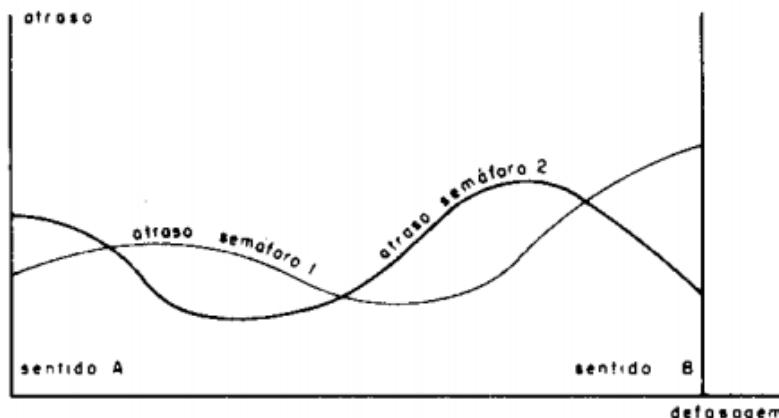


Fonte: DENATRAN (2014).

Para vias de mão dupla, onde a defasagem e tempo de ciclo ótimo são, em geral, diferentes entre os sentidos é necessário verificar se o benefício para um fluxo não gera atrasos em demasia para o fluxo oposto.

Uma possível abordagem de solução é por meio de um estudo do efeito das defasagens e os atrasos gerados, de modo que, adota-se como valor de defasagem aquele que gera menor soma dos atrasos nos dois sentidos.

Figura 2.14 - Relação dos atrasos em cada via em função da defasagem dos semáforos



Fonte: DENATRAN (1984)

Figura 2.15 - Defasagem ótima para vias de mão dupla.



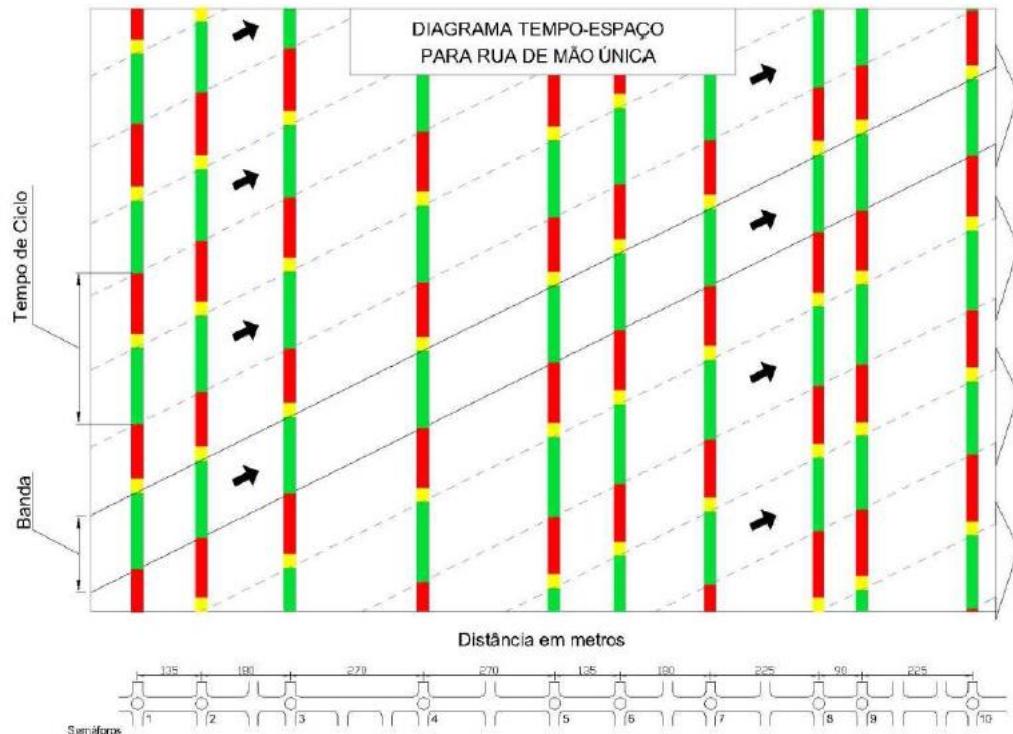
Fonte: DENATRAN (1984).

Outro possível método para o cálculo de defasagem é utilizando o diagrama tempo-espacô, onde no eixo vertical é representado para cada interseção, o tempo de ciclo e os respectivos tempos de verde, amarelo e vermelho; já o eixo horizontal mostra as distâncias em metros entre as interseções controladas por semáforos.

Esse método adota como premissa que não existem veículos em fila nas aproximações das interseções, ou seja, para uma via de mão única esse método é equivalente a equação 8.

Além disso, o tempo de verde que os veículos percorrerão sem parar é denominado Banda e a inclinação das retas traçadas mostra a velocidade de progressão desejada para os pelotões.

Figura 2.16 - Diagrama tempo-espacô para via de mão única



2.1.5.2.3. Fatores limitantes da coordenação semafórica

O DENATRAN (1984) apresenta como um dos fatores limitantes da coordenação baseada em ondas verdes a dispersão dos pelotões de tráfego em trajetos muito extensos, ou seja, como os usuários não percorrem as vias com velocidades iguais, os mais rápidos ultrapassam os mais lentos e tendem a alcançar o início do pelotão que está a sua frente.

Dessa forma, os pelotões sucessivos se encontram e se fundem o que gera uma uniformização do fluxo, reduzindo a necessidade de coordenação semafórica.

De modo complementar, o DENATRAN (2014) mostra que os pelotões, geralmente, só são beneficiados pelo sincronismo entre semáforos adjacentes se a distância entre estes for inferior a 800 metros.

Assim, na determinação do uso de coordenação semafórica por ondas verdes é importante que se avalie a sua necessidade, pois uma de suas premissas é a utilização de tempos de ciclo iguais entre semáforos, sendo que alguns deles estão com valores acima do ótimo. Com isso, para cruzamentos muito distantes, a coordenação pode ser até mesmo prejudicial à rede como um todo.

Por fim, em vias de mãos duplas é necessário se atentar à priorização do fluxo de veículos em um sentido em detrimento do outro, o que pode levar a uma piora do fluxo da rede como um todo.

2.2. GESTÃO DE TRÁFEGO

2.2.1. Medidas de desempenho de tráfego

Para introduzir os métodos de gestão de tráfego, é necessário que seja apresentado quais são as medidas de desempenho de tráfego, uma vez que é preciso ter parâmetros comparativos que permitam mostrar como o tráfego se comporta diante de diferentes soluções e que permitam a visualizar a evolução de soluções ao longo do tempo. Denominam-se soluções as medidas implementadas por planejadores de transporte para melhorar o tráfego, mobilidade e acessibilidade. No presente estudo, foca-se em soluções baseadas em semaforização inteligente sendo, portanto, mais relacionada ao desempenho do tráfego geral.

Uma frase atribuída a Peter Drucker, considerado o pai da administração moderna, afirma “*If you can't measure it, you can't improve it*”. Ela tem o objetivo de salientar a necessidade de se obter uma métrica para quantificar o progresso e poder ajustá-lo de acordo com os objetivos das ações adotadas. Da mesma forma, a gestão do tráfego demanda suas próprias métricas para medir o desempenho e a qualidade do tráfego em estudo.

Alguns índices adotados para a métrica do desempenho do tráfego são divididos de acordo com objetivos gerenciais específicos (MENESES, LEANDRO e LOUREIRO, 2018):

- a) Diagnóstico espaço-temporal de pontos críticos de congestionamento recorrente:
 - Atraso veicular médio (AVM);
 - Congestionamento (CNG);
 - Comprimento de fila de veículos (CFV).
- b) Diagnóstico da fluidez do tráfego urbano
 - Índice de velocidade operacional (IVO);
 - Velocidade operacional (VO);
 - Número de paradas de veículos (NPV).
- c) Avaliar a configuração espacial de subáreas de controle de tráfego:
 - Percentual de atraso veicular por subárea (PAV), relativamente ao tempo de viagem.
- d) Subsidiar a atualização da programação semafórica de tempo fixo:
 - Desvio padrão móvel do fluxo de tráfego (DMF).

A primeira categoria citada permite quantificar a existência e a intensidade do congestionamento de determinado trecho de uma malha viária, com a possibilidade de identificar pontos críticos. A segunda aponta a performance do tráfego nesse trecho e, de acordo com a configuração dos movimentos das interseções, é possível deduzir o que está prejudicando a progressão do fluxo de tráfego. A terceira e a

quarta, por fim, servem como subsídios para a gestão semafórica coordenada em subáreas da região em estudo.

As ações gerenciais sobre o tráfego urbano precisam de informações para embasá-las e os indicadores de desempenho permitem interpretação da realidade para a criação de modelos eficientes e eficazes da malha viária urbana.

2.2.2. Gestão de tráfego em tempo real

A gestão de tráfego em tempo real apresenta elementos tecnológicos que monitoram e podem fazer ou não alterações em elementos do trânsito de acordo com a demanda das vias; essas alterações também podem ser feitas por agentes que recebem as informações em tempo real.

Dessa forma, essa solução se configura com elementos que podem reduzir a demanda, como o controle semafórico em tempo real e o controle da velocidade da via de acordo com a demanda, ou aumentar a oferta, como no caso de alterações de rotas de tráfego.

2.2.2.1. Gestão semafórica em tempo real

Como já citado anteriormente, o controle semafórico em tempo real utiliza elementos de contagem de veículos, de modo que os planos semafóricos não se limitem às variações de demandas percebidas por um conjunto de dados de uma série histórica. Dessa forma, os planos semafóricos são atualizados constantemente de acordo com as variações do número de veículos da via.

Com isso, busca-se otimizar, por meio de softwares, os tempos de ciclo e de verde em um conjunto coordenado de semáforos, de modo a reduzir o número de paradas e minimizar os atrasos na rede.

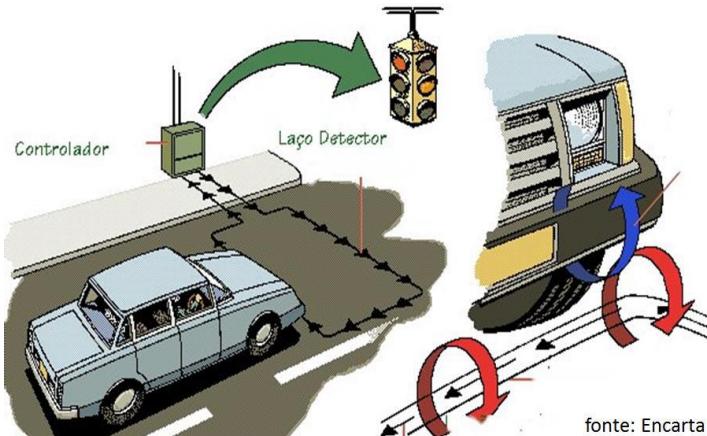
2.2.2.1.1. Arquitetura de um sistema de controle em tempo real de semáforos

Nesse tipo de sistema, a detecção da demanda de veículos é feita através de detectores localizados em todas as aproximações da interseção semaforizada. Esses detectores podem ser, por exemplo, de dois tipos: laços indutivos localizados no pavimento ou câmeras.

a) Laços indutivos

Um cabo metálico é enrolado dentro de um corte feito no pavimento. Esse cabo é enrolado e por ele passa corrente elétrica, que gera um campo magnético. Ao passar um veículo, esse campo magnético é alterado e o veículo é contado.

Figura 2.18 - Esquema de detecção por laço indutivo



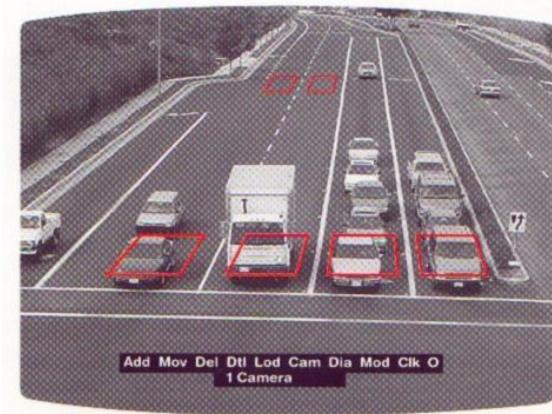
Fonte: NETO (2016).

b) Câmeras

Esse sistema opera com laços detectores virtuais, que são criados por um software específico e gerados na imagem captada pela câmera, que deve ser fixa e deve estar posicionada de forma que capture todo o trecho em que há a passagem de veículos com necessidade de detecção.

A detecção é feita através da diferença de pixels entre o fundo da imagem e os veículos.

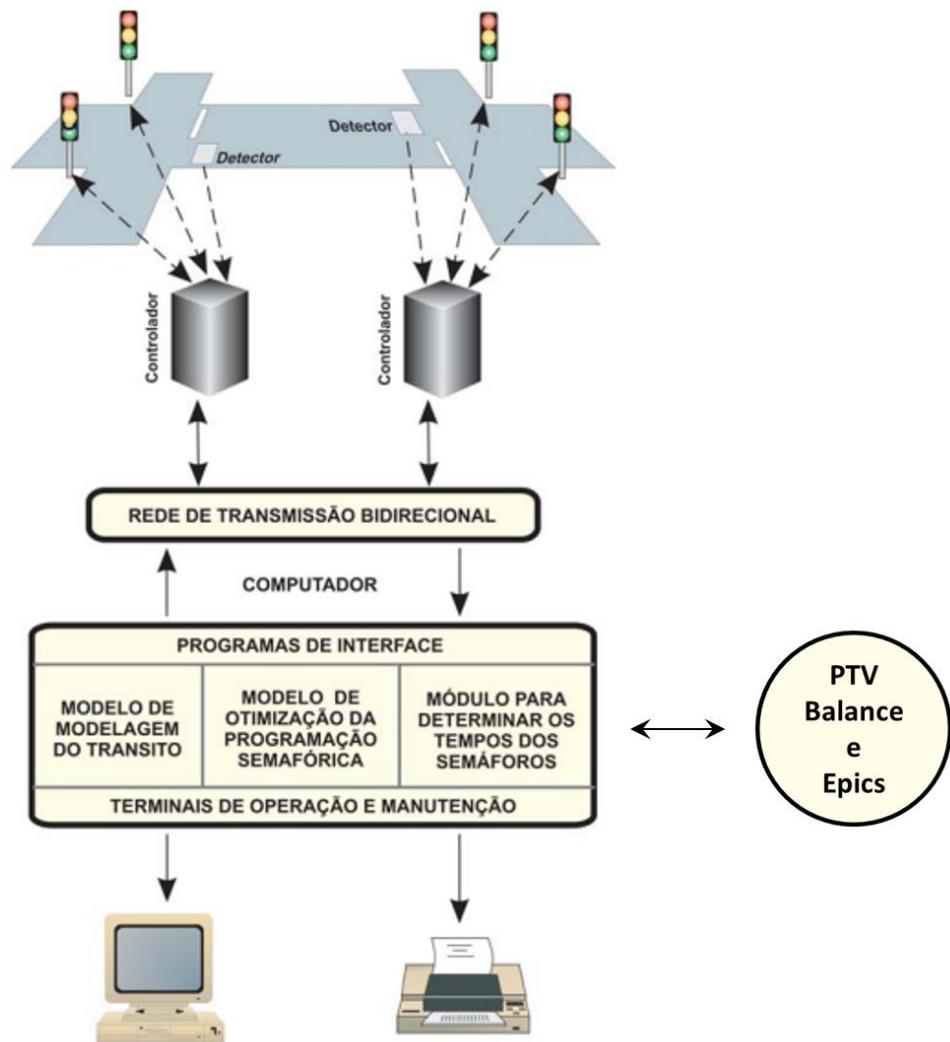
Figura 2.19 - Exemplo de aplicação dos laços virtuais



Fonte: NETO (2016).

Essas informações coletadas pelos detectores são enviadas para o computador do centro de controle através dos controladores dos semáforos; o computador executa o programa do aplicativo de gestão semafórica. O esquema do funcionamento desse sistema é apresentado na Figura 2.20

Figura 2.20 - Modelo de funcionamento de um sistema de gestão em tempo real dos semáforos



Fonte: Adaptado de VILANOVA (2005).

O aplicativo pode ser dividido em três módulos principais:

- a) Modelagem de trânsito - os valores detectados pelos detectores nas vias serão transformados em parâmetros para representar o perfil de demanda e ocupação das vias;
- b) Otimização da programação semafórica - nesta etapa há uma busca pela melhor programação de tempo semafórico, tendo como objetivo minimizar o tempo de atraso (espera dos veículos no semáforo) e o número de paradas,

considerando, ainda, as condições de contorno, como tempos de segurança;

- c) Determinação dos tempos dos semáforos - cálculos dos tempos aplicados à programação semafórica (tempo de ciclo, tempos de estágio, defasagens). Esse cálculo advém da otimização feita na etapa anterior.

Esse comando será enviado aos controladores dos semáforos através de uma rede de transmissão de dados e, ao chegar a eles, os tempos calculados serão aplicados, assim como o operador poderá visualizá-los no centro de controle.

2.2.2.1.2. Softwares de gestão semafórica em tempo real

BALANCE (e EPICS), SCATS e SCOOT são softwares de gestão semafórica citados nesse texto. Com o BALANCE (e EPICS), há a intenção de se aplicar o controle em tempo real no modelo da Av. dos Autonomistas. Já o SCOOT e SCATS são softwares utilizados nos casos estudados.

BALANCE

Este software da empresa alemã PTV trabalha em dois níveis de hierarquia semafórica:

- *Operação local ou nível de operação para intersecção:* o BALANCE não atua neste nível. Sua construção permite que a gestão em tempo real opere tanto em semáforos de tempo fixo, quando atuado, desde que estes semáforos possam ser acessados e controlados por um computador central. No caso de atuação conjunta com semáforos atuados (o que pode ser feito com o auxílio do software, também da PTV, chamado EPICS), o BALANCE responde enviando em limite mínimo e máximo do tempo de verde e, o controle atuado, a cada segundo, decide, dentro desse intervalo qual será o tempo de verde ótimo.

- *Operação a nível tático ou nível de operação de uma rede de semáforos:* o BALANCE trabalha como uma rede macroscópica, cobrindo uma área de médio-longo alcance (5 min -15 min) com semaforização em tempo real. Neste nível, o software otimiza, por meio de algoritmo genético, para um grupo de semáforos pré-estabelecidos, o tempo de ciclo ótimo para o volume de tráfego atual na região desse grupo, além de determinar as defasagens ótimas, e os tempos de estágio,

delimitando os tempos de verde mínimo e máximo, que podem ser iguais em alguns casos, para cada um dos semáforos no grupo. A otimização do BALANCE é feita a cada 5 minutos.

SCOOT

Split Cycle Offset Optimization Technique ou SCOOT, tem 3 fases de otimização de tempos semafóricos:

- Otimizador de estágio;
- Otimizador de defasagem; e
- Otimizador de tempo de ciclo.

Cada otimizador estima o efeito de um pequeno acréscimo do tempo na performance geral da região. O efeito é estimado a partir de uma modelagem detalhada e contínua da rede realizada a partir dos dados enviados a cada segundo pelos detectores. Já a performance é medida a partir do Performance Index (PI), uma composição de atrasos de veículos, e número de paradas em cada link.

- *Otimizador de tempo de estágio*: este otimizador funciona a cada mudança de fase, analisando se esse tempo deve ser prolongado, encurtado ou mantido. Usualmente os incrementos (positivos ou negativos) nesse tempo são de 1 ou 4 segundos.

- *Otimizador de defasagem*: funciona uma vez por ciclo, a cada interseção, utilizando parâmetros obtidos a partir da modelagem para prever a demanda dos *links* acima e abaixo da interseção estudada, definindo se a defasagem deve ser prolongada, encurtada ou mantida a mesma. As mudanças de defasagens também têm incrementos de 4 segundos.

- *Otimizador de tempo de ciclo*: opera a nível regional a cada 5 minutos ou a cada 2,5 minutos quando os tempos de ciclo estão mudando muito rapidamente. Identifica a interseção crítica na região e age para ajustar o tempo de ciclo de forma a manter a saturação do *link* a 90% em cada fase. Os incrementos desse otimizador podem ser de 4, 8 ou 16 segundos.

SCATS

Sydney Coordinated Adaptive Traffic System ou SCATS trabalha em dois níveis:

- *Estratégico*: é controlado por computadores regionais e chamado de *Masterlink*. Utiliza dados de fluxo e ocupação coletados na interseção a partir de detectores para determinar numa área base o tempo ótimo de ciclo, tempo de estágio e defasagem, para atender às condições de tráfego assim que ocorrem em cada subsistema, isto é, em cada grupo de semáforos que trabalharão coordenados.

- *Tático*: permite uma flexibilidade significante no nível local, agindo como um controlador atuado e permitindo a antecipação do verde e a omissão de fases no caso de baixas demandas

No SCATS, é definido um parâmetro empírico chamado de Grau de Saturação, este parâmetro é obtido pela divisão do tempo de verde efetivamente utilizado pelo tempo de verde disponível. A partir do valor deste parâmetro calculado pelo software para a faixa com maior demanda, é decidido se o tempo de ciclo será prorrogado, encortado ou mantido, respeitando valores mínimos e máximos de tempo de ciclo. O valor crítico para essa decisão é usualmente definido como 90%.

Para entender e comparar o funcionamento dos softwares é apresentada a tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 - Comparação entre os softwares de gestão semafórica em tempo real

| | Balance | SCOOT | SCATS |
|------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Detecção | PLR | AI & LR | LR, PLR, MB |
| Ação | P & R | P & R | R |
| Ajuste | ORT | ABR | ODR |
| Horizonte | 5 min | Ciclo/ 5 min | Ciclo |
| Nível | C/L | C/L | C/L |
| Modelagem | Sim | Sim | Não |
| Tempos otimizados | E, TC, D, SF | E, TC, D, SF | E, TC, D |
| Região flexível | Não | Sim | Sim |
| Atuado | Sim | Sim | Sim |
| Priorização de ônibus | Sim | Sim | Sim |

Detecção: LR: Linha de retenção; PLR: Próximo à Linha de Retenção; MB: Meio do Bloco; Acima da Interseção
 Ação: P: Proativo; R: Reativo
 Ajuste: ABR: Ajuste Baseado em Regra; Otimização com Domínio de Restrição; Otimização com Restrição de Tempo
 Nível: C: Central; L: Local
 Tempos otimizados: E: Estágio; TC: Tempo de Ciclo; D: Defasagem; SF: Sequência de fases

Fonte: Adaptado de STEVANOVIC, A. (p.20, 2010)

2.3. MODELAGEM DE TRÁFEGO

Em sua forma mais direta, pode-se dizer que um modelo é uma forma simplificada de representação da realidade. Essa representação é um corte no espaço ou no tempo de algo que se deseja modelar. Podemos tratar, neste caso, esse algo como sendo um sistema.

O conceito de sistema pode ser definido como um conjunto de entidades que agem e interagem juntas em direção a um fim lógico. O processo de representação de um sistema depende de se ter um mecanismo para descrevê-lo e entender como esse sistema funciona e se desenvolve ao longo do tempo. Esse mecanismo é então utilizado para prever os resultados de um sistema real, a partir de variáveis determinadas nos dados de entrada, e sem a utilização do sistema real. Esse mecanismo é a representação formal do modelo de um sistema. (BARCELÓ, 2010).

Um modelo é sempre uma visão enviesada de um sistema: dependendo do ponto de vista e do problema analisado. Existem modelos físicos e abstratos, como por exemplo, uma representação de uma barragem em uma escala reduzida, que é um modelo físico, para simular seu funcionamento e os fenômenos intervenientes nele sem, necessariamente, ela existir em escala real.

Um modelo, principalmente o abstrato, pode ser feito para se otimizar o objeto de estudo, ao se simular inúmeros cenários (possibilitado pelo processamento computacional) a fim de se obter o que maximiza ou minimiza alguma variável de interesse; interesse esse que traz consigo essa visão enviesada do modelo citada, já que, geralmente, não há uma otimização global e algumas compensações (*trade-offs*) devem ser feitas, priorizando determinados parâmetros.

Aqui estamos tratando de uma classe específica de modelos abstratos: formais e matemáticos, os quais têm como mecanismo para a descrição do sistema equações matemáticas baseadas em hipóteses sobre o sistema. (ORTÚZAR e WILLMESEN, 2011).

Assim, para descrever um sistema, segundo BARCELÓ (2010), deve-se especificar:

- a) Seus processos de transformações ou atividades;
- b) Seus limites;
- c) Seus componentes e subsistemas e as relações entre eles ou com a estrutura;

- d) Os dados iniciais advindos do ambiente externo ao sistema;
- e) O resultado que se obtêm.

Ao se processar computacionalmente um modelo, torna-se o computador um laboratório, permitindo a simulação de experimentos que responderão diversas questões de “e se?” sobre o comportamento do sistema.

No caso deste trabalho, o sistema a ser estudado é o de transportes. A modelagem de tráfego é muito útil e utilizada para planejamento e operação dos sistemas de transportes reais, permitindo avaliação de diferentes alternativas de gerenciamento de tráfego, a simulação de casos estressados e até mesmo para controle de tráfego em tempo real.

Pode-se classificar os modelos de sistemas de transportes de acordo com diferentes características, sendo uma das mais notáveis o nível de agregação de seus componentes (veículos).

2.3.1. Macromodelos

Nesse tipo de modelo, os veículos são tratados por meio de suas características médias, isto é, não são considerados em sua individualidade e, portanto, a variância de sua velocidade individual também não é considerada. Além de um nível de agregação maior na observação dos veículos, as vias também são tratadas de forma mais agregada, não dispondendo de quebras por características como número de faixas, greide ou semáforos.

Modelos macroscópicos são considerados estáticos, isto é, não permitem uma avaliação profunda num curto espaço de tempo, pois sua frequência de atualização tem usualmente a ordem de grandeza mínima de 15 minutos. Macromodelos também são determinísticos, dado que tratam de dados médios sem a consideração de variância. Assim, são os que requerem menos dados e consomem menos memória computacional dentre os modelos.

Segundo MAIA (2007), o escopo da utilização dos modelos macroscópicos os torna modelos de planejamento, devendo usá-los para tratar de planejamento de intervenções estratégicas; simulação de médias/grandes áreas; implantação e duplicação de vias.

2.3.2. Mesomodelos

“A simulação mesoscópica é uma classe intermediária quanto ao realismo e detalhamento” (MAIA, 2007 apud PORTUGAL, 2005). Nesse caso, os veículos são tratados como um pelotão, sendo diferenciados ao longo do tempo e do espaço.

SKABARDONIS e MAY (1998) consideram como a principal característica da mesossimulação o tratamento individual dos veículos baseados em relações macroscópicas de fluxo. Além disso, sendo mais detalhado do que o modelo macroscópico, é possível realizar simulações com semáforos e trazer para a análise características como o greide da pista. Um exemplo mais claro sobre o realmente diferencia um mesomodelo de um macromodelo é dado por LIEBERMAN e RATHI (1997):

Por exemplo, manobras de mudança de faixa podem ser representadas para cada veículo individualmente, mas a decisão sendo agregadamente baseada em densidades de faixa, e não nas relações individuais entre os veículos.

Segundo MAIA (2007), o escopo da utilização de modelos mesoscópicos recai sobre: análises de intervenções táticas; simulação de médias/grandes áreas; implantação e duplicação de vias; definição de rotas de veículos e verificação de rotas de veículos por causa de estímulos.

2.3.3. Micromodelos

O nível de agregação para esse modelo é mínimo, cada veículo é tratado individualmente, sendo observadas não somente suas características na direção do fluxo, mas também entre as faixas.

Como os veículos são tratados individualmente, o modelo é considerado estocástico, levando em conta a variação de velocidade de cada indivíduo. Além disso, o modelo é dinâmico, podendo detalhar instante a instante (geralmente a cada segundo) a simulação, o que acaba tornando esse modelo o maior consumidor de memória computacional, com maior necessidade de dados (meso e macromodelos pedem como entrada somente dados médios de velocidade, capacidade, densidade e fluxo, enquanto que o micromodelo pede volume de veículos, velocidade, regras de preferência, semafORIZAÇÃO, comportamento dos motoristas e geometria das vias) e portanto maior tempo despendido para ser realizado.

Segundo MAIA (2007), o escopo da utilização de micromodelos é a simulação operacional, isto é: análise de intervenções operacionais; simulação de pequenas/médias áreas; análises de esquemas alternativos de controle de tráfego; alteração na operação semafórica; entrada e saída de rampas; definição de rotas de veículos; análise de esquemas de operação de tráfego em área e verificação das mudanças de rotas de veículos por causa de estímulos.

Atualmente existem diversos softwares no mercado que trabalham com micromodelos: VISSIM, SUMO, AIMSUN, NETSIM, entre outros.

Para o objeto de estudo deste trabalho (a Av. dos Autonomistas em Osasco), o modelo que melhor se adequa aos objetivos propostos é o micromodelo, atendendo ao escopo de utilização proposto por MAIA (2007).

2.3.4. Modelagem de tráfego no Vissim

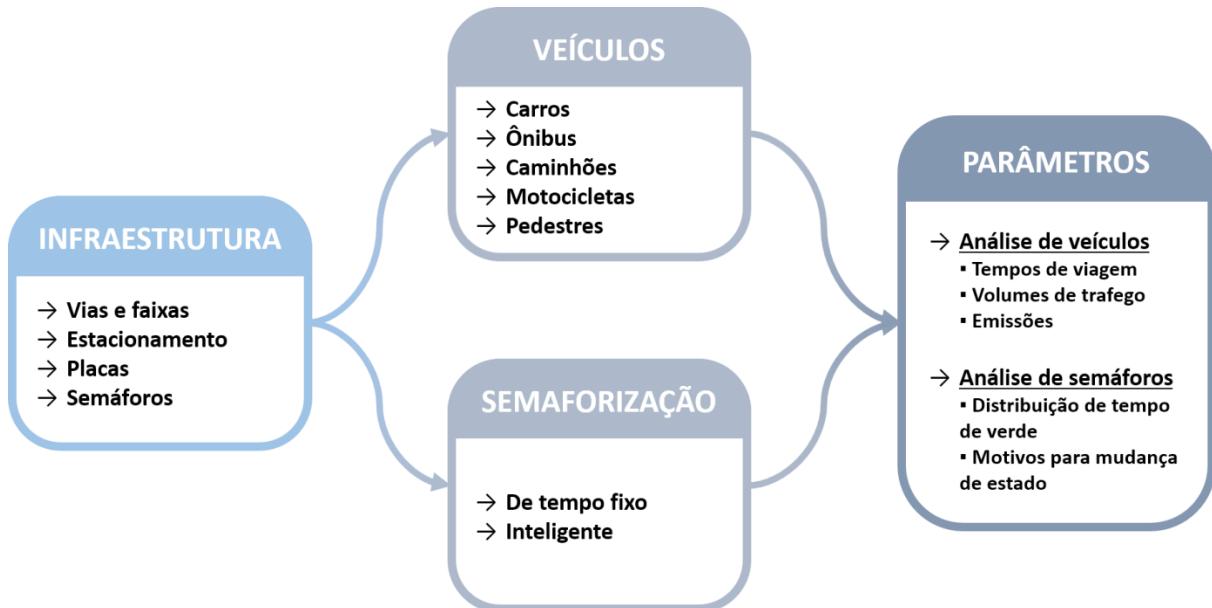
O Vissim é um software de microssimulação de tráfego multimodal da PTV (Planung Transport Verkehr AG), cuja comercialização se iniciou em 1994. Baseado em modelos de comportamento e com simulação passo a passo, permite a modelagem e simulação do tráfego veicular urbano e rural, havendo uma separação entre PrT (Veículos de transporte privado) e PT (Veículos de transporte público). O software também permite a modelagem e simulação de tráfego de pedestres.

Segundo a PTV AG (2018), com o Vissim é possível testar e analisar interações entre sistemas, tais quais, controle semafórico adaptativo, recomendação de rotas em redes e comunicação intraveicular (C2x).

O fluxo de tráfego veicular no Vissim é centrado em dois principais modelos: *car-following*, que representa a movimentação longitudinal dos veículos, e *lane changing*, que representa a movimentação lateral, isto é, entre faixas, dos veículos, além disso, há alguns modelos ‘acessórios’ para melhor aproximar a simulação à realidade.

A figura 2.21 apresenta um esquema da modelagem de tráfego no Vissim, onde é possível verificar a infraestrutura da rede, os tipos de veículos (considerando pedestres), os tipos de controles semafóricos existentes e alguns dos parâmetros de análise.

Figura 2.21 - Estrutura do Sistema de Transportes modelado pelo Vissim



Fonte: Elaboração própria

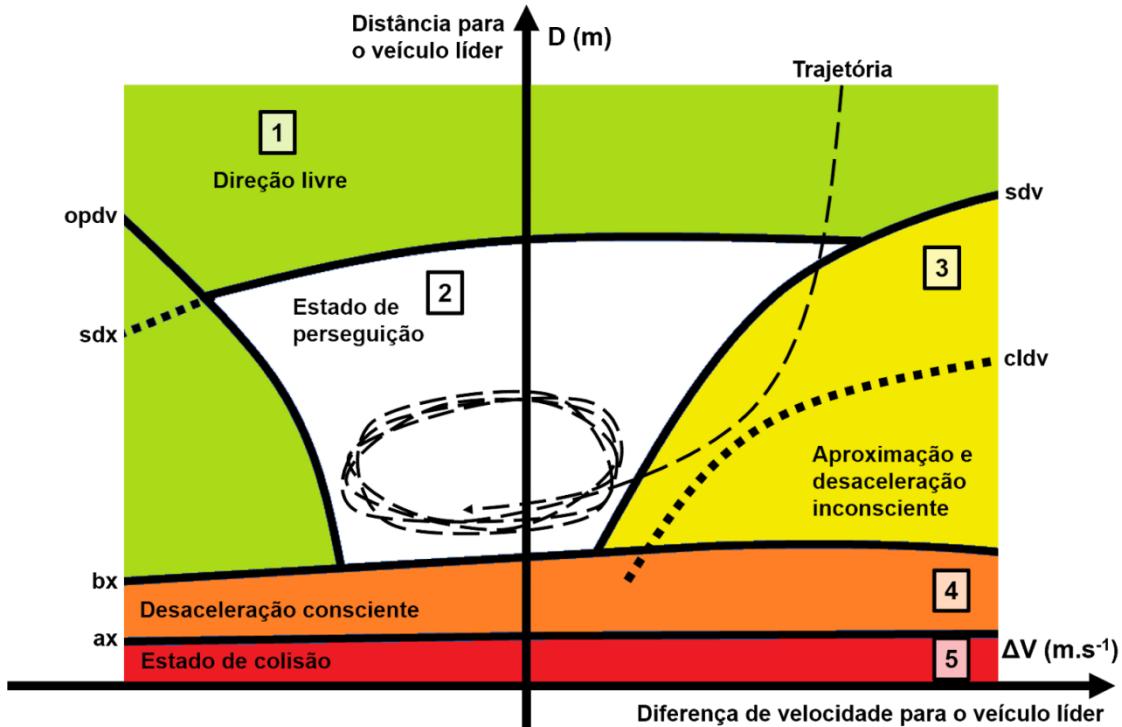
Devido à grande variedade de opções, em especial, a possibilidade de simulação em tempo real, optou-se, neste projeto, pelo uso do Vissim como ferramenta de microssimulação.

2.3.4.1. *Car-following*

Segundo PTV AG (2018): “O Vissim usa um modelo psicofísico de percepção desenvolvido por WIEDMANN (1974)”.

Modelos psicofísicos são modelos nos quais o motorista de veículo seguidor percebe visualmente alterações na velocidade relativa e distância para veículo líder, e então, dependendo da percepção desses valores, age consciente ou inconscientemente acelerando ou desacelerando seu veículo. Assim, esses modelos podem também ser chamados de modelo de pontos de ação (*action point models*).

Figura 2.22 - Modelo psicofísico do car-following



Fonte: Adaptado de PTV AG (2018).

O gráfico apresentado na figura acima retrata a teoria de WIEDEMANN (1974) para explicar o modelo psicofísico do *car-following*.

Os pontos de ação dependem além da diferença de velocidade e distância relativa para o veículo líder, do tipo de comportamento do motorista seguidor.

Segundo FELLENDORF e VORTISCH (2010) e LACERDA e NETO (2014), as curvas acima podem ser explicadas como:

a_x = Distância desejada entre as frentes de dois veículos sucessivos numa fila [m].

$$a_x = V_{eh_L} + MinGap + rdn_1 \cdot ax_mult \quad (11)$$

V_{eh_L} = Comprimento do Veículo [m];

$MinGap$, também chamado de ax_{add} = o mínimo valor entre dois veículos sucessivos numa fila [m];

rdn_1 = Variável de aleatoriedade de correção truncada entre 0 e 1, N (0,5; 0,15). Cuja aplicação é justificada por conta da visão diferente que diferentes motoristas têm de segurança e risco.

ax_{mult} = Fator multiplicativo de ax [m].

bx = Distância de segurança [m]

$$bx = (bx_add + bx_mult \cdot rdn_1) \cdot \sqrt{v} \quad (12)$$

bx_{add} = Fator aditivo de bx ;

bx_{mult} = Fator multiplicativo de bx ;

v = Velocidade do veículo líder quando em situações de perseguição e do veículo seguidor em momentos de distanciamento [m/s];

abx = Distância mínima desejada de perseguição, que é uma função de ax e da distância de segurança bx e velocidade do veículo seguidor v .

$$abx = ax + bx \cdot v \quad (13)$$

sdv = Ponto de ação no qual um motorista conscientemente nota que está se aproximando de um veículo seguidor mais lento e começa a desacelerar.

sdv aumenta com a diferença de velocidades Δv . No modelo original de Wiedemann um outro limite, $cldv$, é definido para o modelo uma desaceleração adicional por conta do uso dos freios com uma variação maior do que em sdv .

$opdv$ = Ponto de ação no qual o motorista seguidor percebe que está mais lento do que o veículo líder e começa a acelerar novamente.

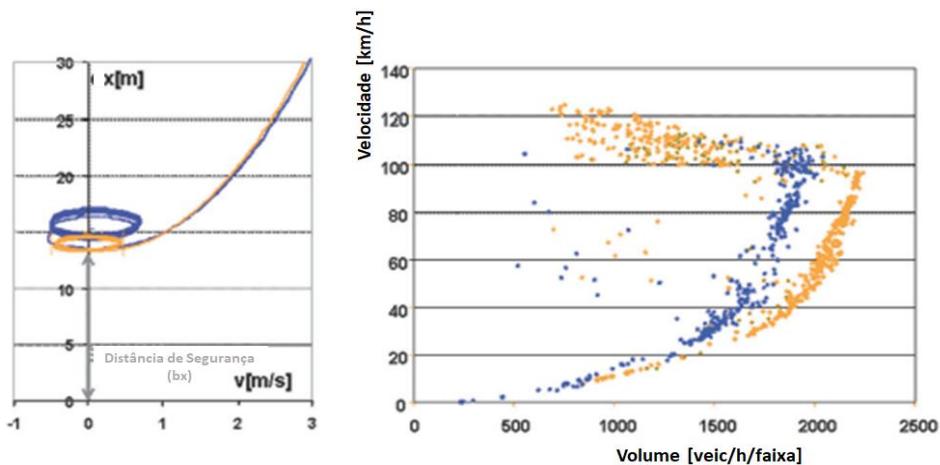
sdx = Limite de percepção para modelar a máxima distância de perseguição, que é em torno de 1,5 a 2,5 vezes abx .

Um exemplo para auxiliar na compreensão do modelo é: um veículo seguidor que parte de um status de direção livre (1) se aproxima de um veículo líder, mais lento, e começa então a desacelerar a partir da percepção de que há um veículo mais lento à sua frente, entrando no estado de aproximação (3). Como o motorista não tem a capacidade de percepção para determinar exatamente a velocidade do veículo seguidor, ele desacelerará até que sua velocidade fique menor do que a do veículo lento, cruzando o eixo das abscissas e já no estado de perseguição (2), ponto a partir do qual ele retoma a ação, acelerando novamente. Chegando assim à uma oscilação constante entre ações de aceleração e desaceleração suaves, representativo do status de perseguição (2).

Caso o motorista entre na zona de frenagem (4), a distância entre o veículo seguidor e líder será menor do que a distância considerada de segurança pelo veículo e ele terá uma taxa de frenagem alta ou média. A entrada nesta zona pode se dar por conta de uma mudança abrupta na velocidade do veículo líder ou pela entrada de um terceiro veículo, entre os outros dois.

Os limites definidos pelas retas dependem do tipo de motorista, permitindo a variação de sdv , que representa o nível de atenção, e de bx , que representa a distância de segurança. Segundo Fellendorf e Vortisch (p.76, 2010) “diferentes limites de sdv e bx , podem aumentar ou diminuir a capacidade de uma via.”

Figura 2.23 - Influência de 100% de veículos aversos ao risco (azul) ou menos alertas (laranja) na capacidade da via



Fonte: Adaptado de FELLENDORF e VORTISCH (p.77, 2010).

No Vissim 10, é possível escolher entre dois modelos diferentes para o car-following: Wiedemann-74 (W74) ou Wiedemann-99 (W99), segundo a PTV AG (2018), é recomendável utilizar o primeiro para modelagem urbana e o segundo para modelagem de rodovias. Como neste trabalho trataremos de um meio urbano, o modelo adotado no Vissim será o W74.

Segundo PTV AG (2018), o W74 é uma versão melhorada do modelo de WIEDEMANN (1974) e permite a definição de 3 parâmetros:

- Distância média parado: É a distância média desejável entre 2 carros, com tolerância entre $-1m$ e $+1m$, distribuídos normalmente sobre 0, o que indica um $ax_{mult} = 1m$, além disso o desvio padrão é $0,3m$, e o valor padrão de ax é $2m$.

- b) Parte aditiva da distância de segurança: (bx_{add}) é o valor usado para calcular a distância de segurança desejada d . bx_{add} padrão 2m.
- c) Parte multiplicativa da distância de segurança: (bx_{mult}) é o valor usado para calcular a distância de segurança desejada d . bx_{mult} padrão 3m.

Para obter abx do modelo a partir de $d = ax + bx$, calcula-se $abx = d - Veh_L$, porque ax de W74 é calculado parado e no modelo está em movimento.

Além disso, é necessário ressaltar que em W74, sdv , sdx $cldv$ e $opdv$ já estão definidos e não podem ser alterados.

O que é justificado por LACERDA e NETO (2014):

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 aceitação de brechas. Vale notar que Wiedemann propôs uma relação quadrática entre bx e v , e justificou afirmando que para velocidades maiores os motoristas tendem a sobre-estimar a distância de segurança, portanto taxa de crescimento de d diminui com o aumento de v .

2.3.4.2. Movimentos laterais

2.3.4.2.1. Escolha de faixa

Um motorista pode decidir mudar de faixa em duas situações: livre ou mandatória. Na situação livre, o motorista ou não está ciente de ou não realizará nenhuma conversão nas próximas intersecções e somente desejará mudar de faixa quando seu estado no *car-following* for diferente do fluxo livre (estado 1 do car-following), caso exista alguma faixa adjacente que propicie um estado melhor de fluxo livre ou de tempo para colisão maior do que na faixa em que se encontra. Caso isso seja verdade, o motorista passa então a avaliar se é possível a mudança de faixa evitando colisão.

Na situação de escolha de faixa mandatória, o motorista deseja fazer uma conversão. Nesses casos, são consideradas pelo programa, para cada conector, duas variáveis: a distância de mudança de faixa e a distância de emergência.

A primeira medida é a partir de quando um motorista se torna consciente de que terá que mudar de faixa. Esses valores, segundo BARCELÓ (2010), variam

entre 100 m e 500 m, a partir desse ponto o motorista irá considerar o conector no processo de escolha de faixa.

Já a segunda, indica a distância para o conector da conversão para a qual o motorista não mais conseguirá acessar os conectores para converter e, portanto, deverá parar para completar a ação.

2.3.4.2.2. Mudança de faixa

A lógica de mudança de faixa (*lane changing*) do Vissim atua a partir do resultado do processo de escolha de faixa, sendo ele mandatório, no caso de uma conversão futura ou livre, onde o motorista entende que há uma melhor condição de tráfego em faixas adjacentes e, em função do processo de '*gap acceptance*', onde o motorista está disposto a aceitar que ele força um veículo a desacelerar para mudar de faixa.

Dessa forma, tanto este valor de desaceleração aceito pelos motoristas, quanto a distância de segurança citada acima, são variáveis a serem calibradas, onde vale destacar que, a maior proximidade entre os condutores no momento de mudança de faixa, reflete em um comportamento mais agressivo, podendo, até mesmo, levar o motorista a desacelerar o veículo, no caso de uma mudança de faixa mandatória.

2.3.4.2.3. Movimento lateral contínuo

Esse movimento é típico de localidades com o tráfego mais desorganizado, no qual o fluxo não respeita corretamente as faixas, podendo mais de um veículo ocupar a mesma faixa, como ocorre, por exemplo, nas ruas paulistanas, onde carros e motos dividem uma mesma faixa.

Nesses casos, é necessário adaptar o modelo de *car-following* e o de mudança de faixa. No primeiro caso, o motorista escolhe a posição lateral na faixa que o permite o maior tempo para evitar a colisão, isto é, a maior fluidez de movimento, criando 'faixas virtuais'. Já no segundo caso, a distância lateral da qual um veículo se permite passar por outro é uma das variáveis mais importantes para modelar esse tipo de comportamento e é função da velocidade, tipo dos veículos e da distância mínima de segurança.

2.3.4.2.4. *Tactical driver behavior*

Para permitir que modelos de *lane-changing* e *car-following* componham uma ferramenta útil ao planejamento de tráfego, é necessário que os motoristas se comportem de forma planejada, isto é, que suas ações sejam tomadas antes de um passo de tempo de simulação do programa ou em função do veículo diretamente a frente.

2.3.4.2.5. *Anticipated Driving at conflict areas*

No Vissim, por definição, em qualquer sobreposição de dois links surge uma área de conflito. Nelas, é definida, ou não, uma prioridade, no caso de uma junção de duas vias, sendo uma delas principal e priorizada, o motorista da via secundária deve calcular e antecipar em quanto tempo um motorista na via principal chega à área de conflito e em quanto tempo e a qual aceleração ele é capaz de atravessar essa zona. Caso ele superestime sua capacidade de atravessar a zona a tempo, o motorista da via principal irá desacelerar ou parar.

A extensão deste modelo resulta numa generalização na qual todos os veículos têm seu plano de aceleração definido para os próximos segundos, esse plano pode ser acessado por outros motoristas para modelar sua antecipação sobre o comportamento do carro observado.

2.3.4.2.6. *Cooperative merging*

Para tráfegos muito densos, nos casos de mudança de faixa, é possível que nem mesmo um aumento na agressividade do motorista viabilize a mudança. Para que a mudança seja possível, é preciso incluir dois pontos ao modelo. O primeiro é a influência da situação de mudança de faixa (lateral) no sentido longitudinal, no qual ao não encontrar um espaço para se posicionar, o motorista adapta sua velocidade para a velocidade média da faixa objetivo com a intenção de diminuir a desaceleração necessária após a mudança para a faixa objetivo, caso a mudança não seja possível, ele desacelera até o próximo espaço na faixa objetivo;

O segundo são atitudes de cooperação dos motoristas na faixa objetivo, veículos na faixa objetivo são informados sobre um veículo que deseja mudar para a faixa em que estão, caso os motoristas desses veículos percebam que é possível a

mudança de faixa na sua frente, esse motorista irá desacelerar para manter o espaço aberto ou até mesmo aumentar esse espaço.

2.3.5. Calibração e validação de modelos de microssimulação

Perante os parâmetros de modelagem apresentados, torna-se necessário verificar se os resultados obtidos nas microssimulações são compatíveis com a realidade, sendo fundamental a calibração e validação de modelos.

2.3.5.1. Teste GEH

O teste GEH, proposto por Geoffrey E. Havers, é um teste baseado na estatística GEH, amplamente usada na engenharia de tráfego, previsão de tráfego e modelagem de tráfego e tem como objetivo comparar os volumes de tráfego modelados com os volumes reais. Esse teste é uma variação do teste Chi-Quadrado e incorpora tanto o erro relativo quanto o erro absoluto.

A estatística GEH é dada pela equação 14, sendo que:

- $GEH < 5$ indica uma “muito boa” aproximação entre o alocado (fluxo modelado) e o contado
- $5 \leq GEH < 10$ indica uma “boa” aproximação entre alocado e contado
- $10 \leq GEH < 12$ indica uma “aceitável” aproximação entre alocado e contado
- $GEH \geq 12$ indica que os dados (alocados e contados) precisam ser “melhor avaliados”. O fluxo alocado “não é confiável”

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M-C)^2}{M+C}} \quad (14)$$

Onde:

M = Volume de veículos no modelo

C = Volume de veículos real

Esse teste é muito útil na comparação de volumes que possuem uma grande faixa de variação sem que isso seja consequência de um erro ou uma diferença significativa entre esses valores, como poderia ser considerado ao utilizar a proporção entre os valores a serem comparados. Além disso, ele dá um maior peso

aos volumes maiores do que ao menores para se considerar que os volumes são similares.

2.3.5.2. Calibração

No processo de calibração, parâmetros são ajustados para que os resultados oferecidos pelo programa sejam similares ao observado.

Segundo HOLLANDER e LIU (2008), quando um modelo é calibrado com dados agregados (volumes, velocidades, tempos de viagem ou tamanho de filas) há um risco de que o resultado tenha um fator comportamental limitante, no entanto, a justificativa para a grande frequência de calibração por dados agregados se dá pela consideração de que a intenção é somente verificar se o modelo representa bem a situação de interesse.

Há um número grande de parâmetros que podem ser alterados no modelo (estes parâmetros dependem do software usado; alguns softwares apresentam parâmetros diferentes de outros) e inúmeros métodos para analisar se os resultados extraídos do modelo representam com uma grande significância os dados retirados da realidade.

AYALA (2013) cita diversos trabalhos que buscaram definir quais parâmetros são mais relevantes para cada tipo de simulação (objetivos da simulação, trecho urbano ou rodovia, várias interseções ou uma única, etc.). Para o software Vissim, que será utilizado neste trabalho, foram levantados 20 parâmetros importantes, sendo eles: distância de mudança de faixa; distância de parada; distância *look-ahead*; distância média de parada; distância mínima de observação; distância mínima lateral para $V=0$ km/h; distância mínima lateral para $V=50$ km/h; distribuição de velocidade desejada; fluxo de saturação: parte aditiva da distância de segurança desejada; fluxo de saturação: parte multiplicativa da distância de segurança desejada; limite para entrar no modo *following*; número observado de veículos precedentes; regras de prioridade para mínimo tempo de *gap*; taxa de aceleração; tempo de espera antes da dispersão; tempo de *headway*; variação de *following*; mínimo *headway*; distância de parada de emergência; velocidade desejada.

Devido a esse número muito grande de parâmetros e métodos, uma calibração englobando todos demandaria um tempo e uma capacidade de processamento que inviabilizaria o projeto de simulação. Portanto, uma escolha dos

parâmetros mais importantes e representativos para cada finalidade do projeto deve ser feita para se obter uma calibração consistente e de qualidade com um processamento acessível.

2.3.5.3. *Validação*

O processo de validação de um modelo, segundo HOLLANDER e LIU (2008), é o meio de se verificar o poder preditivo da calibração realizada e deve ser feita usando uma série de dados independente.

Existem diversas formas de se validar modelos, uma básica, mas não completa, é a inspeção visual para encontrar erros significantes. Outras formas são: usar medidas de ‘fit’ e validações estatísticas.

3. ÁREA DE ESTUDOS

3.1. O MUNICÍPIO DE OSASCO

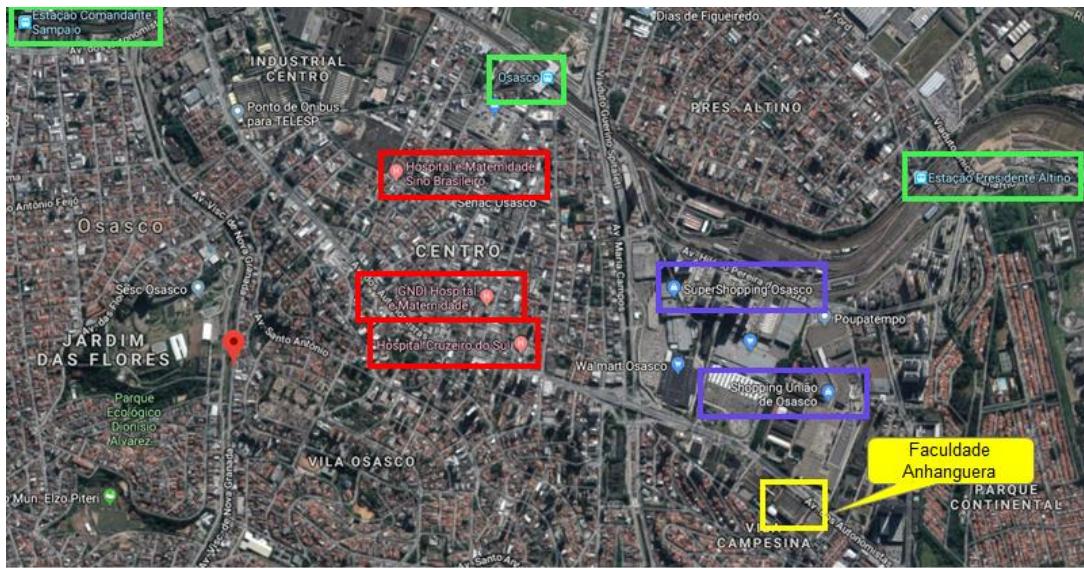
Com 666.740 habitantes (IBGE, 2010), a cidade de Osasco está localizada na Sub-região Oeste da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). É um município pequeno, com aproximadamente 66,95 km² de área, que, no entanto, apresenta intensas atividades econômica e social por se encontrar na maior metrópole brasileira e, portanto, possuir uma dinâmica que vai além dos seus limites territoriais. Dessa forma, os municípios vizinhos acabam por exercer pressões importantes que devem ser levadas em conta no planejamento dos seus serviços públicos e de sua infraestrutura.

Em 07 de julho de 2016, sob a Lei nº 4765, Osasco foi a primeira cidade da região a instituir o Plano Municipal de Mobilidade Urbana (PMMU). Nele se encontram as características atuais das viagens realizadas no município e pode ser notado que 30% das viagens (cerca de 1,2 milhões) são realizadas pelo modo motorizado individual. É interessante destacar também que o município de São Paulo é o principal destino externo ao município, representando 41% do total de viagens.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A avenida em estudo é a Av. dos Autonomistas, que, segundo a PREFEITURA MUNICIPAL DE OSASCO (2016), é um “eixo estruturador histórico do Município e grande concentrador de atividades comerciais e de serviços”, sendo uma das vias mais importantes e solicitadas do município.

Figura 3.1 - Ilustração de diversos polos geradores de viagens próximos à avenida

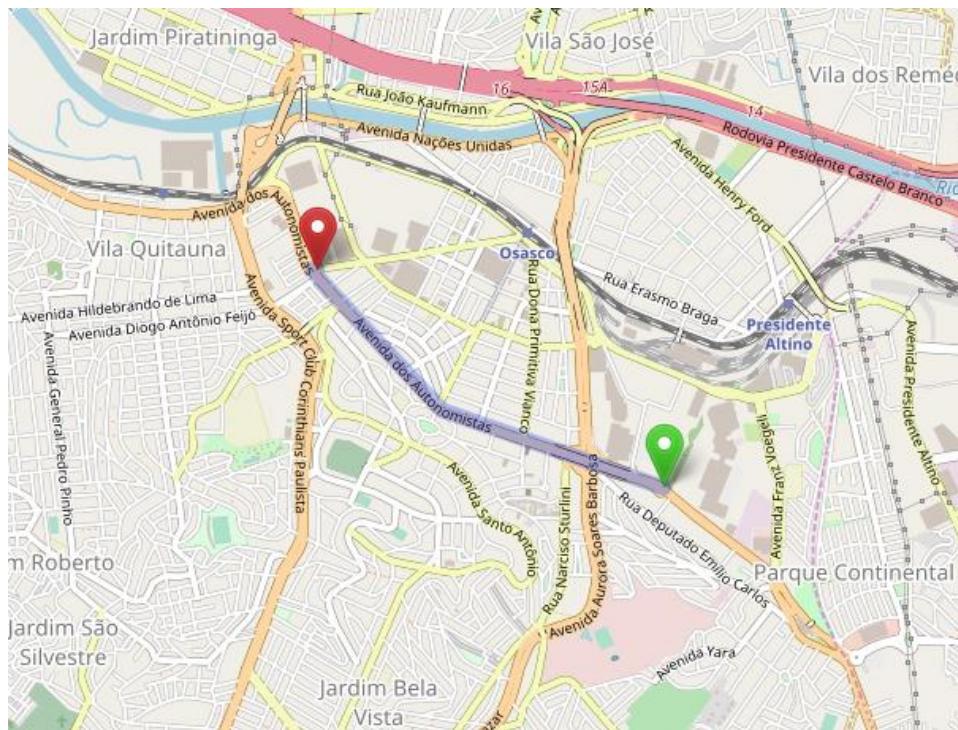


Fonte: Google Maps

Legenda: Verde – Estações de trem; Vermelho – Hospitais; Roxo – Shoppings e Amarelo – Faculdade.

O estudo será delimitado pelo trecho entre o cruzamento com a Av. João Batista até o cruzamento com a Av. Franz Voegeli, entretanto será utilizado um trecho mais longo no modelo de simulação para melhorar as condições de contorno.

Figura 3.2 - Trecho de estudos na avenida dos autonomistas

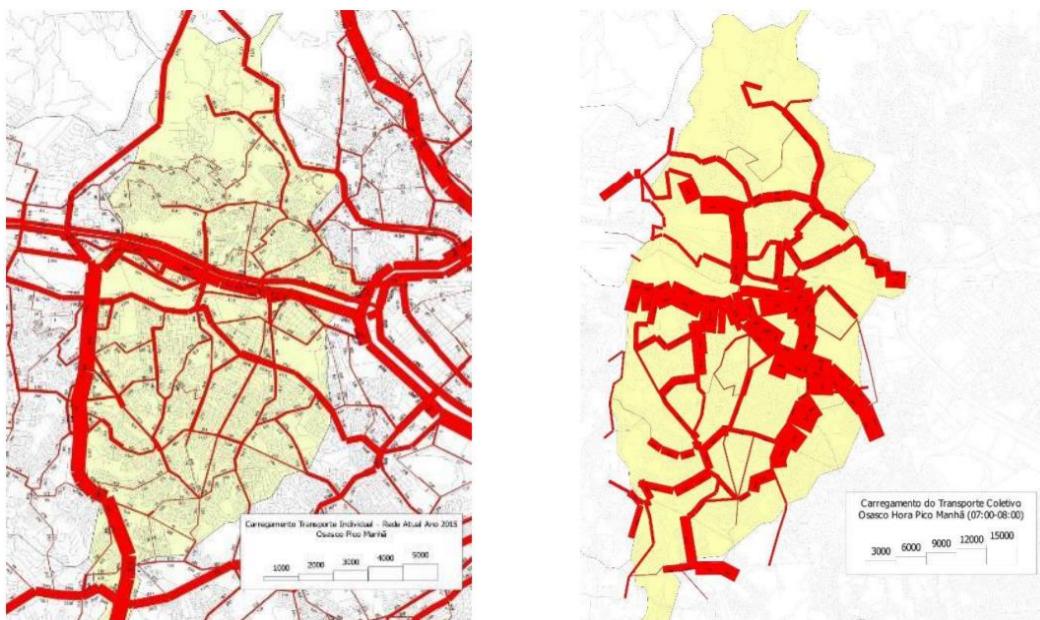


Fonte: OpenStreetMaps.

Na própria Av. dos Autonomistas, os fluxos no sentido Capital são superiores ao sentido Carapicuíba e variam de 1.800 a 3.000 veículos por hora na hora pico da manhã. Na altura da região central, os dois sentidos podem atingir 3.000 veículos por hora, justamente pela forte presença de comércio, serviços (principalmente saúde), escritórios e indústrias ali instalados. Tal número indica que a via se encontra no seu limite de saturação. Fluxos maiores apenas são observados nas rodovias que cruzam o município (PREFEITURA MUNICIPAL DE OSASCO, 2016).

Com relação aos modos motorizados coletivos, o carregamento verificado é de 11.100 passageiros por hora pico manhã para os sistemas municipal e intermunicipal de ônibus, próximo à Rua Primitiva Vianco. Existem poucas alternativas à Av. dos Autonomistas no sentido leste-oeste, o que corrobora para a situação de saturação observada na região (PREFEITURA MUNICIPAL DE OSASCO, 2016).

Figura 3.3 - Município de Osasco: (Esquerda) Carregamento do sistema de transporte individual; (Direita) Carregamento do sistema de transporte coletivo



Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE OSASCO (2016).

Outro ponto de destaque é que a via apresenta três faixas por sentido, sendo as duas da esquerda para o trânsito comum e a da direita para ônibus. Embora esta última seja importante para dar prioridade ao transporte público, ela também interfere na dinâmica do comércio local e dificulta conversões à direita por veículos comuns.

Segundo constatado pelo grupo em visita feita à região, existem câmeras para a detecção do número de veículos nas vias, o que sugere o uso de coordenação semafórica em tempo real, informação confirmada em visita feita ao COI (Centro de Operações Integradas de Osasco).

Entretanto, por meio das contagens dos tempos semafóricos realizada durante o período das 7h00min às 8h30min, não foi possível verificar mudanças nos tempos dos semáforos (estágios, ciclos, etc.), embora tenha sido notável o aumento da demanda de veículos na via.

4. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE MICROSSIMULAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a construção do modelo de microssimulação, do trecho da Av. dos Autonomistas descrito no item 3. Dessa forma, pretende-se ilustrar de modo claro os dados utilizados, a construção do modelo em si e sua calibração e validação.

Além disso, de modo a complementar a análise do modelo, será estudada tanto a aplicação coordenação semafórica em tempo real do tráfego na Av. dos Autonomistas, bem como a criação de cenários alternativos para embasar a resiliência dessa solução.

4.1. DADOS

A Tabela 4.1 apresenta uma síntese dos dados utilizados para a construção do modelo de microssimulação, bem como as fontes de obtenção deles.

Tabela 4.1 - Síntese dos dados e das fontes utilizadas.

| Dados utilizados | Fontes utilizadas |
|---------------------------|--|
| Geometria da via | GPO Sistran Engenharia, <i>Google Earth</i> e <i>Street View</i> |
| Contagem de veículos | GPO Sistran Engenharia |
| Tempos semafóricos | Observações <i>in-loco</i> |
| Pontos e linhas de ônibus | <i>Google Maps</i> , <i>Street View</i> , EMTU e Viação Osasco |
| Tempos de viagem | Observações <i>in-loco</i> e dados do <i>Google Maps</i> |

Fonte: Elaboração pessoal.

Apesar de haver dados significativos para a confecção do modelo, percebeu-se limitações deles. No caso dos tempos semafóricos o grupo se dirigiu a região de estudos para fazer a contagem, ou seja, os tempos foram obtidos em dias diferentes da contagem dos veículos; esta, por sua vez, apresenta uma série de apenas três dias de contagem, o que não necessariamente garante nível de significância de 5% (valor comumente aceito para dados estatisticamente relevantes).

Em relação ao tempo de viagem, eles foram feitos em um único dia, com quatro viagens de ida e quatro de volta no trecho de estudos, o que também está sujeito a erros significativos.

Por fim, os dados das linhas de ônibus não foram obtidos por uma série histórica de dados, mas sim pelo *headway* médio apresentado pelas empresas

responsáveis pelas linhas de ônibus, que, em geral, são valores múltiplos de cinco minutos, valor bastante aproximado.

4.1.1. Geometria da Via

A empresa GPO Sistran Engenharia, com autorização da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), disponibilizou uma série de arquivos para ajudar no desenvolvimento do trabalho, dentre eles um inventário (disponível no Anexo A) do trecho estudado, contendo largura e número de faixa da via, intersecções, além de indicação da existência de faixas exclusivas de ônibus à direita, que foram utilizados no traçado do modelo.

Além disso, utilizou-se o *Google Earth* e o *Street View* do *Google*, e uma visita à campo para obter os dados sobre as vias transversais: número de faixas, largura da via e faixas de ônibus à direita.

4.1.2. Contagem de veículos

Os dados de contagem dos veículos foram feitos previamente pela empresa GPO Sistran Engenharia, de modo que os dados compreendidos entre os pontos 5 e 9 foram aproveitados pelo grupo para compor o volume de tráfego da região (ANEXO B).

O estudo feito pela empresa comprehende contagens dos movimentos de acordo com cada tipo de veículo (carros, ônibus, motocicletas, pedestres, entre outros) em um período de três dias consecutivos nos horários de pico. Embora o estudo leve em conta os períodos de pico da manhã (HPM), do almoço (HPA) e da tarde (HPT), foram aproveitados somente os dados da hora pico da manhã (6h45min até 7h45min).

A escolha pelo horário está de acordo com a visita ao centro de simulação da CET, conforme ANEXO E. Segundo informado, o horário da manhã é o mais apropriado para a calibração de um modelo de microssimulação, uma vez que a origem e destino das viagens são mais conhecidas do que nos demais períodos do dia.

4.1.3. Tempos semafóricos

Os tempos semafóricos foram levantados em campo, cronometrando-se os tempos de cada foco luminoso nos estágios semafóricos, por duas vezes, de modo a se extrair uma média dos valores para a obtenção do resultado final (ANEXO C).

4.1.4. Pontos e linhas de ônibus

As localizações dos pontos de ônibus foram obtidas por intermédio de dados do *Google Maps* e do *Street View*. As linhas de ônibus que passam por cada um dos pontos foram determinadas a partir de dados da EMTU e da empresa de ônibus municipal de Osasco, a Viação Osasco. Dessa forma, obteve-se o trajeto desses veículos, o *headway* na hora-pico manhã, o tipo de linha de ônibus (municipal ou intermunicipal) e o sentido de trajeto.

Para a utilização dos dados na modelagem da rede, como nenhum ponto de ônibus é um terminal e a confiabilidade dos ônibus é baixa, adotou-se para o tempo de entrada dos veículos na rede, um número aleatório entre 0 e o *headway* associado à cada linha de ônibus, gerado aleatoriamente no *Excel*. Os veículos que seguem o primeiro de sua linha apresentam o tempo de entrada na rede como uma soma desse valor aleatório obtido com o *headway*. Os dados podem ser visualizados no ANEXO D.

4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

4.2.1. Geometria da Via

Como já citado anteriormente, os dados da geometria da via (largura e número de faixas, localização de faixas exclusivas de ônibus, etc.) foram utilizados de acordo com as informações disponíveis no inventário da via disponibilizado pela empresa GPO Sistran Engenharia.

Além disso, o Vissim permite o uso de imagem de satélite do Bing como imagem de fundo, que foi usado como guia para o traçado das vias por meio de *links* (vias) e conectores (*links* que ligam vias).

4.2.2. Vehicle Inputs

Para a inserção de veículos na rede construída no Vissim, utiliza-se a função *vehicle inputs*. Por meio dela, é possível colocar um volume/hora de veículos no início dos *links*. Os links escolhidos para receber *vehicle inputs* foram a Av. dos Autonomistas e todas as vias afluentes a ela.

Para a determinação do valor numérico desses volumes, utilizou-se a média dos dois últimos dias de contagem na HPM dos pontos 5 ao 9, já que o primeiro dia de contagem será usado como dado independente para a validação do modelo. Entre os pontos de contagem utilizados, existem vias afluentes e efluentes transversais que não estão contempladas na pesquisa de contagem utilizada como base para este trabalho. Com o intuito de se distribuir o fluxo nestas vias, tornando-o ligeiramente mais próximo da realidade, elaborou-se um método para inferir o fluxo de veículos afluente ou efluente delas, equilibrando o volume na via obtido entre os pontos de contagem.

O método elaborado funciona da seguinte forma:

- a) Calcula-se a variação de volume entre dois pontos de contagem i e j , sendo j o ponto mais à frente no sentido do fluxo;
- b) Determinam-se as vias transversais afluentes e efluentes e o número de faixas de cada uma;
- c) Determina-se uma taxa de renovação de fluxo como uma média da porcentagem de veículos que saiu no ponto i , em relação ao volume que seguia naquele sentido, e a porcentagem de veículos que saiu no ponto j , em relação ao volume que seguia naquele sentido;
- d) Os veículos que deixam a via entram como um volume a mais na próxima via afluente, ou na anterior, no caso de não haver próxima via; já os veículos que entram na via saem na próxima via efluente, ou na anterior, no caso de não haver próxima via;
- e) Para distribuir a variação de volume entre as vias afluentes ou efluentes, calculou-se a exponencial do número de faixas de cada via naquele sentido e o quanto esse valor representa do total para as vias afluentes ou efluentes daquele fluxo. Obtém-se o volume multiplicando a porcentagem pela variação do volume entre i e j .

- f) O volume afluente (ou efluente) final é a somatória da distribuição pelo número de faixas somada com a reposição da taxa de renovação, quando houver.

4.2.3. Vehicle Routes

Para cada interseção em que havia a possibilidade de mais de um movimento, foram traçadas as possíveis rotas, colocando como *input* a proporção de veículos que realiza cada um dos movimentos, obtida tanto a partir das contagens, quanto da distribuição realizada.

4.2.4. Proporção de veículos

Durante a inserção de veículos no modelo, deve-se determinar qual será a composição do tráfego de cada via. Para isso, utilizou-se uma proporção média de cada tipo de veículo para vias transversais e para a via principal.

Como a proporção média dos veículos nas vias é próxima, adotou-se um valor médio entre os dois valores para colocar no Vissim.

Tabela 4.2 - Proporção dos veículos adotada no modelo.

| Proporção de Veículos | Automóveis | Motos | Caminhões |
|--------------------------------|------------|-------|-----------|
| Avenida dos Autonomistas | 90,55% | 8,51% | 0,94% |
| Transversais | 91,41% | 7,38% | 1,21% |
| Distribuição adotada no modelo | 90,97% | 7,95% | 1,08% |

Fonte: Elaboração pessoal (baseado em dados da EMTU).

Nota-se que não foi considerado o volume de ônibus na composição do fluxo, já que esse volume está contemplado nas linhas de ônibus, que são inseridas no modelo em outra etapa.

4.2.5. Semáforos

A partir dos dados obtidos em campo, calculou-se o tempo de início e fim de cada estágio semafórico, de forma a preencher o diagrama de estágios disponível como aplicação do Vissim para cadastrar semáforos.

Vale ressaltar que, em visita ao Centro de Operações Integradas (COI), de Osasco, foi informado que a defasagem utilizada nos semáforos da avenida dos Autonomistas é zero, portanto consideramos também, no modelo, que não há uma defasagem entre os semáforos.

4.2.6. Área de Conflito

No caso de vias não semaforizadas, é preciso determinar, na área de conflito, a prioridade das vias; no caso do modelo, a via com prioridade é sempre a Av. dos Autonomistas.

4.2.7. Driving Behavior

Segundo MARTE (2017), o melhor comportamento para representar o motorista brasileiro é o *cycle-tracking*, devido à peculiaridade comportamental de ultrapassagens tanto da faixa da esquerda quanto da direita, conforme podemos observar no dia-a-dia.

Além disso, alteraram-se alguns outros parâmetros antes de iniciar a calibração, de forma a aproximar o comportamento visual da simulação com o comportamento real observado.

Os parâmetros alterados foram:

- a) Mudança do modelo de *car-following* para W74;
- b) Decisão de travessia no semáforo, onde foi adotado o parâmetro de “*one decision*”, dado que a decisão de travessia não é usualmente constante e cautelosa;
- c) Decisão do motorista quando avista a condição de amarelo para vermelho, adotou-se “*go (same as green)*”, devido ao comportamento de acelerar ao ver a fase amarela;
- d) Distância lateral em movimento, adotou-se 0,8 m, pois as motos passam mais próximas aos demais automóveis.

4.2.8. Contadores

Para conseguir avaliar se o volume simulado é próximo ao volume real observado, colocaram-se contadores nos links do modelo medindo os movimentos observados nas contagens dos pontos 5 ao 9.

4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO

O modelo pode ter dois focos para a calibração: *driving behavior* (comportamento dos motoristas) ou *route choosing* (escolha de rotas). Como a área simulada é, essencialmente, a avenida dos Autonomistas, não é o objetivo deste trabalho verificar novas escolhas de rotas para os motoristas. Além disso, os dados disponíveis possibilitam apenas uma análise e calibração baseadas no comportamento dos motoristas.

Portanto, utilizou-se como base para escolha dos parâmetros e método de avaliação dos resultados dois trabalhos: o trabalho de PARK e SCHNEEBERGER (2003), que é um estudo de uma via arterial nos Estados Unidos com 12 interseções semafORIZADAS, com a utilização do software Vissim para simulação e o trabalho de LACERDA e NETO (2005), que faz considerações sobre a calibração do modelo de *car-following* do Vissim.

Os parâmetros utilizados, no presente trabalho, para calibração foram:

- Distância média de parada (*Average Standstill Distance*);
- Parte aditiva da distância de segurança (*Additive part of safety distance*);
- Parte multiplicativa da distância de segurança (*Multiplicative part of safety distance*);
- Distância de parada de emergência (*Emergency Stopping Distance*);
- Distância de mudança de faixa (*Lane-Change Distance*);
- Distribuição de velocidade desejada (*Desired Speed Distribution*);
- Mínimo headway (*Minimum Headway*).

Com a disponibilidade somente dos dados de contagem (volume) da via, a medida de desempenho utilizada na calibração e validação foi o volume médio de veículos em um período de uma hora.

4.3.1. Parâmetros a serem calibrados

Como não há, em um processo manual de calibração, a possibilidade de variar os parâmetros continuamente para se chegar a um valor ótimo para cada um deles, alterou-se cada parâmetro em valores discretos, baseados nas orientações de Park e Schneeberger acerca dos valores aceitáveis para cada parâmetro.

4.3.1.1. Distância média de parada (Average Standstill Distance)

A distância média de parada, já citada acima como ax , representa a distância desejada entre veículos parados, entre o veículo e a faixa de retenção, etc.

O valor padrão do Vissim é 2,0 m. Um intervalo aceitável de valores é de 1,0 a 3,0 m. Após uma medição, através de imagens aéreas do trânsito de veículos na cidade de São Paulo, considerou-se o valor de 1,1 m para esse parâmetro.

4.3.1.2. Parte aditiva da distância de segurança (Additive part of safety distance)

Parte aditiva da distância de segurança é, como já citado acima, o termo bx_{add} da equação da distância entre dois veículos sucessivos em movimento.

Seu valor padrão é 2,0 m. No processo de calibração, alterou-se esse valor entre 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m.

4.3.1.3. Parte multiplicativa da distância de segurança (Multiplicative part of safety distance)

Parte multiplicativa da distância de segurança é, como já citado acima, o termo bx_{mult} da equação da distância entre dois veículos sucessivos em movimento.

Seu valor padrão é 3,0 m. No processo de calibração, alterou-se esse valor entre 2,0 m, 3,0 m e 4,0 m.

4.3.1.4. Distância de parada de emergência (Emergency Stopping Distance)

A distância de parada de emergência define o ponto limite para que seja realizada a mudança de faixa com a finalidade de possibilitar que o veículo siga na sua rota planejada.

O valor padrão desse parâmetro no Vissim é 5,0 m. São razoáveis variações até 7,0 m. No processo de calibração, dado que o valor mínimo no programa é de 5,0 m, o parâmetro variará entre 5,0 m ou 7,0 m.

4.3.1.5. Distância de mudança de faixa (Lane-Change Distance)

A distância de mudança de faixa é a distância para a interseção em que os veículos começam a tentar mudar de faixa para que consigam seguir a sua rota planejada (virando na interseção).

O valor padrão desse parâmetro é 200 m. São aceitáveis valores entre 150 e 300 m. No processo de calibração, será utilizado este parâmetro como 150 m, 225 m ou 300 m.

4.3.1.6. Distribuição de velocidade desejada (Desired Speed Distribution)

A velocidade desejada é aquela que os veículos desejam trafegar se não houvesse outros veículos que o impedissem.

Quanto maior a diferença entre as velocidades desejadas pelos veículos que trafegam pela via, maior a probabilidade de ocorrer pelotões no tráfego.

A velocidade máxima permitida na via é de 60 km/h, portanto a velocidade desejada pelos motoristas deve oscilar perto deste valor. Para este trabalho, foi usada a variação de 40 a 60 km/h na distribuição de velocidade desejada. No processo de calibração, será utilizado este parâmetro como 40 km/h, 50 km/h ou 60 km/h.

4.3.1.7. Mínimo headway (Minimum Headway)

O mínimo headway é a mínima distância para o veículo à frente necessária para que possa ocorrer a mudança de faixa.

O valor padrão é 0,5 m. O intervalo aceitável para este parâmetro é de 0,5 a 7,0 m. No processo de calibração, será utilizado este parâmetro como 0,5 m, 4,0 m ou 7,0 m.

4.3.2. Método de calibração e resultados

As calibrações normalmente são feitas de forma automática, a partir de algum algoritmo executado em computadores (algoritmo genético, por exemplo). Porém, em modelos que simulam uma pequena região, a calibração pode ser feita de forma manual (HOLLANDER e LIU, 2008), como é o caso deste trabalho.

Portanto, como o modelo será calibrado manualmente, é necessário que se tenham poucos parâmetros de calibração (HOLLANDER e LIU, 2008), motivo pela qual foram utilizados somente 4 parâmetros dos 7 citados por Park e Schneberger além de mais 3 parâmetros citados no trabalho de Lacerda e Neto.

Para a calibração do modelo, foi utilizada uma adaptação do método apresentado por Park e Schneeberger e do modelo apresentado por Lacerda e Neto; foram utilizados pontos citados dos dois trabalhos.

Antes do início da calibração foram identificados alguns problemas no modelo através de uma análise visual do comportamento dos veículos e foram feitas algumas correções no modelo:

- Diminuição de movimentos conflitantes inexistentes na realidade;
- Correção de algumas rotas (*static route decisions*);
- Liberação de ônibus para ultrapassar na região dos pontos.

Os parâmetros bx_{add} e bx_{mult} foram calibrados primeiro, utilizando o fluxo de saturação e de forma separada um do outro, como sugerido por Lacerda e Neto. Um fluxo visivelmente saturado foi observado na rua Salem Bechara, portanto utilizou-se esse trecho para a calibração desses dois parâmetros. Para se avaliar qual o melhor valor de cada parâmetro, calculou-se a estatística GEH para cada valor do parâmetro.

Primeiro, alterou-se o valor de bx_{add} entre 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m, e chegou-se aos seguintes valores de GEH e a 1,0 m como o melhor valor para esse parâmetro.

Tabela 4.3 - Resultados das simulações para calibrar bx_{add}

| bx_{add} | GEH |
|------------|------|
| 1,0 m | 2,00 |
| 2,0 m | 2,00 |
| 3,0 m | 2,48 |

Fonte: Elaboração própria.

Após a obtenção do valor de bx_{add} , alterou-se o valor de bx_{mult} entre 2,0 m, 3,0 m e 4,0 m, chegou-se aos seguintes valores de GEH e a 2,0 como o melhor valor para esse parâmetro.

Tabela 4.4 - Resultados das simulações para calibrar bx_{mult}

| bx_{mult} | GEH |
|-------------------------------|-------------|
| 2,0 m | 1,92 |
| 3,0 m | 2,00 |
| 4,0 m | 2,05 |

Fonte: Elaboração própria.

Após a calibração desses dois parâmetros, iniciou-se o processo de calibração dos outros 4 parâmetros; para isso, simulou-se as 54 combinações possíveis dos valores dos parâmetros, variando conforme citado anteriormente, e calculou-se a estatística GEH para o volume de veículos de cada movimento e uma média geral.

Cada combinação foi simulada 5 vezes (para absorver variações estatísticas), e foi tirada a média do volume medido pelo programa em cada ponto de contagem (V_{med}).

Como resultado da calibração, têm-se na tabela 4.5 as combinações que geraram os 10 menores valores de GEH.

Tabela 4.5 - As 10 combinações que geraram os menores valores de GEH.

| Combinação | Distância de parada de emergência | Distância de mudança de faixa | Distribuição de velocidade desejada | Mínimo headway | GEH |
|-------------------|--|--------------------------------------|--|-----------------------|-------------|
| 16 | 5,0 | 225 | 60 | 0,5 | 1,37 |
| 10 | 5,0 | 225 | 40 | 0,5 | 1,37 |
| 19 | 5,0 | 300 | 40 | 0,5 | 1,37 |
| 13 | 5,0 | 225 | 50 | 0,5 | 1,38 |
| 26 | 5,0 | 300 | 60 | 4,0 | 1,38 |
| 23 | 5,0 | 300 | 50 | 4,0 | 1,39 |
| 37 | 7,0 | 225 | 40 | 0,5 | 1,39 |
| 20 | 5,0 | 300 | 40 | 4,0 | 1,40 |
| 01 | 5,0 | 150 | 40 | 0,5 | 1,40 |
| 40 | 7,0 | 225 | 50 | 0,5 | 1,42 |

Fonte: Elaboração própria.

Pôde-se chegar a volumes no modelo bem próximos aos volumes reais, extraídos dos dados de contagem. Por fim, fez-se uma “pré-validação” com os tempos de viagens, em que se comparou os tempos medidos no modelo com os

tempos medidos durante uma ida em campo e com os tempos apresentados no Google Maps, apresentados na tabela 4.6. Além disso foi feita uma análise visual das velocidades médias do modelo e comparou-se com o apresentado pelo Google Maps durante o horário de pico da manhã.

Tabela 4.6 - Tempos de viagens no trecho estudado.

| Trecho | Medição de Campo | Google Maps |
|---------------------|------------------|-------------|
| P5 - Shopping União | 8,24 min | 11,00 min |
| Shopping União - P5 | 6,11 min | 8,50 min |

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 4.7 apresenta os tempos resultantes da simulação do modelo (tempo médio, tempo mínimo e tempo máximo). Pode-se notar que o intervalo dos tempos medidos no modelo está dentro da faixa observada no Google Maps.

Tabela 4.7 - Tempos de viagens resultantes do modelo.

| Trecho | Tempo médio no modelo | Tempo mínimo no modelo | Tempo máximo no modelo |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| P5 - Shopping União | 7,53 min | 7,20 min | 8,05 min |
| Shopping União - P5 | 8,49 min | 7,42 min | 9,26 min |

Fonte: Elaboração própria.

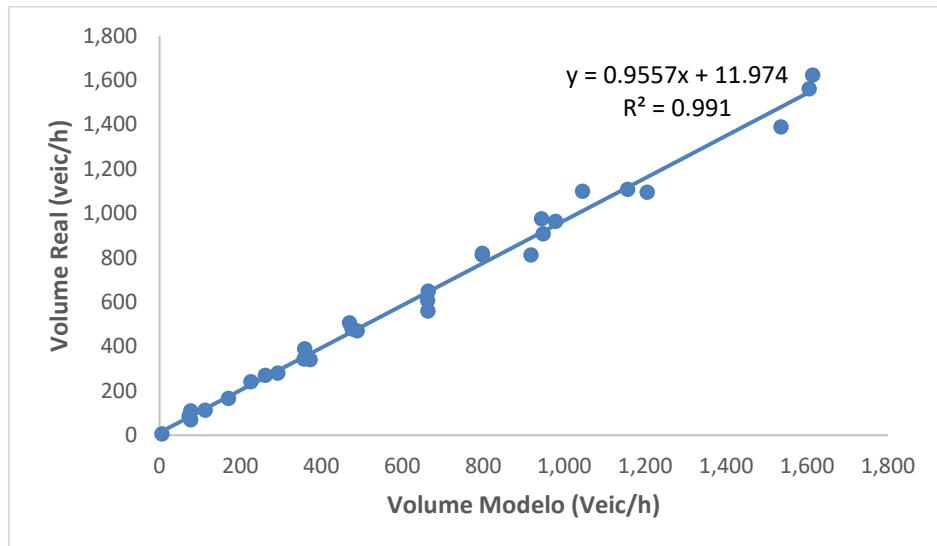
Finalmente, os valores finais para os parâmetros após a calibração são os seguintes:

- Distância média de parada = 1,1 m;
- Parte aditiva da distância de segurança = 1,0 m;
- Para multiplicativa da distância de segurança = 2,0 m;
- Distância de parada de emergência = 5,0 m;
- Distância de mudança de faixa = 225,0 m;
- Distribuição de velocidade desejada = 60 km/h;
- Mínimo *headway* = 0,5 m.

Após chegar a esses valores de parâmetros, plotaram-se os dados de volume de veículos em um gráfico, onde o eixo das ordenadas apresenta volumes extraídos do modelo e o eixo das abscissas os volumes das contagens reais. Dessa forma, extraiu-se o coeficiente de determinação, R^2 , para verificar quanto dos dados reais são explicados pelo modelo. Como pode-se observar na figura 4.1, temos uma reta de regressão com inclinação muito próxima ao ideal de 45º (coeficiente angular de

0,96 e inclinação de 43,7°), além de um R^2 de 0,991, valor bem próximo a 1. Além disso, o Apêndice A mostra a comparação dos volumes do modelo e real, por meio do parâmetro estatístico GEH.

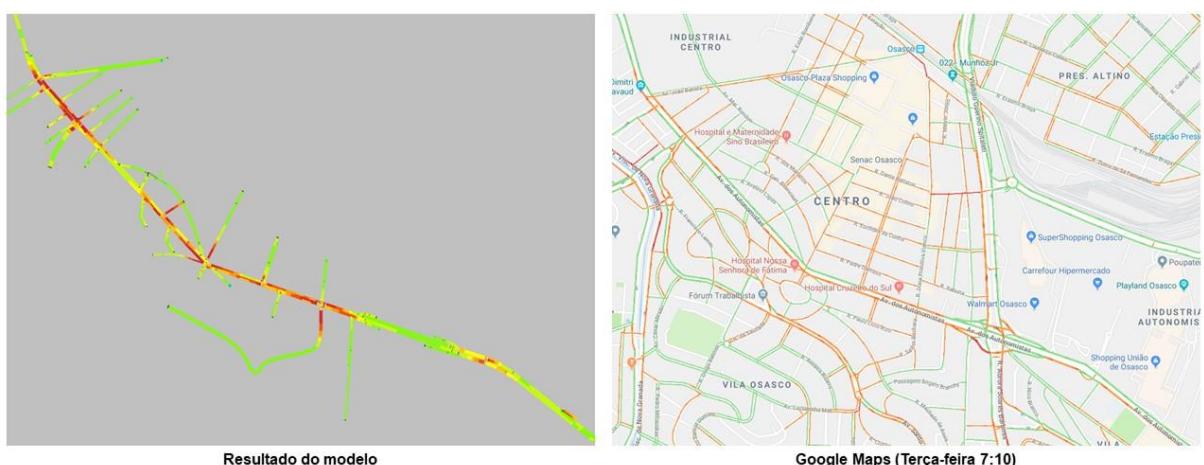
Figura 4.1 - Comparação entre os volumes reais e os volumes extraídos do modelo



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na figura 4.2, a distribuição de velocidades médias do modelo se mostra relativamente similares às apresentadas pelo Google Maps em uma consulta do trânsito às 7:10 (horário dentro da hora pico da manhã usada na calibração). Vale ressaltar que, como o Vissim gera as cores de velocidade por *link*, alguns trechos que estão com outras cores no Google Maps podem ficar com cores mais amenas no Vissim, por se tratar de uma média do *link* inteiro.

Figura 4.2 - Comparação das velocidades



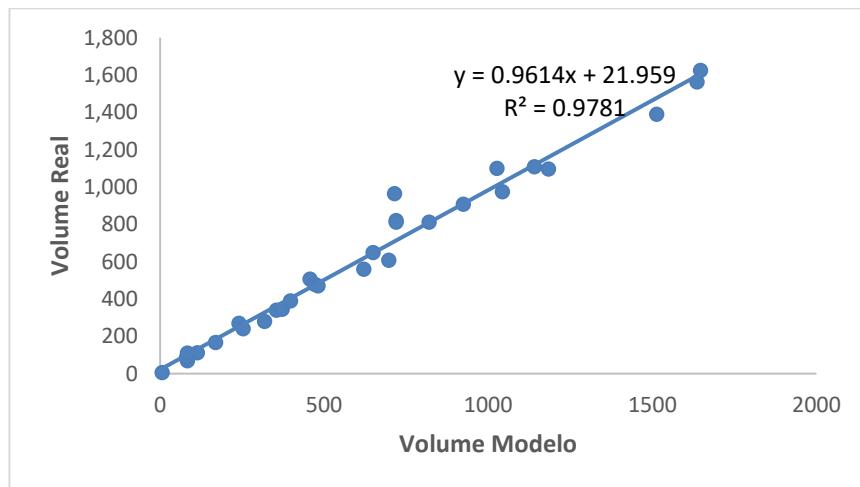
Fonte: Elaboração própria.

4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação do modelo, será feita a simulação, com os parâmetros calibrados, utilizando os dados do primeiro dia de contagem, pois são dados independentes daqueles usados para a calibração; serão extraídos do programa os volumes nos pontos em que havia dados de contagem para comparação.

Com esses dados, plotou-se em um gráfico os volumes apresentados pelo modelo e os volumes reais das contagens. O R^2 da regressão linear entre as duas variáveis do gráfico foi de 0,9781, o que é um valor bem próximo de 1 e pode ser considerado satisfatório. Além, disso a inclinação da reta de regressão foi de $43,9^\circ$ também é bem próxima da ideal (45°). Portanto, a partir dessa análise, pode-se considerar que o modelo representa bem a realidade.

Figura 4.3 - Comparação entre os volumes reais e os volumes extraídos do modelo



Fonte: Elaboração própria.

4.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO

Após a calibração do modelo, pôde-se simulá-lo a fim de levantar indicadores importantes de tráfego, a fim de realizar um diagnóstico da situação atual do trecho estudado.

Foram escolhidos indicadores mais pertinentes à análise em questão uma possível inferência sobre a qualidade do tráfego na avenida dos Autonomistas.

Primeiramente, pode-se observar na figura 4.4, que em uma parte considerável do trecho estudado, a via apresenta o nível de E ou F, que representam condições péssimas de trafegabilidade. Esses níveis de serviço foram

levantados a partir da tabela 4.8 do U.S. HCM 2010, que relaciona a relação da velocidade média da via e a velocidade máxima com o nível de serviço.

Tabela 4.8 - Nível de serviço para carros em vias urbanas no HCM.

| Velocidade de Viagem como % da Velocidade Básica de Viagem Livre | Razão Demanda/Capacidade* (%) | |
|--|-------------------------------|-------|
| | <=100% | >100% |
| >85 | A | F |
| >67-85 | B | F |
| >50-67 | C | F |
| >40-50 | D | F |
| >30-40 | E | F |
| <=30 | F | F |

Fonte: PIETRANTÔNIO (2018).

Figura 4.4 - Níveis de serviço ao longo do trecho no modelo



Fonte: Elaboração própria.

Além disso, extraiu-se os valores de outros parâmetros de tráfego do modelo para o trecho simulado e pode-se observar na tabela 4.9 a partir dos dados de tempo total de viagem (T_{total}), atraso total (A_{total}) e tempo parado total (TP_{total}) que, 54% do tempo de viagem é atraso e 33% é tempo parado, ou seja, se os veículos pudessem trafegar na velocidade máxima da via, eles gastariam 46% do tempo, em média, do que gastam na situação atual.

Tabela 4.9 - Resultados de tempo de viagem do modelo

| T_{total} | A_{total} | TP_{total} |
|-------------|-------------|--------------|
| 28.217 Min | 15.248 Min | 9.229 Min |
| 100% | 54% | 33% |

Fonte: Elaboração própria.

4.6. CENÁRIOS AVALIADOS

Para a aplicação da gestão semafórica em tempo real, pretendia-se utilizar os softwares BALANCE e EPICS da PTV, no entanto, durante o período determinado para o desenvolvimento do trabalho, não foi possível obter a licença para a utilização do software.

Como não foi possível tal avaliação por meio da modelagem, serão estudados três cenários:

- Teste de sensibilidade da solução atual à variação de demanda na via;
- Velocidade reduzida; e
- Onda verde com tempo-fixo.

Estas soluções serão avaliadas somente no quesito eficiência, visto que nenhuma das soluções propostas é adaptativa, isto é, reage a situações diferentes, alterando a oferta de capacidade da via.

Esse teste de soluções e cenários diferentes mostra como um modelo construído e calibrado, mesmo sem a possibilidade de simular semáforos em tempo real, pode ser útil para a gestão de tráfego de uma cidade, já que possibilita testar inúmeras alternativas e cenários para se buscar uma solução que melhore o tráfego no trecho simulado.

Os cenários de velocidade reduzida e onda verde serão avaliados por meio de alguns parâmetros apresentados no tópico 2.2.1. e mais alguns que foram avaliados pertinentes. São eles:

- Tempo de percurso no sentido São Paulo (Tempo SP) – Tempo médio de percurso entre o ponto 5 de contagem e a faixa de pedestres em frente ao shopping União;
- Tempo de percurso no sentido Região Metropolitana (Tempo RM) – Tempo médio de percurso entre a faixa de pedestres em frente ao shopping União e o ponto 5 de contagem;

- Atraso veicular médio (AVM) – Tempo médio a mais que o veículo gasta para trafegar na via em relação ao tempo que ele gastaria se andasse na máxima velocidade permitida nela;
- Velocidade média no sentido São Paulo ($V_{média}$ SP) – Velocidade média entre o ponto 5 de contagem e a faixa de pedestres em frente ao shopping União;
- Velocidade média no sentido Região Metropolitana ($V_{média}$ RM) – Velocidade média entre a faixa de pedestres em frente ao shopping União e o ponto 5 de contagem;
- Índice de velocidade operacional (IVO) – Velocidade operacional média global dos veículos do modelo;
- Número de paradas de veículos (NPV) – Número médio de paradas por veículo.

4.6.1. Teste de sensibilidade (configuração semafórica atual)

Para realização do teste de sensibilidade, simulou-se o modelo variando a demanda em intervalos de 5%, indo de uma diminuição de 15% até um aumento de 15% na demanda atual da via.

Após a simulação, extraiu-se os resultados de tempo médio de percurso e a velocidade média nos dois sentidos entre o ponto 5 de contagem até a faixa de pedestre em frente ao shopping União e gerou-se um gráfico da variação desses indicadores em função da demanda de tráfego.

4.6.1.1. Rodízio

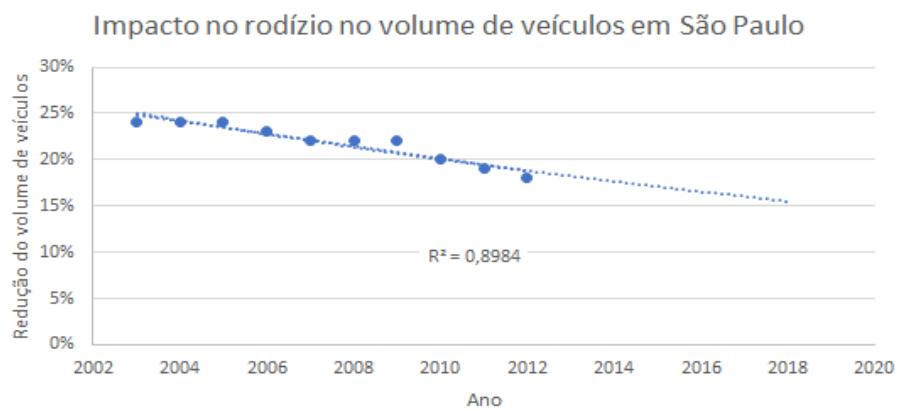
O rodízio urbano de veículos é uma medida de proibição de circulação veicular em determinadas horas e dias da semana. Tem como objetivo reduzir externalidades negativas tais como congestionamentos, emissão de poluentes e atrasos, aumentar a velocidade média dos veículos e incentivar o uso do transporte público. Esse objetivo é atingido restringindo o tráfego dentro de uma área do município com base nos últimos dígitos da placa dos veículos, normalmente durante

os horários de pico. Tal medida já foi implementada em diversas cidades do mundo, tais como Atenas, Cidade do México, Bogotá, São Paulo, Jacarta, San José e Santiago.

Implementada pelo Governo Estadual de São Paulo, a experiência brasileira se iniciou em 1996 em fase de testes de forma voluntária. Ela teve como prerrogativa a mitigação da poluição do ar e do aumento da acidez da chuva. Em 1997, a Prefeitura de São Paulo a tornou mandatária com objetivo principal de aumentar a fluidez do tráfego. Em 1998, a prefeitura de São Paulo estimou uma redução de aproximadamente 18% nos níveis de congestionamento; no entanto, com o passar dos anos, a redução foi compensada com o aumento da frota circulante, estimada em 3,5 milhões em 1997 para quase 5 milhões em 2003 (CÂMARA e MACEDO, 2004). Em geral, políticas de restrição de tráfego apresentam desaprovação do público, entretanto esse caso mostrou-se bem apoiado, principalmente por usuários do transporte público.

A partir dos dados extraídos da portaria 80/13, da prefeitura de São Paulo, acerca da redução de veículos causada pela implementação do rodízio de 2003 a 2012, extrapolando-se exponencialmente os dados para o ano de 2018, chegando-se ao valor de 15% de redução no volume de veículos devido ao rodízio, que foi a máxima redução simulada no teste de sensibilidade.

Figura 4.5 - Evolução da redução de veículos em razão do rodízio em São Paulo



Fonte: Elaboração própria com dados da portaria 80/13 da prefeitura de São Paulo.

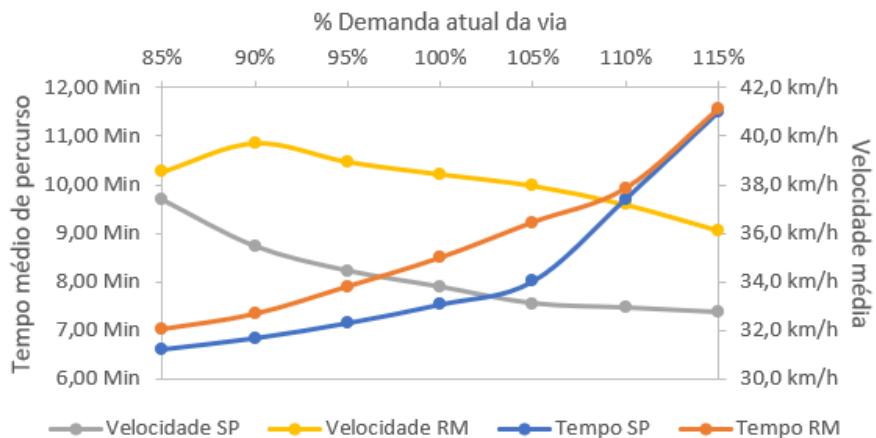
4.6.1.2. Resultados obtidos

Como esperado, de acordo com Ortúzar e Willumsen (2011), nota-se na figura 4.5 que o tempo de viagem tende a crescer exponencialmente conforme a

demanda da via cresce, assim como a velocidade média, principalmente no sentido mais crítico (com maior volume de veículos), tende a diminuir em consequência de um maior fluxo de veículos.

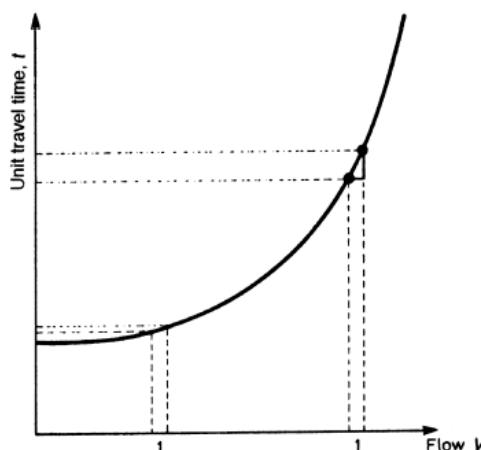
Figura 4.6 - Teste de sensibilidade

Sensibilidade à mudança de volume de veículos



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.7 - Relação entre tempo de viagem e demanda da via



Fonte: Ortúzar e Willumsen (P.6, 2011).

Esse teste de sensibilidade é relevante, já que permite visualizar o que uma mudança na demanda da via impactaria aos usuários, o que pode basear estudos de medidas de diminuição da demanda da via, como a implementação de rodízio (assim como já existe em São Paulo e discutido melhor no tópico 4.6.1.2.), incentivo ao uso de outros tipos de transporte por meio de uma melhora no sistema de transporte público e, incentivo de meio de transporte não motorizados, por exemplo.

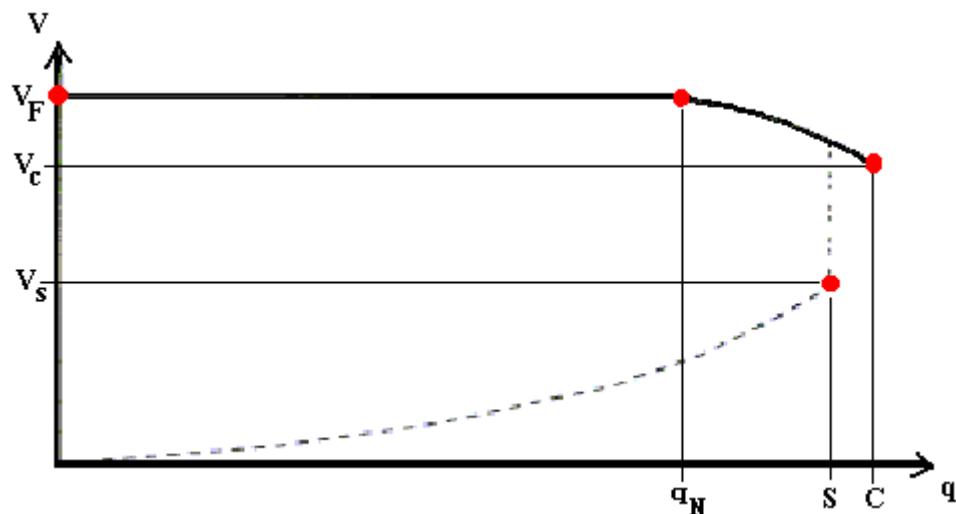
Além disso, esse teste pode servir de subsídio para uma análise da consequência do aumento da demanda na via, tanto o crescimento orgânico quanto alguma demanda pontual. Essa análise pode justificar ou não intervenções futuras na via ou medidas de mitigação previamente à realização de eventos e/ou incidentes que gerem um volume de veículos a mais no trecho estudado.

4.6.2. Velocidade reduzida

Segundo estudo divulgado pela empresa especializada em monitoramento de tráfego *TomTom*, houve uma redução considerável nos tempos de atrasos das viagens na cidade de São Paulo entre os anos de 2013 e 2015, onde ela caiu de 7º colocada no ranking internacional de cidades com maior congestionamento para 58º, atualmente a cidade ocupa a 71º colocação. Ainda segundo este estudo houve uma redução do indicador de atrasos de 66% para 40% no mesmo período, para viagens nos picos da manhã.

O entendimento dessa redução é simples e tem relação com um conceito fundamental do tráfego de que com a redução das velocidades máximas da via, ocorre um aumento do fluxo de veículos em uma seção, o que, por consequência, reduz os atrasos.

Figura 4.8 - Diagrama fundamental de tráfego real de uma via real



Fonte: PIETRANTONIO, 2018.

Além disso, segundo Sarno (2016), as ações de segurança promovidas na cidade de São Paulo, em que se destaca a redução da velocidade média nas

principais vias da capital, promoveram reduções consistentes nos índices de acidentes e fatalidades - os estudos detalhados estão presentes em seu trabalho, Norma Técnica 251 da CET.

Com isso, é possível perceber que o emprego da redução das velocidades nas vias apresenta características positivas em que se destaca o aumento do fluxo de veículos, a redução de acidentes e a intensidade deles. Assim, impactando não somente os veículos privados, como os ônibus que são afetados por eles.

Há ainda o aspecto de ser uma solução de fácil aplicação, uma vez que requer apenas a substituição das placas existentes por outras com velocidades menores.

Neste cenário alternativo, simulou-se o trecho diminuindo a distribuição de velocidade desejada de 60 km/h (atual limite da via) para 50 km/h, assim como foi feito na maioria das avenidas da cidade de São Paulo.

4.6.2.1. Resultados obtidos

Como pode-se notar na tabela 4.10 a seguir, a redução da velocidade nas vias gerou uma diminuição no atraso médio, mas também na velocidade média. Essa redução na velocidade média ocasionou um aumento no tempo total de viagem e, como pode-se observar na tabela 4.11, diminuiu em 1% o atraso médio em relação ao tempo total de viagem em comparação com o cenário atual (Tabela 4.9) significativamente menor do que a redução observada na cidade de São Paulo.

Essa combinação de dados mostra que se deve analisar cada caso para se empregar essa medida de redução de velocidade, já que em alguns locais ela pode trazer benefícios significativos enquanto em outros ela pode não melhorar o problema ou, até mesmo, aumentar o custo generalizado do usuário, considerando o tempo de viagem, velocidade etc. Vale ressaltar que não foi considerado nesta análise e na simulação do modelo, benefícios relacionados à segurança, como estudado por Sarno, em São Paulo.

Tabela 4.10 - Indicadores resultados da simulação do modelo (Velocidade reduzida)

| Cenário | Tempo SP | Tempo RM | AVM | V _{média} SP | V _{média} RM | IVO | NPV |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Situação atual | 7,53 min 100% | 8,49 min 100% | 1,68 min 100% | 33,8 km/h 100% | 38,4 km/h 100% | 27,9 km/h 100% | 3,8 100% |
| | 7,86 min 104% | 8,87 min 104% | 1,64 min 98% | 30,2 km/h 89% | 33,4 km/h 87% | 26,0 km/h 93% | 3,8 100% |
| Velocidade Reduzida | 7,53 min 100% | 8,49 min 100% | 1,68 min 100% | 33,8 km/h 100% | 38,4 km/h 100% | 27,9 km/h 100% | 3,8 100% |
| | 7,86 min 104% | 8,87 min 104% | 1,64 min 98% | 30,2 km/h 89% | 33,4 km/h 87% | 26,0 km/h 93% | 3,8 100% |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.11 - Relação dos tempos de viagem e atrasos

| T _{total} | A _{total} | TP _{total} |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| 30.355 Min | 14.904 Min | 9.427 Min |
| 100% | 53% | 33% |

Fonte: Elaboração própria.

4.6.3. Onda verde

Já foi explicado anteriormente como é o cálculo e o funcionamento das ondas verdes, portanto este tópico discorrerá somente acerca de como foi aplicada essa solução ao modelo.

Primeiramente, equalizou-se o tempo de ciclo de todos os semáforos estudados em 130 segundos, já que era o valor mais próximo de todos os tempos de ciclos medidos.

O cálculo das defasagens dos semáforos foi realizado considerando a fórmula para menor demanda de tráfego e para maior demanda de tráfego e pôde-se chegar à conclusão que, dentre essas, a melhor solução para o trecho estudado, segundo os indicadores analisados, é a utilização da fórmula de menor demanda de tráfego. Com isso, considerou-se uma velocidade de 50 km/h (ligeiramente menor do que a máxima permitida na via) e mediu-se as distâncias entre semáforos através do Google Maps; chegou-se aos resultados de tempo de defasagem apresentados na tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Defasagens calculadas (θ_{ij})

| Semáforo | Distância (m) | Velocidade (km/h) | θ_{ij} (s) |
|----------|---------------|-------------------|-------------------|
| S1 | - | 50 | - |
| S2 | 53 | 50 | 4 |
| S3 | 190 | 50 | 14 |
| S4 | 525 | 50 | 38 |
| S5 | 260 | 50 | 19 |
| S6 | 250 | 50 | 18 |
| S7 | 265 | 50 | 19 |
| S8 | 825 | 50 | 59 |

Fonte: Elaboração própria.

4.6.3.1. Resultados obtidos

Tabela 4.13 - Indicadores resultados das simulações do modelo (Onda Verde)

| Cenário | Tempo SP | Tempo RM | AVM | V _{média} SP | V _{média} RM | IVO | NPV |
|----------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Situação atual | 7,53 min 100% | 8,49 min 100% | 1,68 min 100% | 33,8 km/h 100% | 38,4 km/h 100% | 27,9 km/h 100% | 3,8 100% |
| | 5,19 min 69% | 22,94 min 270% | 2,82 min 168% | 37,2 km/h 110% | 33,7 km/h 88% | 20,2 km/h 72% | 5,2 138% |
| Onda Verde | 7,53 min 100% | 8,49 min 100% | 1,68 min 100% | 33,8 km/h 100% | 38,4 km/h 100% | 27,9 km/h 100% | 3,8 100% |
| | 5,19 min 69% | 22,94 min 270% | 2,82 min 168% | 37,2 km/h 110% | 33,7 km/h 88% | 20,2 km/h 72% | 5,2 138% |

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados apresentados na tabela 4.13 pode-se notar que, como a solução de onda verde, quando aplicada baseada nos fluxos de um sentido predominante, prioriza somente esse sentido, os indicadores específicos desse sentido melhoraram (até 31% de diminuição no tempo de percurso), porém os indicadores do sentido de menor fluxo pioram significativamente (aumento de 170% no tempo de percurso). Qualitativamente, esse resultado já era esperado, já que, como já falado, estamos priorizando um sentido em relação ao outro; porém, mais importante do que ratificar o conceito, os resultados mostram que a coordenação semafórica precisa de algo a mais do que somente onda verde do modo tradicional para melhorar a condição do trecho estudado, já que os indicadores globais, como atraso médio, número médio de paradas e velocidade global média, mostraram que essa solução gera um prejuízo quando se analisa o cenário geral, considerando os dois sentidos da via. Esse prejuízo pode representar um aumento no custo generalizado total e pode significar que não se trata de uma solução adequada para o trecho.

Foi simulada a onda verde também para o cenário com um aumento de 15% na demanda de veículos e, como mostrado na tabela 4.14, qualitativamente, como já era esperado por conta da não adaptabilidade da onda verde, os resultados foram iguais aos obtidos com a demanda atual, ou seja, há um aumento no atraso médio dos veículos e no número médio de paradas, além de uma diminuição na velocidade média global. Além disso, novamente a utilização da fórmula de cálculo de defasagens para menor demanda mostrou indicadores melhores do que a fórmula para maior demanda de tráfego.

Tabela 4.14 - Indicadores resultados do modelo com aumento de 15% na demanda

| Cenário | Tempo SP | Tempo RM | AVM | V _{média} SP | V _{média} RM | IVO | NPV |
|----------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Sem Onda Verde | 11,51 min 100% | 11,56 min 100% | 2,79 min 100% | 32,7 km/h 100% | 36,1 km/h 100% | 20,0 km/h 100% | 6,6 100% |
| Com Onda Verde | 8,70 min 76% | 27,61 min 239% | 3,78 min 135% | 34,2 km/h 105% | 25,2 km/h 70% | 16,1 km/h 80% | 7,7 116% |

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados indicam que, para a utilização de ondas verdes na região de estudo, deve-se considerar o fluxo dos dois sentidos da via e buscar defasagens que minimizem o atraso total dos veículos, ou seja, deve-se procurar uma defasagem ‘ótima’. Esse cálculo é complexo, portanto a utilização de softwares de otimização se mostra necessária, em especial, softwares de otimização em tempo real, como o Balance, por exemplo.

4.6.4. Considerações gerais

Como esperado, por conta da redução do volume de veículos, a maioria dos indicadores melhoraram quando se implementa o rodízio, que se mostrou a melhor solução ao analisar friamente os indicadores de tráfego, no entanto, para a aplicação de uma solução, há muito mais esforço do que somente a demonstração de resultados comparativos positivos.

É necessária uma avaliação de impactos da solução nos municípios que vai além do que entendemos aqui como engenharia, é também necessário analisar os custos e ganhos de implantação, além de mobilizar todas as partes envolvidas para que seja viável esta aplicação.

Além disso, vale notar também que a onda verde, solução que em essência prioriza um sentido de tráfego em relação ao outro, melhora significativamente os

indicadores de tempo e velocidade no sentido priorizado, porém causa um prejuízo grande no outro sentido.

Por fim, observa-se que a solução de redução da velocidade máxima da via é aquela com piores indicadores, visto que o tempo de viagem aumenta e a velocidade média diminui, em ambos os sentidos, quando comparados com a situação atual. Entretanto, a solução apresenta pequena redução nos atrasos da ordem de 2%.

Tabela 4.15 - Comparação de Indicadores resultados do modelo

| Cenário | Tempo SP | Tempo RM | AVM | V _{média} SP | V _{média} RM | IVO | NPV |
|---------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Situação atual | 7,53 min | 8,49 min | 1,68 min | 33,8 km/h | 38,4 km/h | 27,9 km/h | 3,8 |
| | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Velocidade Reduzida | 7,86 min | 8,87 min | 1,64 min | 30,2 km/h | 33,4 km/h | 26,0 km/h | 3,8 |
| | 104% | 104% | 98% | 89% | 87% | 93% | 100% |
| Onda Verde | 5,19 min | 22,94 min | 2,82 min | 37,2 km/h | 33,7 km/h | 20,2 km/h | 5,2 |
| | 69% | 270% | 168% | 110% | 88% | 72% | 138% |
| Rodízio (85% da demanda) | 6,60 min | 7,02 min | 2,83 min | 37,4 km/h | 38,5 km/h | 26,1 km/h | 2,7 |
| | 88% | 83% | 169% | 111% | 100% | 94% | 72% |

Fonte: Elaboração própria.

4.7. APLICAÇÃO EM TEMPO REAL

A seguir serão apresentados os cenários alternativos que seriam simulados para avaliar a solução em tempo real, tanto do ponto de vista de sua eficiência, quanto de sua resiliência, ou seja, seu resultado em situações estressadas.

Infelizmente, a indisponibilidade das licenças não permitiu a aplicação das ferramentas de gestão em tempo real no modelo de microssimulação como o grupo planejava testar. Os cenários que serão descritos a seguir são sugestões para continuação deste trabalho.

4.7.1. Cenários propostos para teste de gestão em tempo real

Para avaliar a eficiência e resiliência da semaforização em tempo real, é preciso testá-la no cenário atual e em situações estressadas, isto é, criar e aplicar cenários alternativos que sejam críticos ou 'subcríticos'.

A seguir são elencados alguns cenários propostos para avaliar a solução em tempo real no âmbito resiliência, isto é, a capacidade de manter sua eficiência em situações diferentes da normal.

4.7.1.1. Faixa interditada por acidente ou veículo quebrado

Considera-se a faixa de tráfego da esquerda no trecho da Av. dos Autonomistas entre a Rua Nossa Sra. da Misericórdia e a Rua Irmã Ester, trecho próximo ao Hospital Nossa Senhora de Fátima, interditada devido a um acidente de trânsito ou um veículo quebrado.

Para calcular o tamanho da intervenção do acidente, considerou-se um espaço retangular com largura de uma faixa e comprimento suficiente para acomodar um veículo padrão, uma ambulância e a distância estipulada pelo código de trânsito brasileiro para a colocação do triângulo de segurança para a sinalização do acidente. Assim, as dimensões são detalhadas na equação 15.

$$C = \text{Veículo} + \text{Ambulância} + \text{Sinalização} \quad (15)$$

Onde:

C = comprimento do trecho interditado;

Veículo = comprimento do veículo considerado 5 metros;

Ambulância = comprimento da ambulância considerado 7 metros;

Sinalização = espaço entre o carro e a sinalização (triângulo) considerado 3 metros.

4.7.1.2. Realização de um evento que atrairá um grande volume de veículos

Supõe-se a realização de um evento religioso importante e com um número acima do normal de visitantes à Igreja Universal do Reino de Deus, localizada na Av. dos Autonomistas, 2222, considerando que em média se aumentará o fluxo nas vias próximas, no período anterior à realização do evento.

4.7.1.3. *Feriado ou período fora-pico*

Simula-se o modelo com uma demanda significativamente menor de veículos, para representar o fluxo na via em um feriado ou em períodos fora do pico.

4.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO

De acordo com todas as considerações feitas, conseguiu-se chegar a um modelo na região da Av. dos Autonomistas, calibrado, com resultados adequado seguindo o método do GEH, e validado, com dados de contagem independentes dos levantados para a calibração.

De modo prático, isso representa uma importante ferramenta para os órgãos trânsito locais, que podem utilizar esse modelo para simular o impacto em diversas situações do trânsito, como aumento de demanda, acidente que bloqueie uma ou mais faixas na avenida, entre outros. Além disso, pode-se verificar a aplicabilidade de diversas soluções como ondas verdes, faixa reversível, mudança na velocidade da via, entre muitas outras.

Entretanto, a simulação em tempo real, que é o foco do projeto, não pôde ser feita devido à falta da licença para o uso das extensões EPICS e BALANCE. Sendo assim, entende-se que para projetos futuros seria importante verificar o impacto dessa solução nessa região.

Neste caso, mesmo se a solução apresentar indicadores de qualidade satisfatórios, ela não necessariamente será aplicada na região, uma vez que esta decisão tem caráter político, onde os aspectos de benefício/custo devem ser levados em consideração.

Portanto, torna-se importante levantar questões associadas à aplicabilidade e ganhos que a gestão em tempo real possa ter em um cenário mais amplo, ou seja, relacionado às cidades. Por este motivo, o item 5 irá abordar um pouco sobre essas questões, levantando aspectos práticos de dificuldades apresentadas por órgãos de trânsito das cidades de São Paulo e Osasco, bem com levantar um estudo de caso da cidade de Toronto.

5. GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL EM CIDADES

Neste capítulo serão apresentadas questões a respeito da coordenação semafórica, em especial no que se refere à tecnologia em tempo real, aplicada nas cidades. Para tanto, será estudado a importância dessa solução, apresentando um panorama de como as entidades responsáveis pela gestão de tráfego aplicam essa tecnologia e, também, resultados de um cenário internacional na cidade de Toronto.

Dessa forma, pretende-se mostrar a flexibilidade da coordenação semafórica em tempo real, bem como a aplicação dessa solução em cidades de diferentes escalas, como em Osasco onde, embora haja atividade industrial considerável, apresenta muitos movimentos pendulares para São Paulo, podendo ser considerada uma cidade dormitório. Outro exemplo é a própria capital, que possui problemas de mobilidade em diferentes níveis devido à grande concentração empregos, população e serviços.

5.1. IMPORTÂNCIA DA COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

A importância da coordenação semafórica pode ser avaliada de muitas formas diferentes, as quais foram levantadas, para este projeto, quatro delas:

- a) Fluidez do trânsito;
- b) Segurança;
- c) Meio Ambiente;
- d) Priorização de veículos.

5.1.1. Fluidez do trânsito

Segundo estimativa de CINTRA (2014), o custo de oportunidade associado ao uso alternativo do tempo gasto pela população nos congestionamentos, chegou a R\$30,2 bilhões, no ano de 2012, somente na cidade de São Paulo. Dessa forma, percebe-se a necessidade de procurar soluções que melhorem a fluidez do trânsito.

Pode-se evidenciar a importância da coordenação de semáforos em tempo real, visto que esta apresenta resultados contundentes em termos de redução de atrasos, aumento da velocidade média, redução do comprimento de filas, entre outros fatores, o que reflete na fluidez do trânsito de maneira geral.

Um exemplo é a aplicação na cidade de Aalborg na Dinamarca, onde a aplicação de um controle em tempo real em oito interseções semafORIZADAS no anel viário mais importante da cidade gerou resultado de 17% na redução nos tempos de viagem nesse trecho, no período de maior congestionamento, ou seja, na hora pico da tarde (AGERHOLM, OLESEN e JENSEN, 2013).

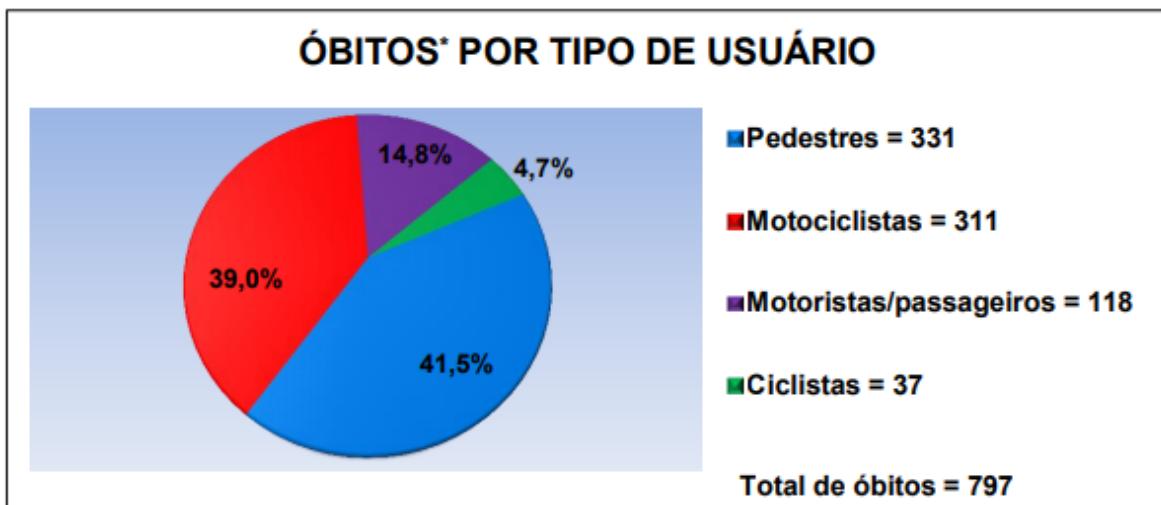
Outro ponto de destaque se refere a condições incomuns em termos de demanda, por exemplo, em dias de shows internacionais e eventos de Fórmula 1, em que muitas vezes a programação semafórica não é alterada e ocorrem inúmeros congestionamentos. Por se adaptar às condições de demanda existentes, a gestão em tempo real consegue otimizar a programação semafórica mesmo nestes casos, reduzindo a necessidade de agentes de trânsito e, também, o impacto desses eventos.

Um exemplo disso se refere a um estudo realizado em Toronto no ano de 1993 com o sistema SCOOT, onde em situações de demanda incomuns como em um jogo de baseball, houve uma redução de 61% nos atrasos semafóricos (DEPARTMENT FOR TRANSPORT, 1995), o que reflete na alta capacidade de adaptação do sistema em tempo real.

5.1.2. Segurança

Segundo GOMES (2014), o gerenciamento de tráfego adota como principal prioridade a segurança. Uma justificativa para esse raciocínio se associa ao elevado número de acidentes que, segundo dados da CET (2017), somente no município de São Paulo, foram registradas 16.252 vítimas de acidentes, no ano de 2017, das quais foram 797 fatais. A distribuição dos óbitos gerados por acidentes de trânsito pode ser vista na figura 5.1.

Figura 5.1 - Óbitos por tipo de usuário na cidade de São Paulo em 2017.



(*) óbitos até 30 dias após o acidente.

Fonte: CET (2017).

Perante todos esses dados, observa-se que a principal vítima do trânsito é o pedestre, o elemento mais frágil do sistema viário, cuja representação é equivalente a 41,5% do número total de óbitos.

Além dessas questões, inúmeras metodologias consideram as perdas econômicas associadas aos acidentes de trânsito. Segundo GOMES (2014), “No Brasil estima-se um custo anual dos acidentes de trânsito de aproximadamente R\$42 bilhões”. Ademais, segundo IPEA (2015), tais perdas se referem a custos associados a pessoas (como custos de remoção, hospitalares e de perda de produção), a veículos (como custos de remoção dos veículos, de danos materiais e de perda de carga) e a outros (como custos institucionais e danos patrimoniais).

Dessa forma, perante à grande quantidade de acidentes e às perdas significativas que eles trazem para a sociedade, torna-se necessário estimular soluções que reduzam o número de acidentes, em especial no que se refere aos pedestres. Uma solução que se prova capaz de lidar com essa questão é a gestão semafórica em tempo real.

No estudo apresentado por VILANOVA (2005), onde se considera os resultados de acidentes de trânsito, antes e depois da implantação da operação em tempo real de 133 interseções semaforizadas na cidade de São Paulo, houve uma redução de 19% nas colisões com vítimas e 44% nos atropelamentos.

Esses resultados estão em conformidade com o apresentado por NETO (2016), que indica que a redução das ociosidades do sistema gerada pela melhor

distribuição dos tempos semafóricos, leva ao aumento de segurança do sistema como um todo.

5.1.3. Meio ambiente

De modo quantitativo, a Tabela 5.1 apresenta a quantidade de poluentes emitidos no Estado de São Paulo, proveniente dos veículos.

Tabela 5.1 - Estimativa de emissão veicular no Estado de São Paulo.

| Categoria | Combustível | Emissão por poluente (t) | | | | | |
|------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|--------------|---------------------|---------------|-------|
| | | CO | NO _x | MP (1) | SO ₂ (2) | COV | |
| Automóveis | Gasolina C | 90.947 | 11.827 | 51 | 131 | 19.273 | |
| | Etanol Hidratado | 39.707 | 3.227 | nd | nd | 7.666 | |
| | Flex-gasolina C | 28.534 | 2.887 | 53 | 148 | 10.960 | |
| | Flex-etanol hidratado | 39.265 | 3.187 | nd | nd | 11.236 | |
| Comerciais Leves | Gasolina C | 15.526 | 1.804 | 9 | 34 | 4.431 | |
| | Etanol Hidratado | 2.654 | 302 | nd | nd | 648 | |
| | Flex-gasolina C | 4.541 | 572 | 9 | 35 | 2.064 | |
| | Flex-etanol hidratado | 11.193 | 941 | nd | nd | 2.431 | |
| | Diesel | 1.826 | 8.330 | 358 | 411 | 484 | |
| Caminhões | Semileves | Diesel | 487 | 2.543 | 119 | 67 | 149 |
| | Leves | | 2.094 | 11.724 | 475 | 325 | 618 |
| | Médios | | 1.377 | 7.887 | 378 | 193 | 442 |
| | Semipesados | | 7.599 | 43.978 | 1.228 | 1.509 | 1.627 |
| | Pesados | | 7.358 | 45.180 | 1.147 | 1.498 | 1.837 |
| Ônibus | Urbanos | Diesel | 4.073 | 20.582 | 590 | 21 | 867 |
| | Micro-ônibus | | 296 | 1.486 | 39 | 2 | 62 |
| | Rodoviários | | 1.835 | 11.439 | 365 | 346 | 537 |
| Motocicletas | Gasolina C | 71.087 | 2.370 | 198 | 21 | 9.136 | |
| | Flex-gasolina C | 2.883 | 195 | 14 | 4 | 406 | |
| | Flex-etanol hidratado | 2.360 | 148 | nd | nd | 395 | |
| Total | | 335.642 | 180.609 | 5.034 | 4.744 | 75.270 | |

Notas: nd – não disponivel.

(1) MP calculado para veículos *flex-fuel* utilizando Gasolina C.

(2) Emissões calculadas pelo método *top-down*.

Fonte: CETESB (2016).

Percebe-se que a quantidade de poluentes emitidos pelos veículos está na ordem de milhares de toneladas, o que impacta de maneira significativa na qualidade de vida da população. Segundo estimativa de CINTRA (2014), a perda econômica no ano de 2012 associada somente à poluição de carros e ônibus no Estado de São Paulo é da ordem de R\$700 milhões/ano.

Nesse sentido, o impacto na qualidade de vida reflete em perdas econômicas bastante significativas e deve ser sempre levado em consideração. Por esse motivo,

como o uso de coordenação em tempo real reduz os atrasos e diminui o tempo que os veículos permanecem nas vias, percebe-se que essa solução pode reduzir a emissão de poluentes como se constata a seguir.

Segundo nota política da CIVITAS (2015), o uso de controle da sinalização em tempo real pode reduzir de 2 a 10% na emissão de CO₂. Além disso, um estudo realizado em Toronto, durante dois meses, utilizando o sistema SCOOT em duas vias arteriais, que juntas totalizam 75 semáforos, mostrou redução de 6% no consumo de combustível, 5% na emissão de monóxido de carbono e 4% na emissão de hidrocarbonetos; quando comparado ao controle semafórico em tempo fixo (U.S. Department of Transportation, 1996).

5.1.4. Priorização de veículos

Uma das características significativas da coordenação semafórica em tempo real é a possibilidade de priorizar o fluxo de alguns veículos em detrimento dos demais. É o caso de ambulâncias que, em casos de emergências, podem entrar em contato com uma central de controle que libere a passagem do veículo modificando a programação semafórica de modo a garantir “ondas verdes” e o rápido atendimento da emergência.

Outro sistema que pode ser priorizado e de modo mais consistente, é o transporte público, uma vez que ferramentas de simulação como o Vissim e o SCOOPTS podem dar maior peso de contagem aos ônibus do que aos veículos de transporte privado, garantindo maior fluidez e priorizando a quantidade de pessoas transportadas e não o número de veículos.

Segundo nota política da CIVITAS (2015), o uso de uma programação semafórica inteligente que permita priorizar os ônibus, pode levar a reduções da ordem de 3 a 16% no tempo de viagem para os usuários do transporte público. Entretanto, este mesmo documento destaca a complexidade desta solução que deve ser implementada de tal forma a não prejudicar demasiadamente outros fluxos de tráfego, como de pedestres, ciclistas, carros, entre outros.

Outro exemplo disso é o caso da cidade de Portland em Oregon nos Estados Unidos, onde combinando o sistema de priorização de ônibus com a tecnologia dos semáforos, que leva a um aumento do tempo de verde ou a redução do vermelho de

acordo com a presença de ônibus na via, gerou reduções da ordem de 5 a 8% no tempo de viagem dos ônibus em uma via arterial (PROPER, 1999).

Além da redução do tempo, o sistema permite reduzir a quantidade de veículos necessários para suprir a mesma demanda das vias, ou melhorar a qualidade da população com o aumento da frequência com que eles trafegam.

5.2. CASO INTERNACIONAL - TORONTO

Localizada na costa noroeste do lago Ontário, a Região Metropolitana de Toronto, segundo STATISTICS CANADA (2016), possui uma população de 5,9 milhões de pessoas. Toronto, por sua vez, é a maior cidade do Canadá, com 2,7 milhões de habitantes e compreende uma área de 630 km². O município possui 2.358 interseções semaforizadas, das quais 287 (12%) são controladas pelo sistema SCOOT, em tempo real (PREFEITURA DE TORONTO, 2018), em pontos estratégicos que atendem aos critérios de melhor funcionamento desse sistema. Tais critérios foram observados e escolhidos para o planejamento da expansão do SCOOT durante uma demonstração do sistema no início dos anos 90, a qual será o tema de análise sobre a implantação de semaforização em tempo real.

Segundo GREENOUGH e KELMAN (1993), o SCOOT foi introduzido no contexto da informatização da *Metropolitan* Toronto em 1992. Na época, o principal sistema de controle de semáforos era o *Main Traffic Signal System* (MTSS) que controlava e monitorava aproximadamente 1.750 interseções operadas. Em comparação com o SCOOT, o MTSS existente operava com um conjunto de planos de tempo-fixo predeterminados para cada interseção. Esses planos eram atualizados de acordo com um cronograma de coleta de dados de contagem de tráfego.

Para a realização da demonstração, 75 cruzamentos foram removidos do controle MTSS e habilitados para serem controlados pelo SCOOT. A demonstração SCOOT demandou 350 detectores.

5.2.1. Áreas da Demonstração

O projeto de demonstração foi geograficamente estruturado para avaliar a operação em tempo real em três diferentes áreas. Elas foram escolhidas por sua

distinção e complexidade operacional, para que a Prefeitura de Toronto pudesse avaliar os benefícios do sistema SCOOT sob várias condições de tráfego e ambientais. As três redes de semáforos cobertas pelo sistema SCOOT foram:

- a) Distrito Central de Negócios – uma densa rede no centro de Toronto com 42 semáforos;
- b) *Lake Shore Boulevard* - um dos principais acessos ao centro com 20 semáforos, que é uma rota alternativa paralela a uma grande via expressa, a *Gardiner Expressway*; e
- c) *Yonge Street (North)* – acesso a uma área comercial com 13 semáforos, que inclui uma interseção com a Rodovia 401.

A intenção da demonstração da operação do SCOOT foi comparar o sistema em tempo real com o existente sistema de tempo-fixo e determinar se o SCOOT é mais adequado para alguns tipos de condições de operação ou tipos de vias na *Metropolitan Toronto*. Outras questões importantes foram a adequação do SCOOT para melhorar as operações de eventos especiais que geram grandes volumes repentinos de tráfego (por exemplo, eventos esportivos) e em vias paralelas ou em interseções com rodovias, onde o SCOOT poderia operar em conjunto com a gestão de tráfego da própria rodovia.

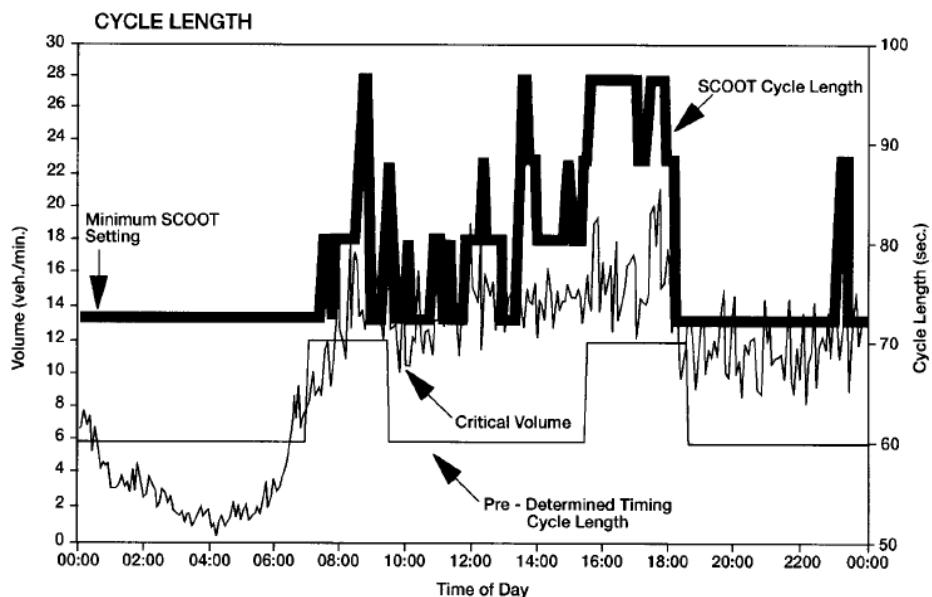
5.2.2. Resultados da Avaliação

Os resultados foram significativamente positivos com a implementação do SCOOT comparando-o com os "recém-otimizados" planos de tempo-fixo da MTSS. Outro propósito da avaliação da Prefeitura de Toronto, por outro lado, era determinar qual era o custo-benefício do SCOOT comparando com o desempenho do sistema da época.

Os estudos de avaliação do desempenho do sistema SCOOT foram realizados durante um período de seis semanas, de forma contínua, entre maio e junho de 1993. Onze tipos de estudos de campo foram realizados para quantificar a mudança nas operações na rua entre o sistema SCOOT e os planos de tempo-fixo do MTSS. Os dois modos de controle do sistema foram se revezando diariamente. A alternância entre os dois modos de operação em um ou dois dias permitiu que ambos fossem avaliados e comparados dentro do contexto de condições semelhantes de tráfego, econômicas e ambientais.

Os resultados do estudo mostraram que o sistema SCOOT, de fato, ajustava automaticamente as temporizações dos sinais em resposta direta e imediata às mudanças nas condições reais de tráfego. Uma comparação da operação do SCOOT com a do sistema já existente é mostrada na Figura 5.2. O gráfico mostra o ciclo do SCOOT em resposta aos volumes altamente variáveis em um cruzamento no centro da cidade. De modo geral, à medida que o volume de tráfego aumenta, o SCOOT responde aumentando a duração do ciclo.

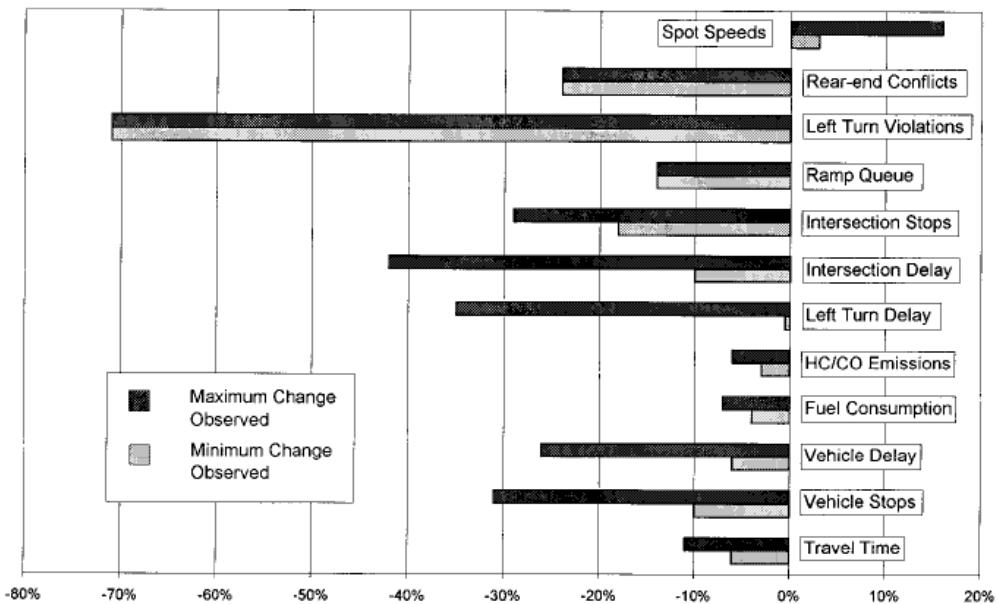
Figura 5.2 - Comparação dos ciclos semafóricos



Fonte: GREENOUGH e KELMAN (1993).

Um resumo dos resultados é fornecido na Figura 5.3. Os resultados indicam que houve melhorias gerais no desempenho do sistema SCOOT em relação ao existente: reduções significativas nos tempos de viagem, paradas e atrasos dos veículos. Por exemplo, durante os períodos de pico, a economia de tempo de viagem foi de 6 a 11% nas três áreas de estudo. À noite, após os jogos de beisebol do *Blue Jays*, a economia de tempo de viagem de até 34% foi medida no *Lake Shore Boulevard*. Houve melhorias na segurança dos motoristas e também estimativas de reduções nos impactos ambientais, energéticos e de saúde pública associados ao consumo reduzido de combustível e às emissões de poluentes.

Figura 5.3 - Resumo da avaliação dos resultados



Fonte: GREENOUGH e KELMAN (1993).

Em média, houve apenas aumentos marginais nos atrasos dos pedestres que atravessavam as principais vias arteriais controladas pelo SCOOT. Se desejado, os parâmetros de operação do sistema SCOOT podem ser ajustados para minimizar esses atrasos. Os tempos de viagem do sistema de transporte público foram afetados pelos tempos de permanência nas paradas; portanto, foi difícil prever a hora exata de chegada dos ônibus e *streetcars* (antigos bondes elétricos) nos cruzamentos; nestas circunstâncias, esses veículos não conseguiram poupar tempo de viagem com o sistema SCOOT, entretanto também não sofreram atrasos significativos.

5.2.3. Custos e Benefícios

O custo inicial previsto para a demonstração do SCOOT foi de aproximadamente CAD\$ 1,1 milhão. No entanto, o valor do total do projeto foi orçado em CAD\$ 1,225 milhão, incluindo o suporte ao gerenciamento do projeto e a supervisão de contratos durante a instalação e teste do sistema. Cerca de metade desse valor total do projeto, está relacionado aos custos de pesquisa, de fornecimento e de instalação do subsistema de detectores.

A estimativa de vida útil de uma instalação SCOOT é de 10 anos, consequentemente, se ao longo desse período os benefícios ultrapassassem o custo do projeto, ele teria um resultado líquido positivo e seria considerado viável.

Estimou-se uma economia de CAD\$ 1,460 milhão, em apenas um ano, avaliando fatores como consumo de combustíveis, emissões de gases nocivos à saúde e ao ambiente, tempo de viagem de veículos comerciais e número de colisões. Ponderando essa estimativa, o sistema SCOOT alcançou benefícios equivalentes aos custos de capital em apenas 10 meses de operação.

Particularmente, apenas três categorias de benefícios como consumo de combustível, tempo de viagem de veículos comerciais e número de colisões já poderiam justificar o projeto SCOOT considerando a relação benefício/custo. Deve-se ressaltar que existiriam ainda outros benefícios como evitar os impactos de eventos especiais, incidentes e construção, mitigação dos efeitos sazonais e climáticos, mas devido à dificuldade em quantificá-los não foram incluídos na análise.

Outra análise que poderia ser realizada com base na relação benefício/custo é o impacto sobre os requisitos de recursos humanos, que corresponde à significativa parcela dos custos operacionais anuais. Sem o sistema SCOOT seria necessário seis vezes mais funcionários para garantir a performance demonstrada. O uso efetivo de recursos humanos é uma consideração muito importante para as agências governamentais, em geral, devido a pressões fiscais.

Os benefícios do SCOOT são ainda mais pronunciados quando se considera que o sistema implementado não envelhece, ou seja, não há necessidade de realizar atualizações rotineiramente, evitando esforços. Além disso, o SCOOT otimiza automaticamente o controle do semáforo durante a semana, fins de semana e feriados reduzindo assim, a necessidade de pessoas para coleta de dados e ajuste de planos de semafORIZAÇÃO, sendo, portanto vantajoso, em relação ao sistema manual.

5.2.4. Expansão do SCOOT

A expansão do SCOOT foi baseada numa abordagem estratégica, integrada e incremental à mudança de sistema, ao invés de uma substituição global do sistema de uma só vez. A abordagem incremental não apenas forneceu uma transição mais suave para a implementação da mudança do sistema, mas também visou atualizar as interseções que mais se beneficiariam das melhorias operacionais, proporcionando uma aplicação mais eficiente economicamente. Além disso, haveria

flexibilidade para a utilização tecnologias ainda não desenvolvidas que poderiam ir além da capacidade do SCOOT.

Os critérios utilizados para a seleção de interseções para a expansão foram fundamentados na demonstração e alinhados com o planejamento da *Metropolitan Toronto* e são descritos a seguir:

- a) Tipo de Rede - o SCOOT oferece mais benefícios em redes lineares do que em malhas;
- b) Volume de Tráfego - vias com volumes veiculares mais altos proporcionam benefícios a mais usuários;
- c) Variação do Volume de Tráfego - as vias com alta variabilidade diária nos fluxos de tráfego se beneficiam da capacidade do sistema SCOOT de se adaptar às condições de tráfego;
- d) Congestionamentos - as vias onde ocorrem congestionamentos com maior regularidade se beneficiam mais;
- e) Faixas Exclusivas - vias com faixas exclusivas para algum tipo de veículo, como corredores de ônibus ou ciclofaixas, proporcionam benefícios para mais usuários;
- f) Geometria da Via - vias com faixas exclusivas para conversão, por exemplo, são mais beneficiadas;
- g) Fricção do Lateral da Via - vias com pouco atrito lateral (por exemplo, estacionamento na rua, cruzamentos de pedestres) se beneficiam mais do que aquelas em que o atrito lateral afeta regularmente o fluxo de tráfego; e
- h) Tráfego de Eventos Especiais - áreas nas quais vias arteriais atendem ao tráfego de eventos especiais obtém benefícios significativos do controle do SCOOT.

5.2.5. Problemas Detectados Atualmente

Segundo a PREFEITURA DE TORONTO (2018), o SCOOT é mais adequado em corredores arteriais com semáforos com grandes ciclos (de 100 a 120 segundos) do que em áreas congestionadas com tempos de ciclo muito mais curtos (de 70 a 80 segundos), tal como no centro da cidade. Também, o SCOOT prioriza os veículos motorizados que trafegam na via, pois minimiza o atraso do tráfego no corredor principal aumentando a duração do ciclo para alocar mais tempo de verde; portanto,

o SCOOT pode representar um desafio para atender às necessidades de pedestres e ciclistas que não são contabilizados pelos laços detectores nas vias.

No caso do transporte público, a dificuldade do modelo de simulação de prever o tempo de parada dos veículos limita seus ganhos, em especial no que diz respeito ao tempo de viagem. Por este motivo, o SCOOT acaba tendo resultados mais efetivos para os carros, o que, inclusive, pode estimular o uso do transporte privado.

A instalação do SCOOT também mostrou ser mais cara quando comparada a outros sistemas, pois requer instalação em uma rede (em vez de apenas uma interseção) para obter benefícios. Ademais, exige a instalação de detectores próximos a cada uma das interseções controladas.

Por esses motivos, a expansão do SCOOT ainda está ocorrendo aos poucos, enquanto isso, outros sistemas de controle de otimização off-line (tempo-fixo) estão sendo atualizados para garantir um bom nível de serviço nos cruzamentos de Toronto.

5.3. CASO DE OSASCO

No caso da cidade de Osasco, o grupo realizou uma visita ao órgão responsável pelo monitoramento de câmeras e pela gestão semafórica na cidade de Osasco, o COI – Centro de Operações Integradas, que é encarregado de cuidar dos 220 semáforos da cidade, dentre os quais 20 operam em tempo real. As principais dificuldades apresentadas são:

- a) A contagem dos veículos era feita com o uso de laços indutivos, entretanto, com o passar do tempo, percebeu-se que estes detectores rompiam com a passagem do tráfego pesado nas vias, sendo necessária a sua substituição por laços virtuais;
- b) O investimento necessário para a implantação de semáforos inteligentes é relativamente elevado, de tal forma que a prefeitura local opte por utilizar seus recursos em outras obras, como a pintura de escolas e o recapeamento de pavimentos;
- c) Os órgãos públicos priorizam os semáforos de contagem regressiva em detrimento à operação em tempo real de semáforos;

- d) O Shopping união deveria arcar com os custos do aumento da rede de semáforos inteligentes na Av. dos Autonomistas, como uma medida mitigadora dos impactos causados durante a construção e operação do empreendimento. Entretanto, embora com quase 10 anos de operação do shopping, ainda não foi tomada nenhuma medida em prol da atenuação desses impactos;
- e) Foi necessário limitar o tempo de ciclo em 125 segundos, pois, caso este valor pudesse variar livremente, os estágios semafóricos para os veículos poderiam ser extremamente longos, enquanto que o de pedestres não variariam. Assim, caso os pedestres tenham que esperar demasiadamente para atravessar a via eles tendem a não respeitar a sinalização semafórica, o que elevaria o risco de acidentes;
- f) Não há estudos que mostram o ganho percentual, como redução no tempo de viagem ou no número de acidentes, com a implantação do SCATS na cidade de Osasco, de tal forma que os resultados sejam limitados a avaliações subjetivas da população como “melhorou bastante o trânsito”;
- g) Não há estudos sobre quais interseções devem receber os semáforos em tempo real, como uma lista de priorização, por exemplo.

5.4. CASO DE SÃO PAULO

O caso de São Paulo será apresentado considerando-se a entrevista realizada no Núcleo de simulação da CET e alguns resultados apresentados no Boletim Técnico 38 (VILANOVA, 2005), que mostra a experiência dos semáforos em tempo real na cidade de São Paulo.

5.4.1. Visita à CET

Durante visita feita ao Núcleo de Simulação de tráfego da CET-SP foi possível ter um panorama dos principais problemas de gestão de tráfego enfrentados na cidade, em especial no que se refere ao uso de ferramentas de simulação.

Sendo assim, no contexto de microssimulação e o uso da tecnologia de semáforos em operando em tempo real, algumas dificuldades práticas foram destacadas, dentre elas:

- a) Por apresentar alto custo de instalação e manutenção e serem extremamente frágeis, as fibras ópticas se configuram como um fator limitante da tecnologia de semáforos inteligentes. Sendo assim, existe uma parceria da USP e a CET para utilizar *chips* dentro dos controladores para enviar informações para a central de operações semafóricas. Entretanto, não obstante o projeto pudesse viabilizar mais obras de semáforos inteligentes, a preocupação com *hackers* que podem invadir o sistema e provocar caos na cidade, simplesmente alterando a programação semafórica, torna seu uso inviável atualmente;
- b) A questão da governança se mostrou bastante relevante, visto que o conflito de interesses entre municípios vizinhos ou entre instituições que lidam com o trânsito, acaba gerando dificuldades na implantação de obras que muitas vezes são simples;
- c) A falta de dados é outro ponto bastante relevante, uma vez que a cidade apresenta escassez de dados consistentes para aplicar na modelagem, sendo muitas vezes empregada a pesquisa O/D, que só é atualizada a cada 10 anos, ou seja, o parâmetro se torna impreciso pela rápida mudança no trânsito da cidade. Para mitigar esse problema a CET vem buscando fontes alternativas na obtenção dos dados como: parceria com o Waze, dados de radares, pesquisa O/D de carga e contagens de campo.
- d) O núcleo de simulação da CET utiliza o programa Vissim para projetos de microssimulação, que se mostra ferramenta eficiente para a gestão do tráfego. Entretanto, é utilizada a quinta versão da ferramenta, enquanto que nos laboratórios da POLI utiliza-se a décima versão. Sendo assim, eles têm uma limitação nas funcionalidades do software e um exemplo disso é a falta das extensões EPICS e BALANCE que fazem o modelo do Vissim trabalhar em tempo real.

5.4.2. Resultados com a implantação de semáforos em tempo real

Além da experiência prática adquirida por meio da visita ao núcleo de simulação, para este projeto foram levantados os resultados que a gestão semafórica em tempo real vem gerando na cidade de São Paulo.

Neste contexto, o trabalho de VILANOVA (2005), apresenta uma série de benefícios, como:

- a) O ganho em uma rede semafórica operando em tempo real no trecho da Av. Rio Branco e Av. Norma Gianotti em termos de redução nos atrasos veiculares foi da ordem de 40% no período da manhã;
- b) A redução dos atrasos em uma rede de semáforos entre a Rua Camargo e a Rua Alvarenga chegou a 53% no período das 10:00 às 16:00;
- c) Na média, chegou-se a redução no tempo de espera em semáforos da ordem de 20%, valor superior à média de outras cidades ao redor do mundo que ficam entre 10 e 15%;
- d) Redução de 19% no número de acidentes e de 44% no número de atropelamentos onde havia a Central de Tráfego em Área-1 (CTA-1), com atuação no centro expandido da cidade de São Paulo.

Vale ressaltar que os benefícios da aplicação dos semáforos em tempo real, em São Paulo, podem apresentar valores altos devido à obsolescência e ineficiência dos sistemas empregados anteriormente à implantação do SCOOT. Caso os sistemas anteriores estivessem “otimizados”, os benefícios poderiam ser ligeiramente menores.

5.5. Considerações sobre os casos três casos

Por intermédio de todas as considerações apresentadas, pode-se perceber que a tecnologia em tempo real já é aplicada no cenário nacional e tem potencial de ampliação de seu uso, apresentando uma série de vantagens quando comparado com o controle em tempo fixo, como a redução de até 61% nos atrasos em dias de jogos de baseball em Toronto, redução de 44% no número de atropelamentos em São Paulo, redução de 2 a 10% na emissão de gás carbônico na Europa, entre muitas outras.

Entretanto, ela apresenta uma série de dificuldades como o elevado custo de implantação. O estudo de SELINGER e SCHMIDT (2009) mostra que a experiência nos Estados Unidos gerou custos médios totais por interseção para a solução com o sistema SCOOT de \$49.000, enquanto que com o SCATS este valor sobe para \$60.000.

Somando-se a isso, as experiências de São Paulo e Osasco mostraram outras considerações práticas, como a impossibilidade de utilizar chips ao invés de fibra ótica pelo risco de invasão do sistema por *hackers*, falta de dados consistentes e atualizados para calibrar e validar modelos de simulação e, até mesmo, a falta de programas que consigam simular a tecnologia em tempo real. Algumas dessas soluções necessitariam de investimentos em segurança cibernética, o que poderia tornar a implantação inviável financeiramente.

Sendo assim, ponderando os pontos positivos com os negativos, a solução poderia ser empregada nas regiões mais críticas das cidades, como a região central de São Paulo. Além disso, a adoção de medidas para obrigar a iniciativa privada a investir na ampliação da sinalização semafórica inteligente, como no caso de Osasco, mostra bastante potencial, se bem fiscalizado. É o caso do Plano Diretor de Osasco (Lei Complementar Nº 125, de 3 de agosto de 2014), que prevê a exigência de medidas mitigadoras na implantação de polos geradores de tráfego.

Sob outro ponto de vista, a cidade de Osasco mostrou mau uso dos recursos públicos, uma vez que, se por um lado a cidade não possui verba suficiente para investir em semáforos inteligentes, optando por outras obras relevantes como a pintura de escolas e a pavimentação de vias, por outro lado, há forte incentivo ao uso da tecnologia de semáforos com contagem regressiva. Segundo MING (2016), embora a população seja favorável ao uso da tecnologia de contagem regressiva, o benefício de seu emprego é controverso e, em muitos casos, gera aumento no número de desrespeitos ao vermelho, o que reflete no aumento de acidentes.

Outro ponto de destaque é que as cidades brasileiras mostram bastante ineficiência na gestão de tráfego. No caso de Osasco não há estudos que mostrem os ganhos percentuais da implantação do sistema SCATS e, no caso de São Paulo, faltam ferramentas computacionais para a microssimulação com o programa Vissim.

No cenário internacional, existem inúmeros casos de implantação de sucesso da tecnologia em tempo real, como o de Toronto, onde vale destacar que o poder financeiro dos órgãos públicos é sensivelmente maior ao das cidades brasileiras,

entretanto a vontade de melhorar os problemas decorrentes dos congestionamentos também o é.

Por isso, além dos custos diretos associados com as soluções inteligentes, consideram-se questões como os custos para a sociedade mediante aos maiores atrasos no trânsito, a segurança, a emissão de poluentes, entre outros fatores.

Esses valores são quantificados e estudados para avaliar a solução que está sendo implantada, de tal forma que, no caso de Toronto, calculou-se o *payback* da solução, onde os custos estão associados com a implantação, manutenção e conservação e o retorno seria os benefícios associados à qualidade de vida da população. Com isso, no estudo de caso, concluiu-se que o retorno do investimento seria em menos de um ano, o que é muito significativo e pode justificar o seu uso.

Sendo assim, embora São Paulo apresente estudos sobre ganhos associados ao uso dos semáforos inteligentes, como pode ser visto em dados públicos, como boletins e notas técnicas, a cidade não aparenta utilizar metodologias semelhantes ao caso de Toronto, por exemplo, contabilizar os ganhos econômicos e aplicar uma metodologia comparativa, como o *payback*.

No caso de Osasco, o cenário é ainda mais crítico, visto que os benefícios médios não são contabilizados e, muito menos, disponibilizados ao público por meio de uma gestão de tráfego transparente, como é o caso de São Paulo. A tabela 5.2 sintetiza algumas das informações levantadas.

Tabela 5.2 – Comparação entre casos

| Cidade de estudo | Osasco | São Paulo | Toronto |
|---|--------|-----------|---------|
| Quantidade de semáforos | 220 | 5742 | 2358 |
| Quantidade de semáforos em tempo real | 220 | 105 | 287 |
| Início da operação em tempo real | 2007 | 1996 | 1993 |
| Software de simulação empregado | SCATS | SCOOT | SCOOT |
| Quantifica benefícios (redução de acidentes, tempo de viagem e afins) | não | sim | sim |
| Considera análises econômicas-financeiras para avaliar a qualidade da solução | não | não | sim |

Fonte: Elaboração própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto tratou de abordar inúmeros aspectos relacionados à gestão semafórica em tempo real, tipos de detectores, funcionamento do sistema, alguns softwares que realizam essa gestão e programas de microssimulação, que permitem avaliar essa solução, benefícios, dificuldades de aplicação, entre outros, sendo o objetivo inicial realizar uma análise partindo de um modelo de uma região específica com problemas de congestionamento, para depois explicitar casos nacionais e internacionais de aplicação.

O início do processo, então, foi a modelagem e calibração da rede da Av. dos Autonomistas e, deste aspecto, é válido salientar que houve uma importante contribuição técnica deste projeto por conta do processo de calibração realizado. Deve-se também ressaltar que a qualidade da modelagem afeta os resultados; no caso deste trabalho, de forma a melhorar ainda mais o modelo, seria válido incluir na área de estudos uma região maior, agregando vias adjacentes e paralelas à Av. dos Autonomistas.

Além disso, seria interessante incluir na modelagem dados mais confiáveis das linhas de ônibus, bem como dados de carregamento destas linhas, o que permitiria avaliar melhor o impacto das mudanças associado ao volume de pessoas afetado e não de veículos como foi possível fazer com os dados disponíveis.

Ainda sobre a primeira parte da análise, não foi possível realizar a aplicação da gestão em tempo real na rede construída, calibrada e validada, diante da falta de uma licença para utilizar o BALANCE e o EPICS. No entanto, o valor da modelagem não se perde por conta da impossibilidade de aplicação da solução proposta. A modelagem e as simulações, realizadas são uma contribuição prática para os órgãos públicos locais, uma vez que demonstram que modelos, e não somente este, após o processo de calibração e validação servem, e devem ser utilizados, como ferramenta de apoio para tomadas de decisão. Ademais, assim que as licenças estiverem disponíveis, o modelo construído, calibrado e validado pode ser utilizado em estudos futuros que visem à continuação deste trabalho. Como apresentado no corpo deste trabalho, a modelagem de tráfego é um importante artifício para planejamento e operação de transportes, permitindo a simulação de diversos cenários e é imprescindível que a modelagem da gestão semafórica em tempo real

se torne uma ferramenta mais conhecida e que sirva de subsídio para o planejamento eficiente do tráfego nas cidades.

No âmbito gerencial de cidades, diversas fontes e bibliografias demonstram os impactos da aplicação da coordenação semafórica em tempo real. Muitas são as cidades do mundo que utilizam essa ferramenta para melhorar a qualidade de vida de seus cidadãos, no entanto não enxergam ou atingem seu potencial caso a empregassem de forma adequada.

Por um lado, há a limitação orçamentária que restringe o seu uso e, por outro, existe a falta de consideração monetária dos benefícios que a gestão em tempo real traz. O caso de Toronto apresenta o tamanho do ganho social, ambiental e, consequentemente, econômico, com a implantação deste recurso, o que deveria ser mais explorado pelos casos brasileiros, a avaliação econômico-financeira da solução é imperativa e seria, caso fossem provados ganhos, um grande estímulo para reconhecimento e disseminação da gestão semafórica em tempo real.

Vale lembrar que, tanto a conversa com a Prefeitura de Osasco, quanto a com o Núcleo de Semáforos da CET, não foram realizadas pela ausência de resposta das solicitações feitas pelo grupo. Acredita-se que seriam muito ricas em informação para complementar a análise realizada.

Apesar dos limitantes e dos obstáculos que regeram a produção desse estudo, a análise evidenciou pontos importantes a serem contabilizados pelos planejadores de cidades e apresentou o relevante instrumento da microssimulação, o qual permite visualizar os efeitos da gestão em tempo real no processo de viabilidade técnica da solução, atuando como subsídio à tomada de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYALA, R. J. L. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores a serem considerados no processo de calibração.** Universidade de Brasília, 2013.

BARCELÓ, J. **Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation.** In:_. Fundamentals of traffic Simulation. 1. ed. Barcelona: Springer, 2010. cap.1, pg.1-62.

BERNARDINIS, M. A. P. **Apostila – Engenharia de Tráfego.** Universidade Federal do Paraná, 2018.

BETHONICO, F. C. **Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas.** Dissertação (Pós Graduação em Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CÂMARA, P.; MACEDO, L. **Restrição veicular e qualidade de vida: o pedágio urbano em Londres e o rodízio em São Paulo.** 2004.

CET – COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. **Relatório anual de acidentes de trânsito.** São Paulo, 2017.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissões veiculares no estado de São Paulo.** São Paulo, 2016.

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

CIVITAS – Cleaner and better transport in cities. **Intelligent Transport Systems and traffic management in urban areas.** 2015

CHILUKURI, B.F. et al. **Adaptive Signal Control II.** Department of Civil and Environmental Engineering, University of Utah. 2003.

DEPARTMENT FOR TRANSPORT. **The “SCOOT” Urban Traffic Control System.**
Traffic Advisory Leaflet, Londres, Abril 1995.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil, 1974.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Manual de projeto geométrico de travessias urbanas, 2010.

_____. **Manual de projeto de interseções**, 2005.

DENATRAN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **CTB - Código de trânsito Brasileiro**: Instituído pela Lei nº 9.503 de 23 de Setembro de 1997 - Brasília.

_____. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume v - Sinalização Semafórica**. 2014.

_____. **Manual de semáforos**. 2.ed. Brasília, 1984.

DUARTE, T. L. **Centro de controle, engenharia e gestão de tráfego**. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego – CET, 2016.

FELLENDORF, M.; VORTISCH, P. **Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM**. In: BARCELÓ, J.(Orgs.). **Fundamentals of traffic Simulation**. 1. ed. Barcelona: Springer, 2010. cap.2, pg.63-94.

GOMES, A.P. **NT236 - Os benefícios da operação de semáforos em tempo real**. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET, 2014

GREENOUGH, J.C. **A Performance Report on the Metropolitan Toronto SCOOT System: An Advanced Traffic Adaptive Control System**. Urban Traffic Engineers Council, Institute of Transportation Engineers, 1994.

GREENOUGH, J.C., KELMAN, W.L. **Metro Toronto scoot: traffic adaptive control operation.** ITE Journal on the WEB, 1998.

HAIGH, B., RICHARDSON, D.B., GREENOUGH, J.C. **The Methodology Used to Evaluate SCOOT in Metropolitan Toronto.** District 7 Annual CITE Meeting, Windsor, Ontario, Canadá, 1994.

HICKS, B.; CARTER, M. **What have we learned about ITS? Arterial management.** In What have we learned about intelligent transportation system?, 2000, Washington D.C. Federal highway administration.

HOLLANDER, Y. ; LIU, R. **The principles of calibrating traffic microsimulation models.** Revista Transportation, Washington, v.35, n.3, pg.347-362, Maio de 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico**, 2010. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 ago. 2018.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Estimativa dos custos de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do Ipea:** Relatório de pesquisa. Brasília, 2015.

LACERDA, V. M. ; NETO, M. M. C. **Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do Vissim para vias arteriais urbanas.** In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. [2014?], Curitiba. Artigo. Curitiba: ed. Anpet, [2014?]. Pg.1-12.

LEITE, G.M.L.; **Engenharia de tráfego: métodos de pesquisa, características de tráfego, interseções e sinais luminosos.** 1. ed. Brasil. 1980.

LIEBERMAN, E.; RATHI, A. K. **Traffic Simulation.** In: GARTNER, N.; MESSER, C.M.; RATHI, A. K. (Eds.) The revised monograph on traffic flow theory. EUA: Federal Highway Administration, 1997. Cap. 10.

MAIA, F. V. B. **Calibração e validação de modelos de meso e microssimulação do tráfego para avaliação de intervenções tático-operacionais na malha viária**

urbana. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARTE, C. H. **Atividade prática 3 (lab_ITS_03):** VISSIM (Construção de uma rede de simulação). São Paulo, Roteiro elaborado para a disciplina Sistemas inteligentes de Transporte (ITS) da POLI-USP, 2017.

_____. **Atividade prática 4 (lab_ITS_04):** VISSIM (Construção de uma rede de simulação). São Paulo, Roteiro elaborado para a disciplina Sistemas inteligentes de Transporte (ITS) da POLI-USP, 2017.

MENESES, H. B.; LEANDRO, C. H. P.; LOUREIRO, C. F. G. **Indicadores de desempenho para sistemas centralizados de controle do tráfego urbano em tempo real.** CTAFOR, Fortaleza. 2018.

MING, S. H. **NT252 – Semáforos com contagem regressiva.** São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego – CET, 2016.

NETO, J.C. **NT243 - Semáforo ser ou não ser inteligente?:** Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET, 2016

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport.** 4. ed. Reino Unido: WILEY. 2011.

PARK, B. e SCHNEEBERGER, D. **Microscopic Simulation Model Calibration and Validation.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1856. Transportation Research Board of The National Academies, Washington D.C. 2003, pp. 185-192.

PERON, L. **Contribuição metodológica para aplicação de prioridade semafórica condicional em corredores de ônibus.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PIETRANTONIO, H. **Notas de aula sobre engenharia de tráfego.** São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes da POLI-USP, 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OSASCO. **Plano Municipal de Mobilidade Urbana de Osasco – PMMU,** 2016.

PREFEITURA DE TORONTO. **Página institucional.** 2018
<<https://www.toronto.ca/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

PROPER, A. T. **Intelligent Transportation Systems Benefits:** 1999 Update. *Federal Highway Administration.* Washington, 1999.

PTV AG. **PTV Vissim 10 user manual.** Karlsruhe: PTV AG, 2018, 1151 p.

SÃO PAULO. **Portaria 80/13 - DSV/SMT,** 2013. Disponível em:
<http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=06082013P%20000802013SMT%20%20%20DSV>. Acesso em: 26 nov. 2018.

SARNO, C.C.B. **Benefícios imediatos da redução das velocidades máximas permitidas:** O caso das Marginais Tietê e Pinheiros. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET, 2016.

SELINGER, M. P. E.; SCHMIDT, L. **Adaptive Traffic Control Systems in the United States.** HDR Engineering, Inc. 2009.

SKABARDONIS, A.; MAY, D.M. **Simulation Models for Freeway Corridors: State-Of-The Art Research Needs.** *Transportation Research Board,* 830. National Research Council, Washington, 1998.

SINDIPEÇAS - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Relatório da frota circulante.** São Paulo, 2018.

STEVANOVIC, A. **Adaptive Traffic Control Systems:** Domestic and foreign state of practice. 1.ed. Washington: NCHRP, 2010

STATISTICS CANADA. **Census.** 2016. Disponível em <<https://www12.statcan.gc.ca>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

TOM TOM. **Página Institucional.** Disponível em <https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL>. Acesso em: 19 jun. 2018.

U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Intelligent Transportation Infrastructure Benefits:** Expected and Experienced. 1. ed. Operation Timesaver, Washington. 1996.

VILANOVA, L. M. **Boletim Técnico 38 - O Controle de Semáforos em Tempo Real.** São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET, 2005.

WEBSTER, F. V. **Traffic Signal settings, Road Research Technical, Paper No.39.** Londres: HSMO, 1958.

WEBSTER, F. V.; COBBE, B. M. **Traffic Signals, Road Research Technical, Paper No. 56.** Londres: HSMO, 1966.

WIEDEMANN, R. **Simulation des Strassenverkehrsflusses.** Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe, Alemanha. 1974.

APÊNDICE A – CÁLCULO DO GEH

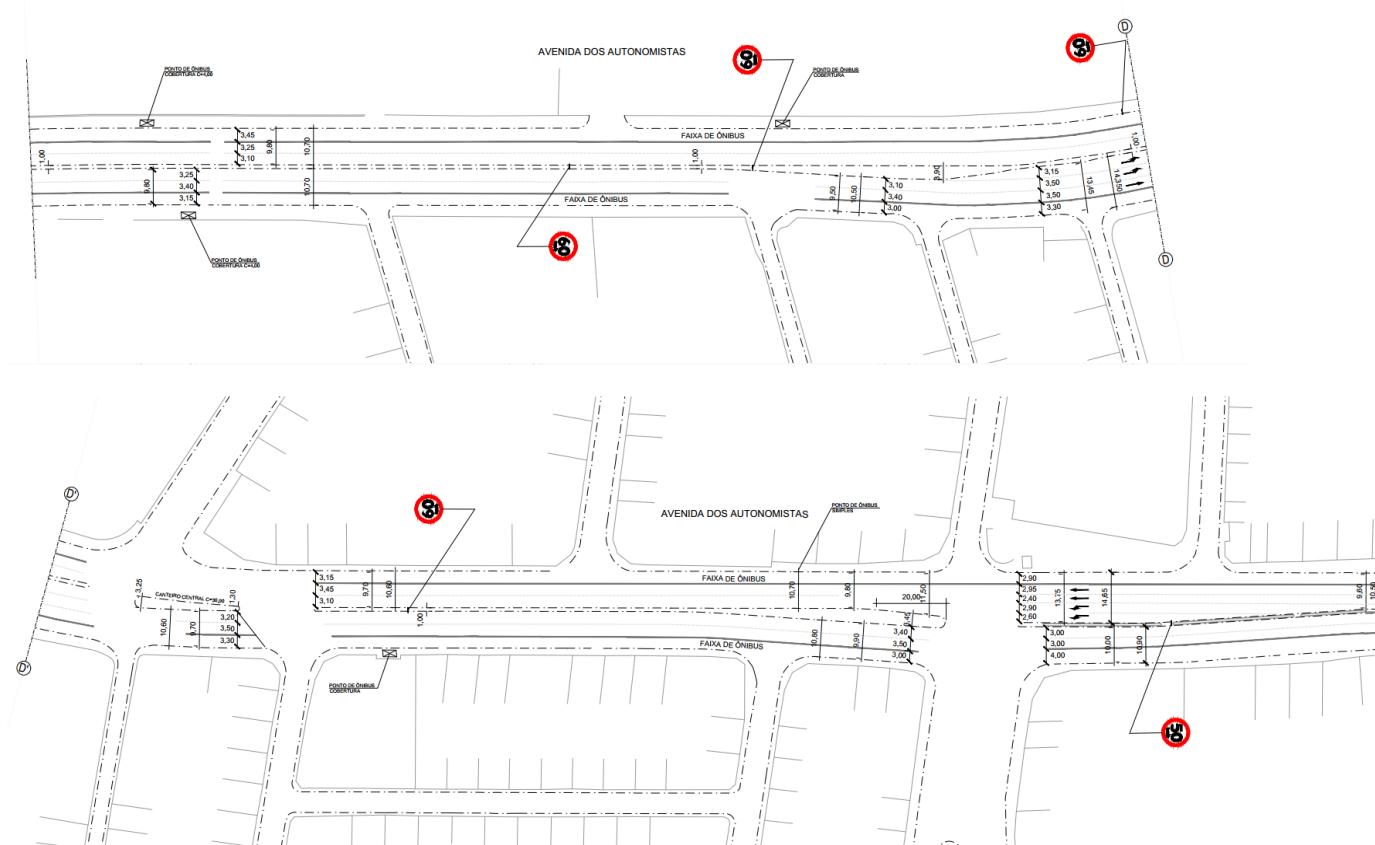
Tabela A.1 – Volumes extraídos do modelo por movimento de contagem

| Ponto | Movimento | Volume Real | Volume Modelo | $\frac{VolumeModelo}{VolumeReal}$ | GEH |
|-------|-----------|-------------|---------------|-----------------------------------|-----|
| P5 | Mov1+2 | 1.045 | 1.099 | 95,1% | 1,6 |
| P5 | Mov2 | 469 | 506 | 92,7% | 1,7 |
| P5 | Mov3 | 113 | 112 | 100,9% | 0,1 |
| P5 | Mov4 | 664 | 649 | 102,3% | 0,6 |
| P5 | Mov5 | 948 | 908 | 104,4% | 1,3 |
| P5 | Mov6 | 6 | 6 | 100,0% | 0,0 |
| <hr/> | | | | | |
| P6 | Mov1 | 663 | 560 | 118,4% | 4,2 |
| P6 | Mov10 | 372 | 340 | 109,4% | 1,7 |
| P6 | Mov2 | 292 | 280 | 104,3% | 0,7 |
| P6 | Mov3 | 77 | 69 | 111,6% | 0,9 |
| P6 | Mov4 | 73 | 86 | 84,9% | 1,5 |
| P6 | Mov5 | 1.205 | 1.096 | 109,9% | 3,2 |
| P6 | Mov6 | 261 | 270 | 96,7% | 0,6 |
| P6 | Mov7 | 77 | 110 | 70,0% | 3,4 |
| P6 | Mov8 | 170 | 166 | 102,4% | 0,3 |
| P6 | Mov9 | 476 | 479 | 99,4% | 0,1 |
| <hr/> | | | | | |
| P7 | Mov1 | 918 | 812 | 113,1% | 3,6 |
| P7 | Mov2 | 357 | 344 | 103,8% | 0,7 |
| P7 | Mov3 | 1.536 | 1.389 | 110,6% | 3,8 |
| P7 | Mov4 | 226 | 241 | 93,8% | 1,0 |
| P7 | Mov5 | 944 | 975 | 96,8% | 1,0 |
| P7 | Mov6 | 359 | 389 | 92,3% | 1,6 |
| <hr/> | | | | | |
| P8 | Mov1 | 1.157 | 1.108 | 104,4% | 1,5 |
| P8 | Mov2 | 1.605 | 1.562 | 102,8% | 1,1 |
| P8 | Mov3 | 488 | 470 | 103,8% | 0,8 |
| P8 | Mov4 | 798 | 820 | 97,3% | 0,8 |
| <hr/> | | | | | |
| P9 | Mov1 | 662 | 608 | 108,9% | 2,1 |
| P9 | Mov2 | 1.614 | 1.624 | 99,4% | 0,2 |
| P9 | Mov3 | 798 | 812 | 98,3% | 0,5 |
| P9 | Mov4 | 979 | 964 | 101,6% | 0,5 |

Fonte: Elaboração própria.

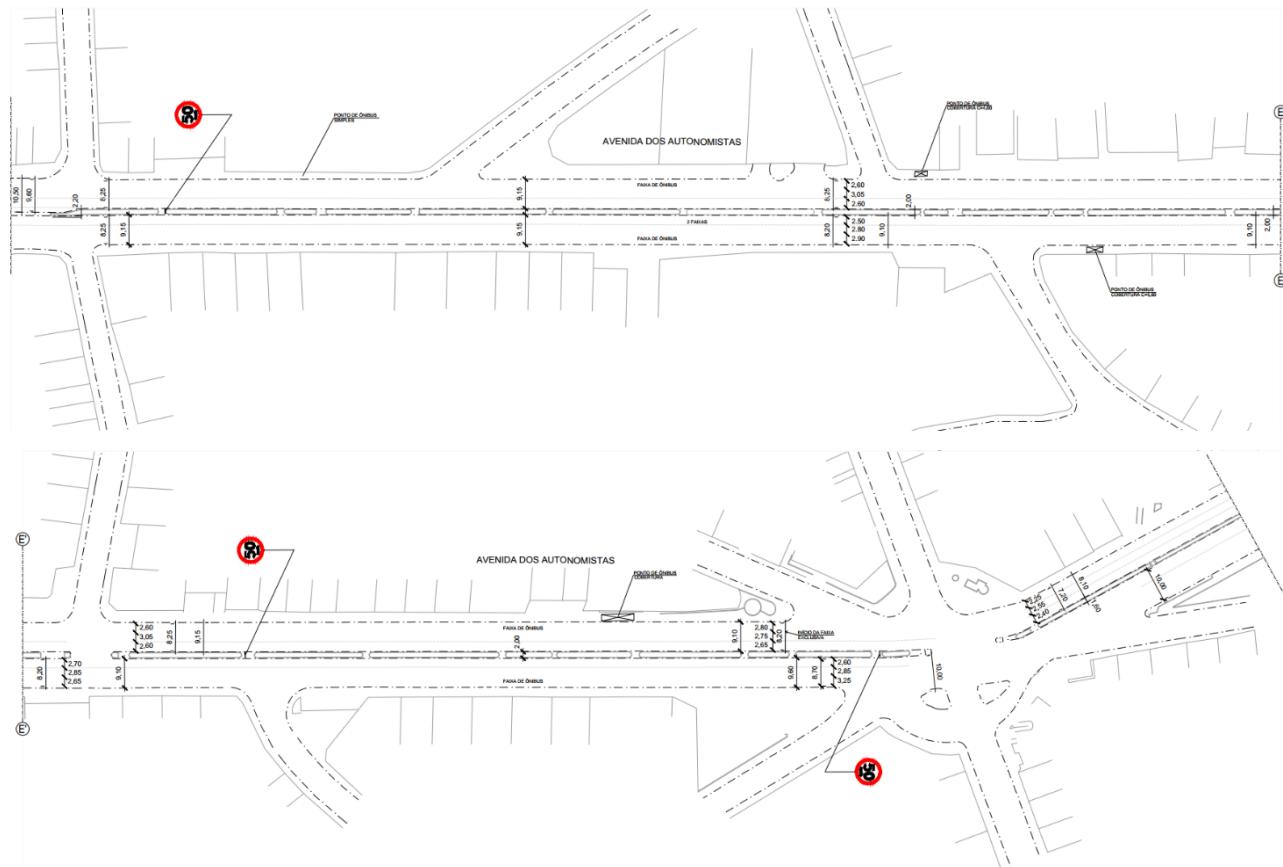
ANEXO A - INVENTÁRIO FÍSICO DO SISTEMA VIÁRIO

Figura A.0.1 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 1



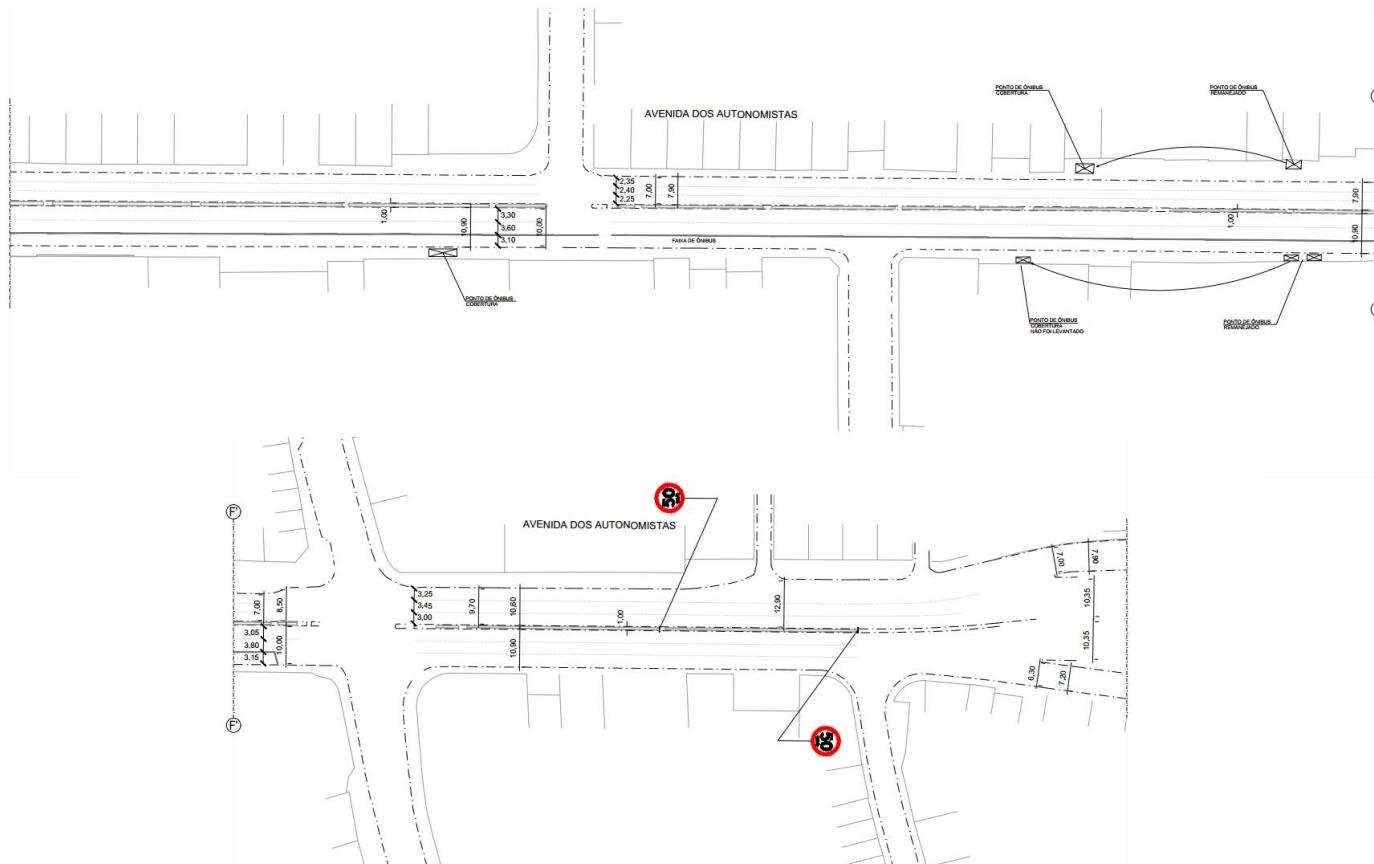
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

Figura A.0.2 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 2



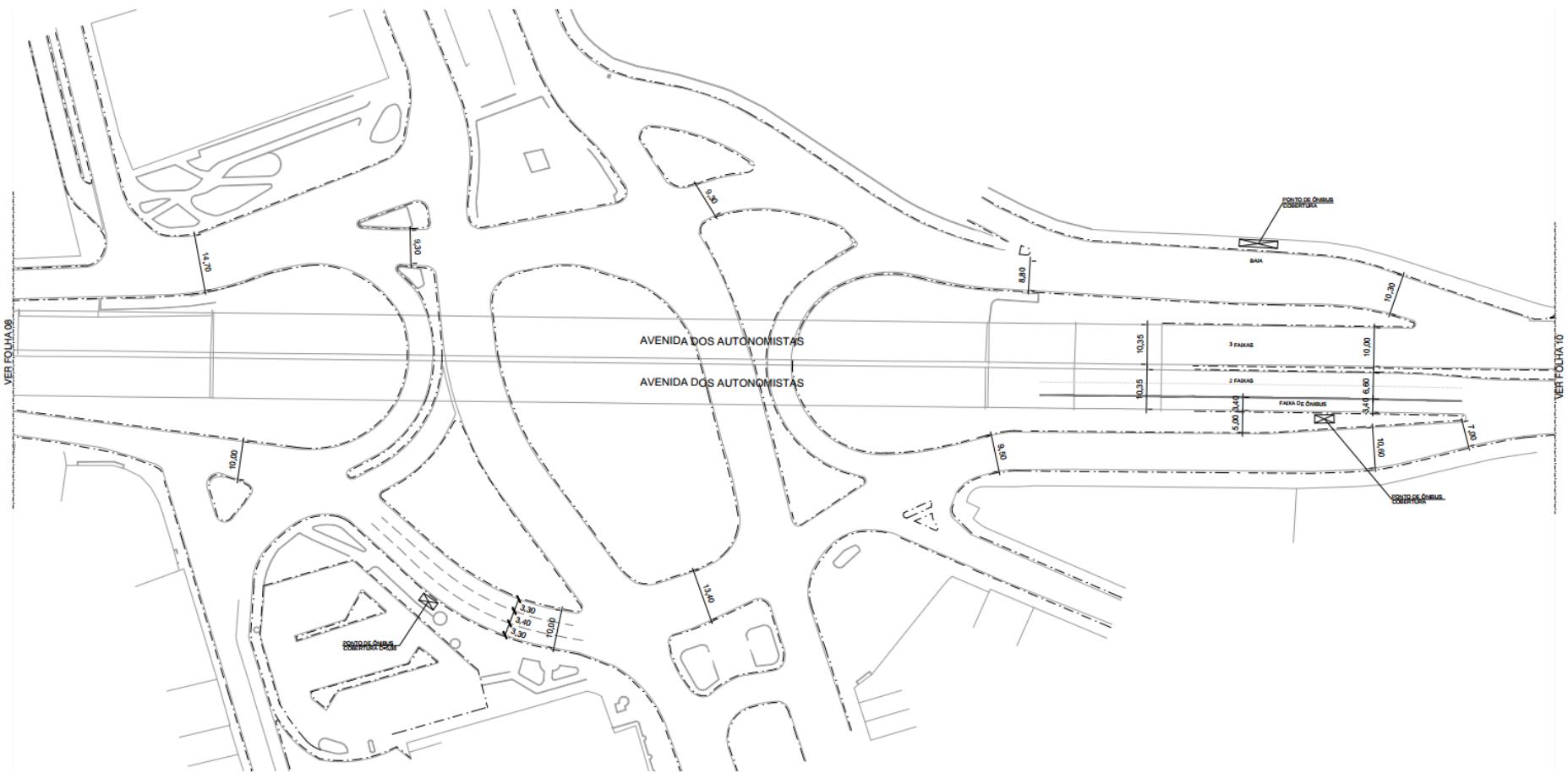
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

Figura A.0.3 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 3



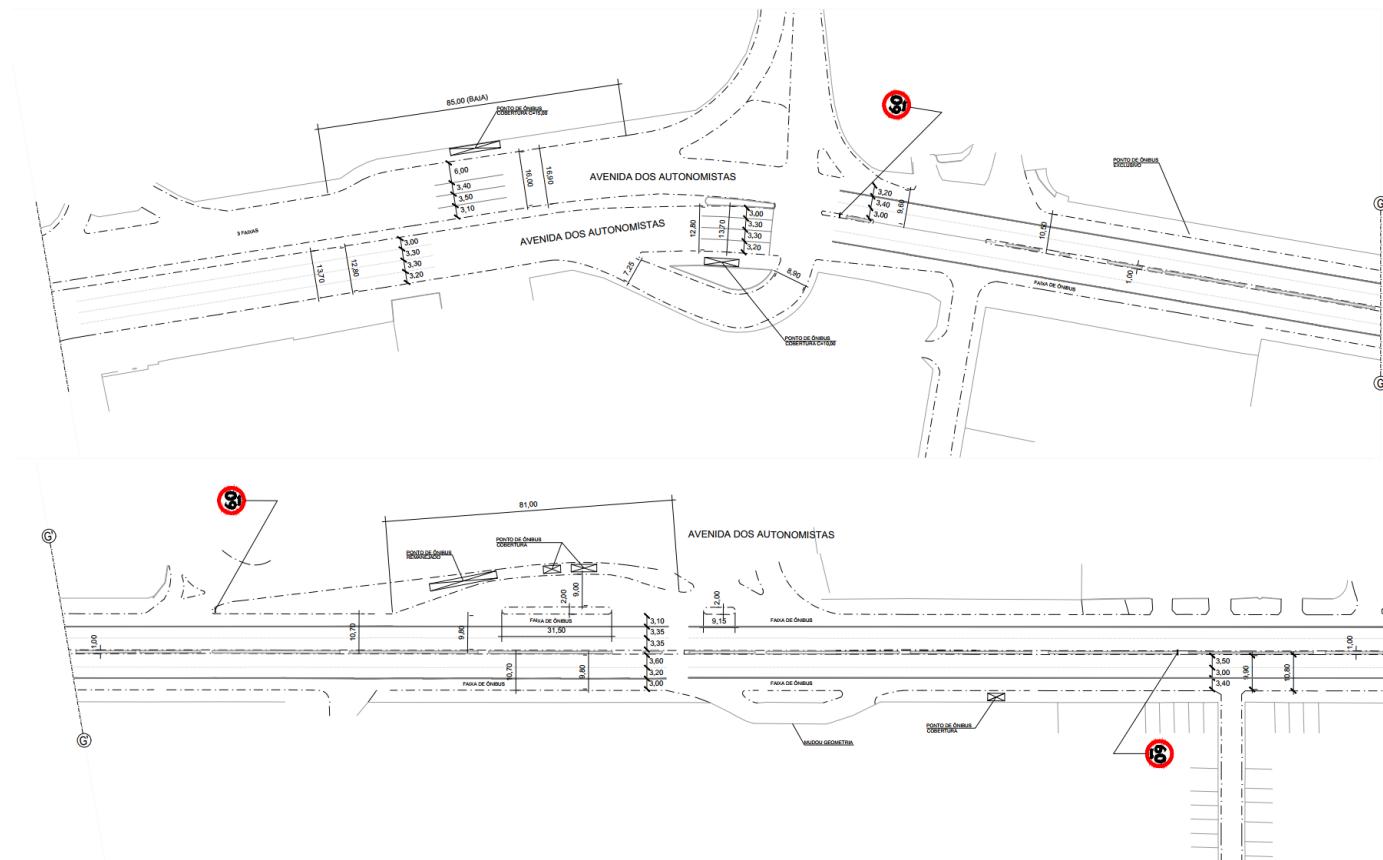
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

Figura A.0.4 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 4



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

Figura A.0.5 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 5



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

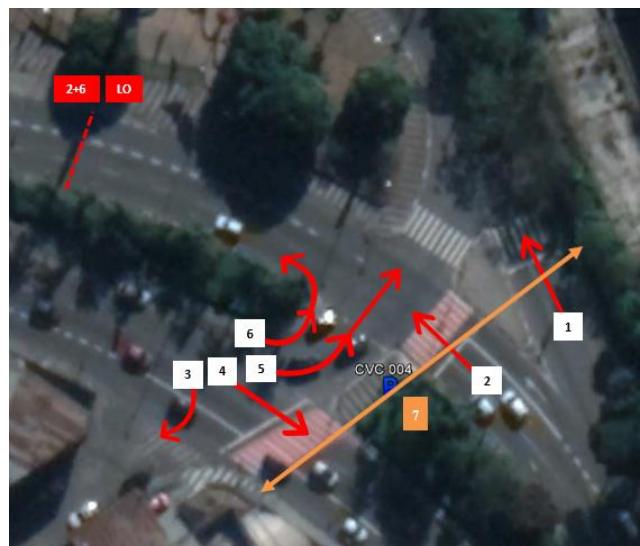
Figura A.0.6 - Inventário Físico do Sistema Viário – Folha 6



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018. Sem escala.

ANEXO B – CONTAGEM DOS VEÍCULOS

Figura B.0.1 - Movimentos do ponto 4



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.1 - Contagem de veículos na HPM do ponto 4

| HPM | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
|-------------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 20/02/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC04_M1 | 177 | 6 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M2 | 595 | 58 | 6 | 90 | 1 | 5 | 0 |
| OSA_PC04_M3 | 91 | 8 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M4 | 1.469 | 227 | 20 | 139 | 0 | 10 | 0 |
| OSA_PC04_M5 | 777 | 45 | 13 | 16 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M6 | 112 | 23 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 21/02/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC04_M1 | 164 | 0 | 11 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M2 | 568 | 60 | 10 | 82 | 3 | 2 | 0 |
| OSA_PC04_M3 | 108 | 8 | 3 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M4 | 1.481 | 200 | 24 | 134 | 5 | 7 | 0 |
| OSA_PC04_M5 | 874 | 70 | 12 | 22 | 3 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M6 | 99 | 20 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| 22/02/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC04_M1 | 153 | 3 | 22 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M2 | 581 | 55 | 10 | 83 | 2 | 4 | 0 |
| OSA_PC04_M3 | 102 | 9 | 8 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M4 | 1.487 | 204 | 26 | 120 | 5 | 5 | 0 |
| OSA_PC04_M5 | 670 | 40 | 11 | 18 | 4 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M6 | 88 | 20 | 3 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| MÉDIA | | | | | | | |
| OSA_PC04_M1 | 165 | 3 | 12 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M2 | 581 | 58 | 9 | 85 | 2 | 4 | 0 |
| OSA_PC04_M3 | 100 | 8 | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M4 | 1.479 | 210 | 23 | 131 | 3 | 7 | 0 |
| OSA_PC04_M5 | 774 | 52 | 12 | 19 | 3 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M6 | 100 | 21 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC04_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.2 - Movimentos do ponto 5



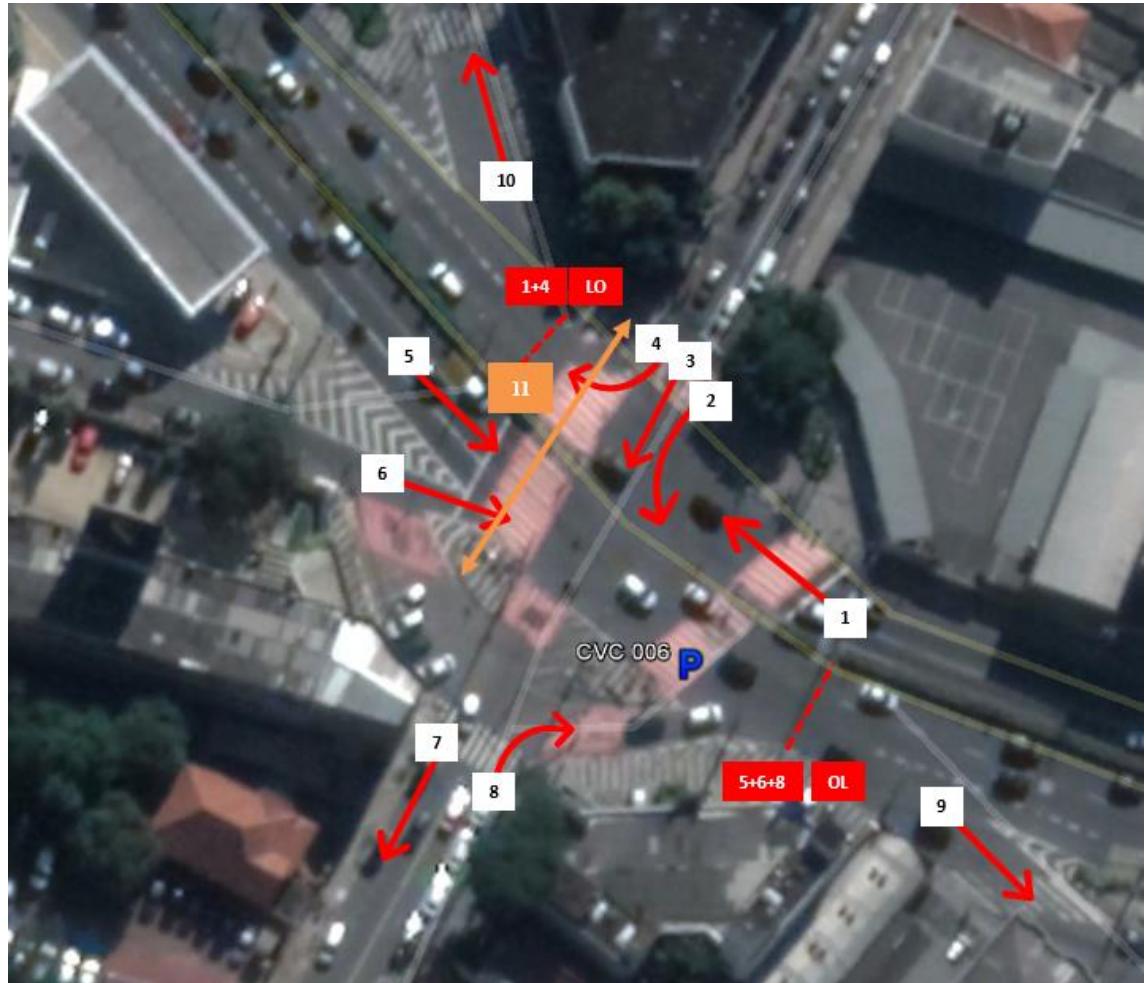
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.2 - Contagem de veículos na HPM do ponto 5

| HPM | | | | | | | |
|-------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 27/02/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC05_M1 | 612 | 61 | 3 | 65 | 1 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M2 | 560 | 42 | 1 | 6 | 0 | 3 | 0 |
| OSA_PC05_M3 | 110 | 7 | 4 | 29 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M4 | 647 | 69 | 13 | 75 | 1 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M5 | 909 | 106 | 18 | 72 | 1 | 6 | 0 |
| OSA_PC05_M6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| OSA_PC05_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29 |
| 28/02/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC05_M1 | 565 | 44 | 9 | 66 | 1 | 5 | 0 |
| OSA_PC05_M2 | 507 | 40 | 1 | 6 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M3 | 113 | 7 | 2 | 39 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M4 | 655 | 70 | 12 | 81 | 2 | 2 | 0 |
| OSA_PC05_M5 | 888 | 148 | 17 | 67 | 1 | 7 | 0 |
| OSA_PC05_M6 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| OSA_PC05_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41 |
| 01/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC05_M1 | 621 | 58 | 4 | 59 | 1 | 2 | 0 |
| OSA_PC05_M2 | 504 | 41 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M3 | 111 | 4 | 5 | 33 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M4 | 643 | 83 | 5 | 78 | 2 | 2 | 0 |
| OSA_PC05_M5 | 928 | 119 | 8 | 70 | 0 | 7 | 0 |
| OSA_PC05_M6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44 |
| OSA_PC05_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29 |
| MÉDIA | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC05_M1 | 599 | 54 | 5 | 63 | 1 | 3 | 0 |
| OSA_PC05_M2 | 524 | 41 | 1 | 6 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M3 | 111 | 6 | 4 | 34 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC05_M4 | 648 | 74 | 10 | 78 | 2 | 2 | 0 |
| OSA_PC05_M5 | 908 | 124 | 14 | 70 | 1 | 7 | 0 |
| OSA_PC05_M6 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC05_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| OSA_PC05_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.3 - Movimentos do ponto 6



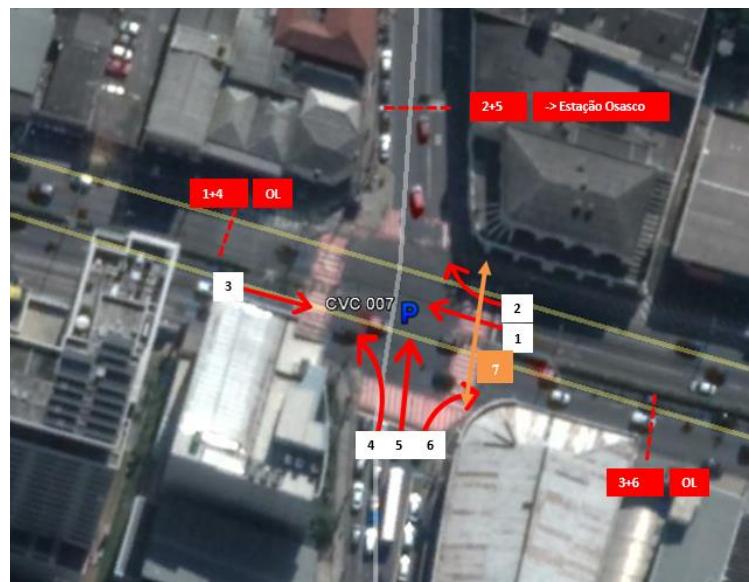
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.3 - Contagem de veículos na HPM do ponto 6

| HPM | | | | | | | |
|--------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 13/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC06_M1 | 608 | 88 | 6 | 47 | 29 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M2 | 286 | 12 | 3 | 156 | 7 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M3 | 80 | 7 | 1 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M4 | 111 | 9 | 1 | 24 | 7 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M5 | 1.040 | 110 | 5 | 70 | 3 | 3 | 0 |
| OSA_PC06_M6 | 248 | 14 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M7 | 168 | 13 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| OSA_PC06_M8 | 171 | 5 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| OSA_PC06_M9 | 394 | 10 | 1 | 6 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M10 | 360 | 13 | 0 | 0 | 11 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 418 |
| 14/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC06_M1 | 550 | 69 | 11 | 36 | 17 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M2 | 261 | 11 | 2 | 166 | 4 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M3 | 63 | 5 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M4 | 99 | 8 | 3 | 25 | 9 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M5 | 1.121 | 146 | 10 | 66 | 1 | 5 | 0 |
| OSA_PC06_M6 | 244 | 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M7 | 134 | 13 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M8 | 168 | 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M9 | 446 | 14 | 2 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M10 | 353 | 12 | 2 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 367 |
| 15/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC06_M1 | 570 | 91 | 8 | 48 | 20 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M2 | 298 | 9 | 3 | 171 | 14 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M3 | 75 | 4 | 1 | 0 | 5 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M4 | 73 | 5 | 3 | 24 | 4 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M5 | 1.071 | 141 | 13 | 62 | 3 | 8 | 0 |
| OSA_PC06_M6 | 295 | 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M7 | 85 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M8 | 163 | 12 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M9 | 511 | 18 | 5 | 9 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M10 | 326 | 9 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 432 |
| MÉDIA | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC06_M1 | 576 | 83 | 8 | 44 | 22 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M2 | 282 | 11 | 3 | 164 | 8 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M3 | 73 | 5 | 1 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M4 | 94 | 7 | 2 | 24 | 7 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M5 | 1.077 | 132 | 9 | 66 | 2 | 5 | 0 |
| OSA_PC06_M6 | 262 | 14 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M7 | 129 | 11 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M8 | 167 | 8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC06_M9 | 450 | 14 | 3 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M10 | 346 | 11 | 2 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| OSA_PC06_M11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 406 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.4 - Movimentos do ponto 7



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.4 - Contagem de veículos na HPM do ponto 7

| HPM | | | | | | | |
|-------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 13/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC07_M1 | 828 | 74 | 9 | 38 | 27 | 1 | 0 |
| OSA_PC07_M2 | 404 | 33 | 4 | 104 | 13 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M3 | 1.357 | 147 | 10 | 197 | 33 | 4 | 0 |
| OSA_PC07_M4 | 263 | 8 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M5 | 1.090 | 48 | 2 | 23 | 24 | 6 | 0 |
| OSA_PC07_M6 | 436 | 7 | 6 | 11 | 11 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249 |
| 14/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC07_M1 | 897 | 75 | 10 | 37 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M2 | 397 | 33 | 3 | 115 | 11 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M3 | 1.503 | 179 | 14 | 200 | 6 | 5 | 0 |
| OSA_PC07_M4 | 250 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M5 | 1.060 | 63 | 4 | 23 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M6 | 406 | 11 | 6 | 10 | 1 | 2 | 0 |
| OSA_PC07_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 229 |
| 15/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC07_M1 | 727 | 71 | 9 | 38 | 2 | 1 | 0 |
| OSA_PC07_M2 | 291 | 17 | 0 | 94 | 5 | 1 | 26 |
| OSA_PC07_M3 | 1.274 | 160 | 13 | 192 | 9 | 4 | 0 |
| OSA_PC07_M4 | 232 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M5 | 889 | 50 | 0 | 18 | 0 | 11 | 176 |
| OSA_PC07_M6 | 371 | 17 | 4 | 11 | 0 | 1 | 0 |
| OSA_PC07_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 336 |
| MÉDIA | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC07_M1 | 817 | 73 | 9 | 38 | 10 | 1 | 0 |
| OSA_PC07_M2 | 364 | 28 | 2 | 104 | 10 | 0 | 9 |
| OSA_PC07_M3 | 1.378 | 162 | 12 | 196 | 16 | 4 | 0 |
| OSA_PC07_M4 | 248 | 7 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC07_M5 | 1.013 | 54 | 2 | 21 | 8 | 6 | 59 |
| OSA_PC07_M6 | 404 | 12 | 5 | 11 | 4 | 1 | 0 |
| OSA_PC07_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 271 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.5 - Movimentos do ponto 8



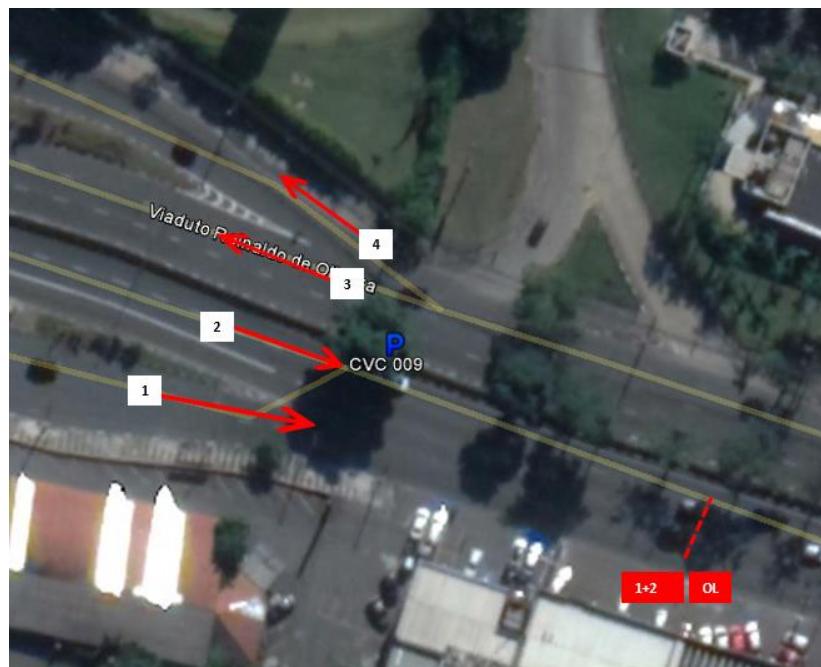
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.5 - Contagem de veículos na HPM do ponto 8

| HPM | | | | | | | |
|-------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 13/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC08_M1 | 1.048 | 45 | 5 | 48 | 6 | 0 | 0 |
| OSA_PC08_M2 | 1.551 | 118 | 12 | 151 | 4 | 7 | 0 |
| OSA_PC08_M3 | 466 | 53 | 6 | 68 | 3 | 1 | 0 |
| OSA_PC08_M4 | 848 | 50 | 6 | 83 | 2 | 0 | 0 |
| 14/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC08_M1 | 1.106 | 56 | 5 | 57 | 7 | 2 | 0 |
| OSA_PC08_M2 | 1.556 | 168 | 13 | 153 | 5 | 7 | 0 |
| OSA_PC08_M3 | 470 | 68 | 3 | 72 | 2 | 1 | 0 |
| OSA_PC08_M4 | 833 | 60 | 10 | 79 | 0 | 2 | 0 |
| 15/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC08_M1 | 1.109 | 47 | 6 | 57 | 7 | 1 | 0 |
| OSA_PC08_M2 | 1.568 | 144 | 7 | 153 | 5 | 10 | 0 |
| OSA_PC08_M3 | 469 | 44 | 5 | 74 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC08_M4 | 806 | 62 | 8 | 77 | 2 | 1 | 0 |
| MEDIA | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC08_M1 | 1.088 | 49 | 5 | 54 | 7 | 1 | 0 |
| OSA_PC08_M2 | 1.558 | 143 | 11 | 152 | 5 | 8 | 0 |
| OSA_PC08_M3 | 468 | 55 | 5 | 71 | 2 | 1 | 0 |
| OSA_PC08_M4 | 829 | 57 | 8 | 80 | 1 | 1 | 0 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.6- Movimentos do ponto 9



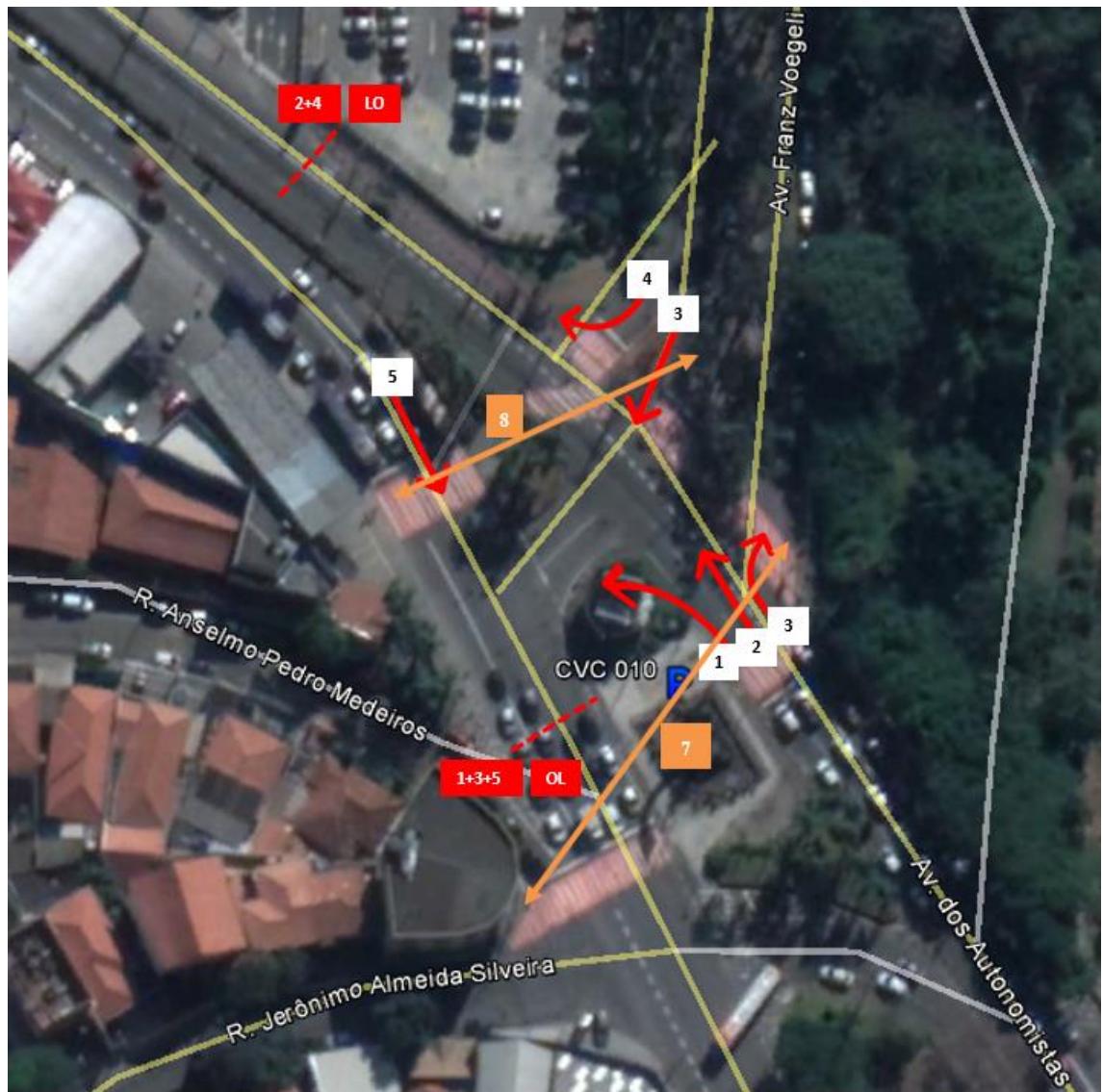
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.6 - Contagem de veículos na HPM do ponto 9

| HPM | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
|-------------------|------------|--------------|-----------|---------------|--------------|------------|-----------|
| 13/03/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC09_M1 | 700 | 67 | 13 | 47 | 8 | 0 | 1 |
| OSA_PC09_M2 | 1.695 | 128 | 13 | 181 | 3 | 5 | 1 |
| OSA_PC09_M3 | 822 | 48 | 6 | 82 | 8 | 2 | 0 |
| OSA_PC09_M4 | 806 | 41 | 10 | 67 | 7 | 4 | 0 |
| 14/03/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC09_M1 | 621 | 48 | 9 | 37 | 1 | 4 | 0 |
| OSA_PC09_M2 | 1.647 | 124 | 17 | 150 | 2 | 11 | 0 |
| OSA_PC09_M3 | 805 | 64 | 11 | 76 | 0 | 2 | 0 |
| OSA_PC09_M4 | 1.044 | 75 | 26 | 74 | 3 | 5 | 0 |
| 15/03/2018 | | | | | | | |
| OSA_PC09_M1 | 595 | 64 | 17 | 40 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC09_M2 | 1.601 | 165 | 10 | 166 | 3 | 8 | 0 |
| OSA_PC09_M3 | 819 | 62 | 11 | 81 | 1 | 2 | 0 |
| OSA_PC09_M4 | 884 | 56 | 17 | 64 | 2 | 3 | 0 |
| MÉDIA | | | | | | | |
| OSA_PC09_M1 | 639 | 60 | 13 | 41 | 4 | 1 | 0 |
| OSA_PC09_M2 | 1.648 | 139 | 13 | 166 | 3 | 8 | 0 |
| OSA_PC09_M3 | 815 | 58 | 9 | 80 | 3 | 2 | 0 |
| OSA_PC09_M4 | 911 | 57 | 18 | 68 | 4 | 4 | 0 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura B.0.7 - Movimentos do ponto 10



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela B.0.7 - Contagem de veículos na HPM do ponto 10

| HPM | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 06/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
| OSA_PC10_M1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M2 | 1.379 | 117 | 23 | 130 | 1 | 5 | 0 |
| OSA_PC10_M3 | 634 | 30 | 7 | 27 | 5 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M4 | 277 | 12 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M5 | 1.529 | 154 | 18 | 168 | 6 | 7 | 0 |
| OSA_PC10_M6 | 519 | 25 | 8 | 10 | 0 | 2 | 0 |
| OSA_PC10_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| OSA_PC10_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 |

| 07/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| OSA_PC10_M1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M2 | 1.400 | 107 | 14 | 141 | 3 | 7 | 0 |
| OSA_PC10_M3 | 590 | 31 | 7 | 23 | 5 | 2 | 0 |
| OSA_PC10_M4 | 247 | 5 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M5 | 2.813 | 151 | 29 | 183 | 6 | 9 | 0 |
| OSA_PC10_M6 | 573 | 21 | 6 | 12 | 1 | 4 | 0 |
| OSA_PC10_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46 |
| OSA_PC10_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 142 |

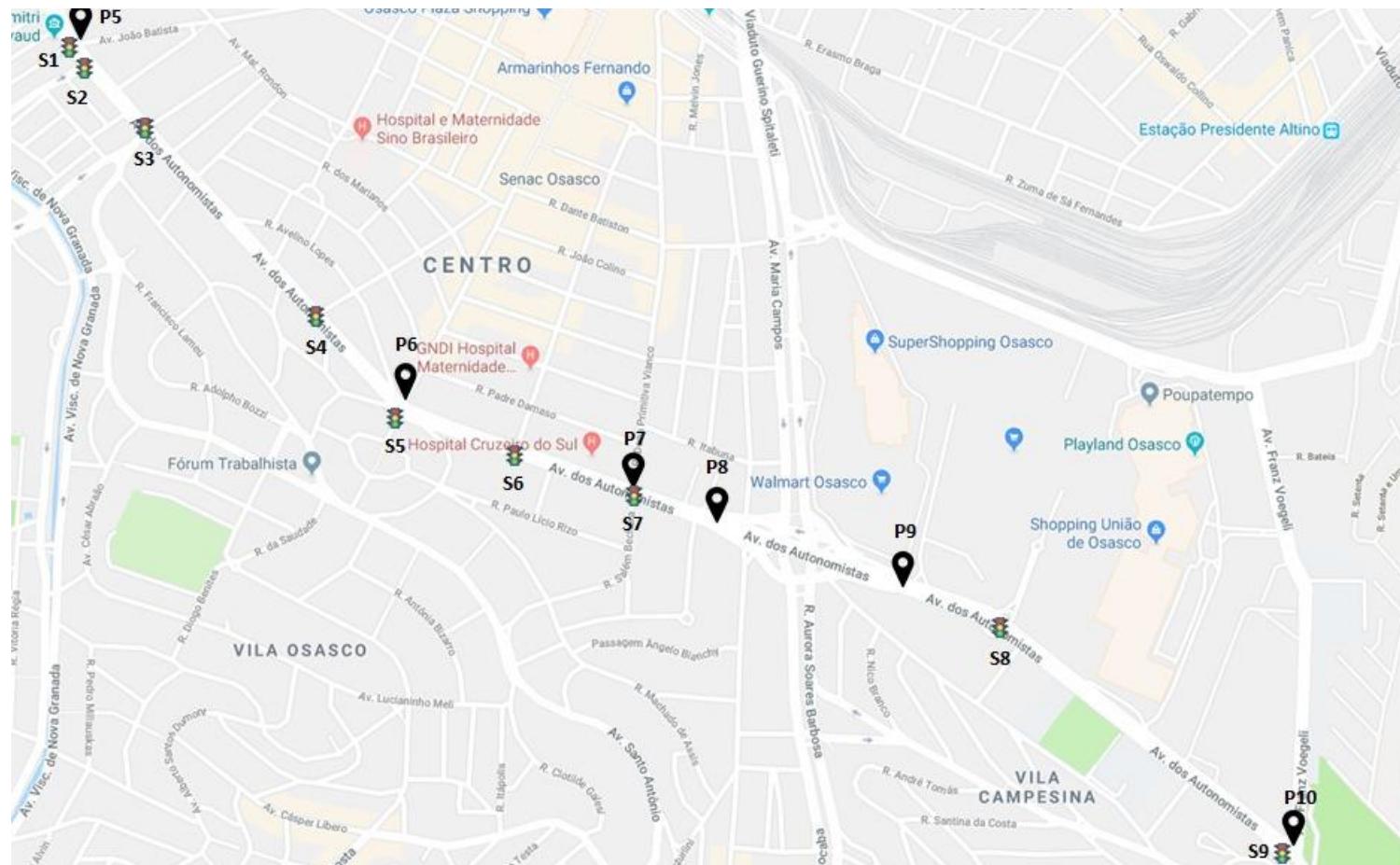
| 08/03/2018 | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| OSA_PC10_M1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M2 | 1.370 | 114 | 19 | 146 | 3 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M3 | 528 | 29 | 10 | 26 | 4 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M4 | 241 | 8 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M5 | 1.696 | 142 | 18 | 188 | 8 | 9 | 0 |
| OSA_PC10_M6 | 529 | 19 | 2 | 12 | 1 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 |
| OSA_PC10_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117 |

| MÉDIA | Automóveis | Motocicletas | Caminhões | Ônibus Padron | Micro Ônibus | Bicicletas | Pedestres |
|--------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| OSA_PC10_M1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M2 | 1.383 | 113 | 19 | 139 | 2 | 5 | 0 |
| OSA_PC10_M3 | 584 | 30 | 8 | 25 | 5 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M4 | 255 | 8 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| OSA_PC10_M5 | 2.013 | 149 | 22 | 180 | 7 | 8 | 0 |
| OSA_PC10_M6 | 540 | 22 | 5 | 11 | 1 | 3 | 0 |
| OSA_PC10_M7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 |
| OSA_PC10_M8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 98 |

Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

ANEXO C – DADOS SEMAFÓRICOS

Figura C.0.1 - Posicionamento dos semáforos no trecho de estudo e a configuração dos pontos de contagem



Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Figura C.0.2 - Movimentos no ponto 5 (semáforo 1)



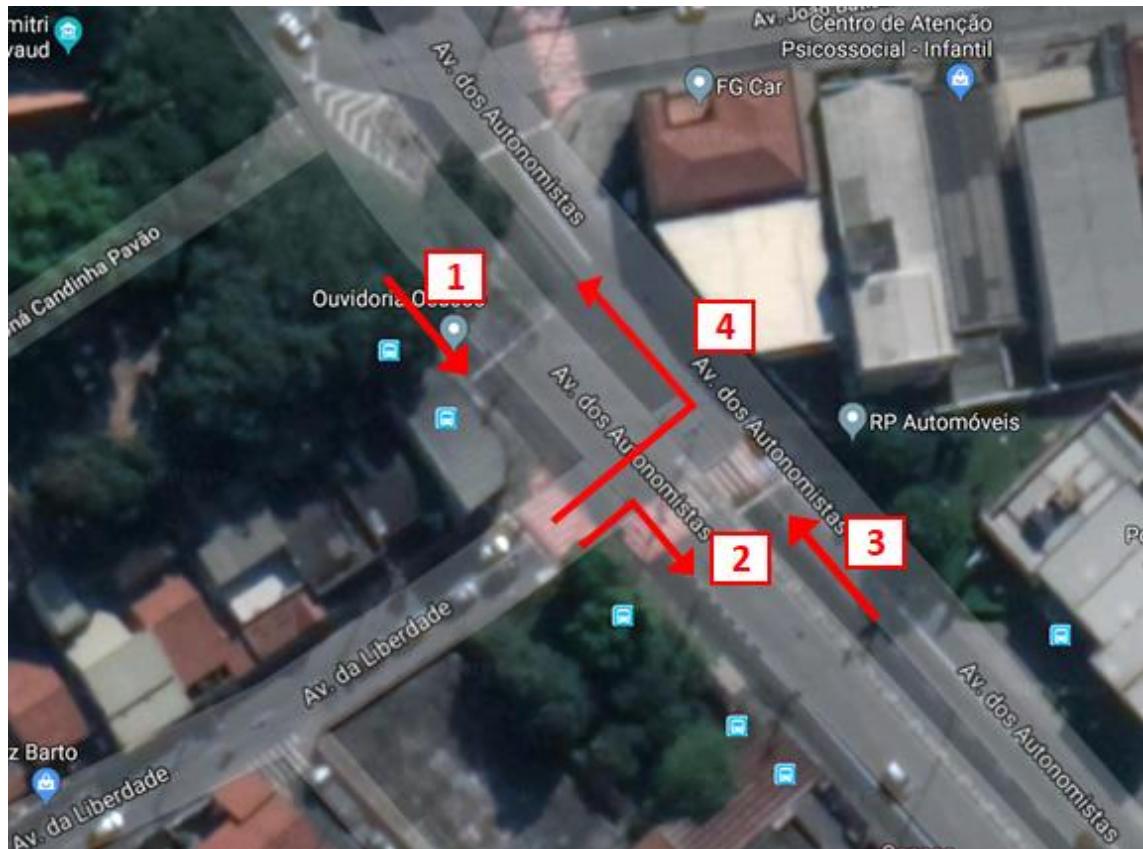
Fonte: GPO/Sistran Engenharia, 2018.

Tabela C.0.1 - Dados Semáforo 1

| Semáforo 1 - Av. dos Autonomistas x Av. da Liberdade | | | | | | VERDE (s) | |
|--|----------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-----|
| CICLO (s) | | 109 | | | | Início | Fim |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | | |
| 1 | Autonomistas Km21-VY | 5 | 49 | 3 | 1 | 0 | 49 |
| 2 | Transversal | 2 + 3 | 52 | 3 | 1 | 53 | 105 |
| 3 | Autonomistas VY-Km21 | 4 | 49 | 3 | 1 | 0 | 49 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.3 - Movimentos no semáforo 2



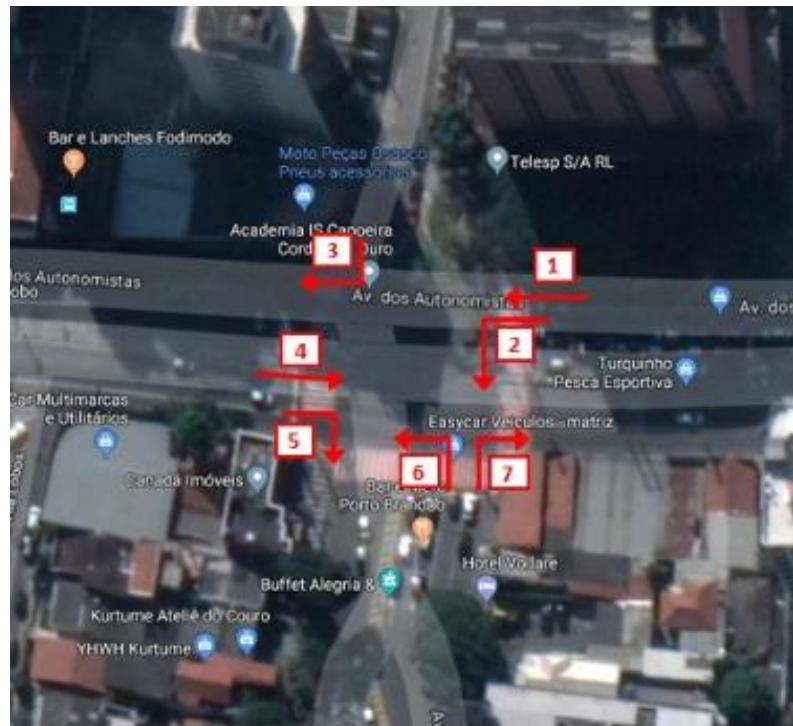
Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.2 - Dados Semáforo 2

| Semáforo 2 - Av. dos Autonomistas x Av. da Liberdade | | | | | | | VERDE (s) | |
|--|----------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------|--|-----------|-----|
| CICLO (s) | | 118 | | | | | Início | Fim |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | | | |
| 1 | Autonomistas Km21-VY | 1 | 42 | 3 | 1 | | 0 | 42 |
| 2 | Transversal | 2 + 4 | 68 | 3 | 1 | | 46 | 114 |
| 3 | Autonomistas VY-Km21 | 3 | 42 | 3 | 1 | | 0 | 42 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.4 - Movimento no semáforo 3



Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.3 - Dados Semáforo 3

| Semáforo 3 - Av. dos Autonomistas x Av. Santo Antonio | | | | | | | VERDE (s) | |
|---|----------------------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------|-----|-----------|-----|
| CICLO (s) | | 140 | | | | | Início | Fim |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | | | |
| 1 | Autonomistas Km21-VY | 1 | 74 | 3 | 1 | 0 | 74 | |
| | Autonomistas Km21-VY - | | | | | | | |
| 2 | Conversão à Esquerda | 2 | 27 | 3 | 1 | 51 | 78 | |
| 3 | Transversal conversão à direita | 7 | 46 | 3 | 1 | 71 | 117 | |
| | Transversal conversão à esquerda | | | | | | | |
| 4 | | 6 | 39 | 3 | 1 | 78 | 117 | |
| 5 | Autonomistas VY-Km21 | 4+5 | 47 | 3 | 1 | 0 | 47 | |
| 6 | Pedestre | | 15 | | 4 | 121 | 136 | |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.5 - Movimentos semáforo 4



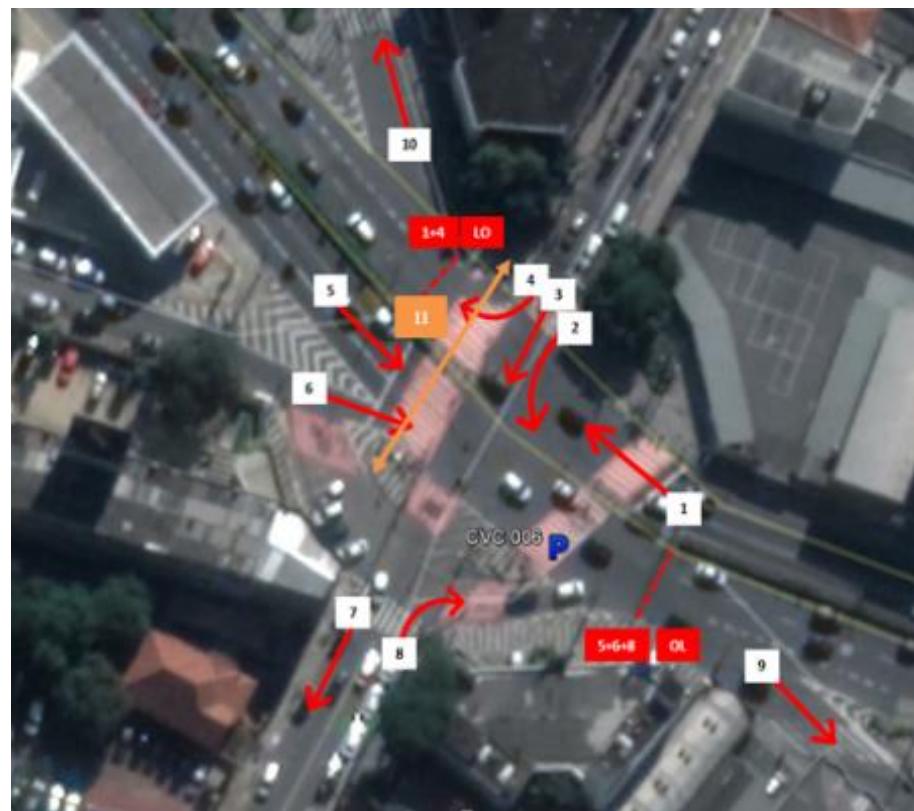
Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.4 - Dados semáforo 4

| Semáforo 4 - Av. dos Autonomistas x R. João Curdo | | | | | | | VERDE (s) | | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|---|--|--|-----------|-------------|--------------------|--------|-----|--|
| CICLO (s) | | | Movimento | | | | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | Início | Fim | |
| No | Grupo | Movimento | | | | | | | | | | |
| 1 | Autonomistas Km21-VY | 1 | 64 | 4 | | | 1 | | | 0 | 64 | |
| 2 | Transversal | 2 | 32 | 4 | | | 1 | | | 69 | 101 | |
| 3 | Autonomistas VY-Km21 | 3 | 64 | 4 | | | 1 | | | 0 | 64 | |
| 4 | Pedestre | 4 | 16 | | | | 5 | | | 106 | 122 | |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.6 - Movimentos Semáforo 5



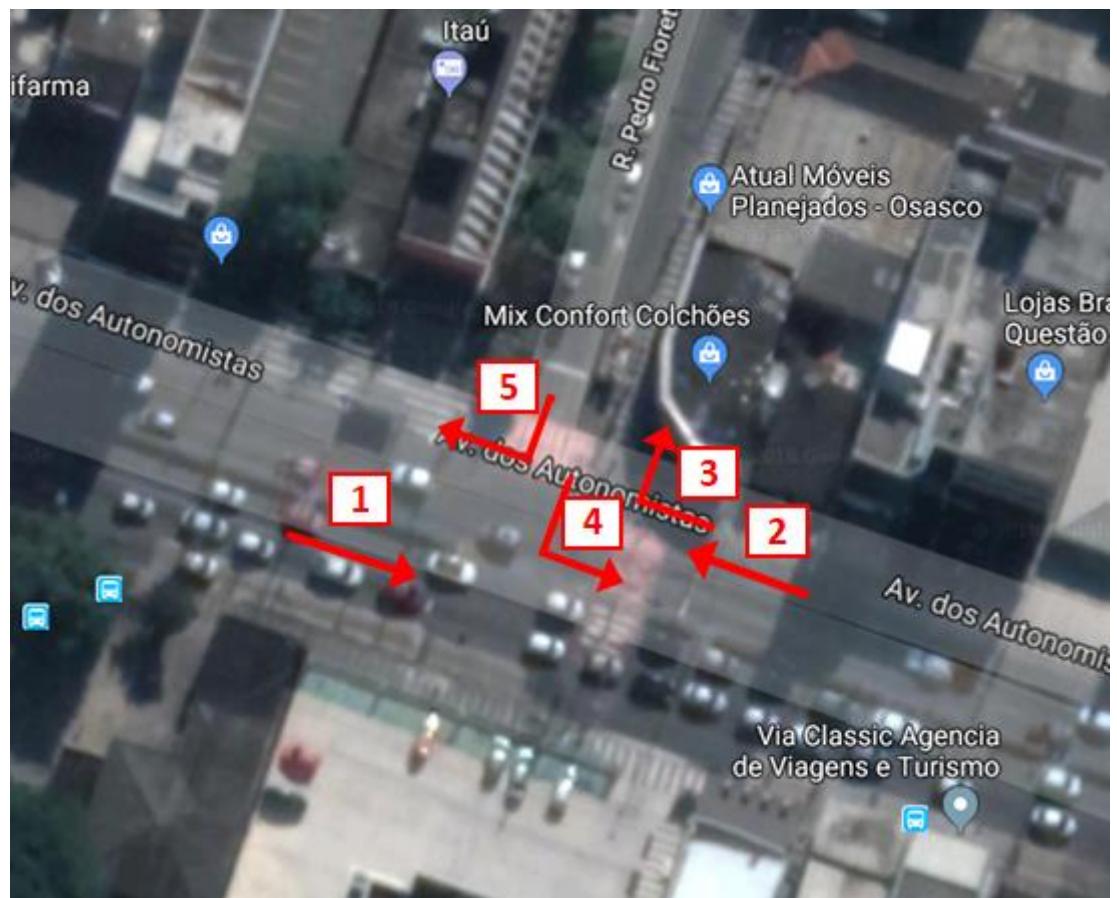
Fonte: GPO Sistran Engenharia, 2018.

Tabela C.0.5 - Dados Semáforo 5

| Semáforo 5 - Av. dos Autonomistas x R. Antônio Agú | | | | | VERDE (s) | |
|--|----------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------|--------|
| CICLO | 136 | | | | Início | Fim |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | |
| 1 | Autonomistas Km21-VY | 5 +6 | 56 | 3 | 1 | 0 56 |
| 2 | Transversal | 2+3+4 | 46 | 3 | 1 | 86 132 |
| 3 | Autonomistas VY-Km21 | 1 | 56 | 3 | 1 | 0 56 |
| | Pedestre | 11 | 22 | | 4 | 60 82 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.7 - Movimentos semáforo 6



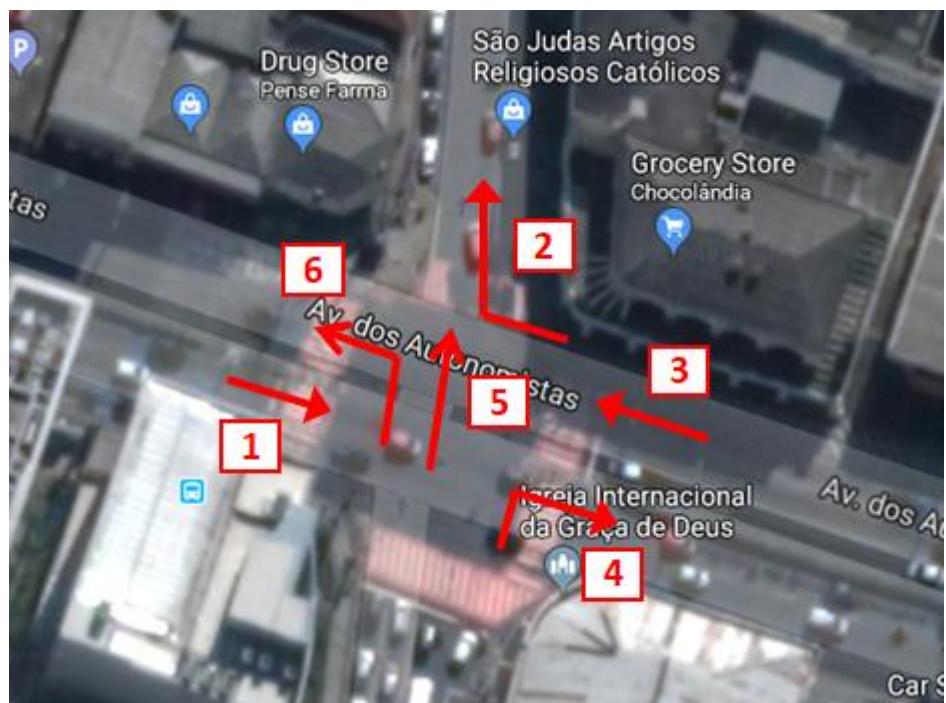
Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.6 - Dados semáforo 6

| Semáforo 6 - Av. dos Autonomistas x R. Pedro Fioretti | | | | | | VERDE (s) | |
|---|-------------|--------------------|--------------|----------------|-----------------------|-----------|---------|
| CICLO (s) | | | | | | | |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | Início | Fim |
| 1 | VY | Autonomistas Km21- | 2+3 | 74 | 4 | 1 | 0 74 |
| 2 | Transversal | | 4+5 | 25 | 4 | 1 | 102 127 |
| 3 | Km21 | Autonomistas VY- | 1 | 74 | 4 | 1 | 0 74 |
| 4 | Pedestre | | | 18 | 5 | 79 | 97 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.8 - Movimento semáforo 7



Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.7 - Dados semáforo 7

| Semáforo 7 - Av. dos Autonomistas x Rua Dona Primavera Vianco | | | | | | VERDE (s) | |
|---|-------------|-----------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-----|
| CICLO (s) | | 136 | | | | | |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | Início | Fim |
| Autonomistas Km21- | | | | | | | |
| 1 | VY | 1 | 62 | 3 | 1 | 0 | 62 |
| 2 | Transversal | 4+5+6 | 44 | 3 | 1 | 66 | 110 |
| Autonomistas VY- Km21 | | | | | | | |
| 3 | Km21 | 2 + 3 | 62 | 3 | 1 | 0 | 62 |
| 4 | Pedestre | | 18 | | 4 | 114 | 132 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

Figura C.0.9 - Movimentos semáforo 8



Fonte: Google Maps.

Tabela C.0.8 - Dados Semáforo 8

| Semáforo 8 - Av. dos Autonomistas na frente do Assaí | | | | | | VERDE (s) | |
|--|----------|--------------------|-----------|-------------|--------------------|-----------|------|
| CICLO (s) | | 103 | | | | | |
| No | Grupo | Movimento | Verde (s) | Amarelo (s) | Vermelho Geral (s) | Início | Fim |
| 1 | VY | Autonomistas Km21- | 1 | 65 | 3 | 1 | 0 65 |
| 2 | Km21 | Autonomistas VY- | 2 | 65 | 3 | 1 | 0 65 |
| 3 | Pedestre | | 30 | | 4 | 69 | 99 |

Fonte: Elaboração própria (dados observados em campo).

ANEXO D – DADOS DOS PONTOS E LINHAS DE ÔNIBUS

Tabela D.0.1 - Linhas de ônibus e dados do modelo

| Tipo de Linha | Linha | Sentido | Headway na HPM (min) | Nº de Pontos na Av. dos Autonomistas | Partida no ponto inicial (s) |
|----------------------|--------------|----------------|-----------------------------|---|-------------------------------------|
| Municipal | 001 | RM | 15 | 2 | 349 |
| | | SP | 15 | 2 | 769 |
| | 003 | RM | 20 | 7 | 459 |
| | | SP | 20 | 6 | 399 |
| | 005 | RM | 30 | 1 | 438 |
| | | SP | 30 | 5 | 335 |
| | 007 | RM | 10 | 5 | 9 |
| | 008 | RM | 20 | 7 | 116 |
| | | SP | 20 | 6 | 435 |
| | 010 | RM | 10 | 2 | 31 |
| | | SP | 10 | 1 | 503 |
| | 011 | RM | 14 | 7 | 6 |
| | | SP | 14 | 5 | 233 |
| | 012 | RM | 46 | 7 | 16 |
| | | SP | 34 | 6 | 61 |
| | 018 | SP | 60 | 1 | 91 |
| | 028 | SP | 10 | 3 | 30 |
| | 030 | RM | 40 | 7 | 24 |
| | | SP | 40 | 6 | 478 |
| | 032 | RM | 12 | 1 | 443 |
| | | SP | 12 | 3 | 64 |
| | 033 | RM | 20 | 2 | 112 |
| | | SP | 20 | 4 | 507 |
| | 035 | RM | 20 | 2 | 350 |
| | | SP | 20 | 2 | 76 |
| | 036 | SP | 14 | 2 | 53 |
| | 037 | RM | 30 | 1 | 1641 |
| | | SP | 30 | 4 | 141 |
| | 002-1 | RM | 40 | 2 | 341 |
| | | SP | 40 | 5 | 125 |
| | 004-1 | RM | 40 | 5 | 273 |
| | | SP | 40 | 1 | 182 |
| | 006-2 | RM | 25 | 2 | 680 |
| | | SP | 25 | 2 | 585 |
| | 009-1 | RM | 40 | 7 | 123 |
| | | SP | 40 | 6 | 600 |
| | 009-2 | RM | 40 | 5 | 43 |
| | | SP | 40 | 3 | 149 |

| Tipo de Linha | Linha | Sentido | Headway na HPM (min) | Nº de Pontos na Av. dos Autonomistas | Partida no ponto inicial (s) |
|----------------------|--------------|----------------|-----------------------------|---|-------------------------------------|
| Intermunicipal | 020 | RM | 20 | 8 | 104 |
| | | SP | 20 | 9 | 337 |
| | 022 | RM | 20 | 3 | 462 |
| | | SP | 20 | 6 | 125 |
| | 023 | RM | 10 | 8 | 41 |
| | | SP | 10 | 9 | 33 |
| | 059 | RM | 40 | 8 | 386 |
| | | SP | 40 | 9 | 410 |
| | 060 | RM | 20 | 2 | 118 |
| | | SP | 40 | 3 | 473 |
| | 061 | RM | 10 | 2 | 216 |
| | | SP | 30 | 3 | 802 |
| | 082 | RM | 30 | 3 | 822 |
| | | SP | 50 | 9 | 529 |
| | 086 | RM | 20 | 8 | 123 |
| | | SP | 10 | 9 | 162 |
| | 122 | RM | 35 | 3 | 101 |
| | | SP | 12 | 5 | 37 |
| | 130 | RM | 15 | 8 | 146 |
| | | SP | 15 | 9 | 1 |
| | 133 | RM | 20 | 3 | 143 |
| | | SP | 30 | 9 | 79 |
| | 134 | RM | 25 | 6 | 68 |
| | 180 | RM | 10 | 2 | 86 |
| | | SP | 15 | 3 | 136 |
| | 181 | RM | 30 | 2 | 323 |
| | | SP | 15 | 3 | 34 |
| | 202 | RM | 20 | 2 | 499 |
| | | SP | 15 | 3 | 457 |
| | 223 | RM | 25 | 3 | 16 |
| | | SP | 25 | 6 | 253 |
| | 230 | RM | 20 | 2 | 216 |
| | | SP | 20 | 3 | 301 |
| | 244 | SP | 30 | 1 | 726 |
| | 246 | RM | 30 | 3 | 442 |
| | | SP | 30 | 9 | 166 |
| | 263 | RM | 15 | 3 | 235 |
| | | SP | 7 | 6 | 49 |
| | 278 | RM | 40 | 2 | 1094 |
| | 280 | RM | 5 | 2 | 89 |

| Tipo de Linha | Linha | Sentido | Headway na HPM (min) | Nº de Pontos na Av. dos Autonomistas | Partida no ponto inicial (s) |
|----------------------|--------------|----------------|-----------------------------|---|-------------------------------------|
| 283 | | SP | 15 | 2 | 72 |
| | | RM | 15 | 3 | 169 |
| | | SP | 5 | 6 | 53 |
| 303 | | RM | 17 | 2 | 88 |
| | | SP | 8 | 2 | 135 |
| 345 | | RM | 40 | 8 | 94 |
| | | SP | 45 | 9 | 469 |
| 350 | | RM | 10 | 8 | 85 |
| | | SP | 10 | 9 | 15 |
| 420 | | RM | 20 | 3 | 561 |
| | | SP | 20 | 9 | 156 |
| 428 | | RM | 15 | 8 | 117 |
| | | SP | 20 | 9 | 82 |
| 466 | | RM | 10 | 6 | 10 |
| | | SP | 30 | 6 | 63 |
| 479 | SP | 30 | 1 | 1740 | |
| 517 | | RM | 60 | 8 | 10 |
| | | SP | 60 | 9 | 13 |
| 557 | | RM | 20 | 8 | 163 |
| | | SP | 20 | 9 | 71 |
| 840 | | RM | 10 | 8 | 68 |
| | | SP | 10 | 9 | 18 |
| 850 | | RM | 8 | 8 | 74 |
| | | SP | 8 | 9 | 110 |
| 059PR1 | RM | 25 | 8 | 258 | |
| 082BI1 | | RM | 60 | 3 | 2646 |
| | | SP | 60 | 9 | 580 |
| 082DV1 | | RM | 60 | 3 | 1513 |
| | | SP | 30 | 9 | 254 |
| 086PR1 | SP | 45 | 9 | 581 | |
| 133BI1 | | RM | 60 | 3 | 72 |
| | | SP | 30 | 9 | 189 |
| 180DV1 | RM | 60 | 2 | 2175 | |
| 180DV2 | RM | 60 | 2 | 924 | |
| 350BI1 | | RM | 60 | 8 | 295 |
| | | SP | 60 | 9 | 23 |

Fonte: Elaboração própria.

ANEXO E – ENTREVISTA COM O NÚCLEO DE SIMULAÇÃO DA CET

No dia 14/06/2018 o grupo realizou uma visita à CET - Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo - onde falamos com o arquiteto Vicente Petrocelli e toda a equipe da Superintendência de Planejamento e Projetos -SPP/ Simulação de tráfego.

A conversa teve como foco o entendimento dos problemas de gestão de tráfego na cidade de São Paulo e quais soluções estão sendo empregadas nesse contexto.

Dificuldades apresentadas para gerir o tráfego em São Paulo

Durante a visita foram levantadas três principais dificuldades na gestão de tráfego da cidade, são elas:

a) Ferramentas de simulação

As principais ferramentas utilizadas pelo Núcleo de simulação da CET são o EMME (macrossimulação) e o Vissim (Microssimulação). No caso do Vissim, foi destacada a questão da versão utilizada para os projetos na cidade de São Paulo, a quinta versão do programa sendo que a POLI já possui a décima e a PTV já está disponibilizando a décima primeira.

Nesse sentido, algumas funcionalidades do Vissim não conseguem ser exploradas, é o caso da simulação em tempo real, uma vez que o sistema não permite as expansões do EPICS e do BALANCE.

b) Governança

Uma das principais dificuldades levantadas foi à questão da governança, seja ela relacionada aos projetos que afetam a população de cidades vizinhas a capital ou em relação aos órgãos de trânsito dentro da própria cidade.

No primeiro caso, a CET destacou uma série de dificuldades para integrar projetos entre cidades vizinhas, um exemplo, tem relação com a dificuldade de obter os dados de entrada em vias de divisa entre cidades vizinhas, como no caso da Av. Corifeu de Azevedo Marques em São Paulo e a Av. dos Autonomistas em Osasco,

ou seja, há uma dificuldade de obter um dado de contagem de veículos que vem da cidade de Osasco para a capital.

Nesse mesmo trecho poderiam ser feitas políticas comuns com a construção de um corredor de ônibus que passe pelas duas cidades ou o uso de semáforos inteligentes com o emprego de ondas verdes que priorizem o tráfego de ônibus, por exemplo.

Já no segundo caso, destacou-se, como exemplo, a relação da CET com a SPtrans que pode apresentar diferentes interesses para a gestão de tráfego na cidade, sendo que a SPtrans faz a simulação das linhas de ônibus do transporte público e a CET apenas carrega esses dados para simular as condições de uma situação mais geral, não tendo poder para alterar algumas rotas de tráfego.

Além da SPtrans, foram citadas dificuldades para integrar os projetos com as empresas CPTM e EMTU que são outras empresas públicas que operam na cidade de São Paulo.

c) Dificuldade de obtenção de dados

Para fazer os modelos de simulação é necessário um estudo atualizado e consistente dos dados para que seja feita a calibração e validação do modelo e, assim, empregá-lo em trabalhos práticos.

Uma das principais fontes de dados utilizados pela CET é a pesquisa O/D do metrô que, além de apresentar os movimentos que são feitos na cidade, ainda revela o motivo pelo qual eles estão sendo feitos, o que permite estudos e implantação de medidas de melhoria mais eficazes.

O grande problema é que essa pesquisa é feita de 10 em 10 anos, e as características de tráfego mudam muito nesse período. Além disso, atualmente a pesquisa O/D que devia ter sido entregue em 2017 ainda não foi concluída o que dificulta os trabalhos da CET.

Outra grande dificuldade em se obter dados ocorre devido às questões de governança, como já citado anteriormente, em que o ideal seria ter projetos mais unificados seja em termos de projetos metropolitanos ou a unificação de entidades de trânsito com propósitos distintos.

Para resolver essa grande dificuldade de obtenção de dados a empresa estabeleceu uma série de medidas complementares aos dados da pesquisa O/D do metrô, como:

- a) **Parceria com o Waze** - consegue obter dados de velocidades em qualquer trecho da cidade, o que permite correlacioná-los com o volume de tráfego. Pretende-se no futuro expandir essa parceria o que pode levar a um aumento na disponibilidade de dados;
- b) **Dados dos radares da cidade** - há uma grande dificuldade de se obter essas informações e, segundo informado, os dados não seriam em tempo real, mas sim com uma defasagem de semanas ou meses. Mesmo assim, esse dado apresenta grande valor podendo, ainda, identificar os veículos de cidades distintas;
- c) **Pesquisa O/D de cargas** - A CET é uma empresa pioneira em pesquisa Origem/Destino de cargas no mundo inteiro, com o intuito de obter melhores informações sobre elas;
- d) **Contagens de campo** - esse é o método mais tradicional onde faz-se contagens em campo, de modo a criar uma série estatística própria.

Simulação de tráfego na cidade de São Paulo

É de conhecimento comum que a CET estuda as características de tráfego de modo a tentar melhorá-lo, estabelecendo soluções que visem aumento de fluidez, priorização de alguns movimentos, garantir maior segurança, entre muitos outros. Dessa forma, a empresa apresentou uma série de estudos, de modo que serão apresentados apenas quatro destes a seguir.

a) Vila Madalena - Mudança no sentido de vias

Em uma determinada região no bairro da Vila Madalena, considerou-se a alteração do sentido de tráfego em algumas ruas. Por meio da microssimulação, percebeu-se que uma das vias apresenta uma declividade muito acentuada o que leva a problemas em dias de chuva, ou seja, os veículos não conseguem subir por essa rua e acabam tendo que fazer o retorno e trafegar no sentido oposto, para que assim consigam seguir por outro caminho.

Assim, se essa via fosse de mão única, quando um veículo retornasse e tentasse mudar de trajeto, ele teria que trafegar na contramão, o que aumenta muito o risco de acidentes. Por esse motivo, descartou-se essa solução, independente do resultado na redução de atrasos em dias secos.

b) Marginal Pinheiros – Segregação em faixas de trânsito

Na Marginal Pinheiros no trecho ao lado da raia da USP, onde há sete faixas de tráfego, propôs-se destinar quatro faixas à esquerda como uma via expressa com limite de velocidade de 90km/h e as três faixas restantes como uma via local, sendo a mais à direita com velocidade de 50km/h e as outras duas 60km/h.

Além disso, destina-se o tráfego de motocicletas apenas nas vias locais o que tende a reduzir acidentes, em especial os fatais. Essa é uma medida que foi simulada e apresenta potencial para ser empregada futuramente.

c) Semáforos inteligentes na avenida Santo Amaro

Dentre os casos em que houve a aplicação de semáforos inteligentes, ou coordenação semafórica em tempo real, temos o caso da avenida Santo Amaro, utilizando o sistema SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) que permite, como o nome sugere, otimizar os tempos de verde, de ciclo e a defasagem entre semáforos.

Normalmente, os dados de contagem são levados a um computador central que calcula os tempos semafóricos adequados de acordo com a demanda da via. No caso da avenida Santo Amaro, há uma peculiaridade onde o sistema consegue dar prioridade para o transporte público, ou seja, faz-se a equivalência em que o ônibus apresenta um peso de contagem maior do que os demais veículos.

d) Avenida 9 de Julho - Presença de táxis no corredor de ônibus

Uma das discussões mais recorrentes quando se fala em corredores de ônibus é quanto ao impacto da presença dos táxis. Neste sentido, a CET fez simulações no programa de microssimulação VISSIM no corredor da avenida 9 de julho.

Por meio dos estudos feitos, chegou-se à conclusão de que os táxis não atrapalham no fluxo dos ônibus, pois eles entram no corredor exclusivo quando encontram as faixas comuns com filas e saem quando se defrontam com um ônibus parado. Com isso, eles acabam por não contribuir efetivamente na geração de filas no corredor do ônibus.

Calibração de modelos de simulação

Durante a conversa, foi dada uma série de dicas para a calibração do modelo de microssimulação, entre elas podemos destacar os melhores dados disponíveis para esta atividade, o que está relacionado com a confiabilidade dos dados e os cenários mais comuns encontrados nas vias.

Neste contexto, destacou-se que as viagens tendem a ter destinos comuns no período de pico da manhã, onde predominam movimentos com origem nas residências e destinos nos locais de trabalho ou de estudos. Em outros períodos de pico, o trajeto que as pessoas fazem muda sensivelmente com o dia da semana, do mês, de eventos, entre outros fatores.

No caso da hora de pico do almoço, destacou-se que as pessoas não seguem sempre a mesma rotina, por exemplo, em alguns dias elas levam marmita para comer no serviço e em outros elas vão ao restaurante; tem dias em que as pessoas gastam parte do seu horário de almoço para ir ao banco, no mercado ou em outros lugares.

Já na hora de pico da tarde, embora os principais movimentos sejam do serviço ou escola para a casa, percebe-se que muitas vezes as pessoas vão para casa de outros parentes, vão ao shopping ou ao bar com os amigos, entre inúmeras outras atividades.

Sendo assim, em determinadas situações em que a quantidade de dados é limitada, deve-se optar por situações de maior confiabilidade dos dados, ou seja, aqueles que apresentam menor desvio estatístico. Portanto, para a calibração de modelos de simulação a CET costuma optar pelos dados de hora pico da manhã.

Além disso, foi discutido o comportamento do tráfego ao longo da semana, onde a sexta-feira apresenta um pico de demanda de veículos, decorrentes de atividades de lazer da população.

Por apresentar uma situação de demanda atípica, não é recorrente usar as sextas-feiras para calibrar os modelos de simulação, sendo preferível optar por outros dias da semana.

Uso de chips em semáforos inteligentes

Um detalhe bastante relevante, relacionado à gestão de semafórica em tempo real, levantado durante a visita é o de um projeto da CET em parceria com a USP

para utilizar *chips* dentro de controladores para mandar informações para a central que coordena os semáforos, já que a necessidade de empregar fibras ópticas é um fator limitante para uso de semáforos inteligentes.

O projeto apresenta, aproximadamente, 90 semáforos, ainda em etapa de testes, que precisam estudos complementares, uma vez que há uma preocupação com *hackers* que podem invadir o sistema e causar um caos na cidade alterando programações semafóricas.

ANEXO F – ENTREVISTA COM O CENTRO DE OPERAÇÕES INTEGRADAS DA CIDADE DE OSASCO

Durante visita feita ao COI (Centro de Operações Integradas) foi possível ter um melhor conhecimento sobre a realidade da gestão de tráfego na cidade de Osasco, em especial no que diz respeito à sua rede semafórica. Além disso, foram discutidas uma série de peculiaridades da Av. dos Autonomistas, contribuindo positivamente no entendimento de sua realidade local.

O que é o COI?

O COI é um órgão terceirizado responsável pelo monitoramento de câmeras na cidade de Osasco, de modo a trabalhar de forma integrada com a segurança da cidade e com a coordenação de semáforos.

Embora o COI exerça um importante papel no combate à criminalidade, captando, armazenando e disponibilizando imagens em alta resolução, o que pode servir de apoio para entidades de segurança como a polícia Civil e a Militar; o foco para este projeto se associa ao controle semafórico.

Neste sentido, o órgão é responsável por garantir a manutenção dos semáforos na cidade, monitorar o bom uso deles, bem como garantir da melhor maneira possível o bom funcionamento dos semáforos coordenados em tempo real.

Gestão de tráfego na cidade de Osasco

Como a visita foi feita a um órgão que não cuida da gestão de tráfego como um todo, mas sim dos sistemas semafóricos, este foi o principal escopo da discussão.

Nesse sentido, um dos principais pontos levantados foi que o COI é uma entidade terceirizada do governo, o que reflete em políticas de privatização de serviços públicos de tráfego para uma entidade privada com maior eficiência. Dessa forma, destacou-se a agilidade com que o núcleo consegue agir nas questões relativas à sinalização semafórica, uma vez que não necessita passar por inúmeros processos de licitação para atuar na cidade.

Com isso, torna-se possível realizar manutenções preventivas e corretivas nos semáforos da cidade, bem como a substituição deles em caso de estarem com

mau funcionamento e operando durante um longo período de tempo. Por este motivo, foi destacado que alguns problemas recorrentes de São Paulo, por exemplo, o mau funcionamento dos semáforos em períodos chuvosos; não acontecem com a mesma frequência na cidade de Osasco.

Em termos do aumento da rede semafórica controlada em tempo real, mostrou-se que, embora tenha resultados positivos para o tráfego, muitas vezes a prefeitura deve optar por direcionar seus recursos para outras atividades como a pintura de escolas e o recapeamento de pavimentos deteriorados.

Outro ponto levantado em termos de gestão se refere à obrigatoriedade dos novos empreendimentos de mitigar os impactos que por eles são gerados durante a construção e, até mesmo, durante a fase de operação.

Dessa forma, é possível empregar recursos da iniciativa privada para atuar de modo contundente nos problemas da cidade, sendo um deles o congestionamento. Neste sentido, um exemplo dado foi a obrigação do empreendedor do Shopping União de arcar com os custos do aumento da rede de semáforos inteligentes levando eles do cruzamento da Av. dos Autonomistas com a Av. Salim Bechara até o terminal de ônibus da Vila Yara. Entretanto, essa medida mitigatória ainda não foi aplicada, de modo que o trecho especificado não possua coordenação semafórica em tempo real.

Gestão semafórica na cidade de Osasco

A cidade de Osasco apresenta uma rede semafórica composta por 220 semáforos, sendo que 20 deles operam em tempo real com o uso do sistema SCATS. Estes semáforos são conectados por meio de fibra ótica. Vale destacar que a cidade de Osasco foi a primeira cidade brasileira a adotar o SCATS no ano de 2007.

Nesse sentido, para a contagem de veículos nas vias o sistema utiliza o sistema de laço virtual ao invés do tradicional sistema de laço indutivo, uma vez que com a passagem do tráfego pesado nas grandes avenidas os laços começaram a romper gerando custos significativos.

Para conseguir utilizar os laços virtuais é necessário um conjunto de câmeras de alta definição que atuem de modo permanente ao longo do dia. É o caso de Osasco, onde o sistema conta com 46 câmeras de monitoramento de trânsito, além

de 15 de segurança em um sistema interligado (as imagens proporcionadas por estas são compartilhadas com a guarda civil).

Outro ponto levantado tem relação com os semáforos distribuídos na cidade, onde uma parcela considerável utiliza grupos focais de contagem regressiva, ou seja, que indicam o tempo restante de verde ou de vermelho de modo direto (valor numérico) ou indireto (aonde os focos vão apagando com o tempo, mas gera interpretação do tempo restante).

Em geral, se há cinco grupos focais isso significa que o tempo de verde e/ou vermelho é dividido por cinco, sinalizando uma fração do tempo restante. Entretanto, essa programação se torna mais complexa quando considerado um sistema adaptativo ou em tempo real, uma vez que a programação dos semáforos deve ser equivalente à programação dos grupos focais de contagem regressiva.

Para conseguir contar com ambas as soluções, na cidade de Osasco foi feita uma adaptação desses grupos focais de contagem regressiva, onde ao invés de mostrar a fração do tempo restante, os grupos focais vão se apagando indicando os últimos cinco segundos da fase de verde e/ou vermelho.

Comparação SCATS e SCOOT

Conforme apresentado anteriormente, o SCATS é a ferramenta utilizada pelo COI para fazer a gestão de semáforos em tempo real. O sistema foi implantado em Osasco desde 2007 com controladores da Digicon e software SOTO.

De modo simplificado, entende-se que o sistema utiliza o conceito de grau de saturação, ou seja, com o número de veículos e o espaçamento entre eles, opta-se por modificar a configuração de verde dos semáforos de modo a reduzir o grau de saturação entre os cruzamentos.

Já o SCOOT é a ferramenta utilizada pela CET para fazer a gestão semafórica em tempo real. O sistema foi implantado em São Paulo em 1996, com uso relativamente restrito e sem grandes atualizações ao longo do tempo.

Segundo informado, o sistema SCATS apresenta a vantagem de ser mais fácil de calibrar e validar o modelo de microssimulação, quando comparado com o sistema SCOOT.

Além disso, a comparação feita levou em consideração que o SCATS apresenta custos de implantação e manutenção menores do que quando comparados com o sistema SCOOT, sendo que este possui maior variedade de

opções de tráfego com um sistema mais complexo. Portanto, destacou-se que o SCATS apresenta maior aplicação em cidades de médio porte, enquanto que o SCOOT apresenta maior aplicação em cidades de grande porte.

Peculiaridades da Av. dos Autonomistas

A Av. dos Autonomistas foi um dos focos da discussão, uma vez que se refere a área de estudos da microssimulação e pretende-se entender da melhor forma possível as peculiaridades locais da região.

Em termos da gestão semafórica em tempo real, o sistema SCATS está sendo empregado nos seguintes cruzamentos da Av. dos Autonomistas:

- Av. dos Autonomistas x Rua Dona Primitiva Vianco;
- Av. dos Autonomistas x Rua Pedro Fioretti;
- Av. dos Autonomistas x Rua Antônio Agú;
- Av. dos Autonomistas x Rua João Crudo;
- Av. dos Autonomistas x Av. Santo Antônio;
- Av. dos Autonomistas x Av. Liberdade;
- Av. dos Autonomistas x Av. João Batista.

Nesse sentido, tentou-se compreender melhor a programação do sistema SCATS aplicada na Av. dos Autonomistas. Assim, de modo simplificado, destacam-se as seguintes características:

- Tempo de ciclo máximo = 125 segundos;
- A defasagem entre semáforos adjacentes é nula;
- O estágio de pedestres de madrugada é nulo;
- Não há priorização do transporte coletivo.

Em relação ao tempo de ciclo, considerou-se um limite máximo de 125 segundos, pois caso este valor pudesse variar livremente, os estágios semafóricos para os veículos poderiam ser extremamente longos, enquanto que o de pedestres não variariam.

Assim, poderia haver um desequilíbrio entre os tempos de travessia, o que pode induzir o pedestre a atravessar a avenida ou as interseções mesmo com a restrição visual determinada pelos semáforos. Dessa forma, a avenida teria um alto risco de acidentes, o que deve ser evitado pelo engenheiro de tráfego.

A defasagem entre semáforos é nula, pois como há dois sentidos de tráfego, a priorização de um sentido em detrimento do outro pode afetar negativamente na rede como um todo. Além disso, as interseções semafóricas são relativamente próximas umas das outras, o que também contribui para restringir a defasagem no modelo.

O estágio semafórico dos pedestres é considerado nulo durante a madrugada pelo simples fato de haver uma demanda muito pequena de pedestres nesse período do dia.

Em relação ao transporte coletivo, destacou-se que embora haja uma enorme quantidade de ônibus passando pela Av. dos Autonomistas, não foi considerada a priorização do transporte coletivo, uma vez que muitos ônibus, em especial intermunicipais, não apresentam cobradores, de modo que os motoristas devem dirigir o veículo, cobrar a passagem de quem não usa o BEM (bilhetagem para ônibus municipais) ou o BOM (bilhetagem para ônibus intermunicipais) e auxiliar no embarque e desembarque de cadeirantes. Assim, eles permanecem um tempo demasiado nos pontos de ônibus.

Outro ponto destacado durante a visita se refere ao aumento da demanda de veículos gerados pelos pedágios instalados no Rodoanel Mário Covas desde meados de julho de 2017. Como existem poucas alternativas para os motoristas que desejam se locomover no sentido leste-oeste de Osasco, ou seja, na direção das cidades de Carapicuíba e São Paulo, eles acabam se dirigindo a Av. dos autonomistas o que contribui para a saturação das vias.