UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

LUCA DI BIASE

Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo

São Paulo, 2019

LUCA DI BIASE

Versão Corrigida

Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de Transportes - Informações Espaciais

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

São Paulo, 2019

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.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Di Biase, Luca
Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo / L. Di Biase -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
149 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Engenharia de tráfego 2.Sistemas adaptativos de controle de tráfego 3.Otimização semafórica em tempo real 4.Microssimulação de tráfego 5.VISSIM I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Nome: DI BIASE, Luca

Título: **Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Diferentes pessoas e entidades contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade, a quem gostaria de agradecer:

Primeiramente ao Brasil, País que me acolheu e que tanto contribuiu ao meu desenvolvimento humano e profissional.

À minha esposa Pamela, que sempre esteve do meu lado me suportando e torcendo para mim.

À Escola Politécnica da USP e ao Departamento de Engenharia de Transportes, especialmente na pessoa do meu orientador, o Professor Cláudio Luiz Marte, por terem me proporcionado a possibilidade de desenvolver esta pesquisa. Fundamentais foram as ferramentas de simulação de tráfego disponíveis nos laboratórios do PTR, adquiridas graças aos recursos do Edital de Apoio à Pesquisa de Jovens Docentes da EPUSP.

À CET, pela preciosa colaboração e a disponibilização de dados reais para a simulação.

Ao Banco Mundial e ao UK Prosperity Fund da Embaixada do Reino Unido de Brasília, pela possibilidade de contribuir ao projeto BIRD UK, no contexto do qual foi produzida parte das análises que compõem esta dissertação.

À PTV AG, pelo apoio e o suporte técnico em relação aos softwares utilizados.

Um agradecimento em especial ao Gabriel Caldeira, fundamental para todas as simulações realizadas no âmbito desta pesquisa.

Obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil

RESUMO

DI BIASE, Luca. **Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Nestas últimas décadas se tornou mais evidente a crise de mobilidade que a cidade de São Paulo vive, cujo aspecto mais evidente é sem dúvida o tráfego. O impacto deste sobre o meio ambiente, a economia e a qualidade de vida dos paulistanos, representa um dos principais problemas com os quais os administradores da cidade devem lidar. Esta dissertação avaliou a aplicação de um sistema semafórico adaptativo, em tempo real, visando mitigar os congestionamentos atuais, melhorando o desempenho da rede viária. Através da utilização do microssimulador VISSIM numa área da cidade, foi estudada a viabilidade de um sistema deste tipo, baseado nas tecnologias BALANCE e EPICS, e os benefícios que geraria tanto para os ônibus quanto para os automóveis. Para quantificar os possíveis impactos que a abordagem proposta teria sobre o desempenho da rede viária de São Paulo, os resultados das simulações foram classificados através de indicadores de desempenho tais como velocidade, atraso, número de paradas, entre outros. As simulações alcançaram resultados significativos com todas as tecnologias avaliadas, com uma melhora dos indicadores que varia de 41% até 72%, como no caso da velocidade média nos cenários considerados. Não se produziram evidências para extrapolar estes resultados para regiões com características diferentes como, por exemplo, os corredores metropolitanos.

Palavras chave: Engenharia de tráfego, Sistemas adaptativos de controle de tráfego, Otimização semafórica em tempo real, Microssimulação de tráfego, VISSIM.

ABSTRACT

DI BIASE, Luca. **Analysis of real-time traffic control optimization systems to improve the performance of roads network: a case study in the City of São Paulo**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

In recent decades, the mobility crises that the city of São Paulo has been experiencing is becoming more evident, which the most obvious aspect is the traffic. The impact of this on the environment, the economy and the quality of life of the people of São Paulo represents one of the main problems that city administrators must deal with.

This research project analyzed the possible application of real-time adaptive traffic control systems to improve the performance of São Paulo's road network. Through the use of the microsimulator VISSIM in an area of the city, the feasibility of such a system based on BALANCE and EPICS technologies has been tested to understand the benefits it could generate for both the cars and public transport vehicles. To better quantify the impacts that the proposed approach could have, the results will be compared and classified by means of a selection of key performance indicators such as speed, delay, number of stops, among others. The simulations achieved significant results with all technologies evaluated, with an improvement of the indicators ranging from 41% to 72%, as in the case of the average speed in the considered scenarios. No evidence has been produced to extrapolate these results to regions with different characteristics, such as metropolitan corridors.

Keywords: Traffic engineering, Adaptive traffic control systems, Real-time traffic light optimization, Traffic microsimulation, VISSIM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 2-1: Uso individual de transporte, por região 31
Figura 2-2: Uso individual de transporte, por modal 32
Figura 2-3: Principais estratégias de priorização semafórica ativa para ônibus 45
Figura 3-1: Evolução dos Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego 54
Figura 3-2: Arquitetura do sistema BALANCE/EPICS 56
Figura 3-3: Estrutura funcional do BALANCE 63
Figura 3-4: Estrutura funcional do EPICS 66
Figura 3-5: Processo de detecção de ônibus no EPICS 68
Figura 4-1: Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) 71
Figura 4-2: Composição das viagens 2007-2017 72
Figura 4-3: Distribuição modal das viagens 2007-2017 73
Figura 4-4: Área de modelagem 75
Figura 4-5: Distribuição das linhas de ônibus e dos pontos de parada da área de modelagem 77
Figura 4-6: Detectores SCOOT da área de modelagem 78
Figura 4-7: Rede semafórica da área de modelagem 79
Figura 5-1: Categorias dos dados de entrada do VISSIM 82
Figura 5-2: Estrutura do Sistema de Transportes modelado pelo VISSIM 83
Figura 5-3: Croqui das interseções Av. Pompeia x Av. Alfonso Bovero x Rua Guiará e Rua Cotoxó x Av. Alfonso Bovero (Parte I) 84
Figura 5-4: Croqui das interseções Av. Pompeia x Av. Alfonso Bovero x Rua Guiará e Rua Cotoxó x Av. Alfonso Bovero (Parte II) 84
Figura 5-5: Fragmento da programação semafórica elaborada pelo sistema SCOOT 85
Figura 5-6: Diagrama de estágios dos grupos focais no VISSIG 86
Figura 5-7: Esquema para o levantamento de dados OD no dia 21/05 87
Figura 5-8: Matriz de viagens da área de estudo 88
Figura 5-9: Distribuição das viagens na área de estudo 88
Figura 5-10: Matriz OD quadrada utilizada para a simulação da hora completa 89
Figura 5-11: Matriz OD quadrada utilizada para o período de aquecimento da simulação 89

Figura 5-12: Diagrama do processo de validação da calibração 92
Figura 5-13: Diagrama do processo de validação do modelo 93
Figura 5-14: Movimento 1 na interseção da Av. Pompeia com Av. Alfonso Bovero e Rua Guiará 94
Figura 5-15: Movimentos 1 e 2 na interseção da Rua Guiará com a Rua Barão de Bananal .. 95
Figura 5-16: Processo de validação utilizando os tempos de viagem 97
Figura 6-1: Diagrama do processo de simulação dos cenários avaliados 99
Figura 6-2: Cenários simulados 101
Figura 6-3: Função dos cenários simulados 102
Figura 6-4: Velocidade média com tempos fixos 105
Figura 6-5: Densidade média com tempos fixos 105
Figura 6-6: Atraso médio com tempos fixos 106
Figura 6-7: Comprimento das filas com tempos fixos 106
Figura 6-8: Cenário selecionado para simulação com EPICS (sem prioridade para ônibus) . 108
Figura 6-9: Cenário selecionado para simulação com EPICS (com prioridade para ônibus) . 108
Figura 6-10: Velocidade média com EPICS (sem prioridade para ônibus) 110
Figura 6-11: Densidade média com EPICS (sem prioridade para ônibus) 110
Figura 6-12: Atraso médio com EPICS (sem prioridade para ônibus) 111
Figura 6-13: Comprimento das filas com EPICS (sem prioridade para ônibus) 111
Figura 6-14: Velocidade média com EPICS (com prioridade para ônibus) 112
Figura 6-15: Densidade média com EPICS (com prioridade para ônibus) 113
Figura 6-16: Atraso médio com EPICS (com prioridade para ônibus) 113
Figura 6-17: Comprimento das filas com EPICS (com prioridade para ônibus) 114
Figura 6-18: Velocidade média com BALANCE 116
Figura 6-19: Densidade média com BALANCE 116
Figura 6-20: Atraso médio com BALANCE 117
Figura 6-21: Comprimento das filas com BALANCE 117
Figura 6-22: Controladores com BALANCE 118
Figura 6-23: Controladores com EPICS 118
Figura 6-24: Velocidade média com BALANCE e EPICS 120
Figura 6-25: Densidade média com BALANCE e EPICS 120
Figura 6-26: Atraso médio com BALANCE e EPICS 121

Figura 6-27: Comprimento das filas com BALANCE e EPICS.....121
Figura 6-28: Variação da velocidade média 124
Figura 6-29: Variação do atraso médio 125
Figura 6-30: Variação do comprimento das filas.....128
Figura 6-31: Variação da densidade média 129

GRÁFICOS

Gráfico 4-1: Divisão modal das viagens motorizadas.....73
Gráfico 5-1: Resultado do processo de validação utilizando as contagens 96
Gráfico 5-2: Resultado do processo de validação utilizando os tempos de viagem 98
Gráfico 6-1: Comparação da velocidade média 123
Gráfico 6-2: Comparação do atraso médio 125
Gráfico 6-3: Comparação do número médio de paradas.....126
Gráfico 6-4: Comparação do comprimento total da fila 127
Gráfico 6-5: Comparação da densidade média 129

EQUAÇÕES

Equação 3-1: Performance Index do BALANCE.....63
Equação 3-2: Perfomance Index do EPICS.....69
Equação 5-1: Fórmula do GEH.....92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Aplicações de modelos de simulação 52
Tabela 3-1: Comparação entre as tecnologias avaliadas 61
Tabela 4-1: Linhas de ônibus da área de modelagem 76
Tabela 4-2: Controladores da área de estudo e principais parâmetros 78
Tabela 5-1: Contagens do Movimento 1 na interseção representada na Figura 5-14 94
Tabela 5-2: Contagens do Movimentos 1 na interseção representada na Figura 5-15 95
Tabela 5-3: Contagens do Movimentos 1 na interseção representada na Figura 5-15 95
Tabela 6-1: Resultados das simulações com tempos fixos (agregados) 104
Tabela 6-2: Resultados das simulações com tempos fixos (desagregados) 104
Tabela 6-3: Resultados das simulações utilizando o EPICS com e sem priorização para ônibus (agregados) 109
Tabela 6-4: Resultados das simulações utilizando o EPICS sem priorização para ônibus (desagregados) 109
Tabela 6-5: Resultados das simulações utilizando o EPICS com priorização para ônibus (desagregados) 109
Tabela 6-6: Variação percentual dos indicadores com EPICS (sem prioridade para ônibus) 109
Tabela 6-7: Variação percentual dos indicadores com EPICS (com prioridade para ônibus) 112
Tabela 6-8: Resultados das simulações utilizando o BALANCE (agregados) 115
Tabela 6-9: Resultados das simulações utilizando o BALANCE (desagregados) 115
Tabela 6-10: Variação percentual dos indicadores com BALANCE 115
Tabela 6-11: Resultados das simulações utilizando BALANCE acoplado com EPICS (agregados) 118
Tabela 6-12: Resultados das simulações utilizando BALANCE acoplado com o EPICS (desagregados) 119
Tabela 6-13: Variação percentual dos indicadores com BALANCE acoplado com EPICS 119
Tabela 6-14: Resultados gerais das simulações 122
Tabela 6-15: Resultados das simulações por categoria de veículo 122

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
API	Application Programming Interface
ATCS	Adaptive Traffic Control Systems
ATMS	Advanced Traffic Management Systems
AVL	Automated Vehicle Location
BALANCE	Balancing Adaptive Network Control Method
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
C-ITS	Cooperative ITS
EPICS	Entire Priority Intersection Control System
FSM	Framework Signal Plans
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Point Systems
IoT	Internet of Things
ITS	Intelligent Transport Systems
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
PI	Performance Index
PIB	Produto Interno Bruto
RFID	Radio-Frequency Identification
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cicle Offset Optimization Technique
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TMS	Traffic Management Systems
TRANSYT	Traffic Network Study Tool
TSP	Transit Signal Priority
UTOPIA	Urban Traffic Optimization by Integrated Automation
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA 23

1.2 OBJETIVO 27

1.3 METODOLOGIA 27

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 28

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAÇÃO TEÓRICA 31

2.1 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE (ITS) 31

2.2 PREVISÃO DE TRÁFEGO E OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL 34

2.2.1 Complexidade do sistema de tráfego 34

2.2.2 Os Sistemas Avançados de Gerenciamento de Tráfego (ATMS) 36

2.2.3 Os Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego (ATCS) 38

2.3 PRIORIZAÇÃO SEMAFÓRICA PARA ÔNIBUS 41

2.3.1 Conceitos básicos de priorização semafórica 41

2.3.2 Estratégias de priorização semafórica 43

2.3.3 A priorização do transporte público em contexto de tráfego adaptativo 46

2.4 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO 48

2.4.1 Os simuladores no contexto dos transportes 48

2.4.2 Modelos de simulação de tráfego 49

3 ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE ADAPTATIVO EM TEMPO REAL 53

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE ADAPTATIVO EM TEMPO REAL 53

3.2 CARACTÉRISTICAS GERAIS E COMPARAÇÂO ENTRE SISTEMAS 56

3.2.1 O BALANCE/EPICS 56

3.2.2 O SCOOT 57

3.2.3 O SCATS 58

3.2.4 Comparação entre as tecnologias BALANCE/EPICS, SCOOT e SCATS 60

3.3 A OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE REDES DO BALANCE 61

3.3.1 Características gerais do BALANCE 61
3.3.2 O processo iterativo de otimização do BALANCE 62
3.4 A OTIMIZAÇÃO E PRIORIZAÇÃO SEMAFÓRICA LOCAL DO EPICS 65
3.4.1 Características gerais do EPICS 65
3.4.2 O processo iterativo de otimização e priorização do EPICS 66
4 A ÁREA DE ESTUDO 71
4.1 A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP) 71
4.1.1 Visão geral 71
4.1.2 Demanda de viagens e divisão modal 72
4.2 DADOS SOBRE A ÁREA DE MODELAGEM 74
4.2.1 Visão geral 74
4.2.2 Linhas de ônibus 76
4.2.3 O sistema SCOOT (detectores) 77
4.2.4 Os planos semafóricos 78
5 CONSTRUÇÃO DO MODELO 81
5.1 A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO 81
5.1.1 Critérios de escolha 81
5.1.2 Características do VISSIM 81
5.2 DADOS DE ENTRADA 83
5.2.1 Os planos semafóricos 83
5.2.2 Demanda de viagens - Matriz OD 86
5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO 90
5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO 91
5.4.1 Validação com dados de contagem (CET) 94
5.4.2 Validação com dados de tempo de viagem (Google Maps) 96
6 SIMULAÇÃO, RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS 99
6.1 PROCESSO DE SIMULAÇÃO 99
6.2 INDICADORES DE DESEMPENHO 100

6.3 CENÁRIOS SIMULADOS 101
6.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 102
6.4.1 Tempos fixos 104
6.4.2 EPICS 106
6.4.3 BALANCE 114
6.4.4 BALANCE e EPICS acoplados 117
6.4.5 Comparação e classificação das tecnologias de otimização 121
7 CONCLUSÕES 131
7.1 POSSÍVEIS EVOLUÇÕES DA PESQUISA 132
BIBLIOGRAFIA 135
ANEXO A - Configuração de BALANCE e EPICS 143
ANEXO B - Elementos de programação semafórica 147

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O aumento generalizado da demanda de transporte relacionado ao crescimento econômico ao redor do mundo nestas últimas décadas, teve como primeira consequência (e mais visível) o sobre carregamento das redes de transportes urbanas, fenômeno que se reflete no aumento dos congestionamentos, dos tempos de deslocamento dos veículos na rede viária, dos acidentes e das emissões (entre outros), provocando um grande impacto sobre o meio ambiente, a economia e a qualidade de vida das pessoas que moram nas cidades.

Na base destes problemas, comuns à maioria dos países, está o incentivo que se deu à utilização do modo de transporte individual motorizado que, no caso de países emergentes, foi acentuado historicamente por um escasso nível de investimento em modos de transporte mais sustentáveis por partes dos governos, tantos locais como nacionais, devido à diferentes fatores entre os quais se destacam a falta de recursos financeiros e a falta de conhecimento dos custos reais que o crescimento descontrolado de um sistema de transporte, baseado sobre o automóvel, impõe às cidades (ORTUZAR; WILLMUSNEN, 2011).

Para os países emergentes como o Brasil, estes aspectos, já particularmente relevantes em si, se inserem no contexto de um processo de urbanização que foi mais rápido e intenso e que inviabilizou a possibilidade do planejamento e construção de oferta de transporte, que realmente atendesse as necessidades dos centros urbanos do país.

Historicamente a estratégia utilizada para enfrentar os níveis crescentes de congestionamentos foi a ampliação da capacidade da infraestrutura viária. A partir dos anos sessenta, período em que iniciou as suas atividades, a indústria automobilística nacional, implantada principalmente na área da região metropolitana, junto com as autoridades de São Paulo realizaram uma gigantesca transformação urbana, incentivando a ocupação do espaço público pelos veículos privados. Estas políticas deram à cidade a forma de um núcleo central principal, rodeado por centros periféricos residenciais e comerciais de segunda ordem, com um sistema viário constituído de grandes vias arteriais, que deveriam permitir o rápido deslocamento entre as áreas centrais e as periféricas (VASCONCELLOS, 2014).

Esta concepção da cidade levou a execução de inúmeros megaprojetos (avenidas, viadutos, túneis, etc.) que se revelaram ineficazes na medida que o aumento da frota de veículos em circulação foi muito mais rápido e consistente do que as novas estruturas podiam acomodar. Cintra (2014, apud DENATRAN, 2012) relata que, entre 2002 e 2012, em São Paulo passaram a circular 1,6 milhão de automóveis a mais, caracterizando um aumento de 54%, enquanto a população da cidade cresceu apenas 8% neste mesmo período.

Apesar de sucessivamente ter sido dada maior ênfase em políticas de ampliação e melhoria da oferta de serviço público (metrô, faixas exclusivas) e de restrição ao uso dos veículos privados (rodízio), criou-se um descompasso entre a oferta de transporte disponível e o crescimento da demanda de locomoção de pessoas e bens, que tornou inevitável a crise de mobilidade da cidade, causando perdas e custos para a sociedade, que muitas vezes não são identificados e quantificados claramente (VASCONCELLOS, 2012).

A cidade de São Paulo, como a maioria das cidades brasileiras, chegou então a uma condição já consolidada em termos de insuficiência da oferta de transportes públicos, que levará ainda muito tempo e esforços para ser revertida em algo mais sustentável, devido à necessidade de se atacar, em profundidade, as verdadeiras causas desta insustentabilidade, ligadas preferencialmente a políticas de uso do solo, que não favorecem a redução da necessidade de transporte (ex. espalhamento mais homogéneo da oferta de trabalho) e ao investimento deficitário em soluções de mobilidade coletiva.

Uma das maneiras em que as cidades estão tentando viabilizar esta mudança de paradigma é através das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), cuja crescente utilização está se afirmando, cada dia mais, como um fator chave para se tornarem sempre mais inteligentes na utilização dos próprios recursos, pois através do uso destas soluções se consegue monitorar, compreender, analisar e planejar seu desenvolvimento, aumentando a eficiência, os investimentos e a qualidade de vida dos próprios cidadãos (DARIDO; PENA, 2012).

Dentro deste processo de transformação dos centros urbanos tradicionais em *Smart Cities*, os sistemas ITS (Sistemas Inteligentes de Transportes) representam uma ferramenta útil e cada vez mais usada para a gestão eficiente e racional da mobilidade para todos os tipos de municípios (DARAIO et al., 2016). A constante evolução da pesquisa, sobre estes tópicos, e o consequente aumento das possibilidades que proporcionam aos administradores das cidades, está na base da grande difusão que estes instrumentos tiveram nos últimos anos,

especialmente nos países tecnologicamente mais avançados, onde muitos casos de sucesso podem ser encontrados (URBAN ITS EXPERT GROUP, 2013).

As vantagens proporcionadas pelos ITS se tornam ainda mais importantes se forem considerados que está-se vivendo em uma época em que os governos nacionais e locais experimentam uma profunda crise fiscal e uma capacidade financeira muito reduzida, em comparação ao esforço econômico necessário para a ampliação da rede de transporte coletivo de alto carregamento (trens e metrôs) e, concomitantemente, se levar em conta o tempo que estes tipos de intervenções urbanas requerem para se tornar realidade (MORFOULAKI; MYROVALI; KOTOULA, 2015).

Como as experiências internacionais demostram, é possível complementar a abordagem aos problemas estruturais dos transportes, relativos ao uso do solo e ao investimento em transporte público, com medidas mais pontuais que, a partir da grande quantidade de informações que o processo de transformação das cidades em *Smart Cities* proporciona hoje, melhorem a eficiência na utilização da infraestrutura de transporte existente. (MAURO, 2010).

Uma das áreas onde os ITS estão sendo aplicados com sucesso, já há algum tempo, com o objetivo de reduzir os impactos negativos dos congestionamentos, é no gerenciamento do trânsito.

As novas tecnologias informáticas proporcionam hoje a capacidade de acompanhar mais de perto a operação de trânsito, coletando em tempo real uma quantidade crescente de dados úteis à gestão e ao planejamento, permitindo a atuação de maneira mais rápida para solucionar eventuais problemas que impactam a operação. Isto se traduz em melhores desempenhos da rede viária que, desta maneira, permite deslocamentos mais rápidos e uma alocação mais racional da demanda na rede existente.

Estes sistemas, chamados de Sistemas Avançados de Gerenciamento de Tráfego (ATMS - Advanced Traffic Management Systems) representam então uma maneira de melhorar a eficiência de um recurso limitado, como a rede viária, em tempos rápidos e com custos baixos (STEVANOVIC, 2010).

Das várias partes que constituem um sistema de gestão do tráfego, em ambiente urbano merece destaque a rede semafórica, componente estratégica e de grande impacto sobre o desempenho do trânsito.

Os sistemas de controle semafórico existem desde o século XIX e foram evoluindo tecnologicamente na medida que as redes viárias se tornaram mais complexas, a fim de evitar acidentes e melhorar o desempenho do sistema em geral.

As estratégias de gestão destes sistemas também experimentaram uma rápida evolução com a incorporação de recursos de Tecnologia da Informação (TI), passando a possibilitar a atuação e a centralização de um grande número deles. Desta maneira se tornou possível a utilização de diferentes planos semafóricos ao longo do dia, previamente calculados para melhor atender à variação diária de fluxo, assim como a coordenação deles dentro de uma maior área, de forma a melhorar a fluidez dos veículos tanto em situações normais como em presença de eventos anómalos, como acidentes (CUCCI, 2016).

A mais recente evolução destes tipos de sistemas é representada, sem dúvida, pelos controles semafóricos adaptativos, aqueles que não se limitam à aplicação de planos semafóricos anteriormente calculados para a área escolhida, mas respondem de forma ativa à demanda, isto é, capazes de variar autonomamente as próprias programações para adaptá-las à situação daquele momento, detectada através de sensores na via, aplicando metodologias e algoritmos diferentes para permitir um melhor aproveitamento da rede, assim como um menor impacto ambiental desta, que se traduz num aumento das velocidades médias dos veículos, resultado de uma maior fluidez do trânsito e de um menor tempo de espera nos cruzamentos (AHMED; HAWAS, 2015).

Já se passaram mais de três décadas desde que estes sistemas começaram a serem implantados em muitas cidades ao redor do mundo e, apesar dos resultados satisfatórios obtidos na maioria dos casos e que compensaram amplamente o esforço econômico feito para implementá-los, existiram também casos em que estas tecnologias não tiveram o sucesso esperado.

A cidade de São Paulo implantou, desde os anos noventa, um sistema adaptativo de controle semafórico (SCOOT) que controlava por volta de novecentas interseções com equipamentos de dois fornecedores diferentes (MING, 1997). Existem poucos estudos comparativos entre o desempenho da rede antes e depois a implantação e, apesar dos resultados positivos apontados por estes, aos poucos o sistema ficou não operativo, principalmente por causa da complicada e onerosa manutenção das suas partes. Além disso, não foi relatado que este tenha chegado a operar com a priorização para os ônibus.

Desde então estes sistemas têm acompanhado os avanços da tecnologia da informação evoluindo consideravelmente, aprimorando as próprias capacidades de previsão e atuação sobre a rede semafórica.

A pergunta que se deseja responder com esta dissertação é então: quais seriam os ganhos (velocidades, atrasos, formação de filas, etc..) que a aplicação de uma estratégia de otimização semafórica em tempo real traria para o desempenho da rede viária da Cidade de São Paulo?

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal desta dissertação é avaliar a utilização, num exemplo de cenário na Cidade de São Paulo, de um sistema de otimização semafórica em tempo real, de forma a averiguar os eventuais ganhos em termos de desempenho que ônibus e automóveis teriam em relação à situação atual de planos fixos.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo que esta dissertação se propõe, será aplicada uma metodologia de estudo que se compõe das seguintes atividades a serem desenvolvidas:

- Revisão da literatura científica relativa aos tópicos que serão abordados na pesquisa: previsão de tráfego, tecnologias de controle semafórico adaptativo em contexto urbano; soluções de priorização semafórica para ônibus; modelos de simulação e modelagem de tráfego urbano.
- Comparação entre alguns dos principais sistemas de tráfego adaptativo atualmente disponíveis.
- Estudo dos princípios de funcionamento e das estratégias de otimização semafórica utilizadas pelas tecnologias de otimização BALANCE e EPICS, escolhidas para o estudo de caso.
- Microssimulação no software VISSIM de uma área da Cidade de São Paulo para averiguar a viabilidade da utilização de tecnologias de tráfego adaptativo e comparar, através da classificação de um oportuno conjunto de indicadores, o desempenho

destas em relação à situação atual, tanto para os automóveis como para o sistema de ônibus, elemento crítico do sistema de transporte da cidade.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, incluindo este primeiro, de caráter introdutório.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica dos conceitos e estudos já realizados sobre o tema de pesquisa, que justificam a relevância desta dissertação. Inicialmente, são abordados os assuntos relacionados aos Sistemas Inteligentes de Transportes e a crescente utilização deles em contexto urbano para a melhoria do desempenho da rede de transporte. Em seguida, são apresentadas as principais estratégias de gerenciamento de tráfego e de controle semafóricos baseadas em tecnologias adaptativas. O Capítulo 2 continua com uma apresentação das questões básicas sobre o tema da prioridade semafórica para os ônibus, em contexto urbano, e a integração da operação destes em sistemas de gestão de tráfego em tempo real. A última seção do Capítulo 2 é dedicada à simulação aplicada aos transportes, em que são abordados os problemas de modelagem de tráfego urbano e dos modelos de simulação.

Na primeira parte do Capítulo 3 alguns dos principais sistemas de tráfego adaptativo atualmente em uso no cenário internacional são comparados entre si. Na segunda parte é apresentado com detalhe o sistema composto pelos softwares BALANCE e EPICS, da empresa alemã PTV, as ferramentas selecionadas nesta pesquisa para estudar a aplicação de estratégias de otimização semafórica em tempo real no cenário local da cidade de São Paulo. Esta parte do capítulo inicia com uma visão geral do funcionamento do sistema, enquanto nas seções sucessivas são apresentados mais em detalhe os modelos utilizados por estas ferramentas no processo de otimização semafórica, começando pelo BALANCE e passando em seguida ao EPICS.

No Capítulo 4 são apresentadas as características gerais do sistema de transporte na cidade de São Paulo e as peculiaridades da área de estudo escolhida para a microssimulação.

O Capítulo 5 inicia com o detalhamento do processo de montagem do modelo de microssimulação, desde a coleta e tratamento dos dados de entrada utilizados, até às características da ferramenta de microssimulação escolhida. O Capítulo 5 continua com a descrição dos processos de calibração e validação e os resultados destes, mostrando como os valores obtidos conferem ao modelo a aderência à realidade necessária para que as simulações possam ser consideradas cientificamente válidas.

O Capítulo 6 é dedicado à análise dos resultados das simulações software e às primeiras conclusões. Na primeira parte do capítulo são descritos os indicadores de desempenho escolhidos para a classificação dos resultados e os cenários de simulação selecionados enquanto na segunda parte são apresentados os valores dos indicadores obtidos nas simulações e a comparação entre eles.

No Capítulo 7, o último desta dissertação, são apresentadas as conclusões do autor sobre o caso de estudo analisado e algumas considerações sobre possíveis evoluções da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

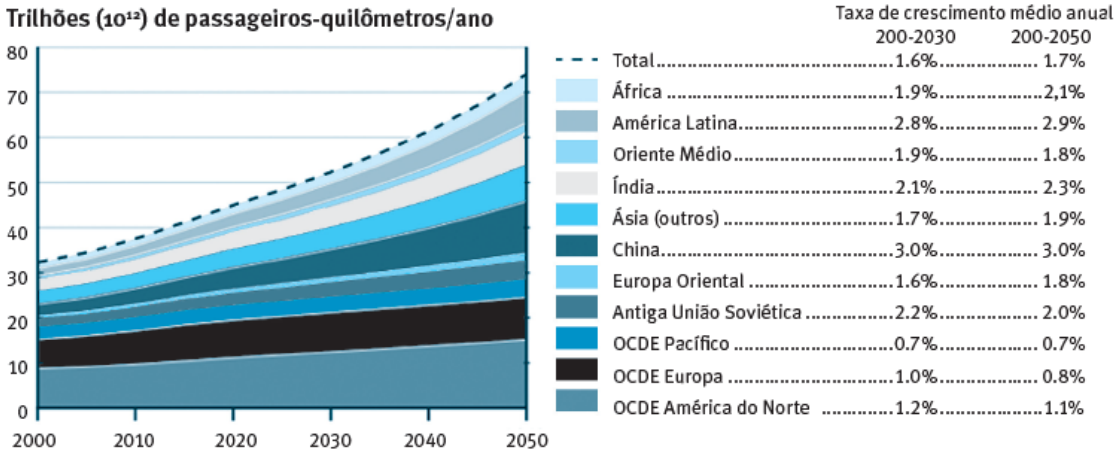
2.1 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE (ITS)

A demanda de mobilidade de pessoas e mercadorias cresceu de maneira notável nas últimas décadas e os dados disponíveis indicam claramente que esta tendência será mantida nos próximos anos (Figura 2-1). Este cenário aponta diretamente para a necessidades de governos investirem de forma consistente na área de transporte para que esta demanda seja atendida de maneira que segurança e a sustentabilidade esteja garantida (MAURO, 2010; TURKSMA; BLOOM; JEFTIC, 2011; VITALE et al.,2013; AMBROSINO et al., 2015; DJAHEL et al., 2015).

Na Figura 2-1 e na Figura 2-2 são apresentadas as projeções de crescimento da demanda de transporte por continente e modal, elaborados em 2004 pelo Conselho Empresarial Mundial em 2004 e reportados no Caderno Técnico nº8 da Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP (DARIDO; PENA, 2012).

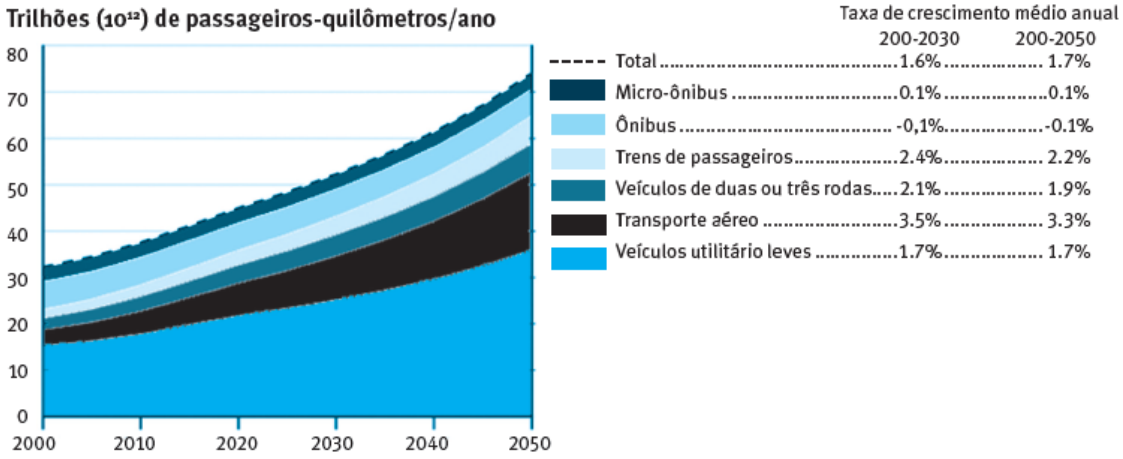
O crescimento das cidades, concentrado especialmente nos países de média e baixa renda, requer estratégias de planejamento urbano diferentes, especialmente em relação às infraestruturas de transporte, componente nevrálgica para o desenvolvimento sustentável das cidades.

Figura 2-1: Uso individual de transporte, por região



Fonte: Darido e Pena, 2012

Figura 2-2: Uso individual de transporte, por modal



Fonte: Darido e Pena, 2012

Uma infraestrutura de transportes que atenda a essas premissas necessita ser mais eficiente e inteligente, isto é, provida da capacidade de prever e influenciar com maior grau de exatidão a demanda para alinhá-la à oferta disponível e desejada, de forma que se consiga reduzir o consumo de energia e as emissões e, sobretudo, aumentar os padrões de segurança (DARIDO; PENA, 2012).

Os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) representam uma ferramenta importante para enfrentar os desafios presentes e futuros da mobilidade urbana e interurbana. A sigla ITS se refere a um conjunto de soluções em que as tecnologias de informática e de telecomunicações (também denominada de TIC ou de telemática) são aplicadas diretamente para solucionar problemas relativos aos transportes.

Como demostram as experiências internacionais, é preciso complementar a abordagem tradicional (mudança no padrão de uso do solo, investimentos em transportes públicos e infraestrutura viária) com medidas mais inovadoras que possam desfrutar da grande quantidade de informações que o processo de digitalização da vida proporciona hoje em dia, utilizando-as da forma mais integrada para que a gestão e o controle operem em sinergia, melhorando a relação entre a demanda e a oferta, otimizando e aprimorando o uso das diferentes modalidades de transporte, das infraestruturas e dos veículos (MAURO, 2010).

A utilização destas tecnologias nos países mais desenvolvidos contribuiu de forma eficaz e econômica à implementação de políticas que visavam melhorar os transportes públicos, promover modos de transportes mais ecológicos e eficientes do ponto de vista energético, reduzir os congestionamentos, aumentar a segurança dos viajantes e melhorar a qualidade de

vida nos centros urbanos (AMBROSINO et al., 2015; MORFOULAKI; MYROVALI; KOTOULA, 2015). Mauro (2010) relata que dados da União Europeia mostram como a implementação de ITS obteve resultados importantes em termos de redução dos tempos de deslocamento (20%), aumento da capacidade da rede (5-10%) e uma melhoria dos índices de segurança (10-15%).

Dentro da categoria de Sistemas de Inteligentes de Transporte encontram-se numerosas tecnologias, como: os centros de controle operacionais, os sistemas de monitoramento e fiscalização (câmeras, sensores, sistemas de informação geográfica, entre outros), os sistemas avançados de gerenciamento e sinalização do trânsito, as tecnologias para o gerenciamento dos estacionamentos, dos incidentes de tráfego, das respostas de emergência, assim com os sistemas para o pagamento eletrônico e a disponibilização em tempo real de informações ao usuário (DARIDO; PENA, 2012).

Como todas as tecnologias, os sistemas ITS também estão em constante evolução. Estes sistemas estão acompanhando a rápida mudança das tecnologias de informação e comunicação (TIC) e estão se tornando sempre mais cooperativos. Os denominados *Cooperative ITS* (C-ITS) são sistemas ITS onde os atores na via (veículos, infraestrutura viária, centros de controles, etc.) se comunicam entre si e compartilham informações utilizando uma arquitetura padrão, com o objetivo de proporcionar aos usuários um serviço melhor e com maior segurança (ERTICO, 2015).

A cooperação entre todos os atores da via se dá principalmente através de dois tipos de cenários: as comunicações entre veículos (*Vehicle to Vehicle* – V2V) e as comunicações entre veículo e a infraestrutura viária (*Vehicle to Infrastructure* – V2I). Num contexto de ITS cooperativos, cada ator gera e troca dados com os veículos na sua volta, com a infraestrutura e os centros de controle. Esta comunicação se dá em tempo real através de dispositivos como rádios embarcados ou instalados ao longo da via. Assim, esses dados são transformados em informações que podem ser tratadas e utilizadas com as modernas tecnologias, de forma a garantir um melhor desempenho da rede de transportes (LEONTIADIS et al., 2011; SCHOLLIERS et al., 2016; TURKSMA; BLOOM; JEFTIC, 2011).

Através dos ITS cooperativos é possível, por exemplo, alertar sobre acidentes ou situações potencialmente perigosas, comunicar a velocidade aconselhada para determinadas condições de tráfego, comunicar as condições do clima ao longo do caminho.

Os ITS cooperativos proporcionam também a possibilidade de utilizar, de forma mais eficiente e sustentável, a infraestrutura existente. Tientrakool, Ya-Chi e Maxemchuk (2011) calcularam

que a capacidade de uma rodovia pode aumentar em 43% com a utilização de sensores embutidos para a detecção de desaceleração imprevista do veículo precedente e a travagem automática e controlada do veículo seguidor, enquanto este número pode subir até 273% caso sejam utilizadas também as soluções V2V.

Dentro de um contexto de ITS cooperativos, os veículos se tornam uma fonte de dados abundante e econômica que pode ser utilizada para os mais variados escopos, inclusive na implementação de sistemas de tráfego adaptativo. A possibilidade de cada veículo se comunicar, em tempo real, com a infraestrutura viária, por exemplo com dados relativos à própria posição e velocidade (entre muitos outros), tornam desnecessária a utilização dos laços indutivos embutidos na via, cujos custos de instalação e manutenção limitam sensivelmente a área de atuação destes sistemas e não são mais justificáveis frente a riqueza de informações e os baixos custos proporcionados pelas tecnologias de comunicação veicular. Para realizar a comunicação entre veículos (V2V) e entre estes e a infraestrutura viária (V2I), se tornam necessárias tecnologias adequadas para a transmissão de dados. Devido ao contexto considerado, além da óbvia exigência de ser de tipo *wireless* (sem fio), estes tipos de redes demandam pré-requisitos como robustez e confiabilidade, características fundamentais para um sistema de transporte conectado e para as aplicações de segurança peculiares deste âmbito (DEY et al., 2016).

2.2 PREVISÃO DE TRÁFEGO E OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL

2.2.1 Complexidade do sistema de tráfego

O sistema de tráfego é um dos mais complexos produzidos pelo homem, devido à grande variedade de atores e fatores envolvidos, cada um com o seu próprio grau de autonomia e importância, cujos objetivos e ações são, não raramente, contrastantes entre si (VAN KATWIJK; VAN KONINGSBRUGGEN, 2002).

Um exemplo claro desta multiplicidade de pontos de vistas se dá com os interesses conflitantes dos motoristas e dos moradores de um bairro, onde os primeiros visam uma diminuição dos próprios tempos de viagem e dos custos associados, enquanto os segundos priorizam a minimização da poluição ambiental nas regiões onde moram, possível somente

através de uma restrição à circulação dos veículos naquelas áreas. Outro exemplo explicativo de necessidades contrastantes é o da disputa do espaço viário disponível entre o transporte coletivo e o individual e, ao mesmo tempo, entre o transporte motorizado e o não motorizado. Estes exemplos são esclarecedores sobre a impossibilidade de adoptar um único ponto de vista para a solução dos problemas relacionados ao trânsito, tornando a operação de gerenciamento do tráfego uma tarefa extremamente complexa para as autoridades que, enquanto representantes de toda a população, precisam elaborar políticas que levem em consideração todas as diferentes necessidades.

Especialmente naqueles casos, de grande saturação da rede viária, esta complexidade se manifesta pela característica ínsita destes sistemas de serem dificilmente previsíveis, devido à tendência a degenerar em situações caóticas, frente a eventos inesperados como fortes chuvas ou acidentes (KUBEK; WIĘCEK; CHWASTEK, 2016).

O aspecto mais evidente de uma situação de desordem é constituído pelos congestionamentos, fenômeno hoje em dia praticamente constante nas médias e grandes cidades, tanto no Brasil como no exterior, que afeta diretamente a qualidade de vida de todos aqueles que residem e trabalham em âmbito urbano, uma parcela da população mundial que já constitui a maioria e que vai crescer nas próximas décadas (UNITED NATIONS, 2014).

Normalmente os congestionamentos que as cidades experimentam são de dois tipos: recorrentes e não recorrentes. Os primeiros são causados quando a capacidade da rede viária não é suficiente para atender uma determinada demanda, como nos horários de pico ou durante os finais de semana e feriados. Os congestionamentos não recorrentes têm outra origem, em vez de eventos casuais e previsíveis, como os acima mencionados, aqui há os acidentes e chuvas fortes, cujos impactos podem ser mínimos e localizados assim como disruptivos para a rede inteira (AMHED; HAWAS, 2015).

Devido ao nefasto impacto ambiental, social e econômico que têm sobre a vida nas cidades, os congestionamentos representam um enorme desafio para as autoridades.

Nas últimas décadas, na literatura internacional apareceram muitos estudos sobre as externalidades negativas diretamente ligadas a uma rede de transporte ineficiente, tentando catalogar e quantificar estes efeitos. As pesquisas geralmente chegam a calcular um prejuízo que varia entre 1% e 3% do Produto Interno Bruto - PIB, números que parecem pequenos mas que pequenos não são, sendo que no caso de uma economia como a da União Europeia, este

custo anual chega a 200 bilhões de Euros, enquanto para os Estados Unidos se fala em 100-120 bilhões de dólares (DJAHEL et al., 2015; LOMAX; SCHRANK; EISELE, 2012).

2.2.2 Os Sistemas Avançados de Gerenciamento de Tráfego (ATMS)

Frente a estes números, as administrações tiveram que desenvolver metodologias de gerenciamento do tráfego que conseguissem lidar com a complexidade do problema, tentando atender, ao mesmo tempo, tanto os interesses dos usuários da rede de transporte, quanto as metas sócio-econômicas e ambientais da cidade.

Estes esforços geraram, de um lado, novas abordagens nas políticas de uso do solo e do planejamento de transportes, enquanto, por um outro lado, levaram ao desenvolvimento de ferramentas de gerenciamento de tráfego (TMS – *Traffic Management Systems*) através das quais as entidades, responsáveis pela operação de trânsito, conseguem monitorar a situação da rede viária e atuar em caso de eventos que geram uma deterioração do desempenho da rede (DJAHEL et al., 2015).

Com a evolução das tecnologias informáticas e de comunicação, estes sistemas passaram a ter a possibilidade de coletar um volume crescente de dados de tráfego, ao mesmo tempo em que a capacidade de cálculo proporcionada pelos computadores permite a extração de informações valiosas para atuar de maneira sempre mais rápida para a resolução dos problemas, tanto que agora se fala em ATMS (*Advanced Traffic Management Systems*).

Nos anos mais recentes os ATMS começaram a ter a capacidade de atuar em tempo real e apareceram ferramentas que propõem uma abordagem proativa à questão de gerenciamento de tráfego, isto é, que conseguem prever a provável evolução de uma determinada situação de tráfego e calcular diferentes cenários alternativos, dependentemente dos aspectos da operação que se quer priorizar.

Estes sistemas se baseiam em modelos matemáticos de previsão de curto prazo, que abrangem um leque temporal, que vai de poucos segundos até algumas horas e normalmente utilizam dados históricos e/ou dados em tempo real, isto é, advindos da rede através dos sensores instalados, tanto na via como nos veículos. Através da aplicação destes modelos se quer minimizar o erro de predição dos diferentes parâmetros de tráfego (volumes de tráfego, densidades, velocidades, tempos de viagem, etc.) até níveis acetáveis para esperar, frente à

implementação de uma determinada medida, um comportamento real do sistema, substancialmente parecido com o previamente simulado.

Nas últimas quatro décadas muitos pesquisadores se debruçaram sobre este tema e muitos foram os modelos de previsão propostos. Os mais antigos são de natureza analítica e se baseiam na elaboração dos dados disponíveis, através da aplicação de metodologias estatísticas como, entre outras, a regressão linear (CLARK, 2003; SMITH; WILLIAMS; OSWALD, 2002) e filtros de Kalman (GUO; WILLIAMS, 2010; XIE et al., 2007).

Estes modelos, baseados principalmente na manipulação de dados históricos, foram desenvolvidos principalmente dentro do contexto rodoviário para prever o tráfego em um determinado ponto, em um determinado momento e, devido à própria natureza estatística, se tornam extremamente complexos e apresentam vários problemas de desempenho, quando aplicados ao cenário urbano, que apresenta um sistema viário extremamente carregado e caracterizado por rápidas variações da demanda. Para que estes modelos consigam atender as condições de dinamicidade dos sistemas de tráfego urbano, se torna necessário um grande esforço computacional de calibração off-line, tarefa que impacta sensivelmente a capacidade destas técnicas de serem utilizadas em tempo real.

Uma outra abordagem estudada para lidar com a grande indeterminação e imprevisibilidade de um fenômeno como o tráfego urbano, é a "orientada a dados" (*data driven*), que vem adquirindo uma importância crescente nos últimos anos, devido à evolução tecnológica e as possibilidades que lhe proporciona em termos de inteligência computacional e mineração e análise de dados (VLAHOGIANNI; GOLIAS; KARLAFTIS, 2014).

Estes métodos, baseados nos conceitos de Inteligência Artificial, se tornaram as soluções mais pesquisadas e as mais promissoras, desde que a produção de abundantes dados em tempo real, providenciados pelos inúmeros sensores, espalhados tanto ao longo da rede como nos veículos e nos usuários do sistema (câmeras, laços, AVLs, antenas Bluetooth, Wi-Fi, celulares, etc.), se tornou uma realidade em numerosos contextos (VLAHOGIANNI; GOLIAS; KARLAFTIS, 2014). Tudo indica que a evolução das comunicações veiculares, acima mencionada (especialmente em relação à tecnologia celular 5G, apesar de alguma controvérsia sobre a privacidade das informações), vai consolidar esta tendência de explorar as mais diferentes possibilidades oferecidas pelas ferramentas computacionais.

Dentro desta categoria se encontram modelos baseados em redes neurais e bayesianas, em análise de frequência, em lógicas *fuzzy*, em algoritmos evolucionários e, também, muitas

aplicações de modelos híbridos (CHAN et al., 2012; DIMITRIOU; TSEKERIS; STATHOPOULOS, 2008; VLAHOGIANNI; KARLAFTIS, 2013; ZHAN; ZHANG; HAGHANI, 2014). Comparadas com as técnicas baseadas em princípios estatísticos, todas estas abordagens apresentam as vantagens de serem mais resistentes às rápidas variações do sistema e conseguir prever a evolução dos parâmetros de tráfego de uma forma mais acurada.

A partir da sempre maior disponibilidade de informações, providenciadas pelas ferramentas ITS e pela consolidação de técnicas de manipulação de dados, típicas da área da Inteligência Artificial, foi então possível desenvolver novos e mais eficientes modelos de previsão, mais aptos às características de rápidas mudanças das condições do sistema e as necessidades de atuação em tempo real, para minimizar o impacto de eventuais fenômenos anômalos, como os acidentes (KUBEK; WIĘCEK; CHWASTEK, 2016).

A possibilidade de uma previsão acurada e em tempo real dos parâmetros de tráfego, torna realidade o gerenciamento proativo do trânsito, sendo que é possível calcular previamente o valor de determinados parâmetros, como velocidade e atrasos, e o impacto em curto prazo que uma determinada medida teria sobre o desempenho da rede (ou de uma porção desta).

2.2.3 Os Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego (ATCS)

Devido à importância que os sistemas semafóricos têm para a regulação dos fluxos de tráfego e, em consequência, para o desempenho do sistema, as técnicas de previsão foram naturalmente aplicadas à gestão destes dispositivos, para que fosse possível um gerenciamento em tempo real, que tornasse os semáforos adaptativos, isto é, que fosse possível que se adaptassem de forma dinâmica e rápida às variações de fluxo, típicas de redes viárias em contexto urbano (AMHED; HAWAS, 2015; YANG; JAYAKRISHNAN, 2015).

Nas últimas décadas, se observou a implantação de numerosos Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego (ATCS, *Adaptive Traffic Control Systems*) ao redor do mundo, baseados em uma abordagem mais inteligente à questão dos congestionamentos, que visa minimizar os grandes impactos negativos destes sobre a eficiência do sistema viário, problemas com os quais as demais técnicas de gestão de planos semafóricos tradicionais não conseguem lidar, devido à presença dos já citados efeitos de rápida flutuação da demanda, característicos do sistema (CUCCI, 2016; STEVANOVIC, 2010).

Estes sistemas, a partir da medição em tempo real do fluxo dos veículos no trecho interessado, aplicam algoritmos para variar alguns parâmetros de funcionamento do semáforo, de forma que seja maximizada a eficiência da rede viária disponível, frente à situação de tráfego detectada naquele momento, através da optimização de determinados índices que dizem respeito a parâmetros tais como: atrasos, velocidades, tempo de viagem, números de paradas (entre outros).

Estes sistemas se diferenciam, dependendo dos algoritmos utilizados e dos parâmetros que visam otimizar. Entre estes há, por exemplo, o SCOOT (*Split Cicle Offset Optimization Technique* – HUNT et al., 1982) que se propõe a minimizar o atraso relativo às paradas nas interseções, o UTOPIA (*Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation* – MAURO; DI TARANTO, 1990) que visa minimizar o número de paradas e atrasos na área considerada. Outro sistema que apresenta os mesmos objetivos é o SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System* - LOWRIE, 1982), que foi desenvolvido na Austrália.

Além desses há o BALANCE (*Balancing Adaptive Network Control Method* - MERTZ, 2001), cujo objetivo é a minimização dos valores dos atrasos, do número de paradas, dos tempos de viagem e do comprimento das filas geradas dentro da área controlada.

Duas questões importantes a serem consideradas quando se fala de sistemas adaptativos de gerenciamento semafórico são: o nível de centralização da estratégia de optimização e a definição de eventuais subáreas de atuação de tais sistemas.

Os sistemas centralizados têm as vantagens de conseguirem olhar a rede inteira e de proverem uma optimização mais abrangente para o sistema como um todo, mas sofrem de problemas de processamento e precisam de uma rede de comunicação muito grande, fatores que podem tornar a atuação em tempo real ineficiente, além de serem inviáveis economicamente, especialmente se for considerado o caso das grandes cidades (MCKENNEY; WHITE, 2013; HAWAS, 2011).

Por outro lado, abordagens locais, em que a optimização é feita exclusivamente em relação à um determinado cruzamento, apresentam grande rapidez de execução e não necessitam de uma conexão com a central, mas, por outo lado, são totalmente cegas ao que acontece nas interseções adjacentes. Assim, a optimização de uma interseção, em presença de determinadas condições de tráfego, pode resultar em uma degradação do desempenho para a área em volta, como naqueles casos em que o tempo de verde é prolongado, apesar da existência de uma situação de congestionamento mais a frente, a qual com muita

probabilidade vai piorar por efeito da optimização local, efetuada nos cruzamentos anteriores (GERSHENSON; ROSENBLUETH, 2012).

Uma solução que vem sendo estudada para a implementação de sistemas adaptativos de controle semafórico é um compromisso entre o modelo local e o centralizado. Consiste em atuar o controle e a optimização em áreas que compreendem vários cruzamentos sinalizados (desde poucas unidades até dezenas), em que a optimização é feita simultaneamente para toda a macro área, a partir da consideração que o impacto dos problemas, na maioria dos casos, é maior em cruzamentos adjacentes e poucas vezes geram efeitos para a rede toda (STEVANOVIC, 2010).

Através desse modelo distribuído, os sistemas conseguem utilizar todos os dados disponíveis (tanto históricos como em tempo real) e conseguem reduzir de forma sensível os tempos e os custos de processamento das informações, ao mesmo tempo em que, devido à extensão da área gerenciada, são muito mais robustos a erros de optimização, típicos dos sistemas locais (AHMED; HAWAS, 2015).

Uma outra abordagem para o problema consiste em estruturar os sistemas de forma hierárquica, em que a optimização é realizada por etapas sequenciais, nas quais os dados são primeiramente processados, a partir de horizontes temporais e espaciais mais amplos, para serem sucessivamente refinados localmente, com um crescente nível de detalhe, até chegar ao cruzamento particular (YANG; JAYAKRISHNAN, 2015). Desta maneira estes sistemas conseguem lidar, de forma mais eficiente, com a multiplicidade das variações típicas do sistema de tráfego, sendo as variações mais lentas (de poucos minutos até algumas horas), gerenciadas e optimizadas em nível de macro área, enquanto as variações mais rápidas - características de uma determinada interseção - são gerenciadas de forma instantânea (poucos segundos) em nível local.

Esta é a solução atualmente adotada por alguns dos mais importantes sistemas ATCS como o UTOPIA, o BALANCE e o SCOOT, os quais utilizam uma estrutura hierárquica, de diferentes níveis, visando melhorar ao máximo o desempenho da rede semafórica. No caso específico do BALANCE a atuação hierarquizada se dá através da cooperação com sistemas de otimização local, onde estes últimos operam variações do plano semafórico e eventuais estratégias de priorização de veículos especiais de uma particular interseção, dentro de vínculos estabelecidos pelo nível superior (BRAUN et al., 2008). A componente macro BALANCE pode ser acoplada à muitos tipos de sistemas de otimização local (desde que consigam operar

respeitando as restrições impostas), sendo o EPICS (*Entire Priority Intersection Control System*) o seu parceiro natural, pois foi desenvolvido pela mesma empresa, a partir da experiência do próprio BALANCE.

2.3 PRIORIZAÇÃO SEMAFÓRICA PARA ÔNIBUS

2.3.1 Conceitos básicos de priorização semafórica

Nas últimas décadas nas grandes cidades, tanto no Brasil quanto no exterior, o sistema público de ônibus teve que lidar, de forma sempre mais acentuada, com problemas que levaram a uma deterioração do serviço ofertado e a uma perda de competitividade em relação ao transporte individual motorizado. A baixa velocidade e os consequentes longos tempos de viagem deste sistema, assim como a elevação dos custos operacionais e a irregularidade do serviço prestado, estão diretamente relacionados à disputa do espaço viário disponível com os veículos particulares, cujo crescimento da frota, tão largamente subsidiado diretamente e indiretamente pelas autoridades públicas, constitui hoje a principal causa dos severos congestionamentos que as cidades experimentam e de todas as consequências negativas associadas (ANTP, 1998).

Na cidade de São Paulo um ônibus, em horário de pico, transporta o equivalente, em passageiros, a trinta e cinco (35) automóveis particulares e, apesar de ser responsável de cerca da metade dos deslocamentos com os modos motorizados (tendo um número parecido de viagens com respeito ao transporte individual motorizado), ocupa somente um quarto do espaço viário disponível (VASCONCELLOS, 2014).

As consequências desta desproporção são inúmeras e dizem a respeito à eficiência energética do sistema, aos custos que a sociedade paga pelos acidentes, à deterioração do meio ambiente e da qualidade de vida dos cidadãos (DARAIO et al., 2016).

As pesquisas feitas para identificar quais fatores guiam a escolha do usuário, em relação ao meio de transporte utilizado, isolaram muitos e diferentes componentes que concorrem para a decisão, mas quase todas concordam em alocar um peso determinante para fatores como o tempo, o custo, o conforto da viagem, a regularidade e a frequência do serviço, aspectos que,

no caso do serviço público de ônibus, são diretamente afetados pelos congestionamentos causados pelo uso descontrolado de automóveis (REDMAN et al., 2013).

Visando a manutenção de adequados níveis de serviço do sistema público de ônibus, num cenário de constante aumento da frota de veículos particulares, as cidades europeias, particularmente expostas ao problema da racionalização de um espaço urbano extremamente limitado devido a um sistema viário, em grande parte concebido antes da invenção do automóvel, vêm implementando estratégias de priorização do transporte coletivo há décadas. Muitos foram os tipos de intervenções testados e implementados para que o usuário do sistema de transporte seja levado a preferir o ônibus em relação ao transporte individual motorizado, realizando, desta maneira, uma mais eficiente utilização da rede viária disponível. As tentativas realizadas neste sentido podem ser agrupadas em duas categorias principais: medidas de intervenção física e medidas baseadas no controle dos semáforos (DINOPOULOU, 2013).

As medidas para a priorização do serviço público de ônibus muitas vezes estão relacionadas a intervenções no sistema viário, através da implantação de faixas e vias de uso exclusivos e, também, de racionalização dos layouts de pontos de embarque e desembarque de passageiros, de forma a se tornar esta operação mais rápida (PERON, 2015).

Estes tipos de medidas se mostraram muito eficazes em melhorar a qualidade do serviço público de ônibus mas, além dos elevados custos de realização que comportam, podem levar, devido ao uma escassa disponibilidade de espaço viário, a uma degradação relevante para o desempenho dos demais veículos e usuários que utilizam a rede, em alguns casos com efeitos negativos (onde as medidas de priorização não foram avaliadas com o devido cuidado) que anularam as vantagens produzidas para os ônibus (OLIVEIRA NETO, 2004).

A partir da constatação que uma parte considerável dos tempos de viagem dos ônibus no contexto urbano (até 20%) é representada pelo tempo gasto nos cruzamentos semafóricos (NTU, 2002), uma estratégia alternativa para melhorar o desempenho dos ônibus é a prioridade semafórica para o transporte coletivo, que se torna uma medida válida, tanto naqueles casos onde a implementação de uma faixa ou de uma via exclusiva não é recomendada, quanto em presença destas.

2.3.2 Estratégias de priorização semafórica

A estratégia de prioridade do transporte público nas interseções sinalizadas (TSP – *Transit Signal Priority*) se realiza através da manipulação dos tempos de funcionamento dos semáforos, de maneira que o ônibus consiga transitar de forma mais rápida, reduzindo desta maneira o tempo de viagem, o consumo de combustível (e consequentemente a emissão de poluentes e os custos operacionais) e garantindo uma melhor regularidade do serviço, assim como maior conforto para os usuários (MIRCHANDANI et al., 2001).

Smith, Hemily e Ivanovic (2005) identificam na regularidade do serviço, no aumento da eficiência, no desempenho da rede viária e na possibilidade de geração de informações sobre o trânsito os mais importantes objetivos de qualquer estratégia de TSP.

Como no caso da implantação de faixas ou vias exclusivas, também no caso da priorização semafórica é necessário que a estratégia a ser implementada seja avaliada com meticulosidade, em relação aos veículos que serão afetados por elas, para que sejam ponderados vantagens e desvantagens consequentes (KOELHER, 2009).

A prioridade semafórica para o transporte público é um campo que evoluiu muito nas últimas décadas e que continua sendo promissor para o aprimoramento da qualidade do serviço de ônibus, devido em parte à necessidade sempre maior que as cidades têm de atrair os potenciais usuários para a transporte coletivo, devido ao constante crescimento das possibilidades tecnológicas - proporcionadas pela evolução das tecnologias informáticas e de comunicação (MALANDRAKI, 2014).

Na literatura, as estratégias de prioridade semafórica são geralmente divididas em duas categorias principais: a prioridade passiva e a prioridade ativa. Esta última, por sua vez, se divide entre prioridade incondicional e condicional (AMHED; HAWAS, 2015; OLIVEIRA NETO, 2004).

A **prioridade passiva** consiste em ajustar a programação semafórica manualmente ou através de programas, dando maior peso a aproximações de veículos com maior volume de passageiros. Neste tipo de operação, a prioridade para o transporte público coletivo pode ser dada por meio de configurações nos tempos semafóricos (ciclo, tempos de verde e defasagem) de forma que os favoreçam. Embora a estratégia passiva não requeira modificações na infraestrutura, os benefícios obtidos são modestos e por isso não são

amplamente implantados. A prioridade passiva é mais indicada para corredores onde os tempos de embarque/desembarque não variam muito.

A sincronização das fases de verde entre as interseções (ou “onda verde”) não é comum com sistemas de ônibus porque os tempos de deslocamento dos veículos estão sujeitos a tempo de permanência variável nas estações (especialmente quando vários serviços de rota usam o mesmo corredor ou as frequências são altas). Se as velocidades dos veículos forem razoavelmente previsíveis ou controladas, então é possível coordenar os semáforos em um corredor de ônibus. Se os tempos de embarque e desembarque forem relativamente regulares e da mesma magnitude do tempo verde da onda verde planejada para o tráfego misto, a coordenação levará ao efeito oposto, já que toda vez que os ônibus demorarem em uma estação, é provável que alcancem próximo semáforo no início da luz vermelha.

Na **prioridade ativa** (ou adaptativa) a manipulação da programação semafórica é feita em tempo real, a partir da detecção da presença de um ônibus em aproximação ao cruzamento interessado. O objetivo da detecção é calcular o instante em que o ônibus chegará ao cruzamento, para que seja possível variar a programação do semáforo de forma que este não precise parar. Existem várias tecnologias para realizar a detecção dos veículos, desde laços magnéticos embutidos na via até dispositivos ópticos de leitura do tráfego, passando pelas mais variadas tecnologias de comunicação *wireless* (Wi-Fi, GPS, RFID, GPRS, entre outros). Dependentemente da infraestrutura de comunicação se encontrar no veículo ou na via ou em ambos e desta última ser de natureza local ou centralizada, os sistemas de detecção são classificados em três grupos: aqueles cujos equipamentos estão instalados somente na via e aqueles onde existe uma parte embarcada no veículo e outra na via, sendo que neste último caso a parte fixa pode ser local ou centralizada (HOUNSELL; MCLEOD; SHRESTHA, 2004).

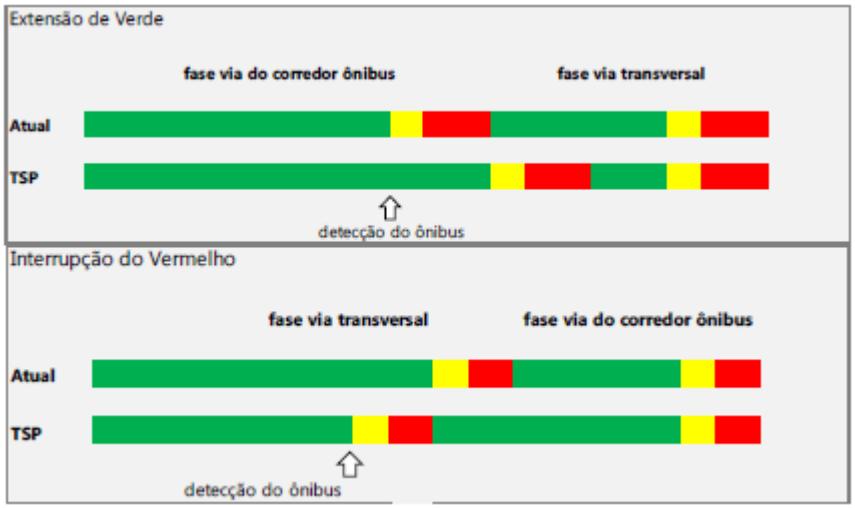
Desde a sua concepção, muitas foram as estratégias utilizadas para modificar os tempos semafóricos e maximizar as vantagens na aplicação da prioridade ativa, sendo a extensão do verde e a interrupção do vermelho as que tiveram mais sucesso até hoje (PERON, 2015).

Na primeira o tempo de verde é prolongado até se detectar a passagem completa do ônibus pelo cruzamento, enquanto na segunda opção um período de verde é inserido dentro do tempo de vermelho para que o ônibus não tenha que parar. Contemporaneamente aos veículos das vias conflitantes é apresentado o vermelho para que sejam forçados a parar, para esperar o ônibus passar (Figura 2-3).

Dentro do âmbito da prioridade ativa existe uma diferenciação entre a prioridade condicional e a incondicional.

Na abordagem **condicional**, a prioridade é dada exclusivamente se determinadas condições predefinidas são satisfeitas pelo veículo em aproximação. Desta maneira se visa aproveitar, de forma mais eficiente, o espaço viário e o tempo disponível, aplicando a prioridade somente naqueles casos que representam uma real vantagem do sistema, como, por exemplo, em casos em que o ônibus está atrasado ou muito lotado, ignorando o pedido de prioridade nos outros casos.

Figura 2-3: Principais estratégias de priorização semafórica ativa para ônibus



Fonte: Peron (2015) adaptado de Alemán (2013)

Desta maneira consegue-se conservar os benefícios da estratégia de priorização semafórica para os ônibus, minimizando ao mesmo tempo o transtorno para os veículos nas vias conflitantes (FURTH; MULLER, 2002). Neste caso é muito importante introduzir controles para a condição de retardo, diretamente relacionados à folga da programação horária das viagens, sendo que, em um sistema com tempos muito justos, a prioridade será aplicada a todos os ônibus pois há muita probabilidade de todos estarem atrasados.

No caso da abordagem **incondicional**, a prioridade é sempre acordada ao veículo em aproximação, sem que nenhuma condição específica seja averiguada, além da presença do ônibus. Esta estratégia apresenta a desvantagem de uma deterioração sensível do desempenho para os veículos nas vias que não desfrutam da priorização, podendo até levar a uma paralização das vias secundárias, em caso de alta frequência de ônibus na via principal

(PERON, 2015). A prioridade incondicional poderia até gerar um impacto negativo na regularidade do serviço de ônibus, sendo que também os veículos que estão antecipados, com respeito à programação horária, também receberão a prioridade, anulando desta forma o efeito regulador do semáforo e possibilitando a criação de filas de ônibus nos pontos de parada.

A grande capacidade de coleta e tratamento de dados, em tempo real, proporcionadas pelos ITS teve um impacto sobre as técnicas de priorização semafóricas, que passaram a ter mais possibilidades a serem exploradas. Especialmente no campo da prioridade condicional, a grande quantidade de informações agora disponíveis e a capacidade de rápida predição e atuação, permitiram a experimentação de novas metodologias de TSP, especialmente acopladas com os sistemas de controle semafórico adaptativo, conforme explicado na seção seguinte.

2.3.3 A priorização do transporte público em contexto de tráfego adaptativo

Paralelamente ao desenvolvimento de sistemas para o gerenciamento em tempo real dos congestionamentos, várias pesquisas tentaram identificar os efeitos que a integração de estratégias de priorização semafórica - para o transporte público - nestes sistemas - gerenciamento dos congestionamentos - teria sobre o desempenho geral da rede (AMHED; HAWAS, 2015). As hipóteses destas pesquisas são que as novas possibilidades, oferecidas pelos sistemas adaptativos de controle semafórico, abrem novas oportunidades de estudo para a TSP, sendo que poderiam ser utilizadas com sucesso para maximizar o desempenho geral do sistema, ao mesmo tempo em que se implementa uma priorização para o sistema de ônibus.

A questão principal a ser abordada é entender se dentro de um contexto de tráfego adaptativo os efeitos negativos que a TPS tem para os demais atores do trânsito podem ser minimizados, especialmente em relação aos fluxos nas direções secundárias.

Apesar do transporte público e do privado terem objetivos conflitantes, devido à constante disputa de espaço viário - que é por natureza limitado, e cuja oferta é extremamente inelástica, estas pesquisas entendem que a quebra de paradigma representada pelos ITS, permite a harmonização destes contrastes em maneira rápida e com custos relativamente baixo (ZHOU, 2007). A grande disponibilidade de dados, tanto dos veículos em si, quanto

relativos aos usuários dos mesmos e mesmo dos pedestres, fornecem a oportunidade de se criarem novas estratégias de TPS condicional, que proporcionem as vantagens esperados em termos de tempo de viagem e regularidade para os usuários do transporte público, minimizando ao mesmo tempo o impacto para os demais usuários da rede chegando, em alguns casos, até a introduzir uma melhoria também para estes atores (DION; HELLINGA, 2002; MUTHUSWAMY; MCSHANE; DANIEL, 2007).

Muitas metodologias foram desenvolvidas para tentar otimizar os vários aspectos da circulação, tanto em situação de corredor, como em situação normal. Em muitos casos os ATCS passaram a incorporar componentes para a implementação da prioridade semafórica, tanto condicional como incondicional, como por exemplo o SCOOT, o UTOPIA, o BALANCE (neste último caso através de uma operação conjunta com um mecanismo de otimização local). A mesma coisa aconteceu em relação aos simuladores (especialmente micro e mesosimulações) que disponibilizam há mais de uma década ferramentas para testar lógicas diferentes de priorização semafórica no contexto considerado.

Os estudos realizados até agora, nos mais diferentes contextos, apontaram para uma relação estreita entre a metodologia de otimização considerada e as características particulares do cenário considerado e da sua demanda de circulação (AMBROSINO et al., 2015). As experiências mostraram que, dependentemente das características intrínsecas da rede analisada (como o grau de saturação da rede, a importância relativa do fluxo principal com respeito aos demais, a localização dos pontos de paradas dos ônibus - em relação à posição dos semáforos, entre outros), a aplicação da priorização semafórica para os ônibus pode ter um impacto positivo ou negativo para os demais veículos, tanto para o fluxo principal quanto para os demais, tornando necessário, por este motivo, um trabalho de estudo e calibração minucioso das estratégias a serem testadas e, eventualmente, implementadas (NGAN; SAYED; ABDELFATAH, 2004; OLIVEIRA NETO, 2004).

2.4 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

2.4.1 Os simuladores no contexto dos transportes

Os softwares de simulação representam um claro exemplo de como a rápida evolução das tecnologias informáticas proporciona novas e poderosas ferramentas para as mais diferentes aplicações na área de transporte, que abrangem aspectos que vão desde o planejamento de longo prazo até a gestão do tráfego em tempo real.

Estes instrumentos permitem, em tempos relativamente rápidos, a avaliação de diferentes opções de intervenção no sistema viário, tanto no longo quanto no curto prazo, proporcionando uma comparação entre elas através do estudo dos impactos que cada uma terá sobre o desempenho da rede viária, a partir de uma classificação baseada em índices oportunamente escolhidos, em relação aos objetivos propostos caso a caso (MADEIROS, 2001; MAIA, 2007).

Através da possibilidade de identificação e caracterização de problemas, diagnósticos e avaliação de alternativas de solução, já na fase de planejamento, a utilização destas ferramentas tem como consequência direta um aprimoramento da experiência de viagem dos usuários da rede e uma maximização da eficiência na aplicação de recursos financeiros (AQUINO, 2013).

As vantagens oferecidas pela simulação na área de transporte estão se tornando sempre maiores à medida que a evolução das novas tecnologias de informática e de telecomunicação (TIC) viabilizam um constante aumento na produção, coleta e tratamento de dados sobre o estado da rede viária, abrindo novos caminhos para estas ferramentas que, desta maneira, se tornaram um componente essencial para o gerenciamento avançado e em tempo real do tráfego. A possibilidade de calcular em poucos minutos a provável evolução do tráfego no curto prazo (até poucas horas), fornece a capacidade de atuar de forma proativa para maximizar a eficiência da rede frente a condições de extrema saturação e degradação do desempenho ou de situações “anômalas” como os acidentes, eventos imprevisíveis cujo impacto sobre o tráfego é considerável, especialmente nos períodos de pico.

Do ponto de vista científico, a simulação de redes de transporte consiste na aplicação de técnicas numéricas para a representação no software de redes viárias, com o objetivo

principal de reproduzir a evolução ao longo do tempo de um determinado sistema, através da previsão da sequência de eventos hipotéticos característicos deste. (AQUINO, 2013; MAY, 1990).

Esta representação é feita a partir de um modelo da rede em estudo, uma representação simplificada da realidade que se pretende pesquisar, em que determinados elementos são ressaltados em relação aos outros, dependentemente dos aspectos sobre os quais se quer focar a atenção (ORTUZAR; WILLUMSENN, 2011).

2.4.2 Modelos de simulação de tráfego

Na literatura sobre o argumento, o elemento chave que caracteriza um modelo é o nível de agregação em que as entidades que percorrem (veículos) são tratadas, aspecto estreitamente relacionado à escala da rede estudada (CYBIS; LINDAU; ARAUJO, 2002).

Dependentemente então da maneira como os modelos representam o fluxo de tráfego, ou ainda de acordo com a natureza do sistema que estes tentam representar, os modelos (e os softwares que se baseiam nestes) são classificados em diferentes categorias (ORTUZAR; WILLUMSENN, 2011).

Na bibliografia a primeira grande classificação é feita entre macro e micro modelos, sendo que os primeiros, em que o movimento das unidades de análise (veículos) é tratado de forma agregada em fluxos de tráfego em grande áreas (no limite na cidade inteira), são considerados os mais aptos para estudos estratégicos, enquanto os segundos, onde o comportamento de cada veículo é analisado individualmente, resultam ser mais aptos às análises mais detalhadas, em áreas menores, que levem em consideração a não homogeneidade e não continuidade do fluxo (MAIA, 2007; CYBIS; LINDAU; ARAUJO, 2002).

Hoje em dia existem muitos estudos que se baseiam em um terceiro tipo de modelo que pode se colocar em uma posição intermediária entre os dois citados acima, o mesomodelo, que apresenta algumas características comuns aos macros e outras ao micromodelos, sempre com base no nível de agregação dos veículos e na natureza do sistema que visam representar.

Os **modelos macroscópicos** são utilizados principalmente para estudos de corte estratégico, para intervenções que interessam grandes áreas, com o objetivo de reproduzir, através da alocação da demanda numa determinada rede de tráfego, o comportamento hipotético dos

usuários na escolha de rota, fator de extrema importância para o correto funcionamento da rede viária (CYBIS; LINDAU; ARAUJO, 2002).

Através destes modelos é possível medir velocidades, densidades e fluxos de forma agregada e relativa aos valores médios dos vários arcos (considerados constantes ao longo do mesmo), chegando a uma representação estática da rede, isto é de um único estado, avaliado a partir de determinadas condições específicas, que geralmente dizem a respeito das características topológicas e viárias da rede que se quer estudar (AQUINO, 2013; ARIOTTI et al., 2004; MAIA, 2007).

Geralmente estes modelos são utilizados em estudos estratégicos, de longo prazo, para planejamento e gerenciamento da rede de transporte, pela capacidade que têm de estimar o impacto que uma determinada medida irá acarretar no conjunto da rede e não somente na operação do local diretamente interessado (CYBIS; LINDAU; ARAUJO, 2002).

Como principais tipos de aplicações podem-se citar a implementação de novas vias de tráfego, duplicação de vias e implantação de corredores exclusivos de transporte público (AQUINO, 2013). Alguns dos softwares de macrossimulação mais conhecidos são o TransCAD, AIMSUN, TRANSPLAN, EMME e VISUM.

Os **micromodelos** são utilizados para medir os impactos de medidas de carácter operacional, que geralmente interessam uma área relativamente restrita da rede viária. As variáveis interessadas são analisadas de forma desagregada, isto é, referindo-se às unidades veiculares e permitindo a estimativa precisa de forma contínua ou discreta de grandezas como velocidades, posição, atrasos, tamanho das filas, entre outras (ARAUJO, 2003).

Nos micromodelos são analisadas as interações entre os veículos ao longo dos arcos, baseados essencialmente nos quatros submodelos comportamentais de perseguição veicular (*car-following*), mudança de faixa (*lane-changing*), aceitação de brechas (*gap-acceptance*) e escolha de rota (*decision routes*) que modela a escolha de rotas sendo estas estáticas (totais ou parciais) ou dinâmicas. Os dois primeiros submodelos são característicos do software VISSIM.

O **modelo de perseguição veicular** descreve o comportamento psicofísico do motorista em relação à velocidade e a aceleração do veículo que segue e que está na sua frente. Está relacionado a fatores como: sensibilidade do motorista e velocidade dos veículos envolvidos.

O **modelo de mudança de faixa** descreve o comportamento do motorista em relação à mudança de faixa, desde a avaliação da oportunidade da mudança até a eventual realização desta.

O **modelo de aceitação de brechas** descreve o comportamento dos veículos (ou pedestres) que não pertencem ao fluxo principal, em caso de travessia ou imissão neste.

O **modelo de escolha de rota** que modela a escolha de rotas sendo estas estáticas (totais ou parciais) ou dinâmicas.

Algumas das ferramentas de software de microssimulação mais populares são o AIMSUN, TRANSMODELER, INTEGRATION, PARAMICS, VISSIM, NETSIM e DRACULA.

Os **modelos mesoscópicos** se aplicam para o estudo de áreas maiores, se comparadas com a microssimulação, mas que não chegam a abrangência típica de um macromodelo. Apresentam então características intermediarias entre os macros e os micromodelos, identificando como unidade de análise os pelotões que se formam, como consequência dos veículos circularem em uma rede viária onde há presença de cruzamentos com semáforos e tratando as mesmas grandezas típicas da macrossimulação, mas dentro de horizontes temporais típicos da micro.

Nos modelos mesoscópicos os veículos não são considerados como elementos discretos e, em consequência disso, as grandezas como velocidade, aceleração, posição, tamanho são avaliados em relação ao grupo inteiro.

Existem autores que introduziram uma subclassificação destes modelos que diz a respeito do grau de detalhe em que as variáveis são tratadas, dividindo em modelos de alta ou de baixa fidelidade (AQUINO, 2013).

Devido à própria natureza, estes modelos são utilizados prevalentemente para medir os impactos gerados por diferentes estratégias de gerenciamento operacional de tráfego numa determinada sub-região, especialmente em relação à utilização de diferentes alternativas de políticas semafóricas. Na Tabela 2-1 são resumidas as principais aplicações dos modelos tratados.

Tabela 2-1: Aplicações de modelos de simulação

MODELOS	APLICAÇÃO
Macroscópico	Planejamento de intervenções estratégicas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
Mesoscópicos	Análises de intervenções táticas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
	Definição de rotas de veículos
	Verificação das mudanças de rotas de veículos segundo estímulos
Microscópico	Análises de intervenções operacionais
	Simulação de pequenas/médias áreas
	Análises de esquemas alternativos de controle de tráfego
	Alteração na operação semafórica
	Entrada e saída - acessos "agulhas"
	Definição de rotas de veículos
	Análise de esquemas de operação de tráfego em área
	Verificação das mudanças de rotas de veículos segundo estímulos

Fonte: Peron (2015) adaptado de Maia (1978) e Medeiros (2012)

3 ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE ADAPTATIVO EM TEMPO REAL

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE ADAPTATIVO EM TEMPO REAL

Desde as primeiras aparições no começo dos anos oitenta no Reino Unido e na Austrália, os Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego (ATCS) se destacaram como uma ferramenta valiosa para minimizar as externalidades negativas, que as cidades vinham experimentando devido à saturação do próprio sistema viário e do consequente baixo desempenho deste.

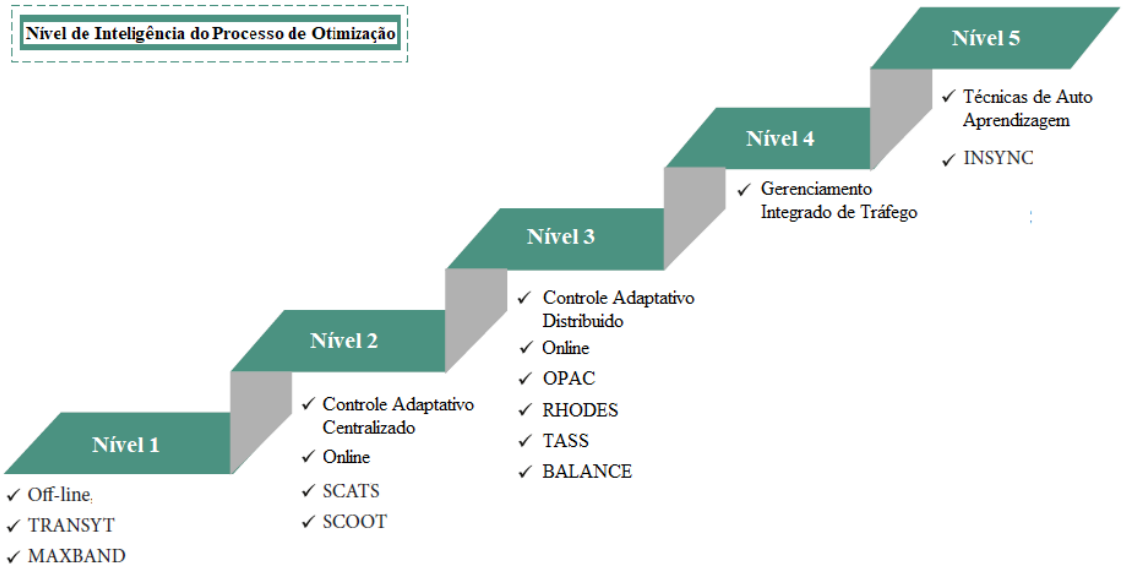
O sucesso dos primeiros sistemas desencadeou um processo evolutivo destas tecnologias, que continua ininterrupto até hoje e que está estritamente ligado ao fato dos congestionamentos continuarem a serem um dos principais problemas para a economia urbana, especialmente para os países emergentes e em desenvolvimento. Como direta consequência da espantosa evolução que as telecomunicações, a informática e a eletrônica tiveram nas últimas décadas, os ATCS se tornaram sistemas sempre mais complexos e poderosos chegando, em alguns casos, a proporcionarem a capacidade de previsão do tráfego, geralmente realizada através de técnicas estatísticas e, ultimamente, graças à utilização de técnicas de inteligência artificial. Dado o atual cenário tecnológico, a tendência é que o processo evolutivo dos sistemas ATCS continue em direção à uma maior integração com ferramentas derivadas dos contextos de Big Data, Internet das Coisas, veículos autônomos, comunicações V2I e V2V (entre outras).

Stevanovic (2010) relata que até hoje mais de 20 sistemas adaptativos de otimização de tráfego foram desenvolvidos por institutos de pesquisa e empresas de transporte em todo o mundo, sendo que menos da metade destes chegaram a ser implantados. Em uma pesquisa recente, Whan et al. (2018) repropõem uma classificação destes sistemas feita por Gartner et al. (1995) que divide estas tecnologias em 5 níveis a partir da adaptabilidade ao contexto em que operam e ao nível de inteligência utilizado no processo de otimização (Figura 3-1).

No primeiro nível da classificação proposta aparecem os sistemas offline como o TRANSYT, enquanto nos níveis 2 e 3 são incluídos aqueles sistemas que operam um processo de otimização online tanto de forma centralizada (nível 2) assim como de maneira distribuída e ativa, isto é, a partir de uma previsão da possível evolução do tráfego (nível 3). Já no nível 4 são classificados aqueles sistemas que realizam uma integração com as demais ferramentas de gerenciamento de tráfego (ATMS) visando maximizar as vantagens técnicas e de

desempenho através da sinergia de múltiplos subsistemas (paneis de mensagens variáveis, estações meteorológicas, sistemas de informação ao público, entre outros). No último nível (o 5), aquele onde a inteligência do processo de elaboração é considerada máxima, são incluídos aqueles sistemas que realizam a otimização semafórica a partir de técnicas de *maching learning* (auto aprendizagem de maquinas) a partir das quais o sistema consegue de se adaptar de forma mais adequada à realidade da porção de rede gerenciada (nível 5).

Figura 3-1: Evolução dos Sistemas de Controle Adaptativo de Tráfego



Fonte: Adaptado de Whan et al. (2018)

Devido ao objetivo desta dissertação ser o estudo da aplicação de um sistema de controle semafórico adaptativo em tempo real no contexto da cidade de São Paulo, optou-se por focar a atenção para os níveis 2 e 3. Isto se deve a diferentes motivos. O primeiro tem a ver com a experiência maturada localmente com sistemas SCOOT (São Paulo) e SCATS (Osasco) a qual mostrou a capacidade que estas tecnologias têm de melhorar o desempenho da rede viária no contexto analisado nesta pesquisa. Outro ponto é relativo aos problemas que estas soluções tiveram desde a implantação e que no caso de São Paulo levou à inatividade do sistema, a qual dependeu principalmente das dificuldades que a manutenção constante de uma infraestrutura grande requer e que demanda uma alocação de recursos que nem sempre as administrações têm, especialmente em países emergentes. Por estes motivos não serão considerados tanto os sistemas dos níveis 4 e 5, sendo que a componente tecnológica

necessária para a implementação destes está atualmente fora do alcance dos órgãos competentes (devido especialmente aos altos investimentos que uma infraestrutura deste tipo demanda), quanto aqueles do nível 1, pois trata-se de sistemas de otimização offline que não são objeto desta dissertação.

Por outro lado, as tecnologias que pertencem ao nível 3 representam um termo de comparação válido para entender uma possível transição no curto e médio prazo dos sistemas atualmente em uso, em função da relativa proximidade tecnológica que estas apresentam e da maior viabilidade econômica consequente. É então nas tecnologias que pertencem a esta categoria que esta dissertação pretende focar, tentando entender os detalhes do funcionamento deste tipo de abordagem ao problema da otimização semafórica e as possíveis vantagens e desvantagens que uma eventual implementação desta teria no contexto da cidade de São Paulo.

Entre os sistemas do nível 3 escolheram-se o BALANCE e o EPICS, da empresa alemã PTV AG, em função da quantidade de informações a respeito da tecnologia e do suporte técnico disponibilizados pela empresa, que proporcionou a possibilidade de se aprofundar no entendimento dos mecanismos de otimização utilizados.

A escolha destas tecnologias torna possível o estudo tanto de uma estratégia para rede (BALANCE) como de uma abordagem local (EPICS), assim como da combinação das duas técnicas de otimização (BALANCE e EPICS funcionando acoplados), tornando a análise das soluções selecionadas mais completa.

Outro fator importante para a escolha foi à possibilidade de simular os algoritmos de otimização dentro do próprio VISSIM e do VISUM, sendo estes, respectivamente, as principais ferramentas de microssimulação e macro modelos que vem sendo usadas no grupo de pesquisa do qual o autor pertence no âmbito do Departamento de Engenharia de Transporte (PTR) da Escola Politécnica da USP.

A ausência de outros exemplos na utilização das tecnologias BALANCE e EPICS no contexto brasileiro (simulados ou em operação) representou também um elemento relevante para a escolha.

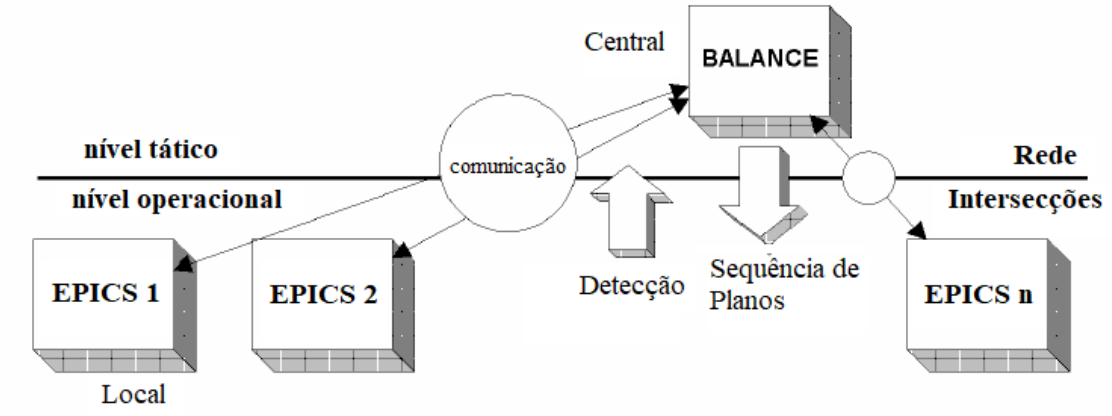
Nas próximas seções deste capítulo será feita, após uma rápida apresentação das principais características das tecnologias, uma avaliação comparativa entre sistemas de nível 2 selecionados (SCOOT e SCATS) e o BALANCE\EPICS para sucessivamente apresentar os detalhes relativos ao funcionamento destes últimos.

3.2 CARACTÉRISTICAS GERAIS E COMPARAÇÂO ENTRE SISTEMAS

3.2.1 O BALANCE/EPICS

O conjunto constituído pelos softwares **BALANCE** e **EPICS,** da empresa alemã PTV, são um exemplo de sistema de tráfego adaptativo, distribuído e estruturado de forma hierárquica em dois níveis (Figura 3-2).

Figura 3-2: Arquitetura do sistema BALANCE/EPICS



Fonte: Adaptado de Braun et al. (2008)

A componente **BALANCE** trabalha de maneira centralizada e no nível macroscópico, dentro de um horizonte temporal mais amplo, que geralmente fica entre os 5 e os 15 minutos, criando ciclicamente **Planos Semafóricos de Referência** (FSM - *Framework Signal Plans*) que são enviados periodicamente para todos os controladores da área gerenciada. Nestes *frameworks* ficam definidas as partes fixas e variáveis do plano de cada controlador, assim como o tempo de ciclo ideal que será o mesmo para todos os semáforos pertencentes ao mesmo grupo de controle.

A componente **EPICS** trabalha de forma local e descentralizada, em nível microscópico, para calcular, a cada segundo e baseando-se nas condições de tráfego na área de próprio interesse, detectadas através dos sensores disponíveis na via, a melhor combinação dos parâmetros da

parte variável do plano semafórico enviado pelo BALANCE, de forma que o desempenho daquela específica interseção seja maximizado.

Maiores detalhes sobre o funcionamento dos sistemas BALANCE e EPICS são apresentados mais a frente neste capítulo.

3.2.2 O SCOOT

Com o nome de *Split Cycle Offset Optimization Technique* ou SCOOT, se define uma tecnologia de otimização semafórica desenvolvida em 1982 no Reino Unido pelo *Transport Research Laboratory* (TRL). O SCOOT foi criado a partir dos princípios de funcionamento do método TRANSYT (utilizado para calcular planos de tempo fixos) com o objetivo principal de minimizar o atraso relativo às paradas nas interseções (ROBERTSON; BRETHERTON, 1991).

O SCOOT utiliza uma arquitetura fisicamente centralizada e o algoritmo de otimização é executado centralmente para todos os controladores gerenciados pelo sistema.

O processo de otimização é feito através de rápidas mudanças dos tempos relativos aos estágios, à defasagem e ao offset.

O processo de otimização de cada um destes parâmetros é feito a partir da avaliação dos efeitos que uma pequena variação de tempo teria para o desempenho geral da região controlada. Este efeito é estimado em nível central através da atualização continuada de um modelo interno da rede, possível a partir dos dados coletados na via pelos detectores do sistema. O desempenho é medido a partir do valor de um *Performance Index* (PI, indicador de desempenho), um indicador que mede o valor dos atrasos e número de paradas dos veículos em cada link (STEVANOVIC, 2010). Em detalhe:

- *Otimizador de tempo de estágio (Split)*: este otimizador atua 5 segundos antes de cada mudança de fase, analisando se esse tempo deve ser prolongado, encurtado ou mantido. Usualmente os incrementos (positivos ou negativos) nesse tempo são de ±4 segundos.

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

ou pode ser confirmado o valor atual). As decisões tomadas são implementadas no ciclo sucessivo.

- *Otimizador de tempo de ciclo (Cycle)*: opera a nível regional a cada 5 minutos ou, caso os tempos de ciclo estejam mudando muito rapidamente, a cada 2,5 minutos. O otimizador identifica a interseção crítica na região e age para ajustar o tempo de ciclo desta de forma a manter a saturação do link conforme o parâmetro de *Target Saturation* (Saturação Desejada), normalmente estabelecido no valor de 90% para cada fase. Os incrementos possíveis para esse otimizador são de 4, 8 ou 16 segundos, dependendo do tempo de ciclo.

O SCOOT requer, no mínimo, um detector em cada link da interseção. Os loops indutivos são os detectores mais usados, embora também possam ser usadas câmeras de detecção de vídeo. Estes detectores podem ser colocados tanto na proximidade da linha de retenção como a distâncias superiores que podem variar entre os 50 e os 300 metros (dependendo do link) e podem endereçar de uma a quatro faixas. Estes detectores coletam informações a cada quarto de segundo, e que sucessivamente são enviados pelo controlador ao sistema central a cada segundo.

O SCOOT é provido de ferramentas para gerenciar de maneira correta os congestionamentos (MING, 1998) e permitir a prioridade semafórica para os ônibus, implementada através das estratégias de extensão de verde e interrupção de vermelho (ver seção 2.4).

O Sistema SCOOT foi implantado pela Prefeitura de São Paulo no final dos anos noventa e chegou a gerenciar por volta de 900 controladores sobre os quase 5000 da rede inteira. Existem estudos do tipo antes-depois que apontaram a uma sensível melhora dos indicadores de desempenho da via depois da sua implantação (MING e POWLER, 1998; BITTENCOURT, 1998). Apesar dos resultados positivos apontados por estes escassos estudos, aos poucos o sistema ficou não operativo, principalmente por causa da complicada e onerosa manutenção das suas partes.

3.2.3 O SCATS

O SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) é uma tecnologia de controle de tráfego adaptativo desenvolvido na Austrália, a partir das pesquisas de Lowrie (1982). Trata-

se de um sistema que implementa mudanças nos planos semafóricos na área controlada baseando-se sobre as variações de tráfego detectadas nos últimos ciclos.

Diferentemente do SCOOT e do BALANCE, o SCATS baseia o próprio processo de otimização em algoritmos e não em modelos de tráfego (STUDER; KETABDARI; MARCHIONNI, 2015).

O SCATS divide a rede em subsistemas, que geralmente são constituídos de um número de interseções que varia entre 1 e 10. Em cada subsistema é definido uma interseção crítica, a partir do desempenho da qual são calculados os parâmetros semafóricos para todas as interseções daquele grupo.

É estruturado, em sua arquitetura lógica, em dois níveis denominados de *Estratégico* e *Tático*. O *nível estratégico* é implementado por computadores regionais, que utilizam dados de fluxo e ocupação coletados pelos detectores - implantados nas interseções - para determinar os melhores valores para o tempo de ciclo, a duração dos estágios e a defasagem para todos os subsistemas. O objetivo do nível estratégico é operar a otimização dos vários subsistemas, para melhorar as condições de tráfego detectadas em cada conjunto de controladores. Os planos calculados pelo nível estratégico para um determinado subsistema serão implementados por todos os controladores que pertencem ao grupo, que trabalham de forma coordenada.

Dentro de cada subsistema, o *nível tático* proporciona uma maior flexibilidade para cada controlador, permitindo variações locais que melhorem a resposta local para cada interseção, implementando estratégias como a antecipação de verde e a omissão de fases e, eventualmente, a priorização de veículos especiais. Esta configuração hierárquica é parecida com aquela permitida pelas tecnologias BALANCE e EPICS em operação acoplada.

O processo de otimização do sistema SCATS é baseado num parâmetro empírico, denominado “Grau de Saturação”. A partir do valor deste parâmetro, obtido pela razão entre o tempo de verde efetivamente utilizado e o tempo de verde disponível, calculado para a faixa com maior demanda da interseção crítica de cada subsistema, é decidido se o tempo de ciclo será prorrogado, encurtado ou mantido, respeitando valores mínimos e máximos de tempo de ciclo. O valor crítico para essa decisão é usualmente definido como 90% (STEVANOVIC, 2010).

Os detectores utilizados pelo sistema SCATS são laços magnéticos implantados em posição próxima da linha de retenção. Raramente se utiliza um segundo conjunto de detectores no começo do link com o objetivo de medir o comprimento da fila.

Um sistema SCATS se encontra atualmente em uso na cidade de Osasco. Este sistema é composto por 20 controladores conectados por meio de fibra ótica, que operam em tempo real desde o ano 2007.

3.2.4 Comparação entre as tecnologias BALANCE/EPICS, SCOOT e SCATS

Devido aos sistemas analisados neste capítulo terem sido desenvolvidos para atender situações diferentes, uma comparação entre as tecnologias é possível até certo ponto. Para realizar esta comparação decidiu-se utilizar a abordagem proposta por Stevanovic (2010), que identifica uma lista de aspectos comuns entre os demais sistemas analisados em seu estudo, entre os quais foram selecionados os mais expressivos no contexto da comparação que se pretende realizar nesta dissertação. Em detalhe:

- Tipologia de detecção
- Tipologia de ação
- Metodologia de otimização
- Horizonte temporal de otimização
- Níveis hierárquicos
- Estimação através de modelagem de tráfego
- Parâmetros semafóricos otimizados

O resultado da comparação entre os sistemas adaptativos considerados nesta dissertação é apresentado na Tabela 3-1:

Tabela 3-1: Comparação entre as tecnologias avaliadas

	BALANCE/EPICS	SCOOT	SCATS
DETECÇÃO	PLR	CL & LR	LR, PLR, ML
AÇÃO	P & R	P & R	R
OTIMIZAÇÃO	RT	RD	BR
HORIZONTE	5 min	Ciclo\5 min	Ciclo
HIERARQUIA	C\L	C\L	C\L
MODELAGEM	Sim	Sim	Não
PARÂMETROS	E, TC, D, SF	E, TC, D, SF	E, TC, D

DETECÇÃO – **LR**: Linha de Retenção; **PLR**: Próximo à Linha de Retenção; **ML**: Meio do Link, **CL**: Começo do Link
AÇÃO – **P**: Proativo; **R**: Reativo
OTIMIZAÇÃO – **BR**: Baseada em Regra (relação funcional simples entre os parâmetros de tráfego e temporizações de sinal resultantes) ; **RD**: Restrição de Domínio (o domínio de pesquisa é muito limitado para evitar grandes flutuações dos parâmetros) ; **RT**: Restrição de Tempo (o processo de otimização é limitado pelo tempo limite) definidos pelas políticas do controlador local
HIERARQUIA – **C**: Central; **L**: Local
PARÂMETROS – **E**: Estágio; **TC**: Tempo de Ciclo; **D**: Defasagem; **SF**: Sequência de Fases

Fonte: Adaptado de STEVANOVIC (2010)

3.3 A OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE REDES DO BALANCE

3.3.1 Características gerais do BALANCE

O BALANCE (*Balancing Adaptive Network Control Method*) é um software que visa melhorar, em uma área relativamente grande, o desempenho da rede viária, a partir da optimização em tempo real dos parâmetros de funcionamento dos controladores semafóricos.

O BALANCE é capaz de gerenciar até 100 cruzamentos, divididos em um ou mais grupos de controle, sendo a divisão normalmente feita com base nas características de uma determinada região, com o intuito de colocar no mesmo grupo todos aqueles controladores que pertencem a uma área, com características homogêneas e cujo funcionamento tenha um relacionamento direto maior entre eles.

Uma vez estabelecidos os eventuais grupos de controle, o BALANCE operará a optimização de forma integrada, coordenada e simultânea para todos os cruzamentos que fazem parte do grupo, a partir da elaboração de um tempo de ciclo que será único para todos dentro de cada área.

Para realizar a optimização o BALANCE utiliza um modelo macroscópico para a estimativa dos fluxos de tráfego, a partir dos dados históricos armazenados no próprio banco de dados e atualizado com os dados coletados pelos sensores presentes na via, e um modelo mesoscópico, que calcula os efeitos que um determinado plano semafórico tem sobre estes fluxos. Ao decorrer das várias etapas do processo, vários algoritmos são utilizados, conforme explicado mais adiante.

O BALANCE é independente da modalidade de detecção utilizada e também da presença de componentes locais de optimização, que consigam melhorar os planos calculados por este. Todos os tipos de sensores podem ser utilizados para enviar dados sobre a situação do tráfego, a condição é que a qualidade mínima destes seja conservada, especialmente em situações de grande saturação da rede ou de fenômenos meteorológicos extremos (que no caso de São Paulo se trata principalmente de fortes chuvas).

Caso não seja presente um software de optimização em nível local (não necessariamente deve ser o EPICS) o controlador pode utilizar como planos fixos os enviados pelo BALANCE, sendo que estes contém todos os parâmetros para realizar a coordenação entre semáforos (offset, tempo de ciclo), assim como uma primeira optimização dos tempos de verde.

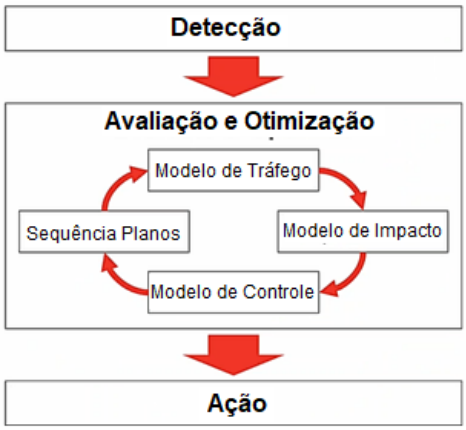
O BALANCE é formado por diferentes módulos funcionais que operam dentro de um processo iterativo, cujo objetivo final é identificar o melhor plano semafórico de referência para uma determinada área, considerando as condições da rede detectadas pelos sensores. Dentro de cada módulo diferentes metodologias e algoritmos são utilizados para otimizar o resultado final.

3.3.2 O processo iterativo de otimização do BALANCE

Para realizar uma estimativa confiável da situação de tráfego na área controlada é preciso coletar e tratar os dados existentes, sobre as condições da rede, no momento considerado. No primeiro passo do processo de optimização do BALANCE os dados registrados pelos sensores, espalhados na via, são coletados pelo controlador e enviados à base de dados central, onde são armazenados depois de serem oportunamente validados e tratados, para que seja possível atualizar o modelo de rede neste contido, complementando os dados históricos já presentes.

Na Figura 3-3 é representado o modelo iterativo descrito e os módulos funcionais que o compõem:

Figura 3-3: Estrutura funcional do BALANCE



Fonte: PTV Group (2016, a)

A partir dos dados coletados na via (inclusive os planos semafóricos que estão sendo utilizados) e dos outros armazenados na base de dados central, na primeira etapa do processo de avaliação e otimização, o **Modelo de Tráfego** faz a criação, a partir dos dados advindos da via e das informações armazenadas, no *database* central, de uma estimação da situação atual da rede, que seja a mais próxima possível à realidade. Para fazer isso se trabalha em dois diferentes níveis: macroscópico e mesoscópico. O resultado deste processo é repassado ao **Modelo de Impacto,** que é o responsável pelo cálculo dos efeitos que os planos semafóricos utilizados terão no curto prazo sobre os veículos na rede, realizando uma avaliação em termos de indicadores de atraso, número de paradas e tempo de viagem. A avaliação destes efeitos é baseada em um indicador de desempenho ***PI*** (*Performance Index*) que é calculado a partir dos valores dos atrasos, do número de paradas, dos tempos de viagem e do comprimento das filas geradas (Equação 3-1).

Equação 3-1: Performance Index do BALANCE

$$PI(x,y) = \sum_{sg \in SG} (\alpha_{sg} D(x,y,sg) + \beta_{sg} H(x,y,sg) + \gamma_{sg} L(x,y,sg))$$

onde:

sg	número de grupos semafóricos da rede
$\alpha(sg),\ \beta(sg),\ \gamma(sg)$	ênfase em tempos de espera, número de paradas, comprimento da fila no grupo semafórico *sg*
D, H, L	tempos de espera, número de paradas, comprimento da fila para o grupo semafórico *sg*
x	vector das variáveis de controle
y	vector das variáveis relacionadas ao trânsito

O **Modelo de Controle** recebe a previsão de tráfego, baseada nos atuais planos semafóricos, e procura calcular, através da variação dos parâmetros destes (split, offset e tempo de ciclo), alternativas que minimizem os indicadores citados.

Para alcançar este objetivo o BALANCE dispõe de duas possibilidades:

- **Algoritmo de Hill-Climbing:** processo de otimização sequencial que requer um razoável tempo de cálculo e que o torna ideal, especialmente para o ambiente de simulação onde este recurso é limitado.
- **Algoritmo genético:** processo de otimização paralelo de todos os parâmetros, cujos resultados são, em geral, melhores do que o algoritmo de Hill-Climbing, mas a um maior custo de consumo de recursos de cálculo e de um maior tempo.

O resultado do modelo de controle é o conjunto de **Planos Semafóricos de Referência** para todos os controladores da área.

Neste ponto a estimativa de tráfego é reavaliada, a partir do modelo de tráfego, para considerar os efeitos que seriam produzidos pelo plano de referência calculado, começando de novo o ciclo descrito, num processo de iteração que é interrompido somente quando a solução ótima é encontrada, ou o tempo máximo permitido para o processamento é alcançado.

Neste ponto o plano com o melhor desempenho associado é enviado aos controladores reais para que seja implementado por estes.

Independentemente do algoritmo utilizado, o produto final do processo de otimização do modelo de controle é um **Plano Semafórico Geral de Referência** (*Framework Signal Plan*), que é constituído pelos parâmetros específicos, avaliados como os melhores para cada

controlador da área (split, offset), além de um tempo de ciclo único para todos os semáforos desta.

O **Framework Signal Plan** é encaminhado então para a componente mesoscópica do modelo de tráfego para que sejam avaliados os efeitos dos novos parâmetros sobre os perfis de tráfego em cada arco da rede.

Neste ponto o processo geral recomeça de novo e é repetido até encontrar o melhor valor do indicador ***PI***, quando o plano semafórico de referência associado é então enviado aos controladores (no simulador ou no mundo real) para que seja implementado.

3.4 A OTIMIZAÇÃO E PRIORIZAÇÃO SEMAFÓRICA LOCAL DO EPICS

3.4.1 Características gerais do EPICS

Entire Priority Intersection Control System (EPICS) é um sistema de controle adaptativo local, isto é, um sistema que, a partir de dados em tempo real e de modelos de tráfego, otimiza a sequência e o tempo de duração dos estágios semafóricos em uma única intersecção, através da constante avaliação da manutenção ou da mudança destes parâmetros.

O EPICS atua em tempo real com um horizonte temporal de previsão de 100s (PTV Group, 2016 b), suficiente para considerar, de maneira adequada, a demanda de uma intersecção isolada. Outra característica do EPICS é a velocidade de execução, sendo que o processo de otimização pode ser executado em apenas um segundo (caso for integrado com um moderno controlador), conferindo ao sistema a capacidade de grande precisão para estimar a melhor combinação para maximizar o desempenho do cruzamento de interesse.

Uma primeira consequência da capacidade do EPICS de manipular rapidamente os planos semafóricos, de forma que se adaptem melhor às condições de tráfego detectadas, é a possibilidade de implementar estratégias de priorização para transporte público coletivo.

A priorização semafórica de ônibus usual, feita por um método de controle baseado em regras, aplica diagramas de fluxo para prever todas as possíveis situações em que um ou mais ônibus podem se aproximar de uma intersecção. Já o EPICS faz uso da priorização de forma mais simplificada: tenta minimizar o tempo de atraso total dos usuários das vias num futuro próximo (100s), mensurado por meio de um índice de performance total ***PI***.

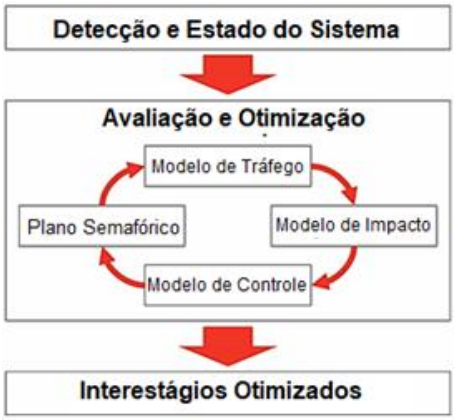
Dentro desta lógica, a priorização semafórica de transporte público é implementada de forma simples, através da escolha de um peso relativo maior para os ônibus, aumentando desta maneira a relevância do atraso para este tipo de veículos, mas tomando o cuidado de não desequilibrar a intersecção.

Além disso, esse sistema permite muitas outras formas de priorização e controle da intersecção como, por exemplo, o caso do atraso dos pedestres em vias em que o transporte a pé é muito utilizado, que pode ser reduzido com a utilização de um índice associado maior.

3.4.2 O processo iterativo de otimização e priorização do EPICS

O esquema geral de funcionamento do EPICS é parecido com o do BALANCE, sendo este também constituído por diferentes módulos funcionais, que operam dentro de um processo iterativo, cujo objetivo final é a otimização dos parâmetros do plano semafórico do controlador local (no caso do BALANCE o resultado é um plano geral de referência para todos os controladores da área gerenciada), conforme a situação de tráfego detectada pelos sensores associados ao cruzamento e às eventuais regras de priorização estabelecidas. Na Figura 3-4 é apresentado o esquema geral de funcionamento do EPICS. As principais diferenças com aquele do BALANCE são representadas para os parâmetros de entrada e saída do processo, além de outros detalhes do mecanismo de otimização, conforme explicado mais adiante nesta seção.

Figura 3-4: Estrutura funcional do EPICS



Fonte: PTV AG (2016, b)

Na etapa inicial do processo, a partir dos dados coletados pelos sensores espalhados na via e daqueles fornecidos diretamente pelos controladores, o EPICS recebe informações sobre o estado de tráfego da própria área de interesse. Estas informações são coletadas e tratadas a cada segundo pelo sistema, de forma que este possa ter uma imagem sempre atualizada das condições reais da seção local da rede. As informações são coletadas continuamente, mesmo durante as fases de interestágios nas quais o EPICS não pode interferir, para que este disponha de uma imagem sempre atualizada da situação de tráfego na área alçada.

A parte iterativa do processo de otimização é composta de várias etapas que são repetidas até que a melhor combinação de valores possíveis seja identificada para os parâmetros dos planos semafóricos do cruzamento interessado. Em cada etapa diferentes metodologias e algoritmos são utilizados para que os resultados parciais a serem entregues para o estágio sucessivo correspondam à melhor solução para aquela determinada fase e aquelas determinadas condições.

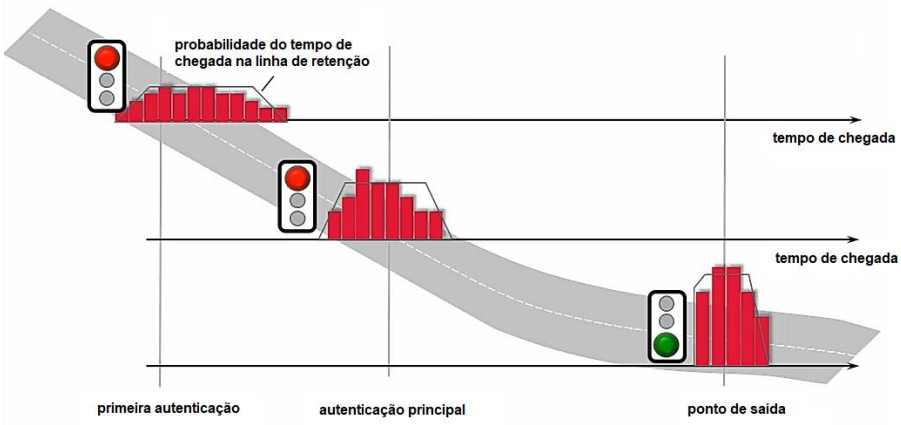
Na primeira etapa o **Modelo de Tráfego** procura estimar o tamanho das filas nos trechos de competência do cruzamento, da maneira mais fiel possível à realidade. Esta estimativa é realizada a partir dos dados fornecidos pelos detectores e pelos mesmos controladores, oportunamente tratados.

Para a estimação do tráfego individual, um modelo determinístico semelhante ao do TRANSYT (software para a coordenação de semáforos de tempos fixos criado nos anos sessenta – ROBERTSON, 1986) foi desenvolvido para o PTV EPICS. Nele se assume a velocidade de progressão dos veículos como constante, com os veículos que, após a detecção, progridem segundo a segundo numa mesma velocidade, até a linha de parada. Quando são identificadas filas além do detector, outro modelo é utilizado. Nestes casos o modelo passa de reativo, isto é, que estima o tamanho da fila a partir de dados de carros que chegaram, para o proativo, isto é, que estima a fila considerando também aqueles carros que ainda não foram detectados. O método utilizado para estimar o comprimento da fila, nesse caso, identifica durante o verde o comprimento da fila além do detector e o utiliza para predizer esse comprimento no próximo ciclo (LIU et al., 2009).

Os veículos de transporte público, diferentemente dos individuais, são tratados com uma probabilidade trapezoidal de tempo de chegada na linha de retenção. Quando mais próximo da interseção o veículo estiver, mais estreita e certeira será a distribuição trapezoidal (Figura 3-5). Para que seja possível implementar este mecanismo no EPICS são necessários pelo

menos dois detectores (um ponto de login no começo ou na metade do link e um de logout próximo à interseção), sendo a utilização de um número maior resultante em uma maior precisão da previsão do tempo de chegada.

Figura 3-5: Processo de detecção de ônibus no EPICS



Fonte: PTV Group (2016, b)

Os pedestres não são mensurados pelo programa e, no caso de estágio verde, se considera que todos eles atravessam a rua simultaneamente.

Os pedestres não são mensurados pelo programa e, no caso de estágio verde, se considera que todos eles atravessam a rua simultaneamente.

Na fase sucessiva do processo, o **Modelo de Impacto** opera a partir das estimativas de filas elaboradas pelo modelo de tráfego. Este módulo funcional utiliza uma função objetivo a ser otimizada pelo software, chamada de indicador de desempenho ***PI*** (*Performance Index*), que é definida pelas variáveis de atraso total e número de paradas. Normalmente, o número de paradas tem peso relativo nulo na função de desempenho, sendo que este valor está diretamente relacionado ao do atraso (em condições normais de tráfego uma parada significa, na média, mais de 10 segundos de atraso). Devido às diferenças de contextos (especialmente políticos) de cada cidade e país, o número de paradas pode se tornar um parâmetro importante a ser considerado (Equação 3-2). Nestes casos é possível introduzir o controle desta variável através da inclusão no indicador de desempenho de um fator ponderado que possa dar conta de maneira adequada do peso específico deste parâmetro na situação considerada.

Equação 3-2: Perfomance Index do EPICS

$$PI(sp) = \sum_{sg \in SG} \alpha_{sg} D_{sg}(sp) + \beta \, \Delta(ref, sp)$$

onde:

SG	conjunto de grupos semafóricos
sp	plano semafórico avaliado
ref	plano semafórico de referência
$\alpha(sg)$	peso do grupo semafórico *sg*
D(sg)	soma do atraso no grupo semafórico *sg* no horizonte temporal considerado
Δ	desvio da alternativa de controle sp com relação à referência sp
β	peso do desvio com relação à referência *sp*

O tempo de atraso é calculado como a diferença no fluxo que entra e sai de cada semáforo, valor estreitamente relacionado ao tamanho das filas. Sendo que o fluxo de saída está diretamente relacionado à posição e a duração dos tempos de verde de cada controlador, estes fatores são os que mais influenciam o valor do indicador ***PI***, e é então na manipulação destes parâmetros que o modelo de controle atua.

Uma vez calculado o valo do Performance Index, o **Modelo de Controle** opera com o objetivo desse modelo é definir uma sequência de estágios e interestágios que minimize o valor do indicador de desempenho ***PI***. Normalmente esta operação é realizada em relação a um horizonte de tempo que usualmente é de 100 segundos (isto é, se procura o menor valor de ***PI*** para a interseção avaliada para os próximos 100 segundos), considerado suficiente para dar conta de uma demanda de tráfego relevante.

O resultado de cada processamento é então um plano semafórico para os seguintes T segundos, isto é uma descrição detalhada das fases de interestágios a serem implementadas, definindo desta maneira também os relativos tempos de verde associados. O processo de otimização continua então segundo o mecanismo descrito acima até o melhor plano semafórico ser encontrado para o horizonte temporal considerado (geralmente 100s).

Finalmente, a partir do mínimo ***PI*** encontrado, a sequência dos sinais e tempo de duração dos estágios são definidos e enviados para os controladores da interseção. Esse ciclo de otimização é realizado pelo EPICS a cada segundo, mas somente enquanto uma fase de interestágio não estiver ativa, sendo que durante este intervalo de tempo o plano semafórico

deve ser considerado fixo. Atualmente o EPICS não possui a capacidade de começar uma fase de interestágio enquanto outra estiver sendo aplicada.

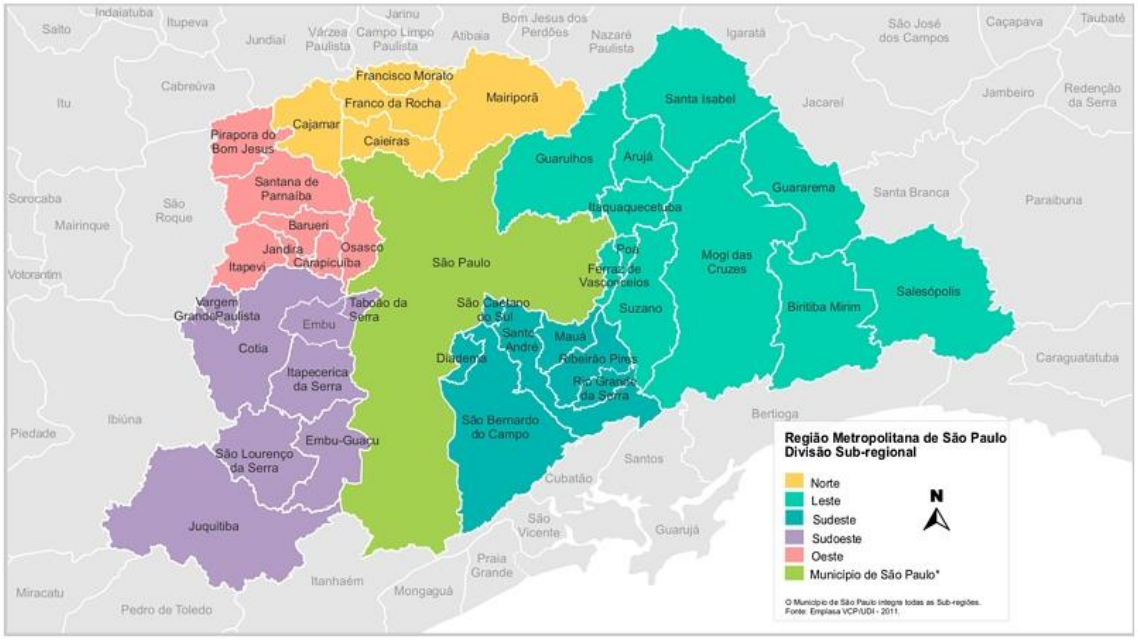
4 A ÁREA DE ESTUDO

4.1 A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP)

4.1.1 Visão geral

Com uma população que supera os 21 milhões de habitantes e uma área urbanizada superior a 2.200 km², a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP - Figura 4-1) é uma das maiores aglomerações urbanas do mundo. A RMSP é o maior polo de riqueza nacional e seu Produto Interno Bruto (PIB) atingiu R$ 1.107,5 bilhões em 2016, o que corresponde a algo em torno de 17,7% do PIB brasileiro (EMPLASA, 2019). A Metrópole sedia alguns dos mais importantes conglomerados financeiros, industriais e comerciais do País, desempenhando função de liderança no mercado latino-americano, utilizando complexas redes de serviços de alta especialização e requerendo um adequado planejamento para a circulação e transporte de pessoas, mercadorias e informações.

Figura 4-1: Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)



Fonte: Emplasa (2019)

Com uma população em 2018 de mais de 12 milhões de pessoas o Município de São Paulo representa o coração pulsante deste gigantesco conglomerado urbano, cuja economia representa o 62% do PIB da RMSP e 33% do PIB do Estado de São Paulo (EMPLASA, 2019).

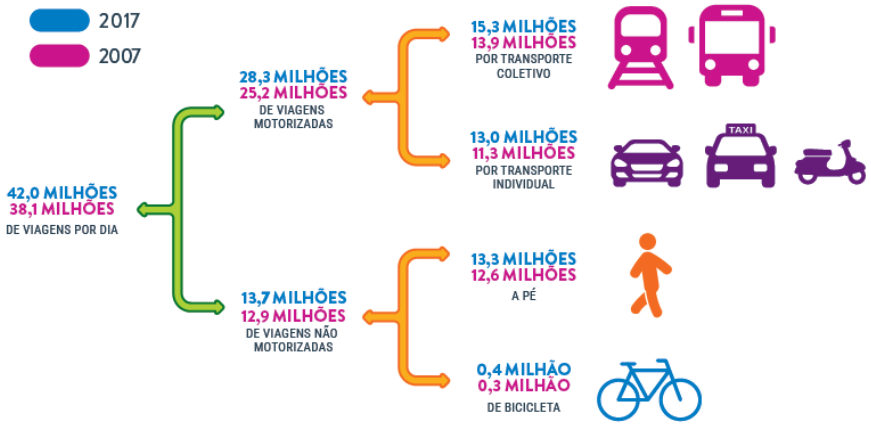
A cidade tem um dos centros financeiros mais modernos do mundo tanto que a Bolsa de Mercadorias e Futuro de São Paulo (BM&F Bovespa) é a segunda maior bolsa de valores do mundo em valor de mercado e é responsável por mais de um quarto da produção científica brasileira e sedia dois terços das empresas multinacionais presentes no País (CINTRA, 2014).

4.1.2 Demanda de viagens e divisão modal

A mobilidade é um tema importante e complexo especialmente em uma metrópole extensa como a RMSP. Uma pesquisa realizada pelo IBOPE (2016) para a Semana da Mobilidade revela que o paulistano leva em média 2 horas e 58 minutos para realizar as viagens necessárias no dia.

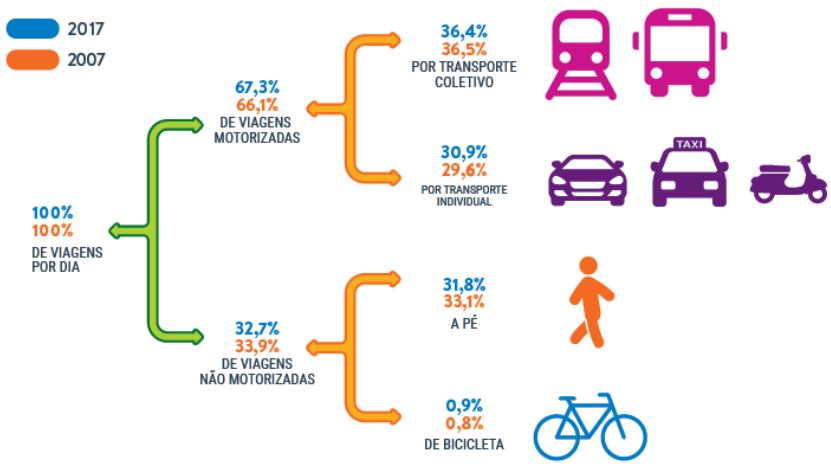
Atualmente, a população da cidade da RMSP é atendida diariamente por linhas de metrô, trens, ônibus e por veículos particulares. Segundo a última pesquisa OD do Metrô, na RMSP são realizadas diariamente 42 milhões de viagens (METRÔ, 2019). Destas, cerca de 32% são realizadas nos modos ativos, 31,2% nos modos individuais motorizados, 36.8% nos modos coletivos (Figuras 4-2 e 4-3).

Figura 4-2: Composição das viagens 2007-2017



Fonte: Metrô (2019)

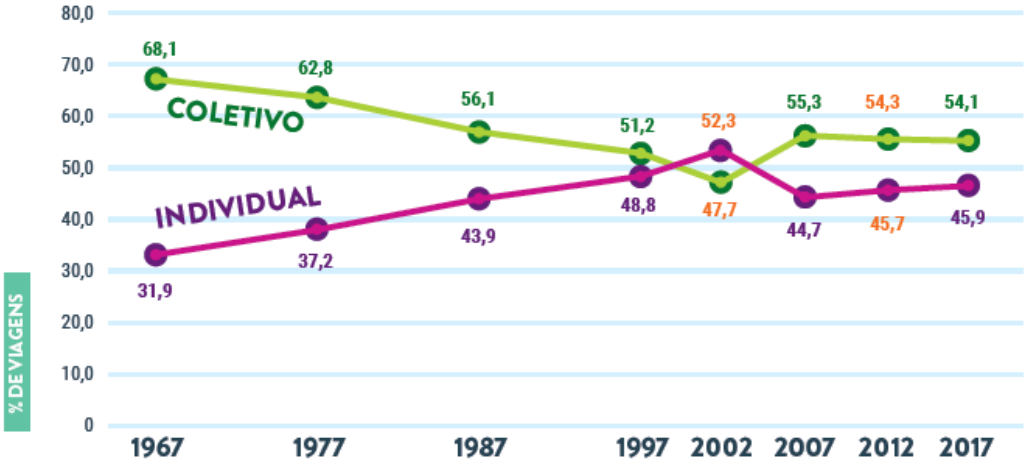
Figura 4-3: Distribuição modal das viagens 2007-2017



Fonte: Metrô (2019)

Entre as viagens motorizadas os modos coletivos continuam sendo as opções mais utilizadas pela população da RMSP (Gráfico 4-1).

Gráfico 4-1: Divisão modal das viagens motorizadas



Fonte: Metrô (2019)

Desde 2007 nota-se um aumento das viagens dos modos individuais motorizados, efeito da expansão que a economia teve no conjunto da última década e da entrada em cena dos

aplicativos para uso de veículos particulares como Uber e 99, sempre mais usados como alternativas aos modos coletivos (METRÔ, 2019).

Estes dados apontam para a necessidade de reverter esta tendência favorecendo uma transferência de usuários dos modos motorizados do particular para o coletivo, em linha com as estratégias que estão sendo implementadas mundo afora para a redução das externalidades que um sistema de transporte urbano fortemente dependente do uso do automóvel inevitavelmente comporta do ponto de vista social, econômico e ambiental.

Por este motivo um dos objetivos que esta dissertação se propõe é de estudar a eventual melhoria que os ônibus eventualmente teriam com a aplicação de tecnologias de otimização semafórica em tempo real, com e sem a implementação de estratégias de priorização específicas para esta categoria de veículos.

4.2 DADOS SOBRE A ÁREA DE MODELAGEM

4.2.1 Visão geral

Dentro do município de São Paulo, foi escolhido como caso de estudo desta dissertação o trecho da Avenida Pompeia entre a Rua Ministro Ferreira Alves e as ruas Guiará e Alfonso Bovero e as suas paralelas Cotoxó, Tucuna e Barão de Bananal (Figura 4-4). A escolha foi baseada na disponibilidade de dados produzidos para a região nos últimos meses em ocasião da primeira fase do projeto BIRD UK para cidades inteligentes, do UK Prosperity Fund da Embaixada do Reino Unido de Brasília em colaboração com o Banco Mundial. Uma das frentes desta fase do projeto tem como objetivo a produção de estudos que permitam avaliar os eventuais benefícios que sistemas de otimização semafórica em tempo real trariam ao desempenho do sistema viário da Cidade de São Paulo. Devido à correspondência com o objeto tratado nesta dissertação, o autor foi convidado pelo Banco Mundial para participar do projeto para desenvolver microssimulações de estratégias de tráfego adaptativo, que permitissem uma comparação com o atual cenário de tempos fixos. Esta participação proporcionou a possibilidade de desenvolver as simulações em coordenação com a própria CET, a qual produziu e forneceu todos os dados que foram utilizadas para este caso de estudo, conforme apresentado nas subsequentes seções e capítulos. A região da Pompeia em objeto

foi selecionada pelo Banco Mundial e a CET como ideal para a primeira fase do estudo (prova de conceito), devido às boas condições do sistema SCOOT na área considerada, fator este que aprimoraria os resultados do projeto BIRD UK.

Figura 4-4: Área de modelagem

Fonte: OpenStreetMap (2019)

A Avenida Pompeia é o principal corredor de uma área muito povoada que compreende diversos polos de atração de viagem como o Shopping Bourbon, o Sesc Pompeia, o Hospital São Camilo e, sobretudo, o Allianz Parque, o estádio que, além de ser a sede da Sociedade Esportiva Palmeiras, um dos principais times de futebol do cenário nacional, é palco privilegiado de inúmeros megaeventos na Cidade de São Paulo que afetam a circulação em toda a região.

A avenida Pompeia representa também um eixo de conexão Centro-Norte com uma alta demanda nas horas de pico, conforme mostra a micro pesquisa OD realizada pela CET no dia 21/05 (cujos resultados são apresentados a seguir no texto) durante a qual foram efetuadas também as contagens complementares àquelas feitas no dia 26/4 e relativas a todos os movimentos para a área considerada.

A avenida apresenta uma declividade sentido bairro que chega a ser bastante acentuada nas proximidades da interseção com a Alfonso Bovero e a Guiará.

Outra característica da região considerada é o pertencimento ao centro expandido, aplicando-se então as restrições à circulação do rodízio municipal.

4.2.2 Linhas de ônibus

A área de estudo é atravessada por diversas linhas de ônibus que transitam tanto ao longo do eixo principal (Avenida Pompeia) como nas transversais (Desembargador do Vale). Na Tabela 4-1 são listadas as linhas que interessam a região:

Tabela 4-1: Linhas de ônibus da área de modelagem

Linha	Trajeto	padrão	articulado
478P-10	Sacomã - Pompéia	sim	sim
199D	Vila Iório - Terminal Pinheiros	sim	não
8252-10	Metrô Barra Funda - Lapa	sim	não
7272-10	Mercado da Lapa - Praça Ramos de Azevedo	sim	não
809U-21	Metrô Barra Funda - Metrô Vila Madalena	sim	não
809U-10	Cidade Universitária - Metrô Barra Funda	sim	não
856R-10	Lapa - Socorro	sim	não
N206-11	Metrô Santana – Metrô Vila Madalena	sim	não

Fonte: Elaboração própria

Todas as linhas atravessam a área em estudo em ambos os sentidos. Os ônibus são todos de tipo padrão com exceção da linha Sacomã – Pompeia que pode utilizar veículos articulados.
A Figura 4-5 mostra quais vias são percorridas pelos ônibus (em laranja) e onde se encontram os pontos de parada (em vermelho).
A Avenida Pompeia dispõe de uma faixa exclusiva para os ônibus apenas no sentido bairro. Isto se deve à declividade da região acima mencionada que, no trecho e no sentido considerado, pode afetar sensivelmente o *headway* (o intervalo de tempo previsto entre dois ônibus sucessivos de uma mesma linha) das linhas que transitam pela avenida.

Figura 4-5: Distribuição das linhas de ônibus e dos pontos de parada da área de modelagem

Fonte: VISSIM

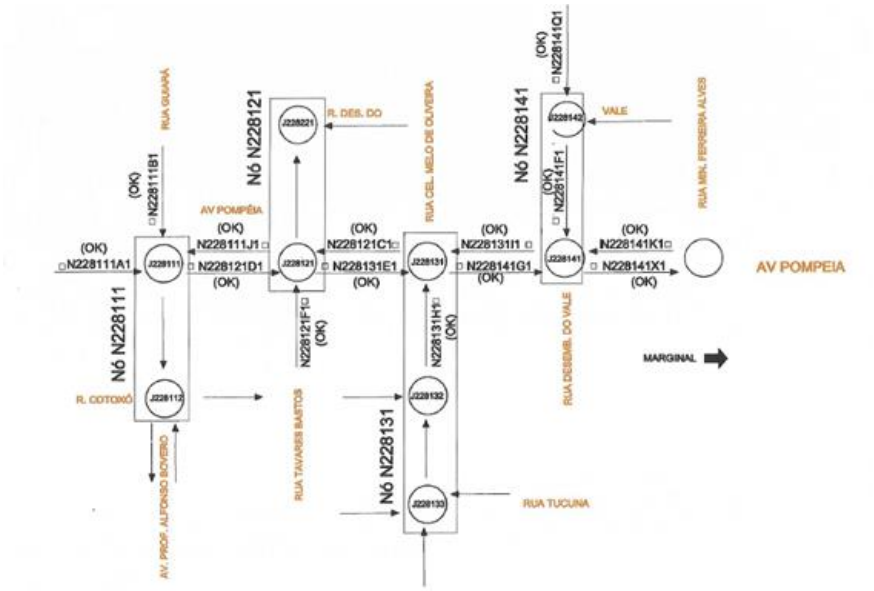
4.2.3 O sistema SCOOT (detectores)

A Avenida Pompeia está equipada com o sistema SCOOT que foi parcialmente reativado para coleta de dados no âmbito do projeto BIRD UK, conforme mencionado. A configuração dos seus laços detectores é apresentada na Figura 4-6, na qual são destacados os nomes das vias, os nós da rede (cujo código começa por J228), os sentidos dos arcos desta (setas), a presença de eventuais detectores (cujo código incorpora o nome do nó ao qual estão associados) e o seu estado de funcionamento (OK).

Na área de estudo os laços indutivos do sistema SCOOT são posicionados no início do link e endereçam duas ou três faixas ao mesmo tempo, dependendo da instalação.

Apesar da avaliação do desempenho do sistema SCOOT não estar entre os objetivos desta dissertação (diferentemente do projeto BIRD UK), escolheu-se reportar esta característica da rede viária examinada pois, durante a fase de construção do modelo (Capítulo 5), decidiu-se colocar os detectores de BALANCE e EPICS somente naqueles links onde já existem laços do sistema SCOOT. Desta maneira, eventuais análises comparativas sucessivas entre as informações extraídas deste pela CET e os resultados do BALANCE e do EPICS, se tornariam mais explicativas além de simples.

Figura 4-6: Detectores SCOOT da área de modelagem



Fonte: CET (2019)

4.2.4 Os planos semafóricos

A região analisada apresenta 12 interseções controladas por semáforos, conforme Tabla 4-2. Nesta são apresentados os principais parâmetros de cada controlador. Para uniformidade, o nome dos grupos focais foi mantido igual àquele presente nos croquis da própria CET, uma das principais fontes de dados semafóricos para o modelo (seção 5.2.1).

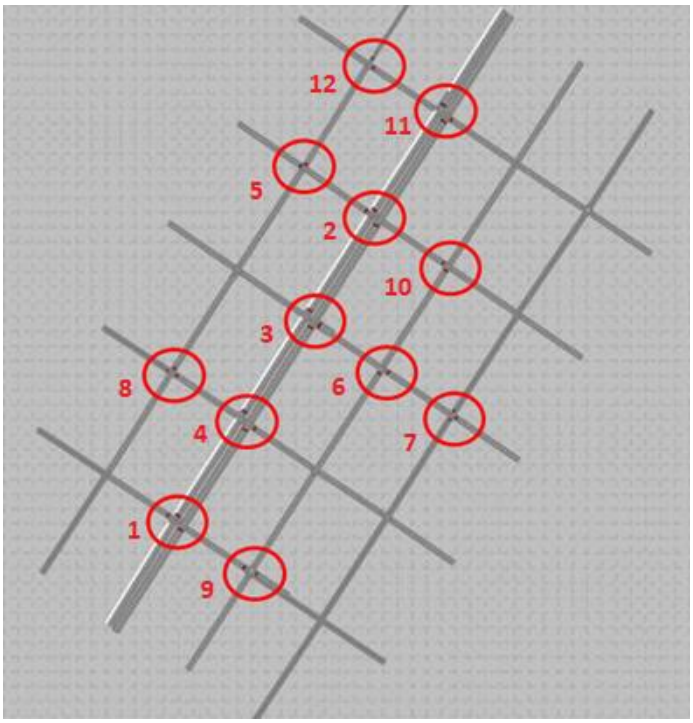
Tabela 4-2: Controladores da área de estudo e principais parâmetros

Nº Controlador	Interseção	Tempo de Ciclo (seg)	Grupos	Tempo de verde (seg)
1	Pompeia x Bovero	128	G1 G2	58 45
2	Pompeia x Desembargador do Vale	128	G1 G2	67 55
3	Pompeia X Celso de Mello	128	G1 G2	68 43
4	Pompeia x Tavares Bastos	128	G1 G2	82 40
5	Barão do Bananal x Desembargador do Vale	128	G3 G2	55 64
6	Cotoxó x Celso de Mello	128	G5 G6	65 51
7	Tucuna x Celso de Mello	128	G7 G8	60 55
8	Barão do Bananal x Tavares Bastos	64	G1 G2	30 28
9	Bovero x Cotoxó	128	G8	56
10	Cotoxó x Desembargador do Vale	64	G1 G2	40 18
11	Pompeia x Ministro Ferreira	128	G1 G3	73 34
12	Ministro Ferrreira x Barão do Bananal	128	G1 G2	66 50

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4-7 é possível identificar as interseções providas de semáforo e, em vermelho, as relativas linhas de retenção (*signal heads*):

Figura 4-7: Rede semafórica da área de modelagem



Fonte: Elaboração própria

Normalmente os planos semafóricos utilizados pelos controladores na área de estudo são fixos e são elaborados pelo próprio sistema SCOOT.

Os semáforos da Avenida Pompeia são coordenados e apresentam um offset entre eles para criar uma "onda verde" especialmente em direção bairro, a mais carregada durante o pico da manhã. A onda verde se realiza através do cálculo da defasagem ideal entre os estágios de verde de semáforos sucessivos de maneira de maximizar o número de veículos que encontram o verde ao chegar na interseção. Normalmente está técnica é aplicada nas avenidas principais é precisa que os semáforos interessados estejam conectados em uma rede, como no caso da Avenida Pompeia.

5 CONSTRUÇÃO DO MODELO

5.1 A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

5.1.1 Critérios de escolha

Conforme mencionado no Capítulo 2, existem atualmente diferentes ferramentas que permitem a microssimulação de tráfego. Dentro do grupo de pesquisa ao qual o autor pertence vem se trabalhando com a suíte VISION da empresa alemã PTV AG, que compreende, entre outros, além do próprio VISSIM, o macrossimulador VISUM e os softwares de otimização semafórica BALANCE e EPICS. As licenças dos softwares utilizados foram adquiridas pelo PTR e se encontram atualmente disponíveis nos laboratórios do departamento de Transportes.
Complementando o que foi mencionado no Capítulo 3, escolheu se por implementar a parte prática da dissertação utilizando a suíte VISION da empresa alemã PTV AG, devido tanto à disponibilidade das licenças dos softwares de otimização semafórica BALANCE e EPICS, que tem como suporte os softwares VISSIM e VISUM, assim como devido aos conhecimentos práticos e teóricos adquiridos ao longo dos estudos de pós-graduação.

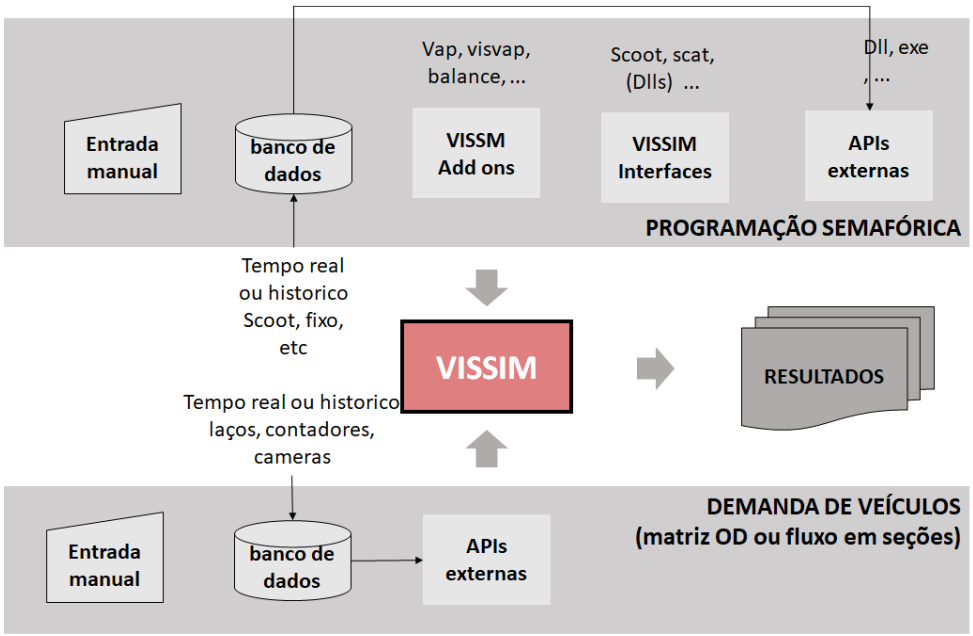
5.1.2 Características do VISSIM

Conforme apresentado na seção 3.1, o VISSIM proporciona a possibilidade de testar e analisar sistemas com controle semafórico adaptativo (objeto deste trabalho de pesquisa), especialmente para o BALANCE e o EPICS cujos algoritmos, devido ao terem sido desenvolvidos pela mesma empresa, podem ser embutidos na própria versão do simulador sem necessidade de interfaces ou bibliotecas externas.
O fluxo de tráfego veicular no VISSIM é centrado em quatro modelos: *car-following*, que descreve a movimentação longitudinal dos veículos, e *lane changing*, que descreve a movimentação lateral destes, o *get acceptance* que modela o comportamento nas interseções em relação à questão da prioridade e dos conflitos e o *decision routes* que modela a escolha de rotas sendo estas estáticas (totais ou parciais) ou dinâmicas.

A Figura 5-1 mostra as duas principais categorias de dados de entrada do VISSIM, a programação semafórica e a demanda de veículos, explicitando os diferentes canais através dos quais é possível utilizá-las.

Conforme apresentado na Figura 5-1, além da entrada manual dos dados, é possível alimentar o microssimulador a partir de dados advindos por sistemas externos através de APIs e, no caso da programação semafórica, também de outros módulos da suíte VISION e de interfaces (ex. SCOOT).

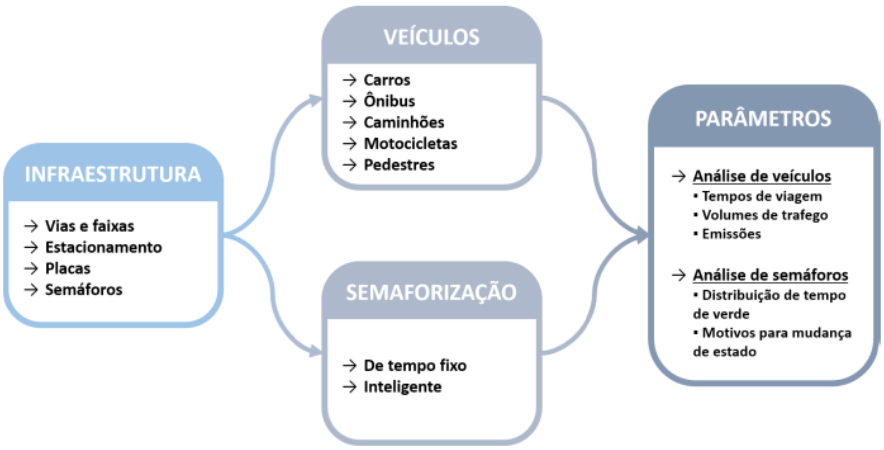
Figura 5-1: Categorias dos dados de entrada do VISSIM



Fonte: PTV Group (2016, a)

O VISSIM trabalha a partir de um esquema de modelagem de tráfego que considera, além das categorias acima citadas, a infraestrutura da rede e diferentes parâmetros de análise, conforme apresentado na Figura 5-2.

Figura 5-2: Estrutura do Sistema de Transportes modelado pelo VISSIM



Fonte: PTV Group (2016, a)

5.2 DADOS DE ENTRADA

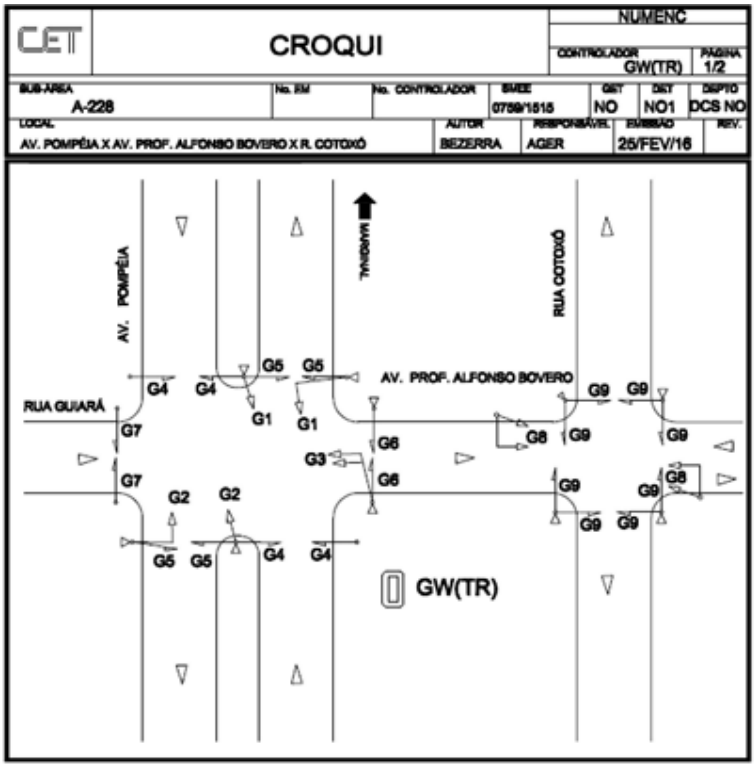
Conforme mencionado no Capítulo 4, para a parte prática desta dissertação, foram utilizados dados disponibilizados e produzidos pela CET no âmbito do projeto BIRD UK, do UK Prosperity Fund da Embaixada do Reino Unido no Brasil em colaboração com o Banco Mundial, dentro do qual foi elaborado o caso de estudo apresentado nesta dissertação.

Os dados que foram utilizados para a montagem do modelo são detalhados nas seções a seguir.

5.2.1 Os planos semafóricos

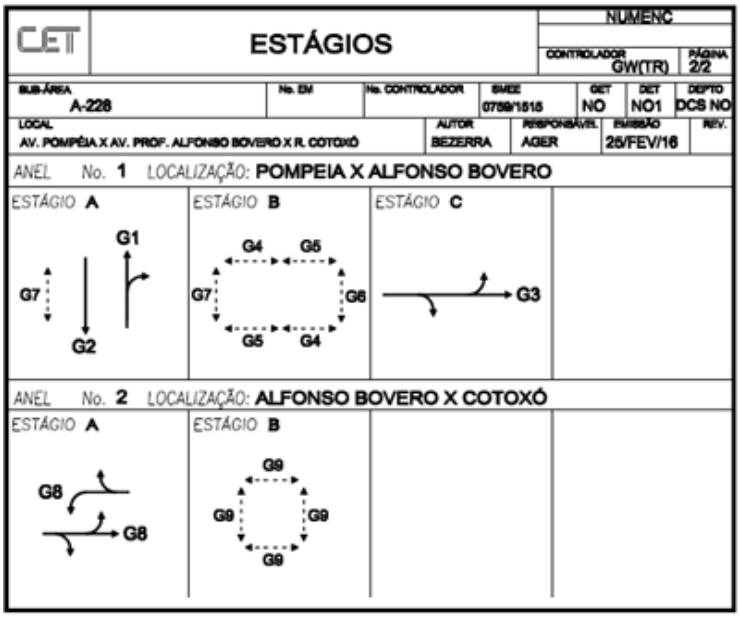
Relativamente aos planos semafóricos da área de interesse, o VISSIM foi configurado usando os planos fixos, em vigor em junho de 2019, para a faixa horária considerada, conforme informações repassadas pela própria CET através dos croquis das interseções e dos dados fornecidos pelo sistema SCOOT. Nas Figuras 5-3 e 5-4 são apresentadas as duas partes do croqui da interseção Avenida Pompeia *x* Avenida Alfonso Bovero *x* Rua Guiará e Rua Cotoxó *x* Avenida Alfonso Bovero. Através deste documento é possível reconstruir a sucessão de estágios da interseção.

Figura 5-3: Croqui das interseções Av. Pompeia x Av. Alfonso Bovero x Rua Guiará e Rua Cotoxó x Av. Alfonso Bovero (Parte I)



Fonte: CET (2019)

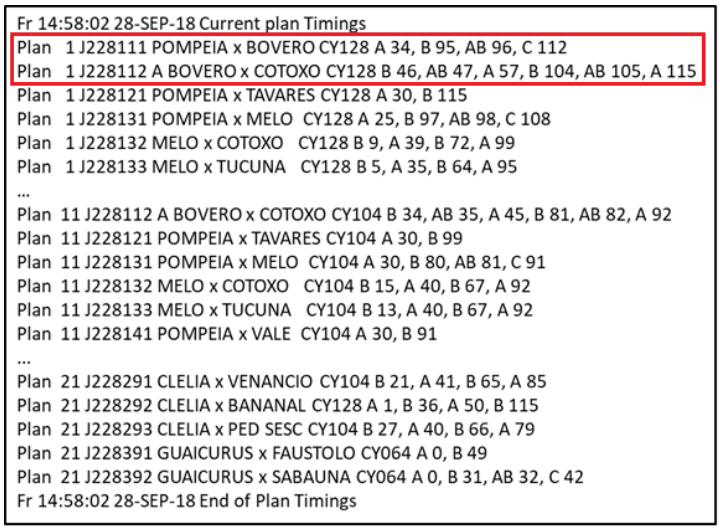
Figura 5-4: Croqui das interseções Av. Pompeia x Av. Alfonso Bovero x Rua Guiará e Rua Cotoxó x Av. Alfonso Bovero (Parte II)



Fonte: CET (2019)

Na Figura 5-5 é mostrado um fragmento da programação semafórica elaborada pelo sistema SCOOT para os controladores da região da Pompeia. Nas primeiras linhas é possível ver os detalhes do *Plan 1* (o plano que foi utilizado para o modelo, conforme indicações da própria CET) relativos às interseções do croqui das Figuras 5-3 e 5-4. É a partir destas informações que a duração dos estágios dos grupos para os controladores é configurada no VISSIG, o módulo do VISSIM dedicado à programação semafórica (Figura 5-6).

Figura 5-5: Fragmento da programação semafórica elaborada pelo sistema SCOOT



Fonte: CET (2019)

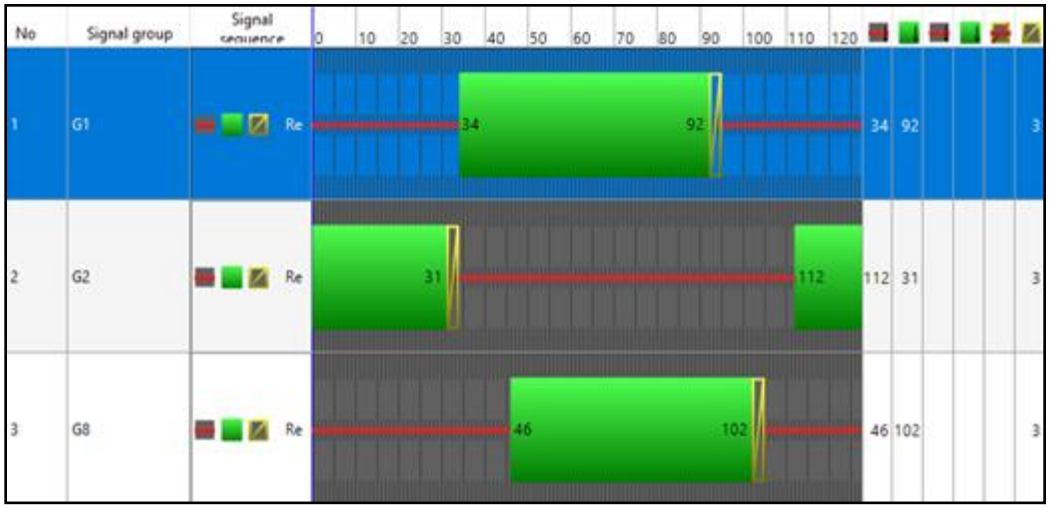
As informações são utilizadas na forma seguinte (em relação à primeira interseção):

- CY - Duração do ciclo em segundos
- A - Segundo em que começa o primeiro estágio (estágio A no croqui, correspondente ao verde na Av. Pompeia em ambos os sentidos)
- B - Segundo em que começa o segundo estágio (estágio B no croqui, correspondente ao verde para os pedestres na Av. Pompeia)
- AB - Segundo em que começa o vermelho geral (1 segundo, por determinação da CET)
- C - Segundo em que começa o terceiro estágio (estágio C no croqui, correspondente ao verde para os veículos que chegam da Rua Guiará)

A estes tempos devem ser acrescentados os três segundos de vermelho geral no final de todos os estágios, conforme determinação da CET (em amarelo na Figura 5-6).

Devido ao foco do trabalho ser a otimização para os veículos, na configuração do VISSIG do estágio B correspondente ao verde para os pedestres da Av. Pompeia optou-se para representar este estágio de maneira indireta, através de uma janela de tempo (no exemplo da Figura 5-6 entre os segundos 95 e 112) em que ambos os movimentos G1 e G2 do VISSIG (correspondentes aos estágio A e C do croqui) permanecem inibidos pelo vermelho (Figura 5-6). Nas Figuras 5-3 e 5-4 o movimento G8 representa o verde para os veículos na interseção entre a Avenida Alfonso Bovero e a Rua Cotoxó, a interseção nº2 do croqui acima (Anel nº2).

Figura 5-6: Diagrama de estágios dos grupos focais no VISSIG



Fonte: Elaboração própria

5.2.2 Demanda de viagens - Matriz OD

Antes de realizar a pesquisa OD para a área considerada, foram feitas pela CET macrossimulações com o software EMME para identificar a área de influência do corredor objeto de estudo e definir origens e destinos da matriz. Com esta operação se quis checar se a melhora do fluxo na Avenida Pompeia teria gerado uma mudança das zonas de interesse a serem consideradas para o levantamento da matriz OD que seria utilizada para o estudo. A esse fim foi considerada a hipótese de um ganho em termos de tempos de viagem de 30% na Avenida Pompeia caso um sistema de otimização semafórica em tempo real estivesse operando. O valor de 30% foi escolhido para não ter nenhuma dúvida sendo que geralmente estes sistemas prometem um ganho médio de desempenho que varia entre 10% e 20%. O

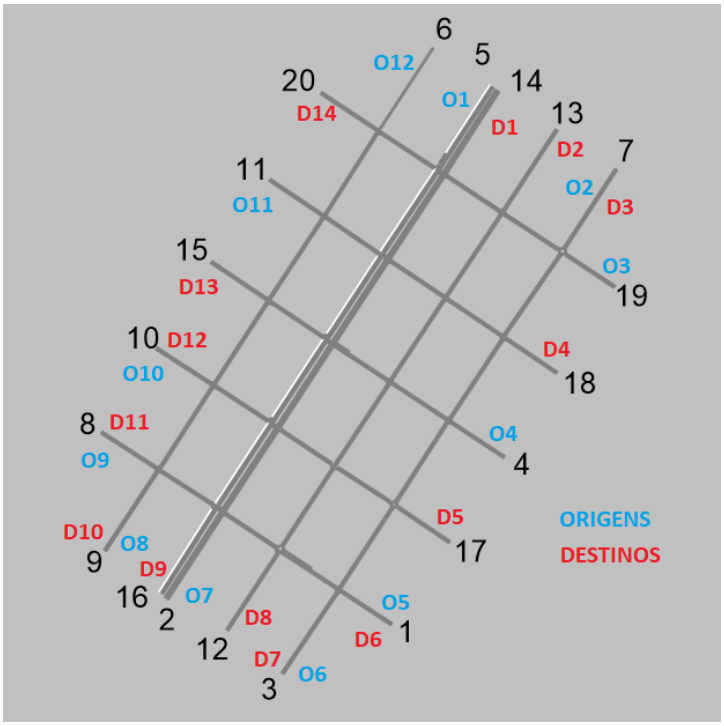
resultado desta operação mostrou que mesmo com um ganho do 30% a matriz OD da área considerada não variaria.

A pesquisa OD foi realizada na terça-feira dia 21/05 e foram utilizadas 50 pessoas envolvidas entre atividades de planejamento, levantamento e tabulação dos resultados. A pesquisa, devido a este tipo de coleta de dados ser um evento pouco frequente dentro da CET, representou uma ocasião importante para ampliar os conhecimentos operacionais e testar a metodologia de coleta e, por este motivo, foi planejada com muito cuidado em uma série de reuniões internas da Companhia.

A terça-feira foi escolhida devido a uma pesquisa da própria CET que apontou que terça e quarta-feira são os melhores dias para realizar este tipo de levantamento de dados. Devido à presença de uma feira livre no quadrilátero da matriz na quarta e querendo garantir uma base comum para todos os dados coletados, optou-se para a terça-feira tanto para a pesquisa OD como para as contagens e pesquisas futuras na região.

Na figura 5-7 é apresentada o esquema de levantamento na área de interesse. É possível ver as origens (em azul) e os destinos (em vermelho) identificados e o nome das pessoas responsáveis de cada ponto.

Figura 5-7: Esquema para o levantamento de dados OD no dia 21/05



Fonte: Elaboração própria

A faixa horária de interesse foi estabelecida entre às 7:30 e às 8:30 da manhã, sendo este considerado o horário de pico da região analisada.

Para a pesquisa foram rastreadas somente às placas com final 8 para depois submeter a amostra a um processo de expansão. O final 8 foi escolhido pela CET depois de ter eliminado os finais 1-2-3-4-9-0. Enquanto a eliminação dos finais 3-4 é obvia sendo que no dia da coleta de dados estes veículos não podiam circular na região de estudo por conta do rodízio municipal, os finais 1-2-9-0 foram descartados pois a própria CET detectou um número maior de veículos com placas deste tipo devido à preferência de uma parte de moradores de São Paulo de ter uma alternativa de deslocamento nas segundas e nas sextas-feiras. A partir dos dados coletados, foi então criada uma matriz OD relativa aos veículos com placas com final 8. Sucessivamente, a partir das contagens veiculares completas realizadas nos pontos de origem, calculou-se a proporção de viagens entre cada par OD e multiplicando estas percentagens pelo número de veículos levantado em cada origem, chegou-se à matriz OD Final. Nas Figuras 5-8 e 5-9 são apresentadas as matrizes que resultaram deste processo.

Figura 5-8: Matriz de viagens da área de estudo

		Destino														
7:30-8:30	Origem	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
1625	O1	74	30	5	124	25	104	20	40	718	5	20	50	149	263	**1625**
152	O2	10	34	5	20	20	5	29	0	0	0	5	10	0	15	**152**
457	O3	88	18	97	26	0	0	4	0	22	0	0	4	9	189	**457**
647	O4	87	43	33	43	11	11	11	0	33	0	0	22	343	11	**647**
304	O5	43	31	19	6	31	12	12	12	0	6	0	93	31	6	**304**
115	O6	14	0	14	7	14	14	7	0	7	0	0	22	14	0	**115**
832	O7	583	16	0	43	22	65	11	5	16	5	5	11	27	22	**832**
595	O8	115	19	0	38	77	77	19	154	58	0	19	0	19	0	**595**
107	O9	12	3	0	2	7	49	1	26	2	2	0	2	1	0	**107**
220	O10	13	6	0	13	25	44	6	50	13	25	13	0	13	0	**220**
842	O11	233	33	6	371	22	11	11	6	39	11	6	28	66	0	**842**
278	O12	36	9	0	76	0	4	13	0	18	9	9	9	27	67	**278**
6174		1308	243	178	771	253	397	146	293	926	64	76	249	698	572	**6174**

Fonte: CET (2019)

Figura 5-9: Distribuição das viagens na área de estudo

	Destino														
Origem	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
O1	5%	2%	0%	8%	2%	6%	1%	2%	44%	0%	1%	3%	9%	16%	**100%**
O2	6%	23%	3%	13%	13%	3%	19%	0%	0%	0%	3%	6%	0%	10%	**100%**
O3	19%	4%	21%	6%	0%	0%	1%	0%	5%	0%	0%	1%	2%	41%	**100%**
O4	13%	7%	5%	7%	2%	2%	2%	0%	5%	0%	0%	3%	53%	2%	**100%**
O5	14%	10%	6%	2%	10%	4%	4%	4%	0%	2%	0%	31%	10%	2%	**100%**
O6	13%	0%	13%	6%	13%	13%	6%	0%	6%	0%	0%	19%	13%	0%	**100%**
O7	70%	2%	0%	5%	3%	8%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	3%	3%	**100%**
O8	19%	3%	0%	6%	13%	13%	3%	26%	10%	0%	3%	0%	3%	0%	**100%**
O9	11%	3%	0%	2%	7%	46%	1%	25%	2%	2%	0%	1%	1%	0%	**100%**
O10	6%	3%	0%	6%	11%	20%	3%	23%	6%	11%	6%	0%	6%	0%	**100%**
O11	28%	4%	1%	44%	3%	1%	1%	1%	5%	1%	1%	3%	8%	0%	**100%**
O12	13%	3%	0%	27%	0%	2%	5%	0%	6%	3%	3%	3%	10%	24%	**100%**

Fonte: CET (2019)

Para que fosse possível utilizar esta matriz no VISSIM foi necessária uma adaptação para que se torne quadrada, sendo que a ferramenta de simulação escolhida considera cada zona tanto uma origem com um destino.

Devido à simulação prever um período de 15 minutos para aquecimento a matriz foi dividida em duas partes, a primeira relativa ao período de aquecimento e a segunda para a simulação da hora de pico objeto deste estudo. A segunda matriz foi extraída a partir da primeira contabilizando ¼ (15min) do total de viagens da matriz levantada em campo. Depois do processo de recálculo chegou-se as seguintes Matrizes OD quadradas (Figuras 5-10 e 5-11):

Figura 5-10: Matriz OD quadrada utilizada para a simulação da hora completa

MATRIZ HORA COMPLETA																				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	
Z1	12	0	12	0	0	0	19	0	6	93	0	12	31	43	31	0	31	6	0	6	304
Z2	65	0	11	0	0	0	0	5	5	11	0	5	16	583	27	16	22	43	0	22	832
Z3	14	0	7	0	0	0	14	0	0	22	0	0	0	14	14	7	14	7	0	0	115
Z4	11	0	11	0	0	0	33	0	0	22	0	0	43	87	343	33	11	43	0	11	647
Z5	104	0	20	0	0	0	5	20	5	50	0	40	30	74	149	718	25	124	0	263	1625
Z6	4	0	13	0	0	0	0	9	9	9	0	0	9	36	27	18	0	76	0	67	278
Z7	5	0	29	0	0	0	5	5	0	10	0	0	34	10	0	0	20	20	0	15	152
Z8	43	0	1	0	0	0	0	0	2	2	0	26	3	12	1	2	7	2	0	0	107
Z9	77	0	19	0	0	0	0	19	0	0	0	154	19	115	19	58	77	38	0	0	595
Z10	44	0	6	0	0	0	0	13	25	0	0	50	6	13	13	13	25	13	0	0	220
Z11	11	0	11	0	0	0	6	6	11	28	0	6	33	233	66	39	22	371	0	0	842
Z12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z19	0	0	4	0	0	0	97	0	0	4	0	0	18	88	9	22	0	26	0	189	457
Z20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	397	0	146	0	0	0	178	76	64	249	0	293	243	1308	698	926	253	771	0	572	6174

Fonte: Elaboração Própria

Figura 5-11: Matriz OD quadrada utilizada para o período de aquecimento da simulação

MATRIZ AQUECIMENTO																				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	
Z1	3	0	3	0	0	0	5	0	2	23	0	3	8	11	8	0	8	2	0	2	76
Z2	16	0	3	0	0	0	0	1	1	3	0	1	4	146	7	4	5	11	0	5	208
Z3	4	0	2	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0	4	4	2	4	2	0	0	29
Z4	3	0	3	0	0	0	8	0	0	5	0	0	11	22	86	8	3	11	0	3	162
Z5	26	0	5	0	0	0	1	5	1	12	0	10	7	19	37	180	6	31	0	66	406
Z6	1	0	3	0	0	0	0	2	2	2	0	0	2	9	7	4	0	19	0	17	70
Z7	1	0	7	0	0	0	1	1	0	2	0	0	9	2	0	0	5	5	0	4	38
Z8	12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	1	3	0	1	2	1	0	0	27
Z9	19	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0	38	5	29	5	14	19	10	0	0	149
Z10	11	0	2	0	0	0	0	3	6	0	0	13	2	3	3	3	6	3	0	0	55
Z11	3	0	3	0	0	0	1	1	3	7	0	1	8	58	17	10	6	93	0	0	211
Z12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z19	0	0	1	0	0	0	24	0	0	1	0	0	4	22	2	5	0	7	0	47	114
Z20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	99	0	36	0	0	0	44	19	16	62	0	73	61	327	175	231	63	193	0	143	1544

Fonte: Elaboração Própria

5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

No processo de calibração, um conjunto de parâmetros são regulados de maneira que os resultados oferecidos pelo software de simulação reproduzam, dentro de um nível de erro considerado aceitável, a situação real observada em campo, pois somente dentro destas hipóteses é que as análises, feitas através do simulador, adquirem validade científica.

Normalmente os parâmetros que necessitam de uma calibração dependem do objetivo da simulação, das características da área de estudo considerada e do específico software de simulação utilizado, sendo que cada ferramenta permite a manipulação de um determinado conjunto destes, dependendo da lógica com a qual foi desenvolvida. Geralmente há um número grande de parâmetros que podem ser alterados no modelo e muitos também são os métodos existentes para a análise da representatividade dos resultados extraídos do modelo da realidade observada. Medeiros (2012) aponta que esta grande variedade de possíveis parâmetros de entrada representa o principal fator da não existência de uma metodologia, válida em geral para a calibração de todos os modelos de microssimulação.

Devido às macrossimulações feitas pela CET com o software EMME mostrarem que uma eventual melhora do fluxo no corredor da Avenida Pompeia não modificaria a escolha de rota dos motoristas interessados, assim como busca-se uma otimização semafórica, o modelo foi calibrado com foco no comportamento do motorista (*driving behavior*), pois estes parâmetros podem ser considerados os mais adequados para o contexto considerado.

No VISSIM, é possível escolher entre dois modelos diferentes de *car-following*: Wiedemann-74 (W74) ou Wiedemann-99 (W99) sendo o primeiro recomendável para modelagem urbana (o nosso caso) e o segundo para modelagem de rodovias (LACERDA; CASTRO NETO, 2014). O W74 permite a definição de 3 parâmetros:

● **Distância média de parada (*Average Standstill Distance*)** - representa a distância desejada entre veículos parados ou entre o veículo e a faixa de retenção. O valor padrão do VISSIM é 2,0 m com uma variação de 1,0 a 3,0 m. Após uma medição da CET, considerou-se o valor de 1,6 m para esse parâmetro.

● **Parte aditiva da distância de segurança (*Additive part of safety distance*)** – valor utilizado para o cálculo da distância média de segurança. Seu valor padrão é 2,0 m. No processo de calibração, alterou-se esse valor para 1,6 m.

● **Parte multiplicativa da distância de segurança (*Multiplicative part of safety distance*)** – permite de ajustar os valores de tempo requeridos. Quanto maior for o valor deste parâmetro maior será o desvio padrão da distância de segurança. Seu valor padrão é 3,0 m. No processo de calibração, alterou-se esse valor para 2,0 m.

Os valores utilizados do modelo de car-following foram levantados pela CET através de medições em campo feitas a partir da mensuração física dos parâmetros com os veículos parados e sucessivamente adaptados baseando-se da observação direta do comportamento destes em movimento. Estes valores são atualmente utilizados em todas as microssimulações da CET e foram validados através destas.

O objetivo da alteração destes parâmetros é reproduzir o comportamento agressivo típico do motorista de São Paulo especialmente durante o pico da manhã.

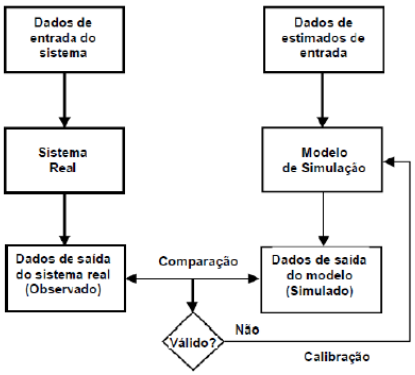
Durante o processo de calibração foi utilizado também o parâmetro ***lane change*** do modelo de *lane-changing,* parâmetro associado ao conector que diz respeito à distância a qual o veículo percebe que precisa fazer uma conversão.

A distância padrão do *lane change* de 200 m foi reduzida para a dimensão do link antecessor. Desta forma quis se evitar que os veículos da rede começassem a se posicionar para a conversão muito antes ao que acontece na realidade, na área de estudo, comportamento que resultava em um desequilíbrio da calibração para determinados movimentos. Depois da alteração se observou uma melhora do teste estatístico GEH para os movimentos interessados, conforme mostrado a seguir.

5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

O processo em que se determina quando é que um modelo representa com precisão a realidade designa-se por validação. Trata-se de um processo iterativo (Figura 5-12) que envolve a comparação do modelo com o comportamento do sistema real através dos valores obtidos por observação do sistema.

Figura 5-12: Diagrama do processo de validação da calibração



Fonte: Tavares e Pereira (2015)

O processo de validação de um modelo de simulação representa então a etapa em que é verificado o poder preditivo da calibração realizada e por isso, para que seja cientificamente expressiva, deve ser feita usando um conjunto de dados independente dos utilizados no processo de calibração.

Na literatura é possível encontrar diferentes abordagens para validar modelos e não há unanimidade sobre o mais adequado procedimento para validar esses tipos de modelos. A validação do modelo pode ser realizada a partir de análises de sensibilidade, análises de variância, testes estatísticos, análises de regressão, técnicas de série de tempos *standard*, entre outros. A escolha da metodologia é sempre dependente do problema (SILVA; TYLER, 2002).

Neste trabalho de pesquisa escolheu-se de utilizar a **métrica GEH,** baseada a comparação dos volumes modelados e observados e incorpora tanto o erro relativo quanto o erro absoluto (Equação 5-1) considerado adequado ao cenário avaliado nesta dissertação (TAVARES, 2003). O índice foi calculado para todos os movimentos das interseções da Avenida Pompéia com as transversais mais a interseção entre a Rua Barão do Bananal e a Rua Desembargador do Vale, isto é, todas as interseções consideradas pela CET na contagem do dia 26/04.

Equação 5-1: Fórmula do GEH

$$GEH = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}}$$

onde:

x_i – valor simulado para a secção i

y_i – valor observado na secção i

n – número total de observações

Um valor de GEH menor que 5 para 85% dos casos de uma secção isolada é um valor aceitável (TAVARES; PEREIRA, 2015).

- GEH < 5 → aproximação "muito boa"
- 5 ≤ GEH < 10 → aproximação "boa"
- 10 ≤ GEH < 12 → aproximação "aceitável"
- GEH ≥ 12 → os dados (alocados e contados) precisam ser "melhor avaliados". O fluxo alocado "não é confiável"

Para o modelo utilizado nesta dissertação este processo de ajustes envolveu ações de vários tipos, desde a correção de informações de planos semafóricos não carregados de forma correta no módulo VISSIG até o ajuste da geometria da via ou mudança de parâmetros em modelos comportamentais (modelo de *lane changing*).

Para o processo de validação da calibração efetuada foi utilizada uma abordagem que prevê uma dupla comparação entre os dados produzidos pelas simulações e um outro conjunto de dados reservado para esse fim, conforme esquema apresentado no Figura 5-13.

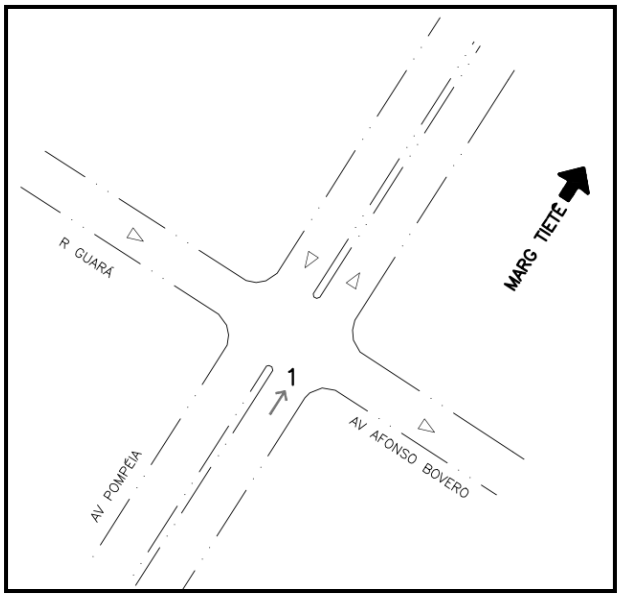
Figura 5-13: Diagrama do processo de validação do modelo

Fonte: Elaboração própria

5.4.1 Validação com dados de contagem (CET)

Para a primeira etapa do processo de validação foram utilizados os dados de volumes relativos aos movimentos da área de estudo, coletados pela CET através de contagens manuais feitas em ocasião da micro pesquisa OD do dia 21/05. Nas Figuras 5-14 e 5-15 e nas Tabelas 5-1, 5-2 e 5-3 que seguem, são apresentados dois exemplos deste levantamento de dados, para a Avenida Pompeia na altura em que ela cruza a Avenida Alfonso Bovero e a Rua Guiará e para o cruzamento entre a Rua Guiará e a Rua Barão do Bananal.

Figura 5-14: Movimento 1 na interseção da Av. Pompeia com Av. Alfonso Bovero e Rua Guiará



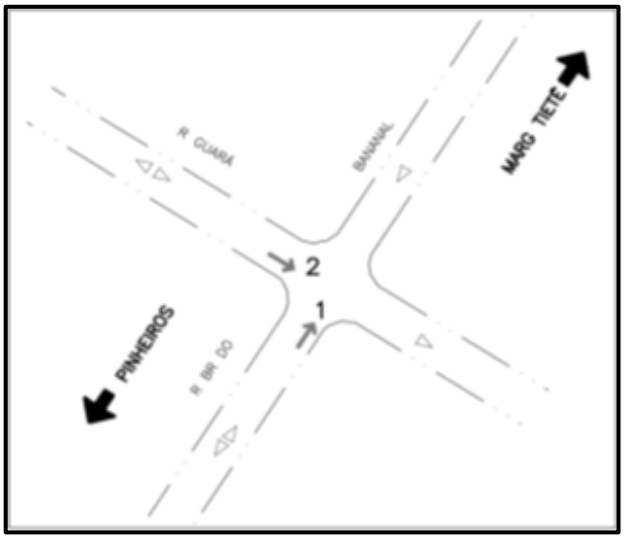
Fonte: CET (2019)

Tabela 5-1: Contagens do Movimento 1 na interseção representada na Figura 5-14

Movimento 1							
MANHÃ							
Intervalos	Auto	Ônibus	Caminhão	Moto	Bicicleta	Total	FHP
07:30 - 08:30	832	18	11	77	0	938	98%
07:45 - 08:45	793	20	13	91	1	918	
08:00 - 09:00	794	20	15	92	1	922	
08:15 - 09:15	805	18	13	89	1	926	
08:30 - 09:30	801	20	9	81	1	912	
Total 2 horas	1633	38	20	158	1	1850	

Fonte: CET (2019)

Figura 5-15: Movimentos 1 e 2 na interseção da Rua Guiará com a Rua Barão de Bananal



Fonte: CET (2019)

Tabela 5-2: Contagens do Movimentos 1 na interseção representada na Figura 5-15

Movimento 1							
MANHÃ							
Intervalos	Auto	Ônibus	Caminhão	Moto	Bicicleta	Total	FHP
07:30 - 08:30	595	2	1	24	1	623	
07:45 - 08:45	610	2	3	32	1	648	
08:00 - 09:00	596	2	3	34	1	636	
08:15 - 09:15	608	0	2	35	0	645	
08:30 - 09:30	**655**	**0**	**2**	**35**	**0**	**692**	**80%**
Total 2 horas	**1250**	**2**	**3**	**59**	**1**	**1315**	

Fonte: CET (2019)

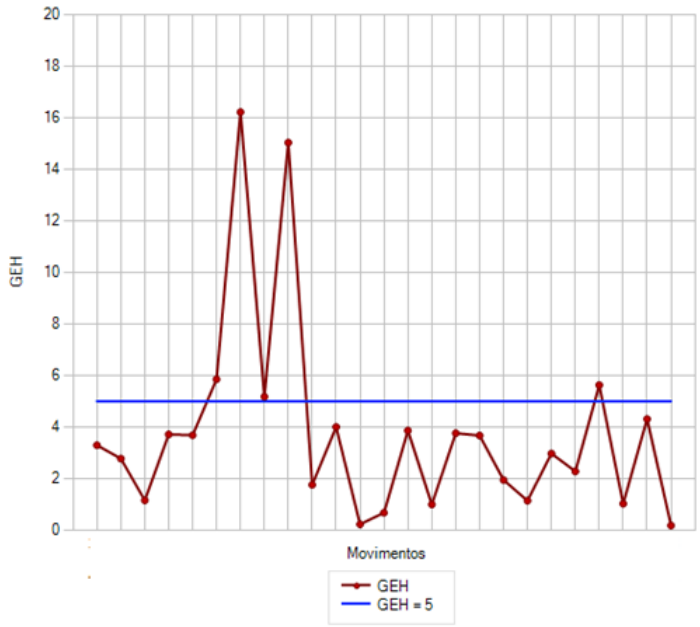
Tabela 5-3: Contagens do Movimentos 1 na interseção representada na Figura 5-15

Movimento 2							
MANHÃ							
Intervalos	Auto	Ônibus	Caminhão	Moto	Bicicleta	Total	FHP
07:30 - 08:30	107	0	0	7	0	114	
07:45 - 08:45	157	0	1	8	0	166	
08:00 - 09:00	199	0	1	7	0	207	
08:15 - 09:15	**200**	**0**	**1**	**9**	**0**	**210**	**75%**
08:30 - 09:30	196	0	1	7	0	204	
Total 2 horas	**303**	**0**	**1**	**14**	**0**	**318**	

Fonte: CET (2019)

Para realizar a validação da calibração do modelo foi utilizado o métrica GEH aplicada a cada um dos 25 movimentos levantados no dia 26/04 na área de estudo. O resultado do processo é apresentado no Gráfico 5-1:

Gráfico 5-1: Resultado do processo de validação utilizando as contagens



Fonte: VISSIM

O resultado do teste GEH foi menor ou igual a 5 em aproximativamente 85% dos movimentos considerados, valor que garante a confiabilidade do modelo construído e a representação suficientemente fiel deste da realidade em campo.

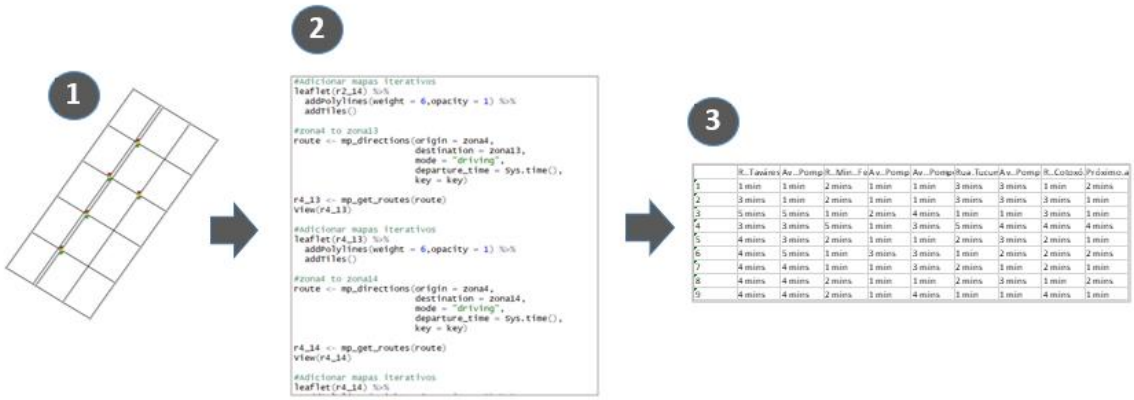
5.4.2 Validação com dados de tempo de viagem (Google Maps)

A validação do modelo, feita a partir das contagens da CET, foi acoplada a uma validação feita utilizando dados de tempos de viagem extraídos do Google Maps, via API do serviço, através de um processo dividido em três fases:

1. Determinação de coordenadas de origens e destinos (VISUM);
2. Download dos dados de Tempo de Viagens;
3. Comparação com os dados simulados.

Na Figura 5-16 é representado de forma gráfica o processo de validação acima descrito.

Figura 5-16: Processo de validação utilizando os tempos de viagem

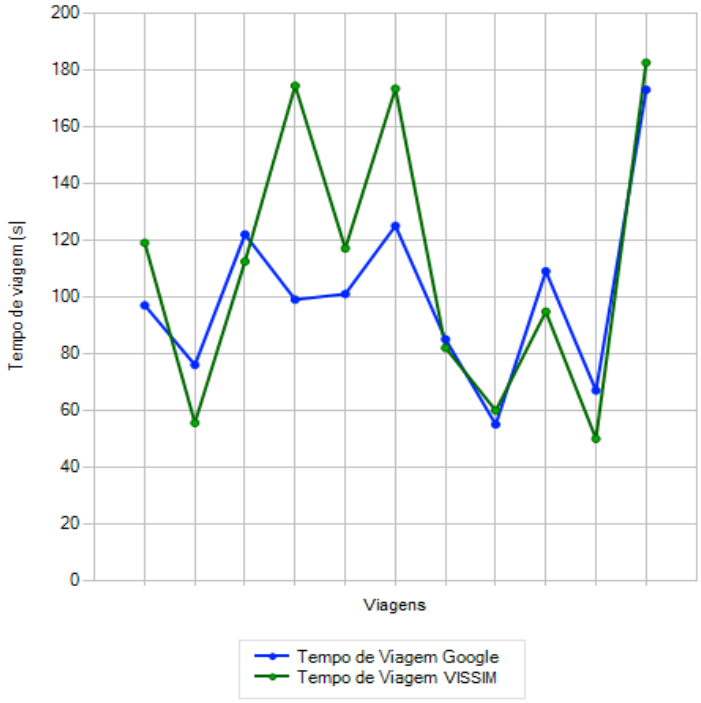


Fonte: Elaboração própria

As viagens comparadas foram aquelas entre pares OD que na matriz OD consolidada (Figura 5-8) tinham apresentado um mínimo de 100 viagens. A requisição via API foi feita para dados relativos às terças-feiras, dia escolhido para a realização do levantamento em campo (21/05). Os resultados do processo de comparação entre os tempos de viagens simulados pelo modelo e os extraídos via API do Google Maps são mostrados no Gráfico 5-2.

Como é possível ver no Gráfico 5-2 os resultados foram positivos, com os perfis simulados e extraídos do Google bem parecidos, com exceção de apenas dois percursos.

Gráfico 5-2: Resultado do processo de validação utilizando os tempos de viagem



Fonte: VISSIM

6 SIMULAÇÃO, RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

A partir do modelo validado, antes de passar para a fase de simulação, é importante definir tanto os cenários que se pretende comparar quanto os indicadores de desempenho que servem para classificar os resultados das simulações para as diferentes configurações semafóricas avaliadas. O fluxo lógico destas operações é representado no diagrama da Figura 6-1:

Figura 6-1: Diagrama do processo de simulação dos cenários avaliados

Fonte: Elaboração própria

Para que seja possível uma comparação entre os diferentes cenários de otimização e a atual situação de tempos fixos, se torna necessária a escolha de um conjunto de indicadores de desempenho que permitam aferir quantitativamente os eventuais benefícios e perdas que uma determinada tecnologia adaptativa introduziria no contexto examinado, com respeito ao cenário atualmente existente.

6.2 INDICADORES DE DESEMPENHO

Para comparar as diferentes alternativas simuladas entre elas e com a atual estratégia de tempos fixos, foram selecionados indicadores de desempenho a partir dos quais pode-se obter a classificação dos resultados.

Durante o processo de seleção pareceu natural incluir aqueles indicadores que estão embutidos no ***Perfomance Index*** otimizado pelos algoritmos internos do EPICS e do BALANCE (Equações 3-1 e 3-2, Capítulo 3):

- **Atraso**
- **Número de paradas**
- **Comprimento da fila**

A estes o autor considerou interessante acrescentar mais dois indicadores:

- **Velocidade**
- **Densidade**

A escolha da velocidade e da densidade foi feita pensando na importância que estes indicadores têm para o monitoramento das condições de tráfego no contexto urbano.

A seleção feita foi baseada também no *Relatório D4 - Metodologia de avaliação do desempenho dos sistemas adaptativos de controle semafórico* da empresa espanhola IDOM, realizado também dentro do escopo do projeto BIRD UK sobre otimização semafórica em tempo real. Neste documento são apresentados, além daqueles escolhidos para este trabalho de simulação, outros indicadores de desempenho como o atraso total, o valor médio do atraso em cada parada, as emissões (entre outros).

Os valores dos indicadores de velocidade, atraso e número de paradas foram calculados para a rede em geral e catalogados a partir de seus valores médios para o conjunto dos veículos, para a categoria dos automóveis e para a dos ônibus, enquanto para a densidade e o comprimento da fila, devido à natureza dos indicadores, este detalhamento foi feito considerando apenas os valores relativos à todos os veículos. Desta forma buscou-se entender se existem estratégias de otimização que conseguem melhorar o desempenho geral da rede

sem comprometer a circulação de uma determinada categoria de veículos, especialmente em relação ao transporte coletivo.

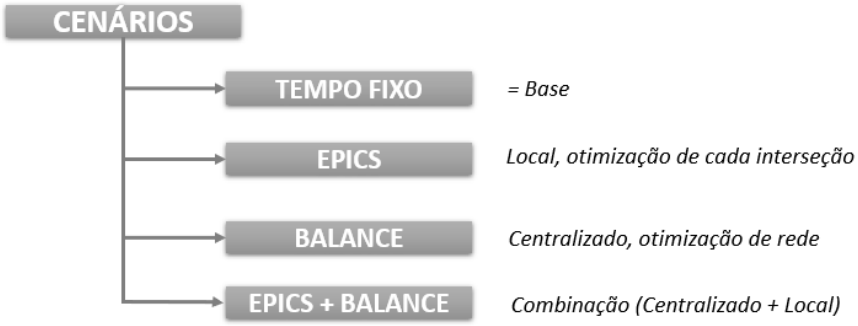
6.3 CENÁRIOS SIMULADOS

Para averiguar o desempenho dos softwares de otimização semafóricas considerados neste trabalho de pesquisa foram escolhidos os seguintes cenários de simulação:

- O cenário atual de tempos fixos
- O BALANCE funcionando independentemente
- O EPICS funcionando independentemente (sem e com prioridade para ônibus)
- O BALANCE e o EPICS funcionando conjuntamente (sem prioridade para ônibus)

As Figuras 6-2 e 6-3 explicam, de forma visual, qual a diferença principal entre as estratégias avaliadas e qual a função de cada cenário dentro dos objetivos da simulação:

Figura 6-2: Cenários simulados



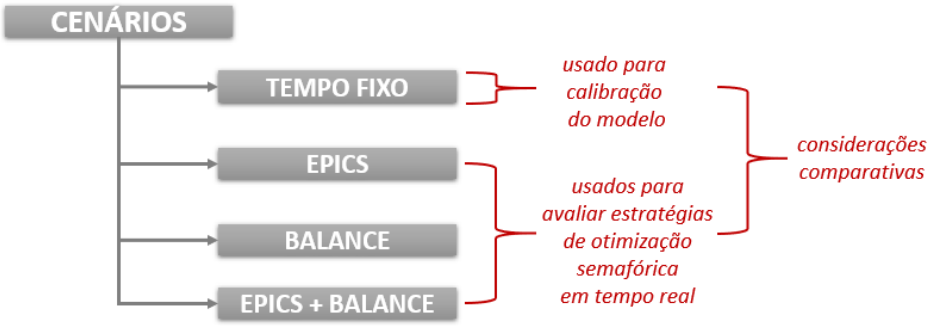
Fonte: Elaboração própria

Conjuntamente com o cenário de tempos fixos atualmente em uso na área de modelagem, nesta dissertação se simularam as estratégias de otimização semafóricas baseadas nas tecnologias EPICS e BALANCE, além de uma atuação paralela e hierárquica dos dois, conforme detalhado no Capítulo 3.

O cenário de tempos fixos representou a base de avaliação das demais tecnologias simuladas, a referência para se analisar e quantificar as vantagens e as desvantagens das alternativas adaptativas estudadas.

A outra importante função do cenário base foi relativa à calibração do modelo, pois é para esta configuração que todos os dados de entradas foram levantados (Figura 6-3).

Figura 6-3: Função dos cenários simulados



Fonte: Elaboração própria

Todos os cenários considerados foram classificados a partir dos valores dos indicadores de desempenho selecionados, comparando, através destes, as tecnologias adaptativas testadas com a atual situação de tempos fixos, considerada a base de referência. Para cada cenário foram considerados tanto os indicadores em seu valor geral, quanto, no caso de velocidade, atraso e número de paradas, também os valores específicos para automóveis e ônibus.

No cenário que prevê a utilização do EPICS, foi considerada também a opção com prioridade para os ônibus, possibilidade proporcionada por esta tecnologia, conforme descrita no Capítulo 3.

6.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A etapa de simulação deste trabalho foi estruturada começando pela extração dos indicadores relativos à atual configuração de tempos fixos, a partir da comparação com os quais foi possível fazer a avaliação do desempenho das técnicas de otimização consideradas neste trabalho.

O período de simulação foi de uma hora, conforme a disponibilidade de dados coletados pela CET, entre às 7:30 e às 8:30, horário do pico da manhã para a região analisada. A este período foram acrescentados 15 minutos iniciais para a fase de aquecimento da simulação. Para não distorcer os resultados a Matriz OD utilizada para a alocação foi dividida em duas, processo detalhado no Capítulo 5. A possibilidade de dispor da Matriz OD permitiu utilizar a alocação dinâmicas na rede, conferindo maior realidade à simulação.

Para cada cenário de otimização considerado, foram selecionadas diferentes configurações das tecnologias avaliadas, isto é, diferentes conjuntos de semáforos otimizados e, no caso do EPICS, também diferentes combinações de fluxos a serem priorizados, com seus relativos pesos. A seleção foi necessária devido ao extenso número de combinações de otimização possíveis que tanto o BALANCE como o EPICS (e, sobretudo, a combinação dos dois) proporcionam, até em uma área com apenas doze interseções como aquela considerada. Esta seleção se baseou na observação dos principais problemas (gargalos) que o atual cenário de tempos fixos apresentou e nas próprias simulações das diferentes tecnologias de otimização contempladas. Com base na identificação destas criticidades e com objetivo de otimizar as sub-regiões da área de estudo onde estas se manifestavam, era então testada uma primeira configuração de otimização e, a partir da análise dos resultados das simulações desta, eram avaliadas eventuais melhorias ou pioras da solução proposta (configuração). A configuração era então variada com o intuito de consolidar as eventuais melhorias conseguidas e atacar os gargalos remanescentes e, caso tivessem, aqueles surgidos por efeito da configuração que estava sendo testada. Por outro lado, em caso que a simulação tivesse apresentado apenas uma piora geral do desempenho da rede, se procedia voltando-se atrás para a última configuração que tinha proporcionado uma melhora.

Para cada configuração foram executadas 10 simulações, extraindo no final destas o valor médio calculado pelo VISSIM para os indicadores de desempenho selecionados. Este número foi escolhido para garantir a maior acurácia possível dos resultados dentro da disponibilidade dos recursos de simulação utilizados. Para cada cenário de otimização contemplado, foi então selecionada a configuração que obteve o melhor desempenho, cujos resultados foram utilizados para as considerações comparativas entre as tecnologias, conforme apresentado em detalhe no final deste capítulo. Desta maneira se quiseram destacar as potencialidades que cada uma oferece para a melhora das condições de tráfego na Cidade de São Paulo, objetivo principal desta pesquisa.

Nas seções 6.4.1, 6.4.2, 6.4.3 e 6.4.4, que seguem, são reportados os resultados assim obtidos para cada cenário relativamente aos diferentes indicadores selecionados, os quais são apresentados de forma tanto quantitativa (tabelas) como qualitativa (mapas), com a exceção do número de paradas que é tratado apenas de maneira quantitativa sendo que, devido à natureza deste indicador, o autor desta dissertação considerou pouco expressivo um mapa específico.

A comparação dos indicadores entre os diferentes cenários é feita mais a frente, na seção 6.4.5, onde é possível aferir qual o desempenho específico de cada tecnologia para cada um dos aspectos considerados.

6.4.1 Tempos fixos

Os resultados obtidos na simulação do atual cenário de tempos fixos servem como base de comparação para as estratégias de otimização semafórica em tempo real consideradas neste trabalho de pesquisa. As Tabelas 6-1 e 6-2 resumem os resultados obtidos nas simulações do atual cenário de tempos fixos:

Tabela 6-1: Resultados das simulações com tempos fixos (agregados)

VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6-2: Resultados das simulações com tempos fixos (desagregados)

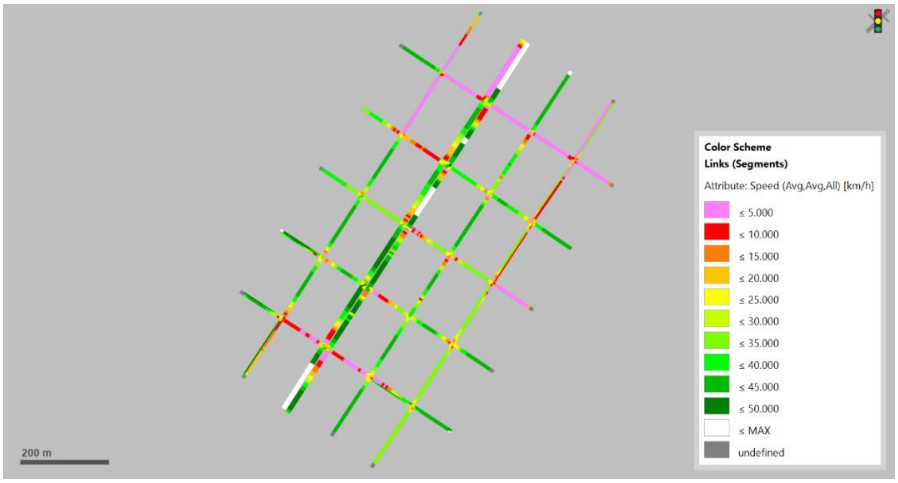
	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO MÉDIO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
VALOR	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
MÉDIA	10,44	10,31	14,06	196,01	197,61	154,11	6,35	6,46	3,42
DESVIO PADRÃO	0,31	0,31	0,28	7,57	7,83	4,31	0,27	0,28	0,15
MIN	9,94	9,8	13,61	187,73	189,09	147,42	6,05	6,16	3,2
MAX	10,75	10,63	14,45	208,79	210,78	159,92	6,74	6,86	3,66

Fonte: Elaboração própria

Nas Figuras 6-4, 6-5, 6-6 e 6-7 são apresentados, respectivamente, os mapas relativos aos valores médios da velocidade, da densidade, do atraso e do comprimento das filas na região de estudo. Os resultados apresentados apontam as interseções da Avenida Pompeia com a

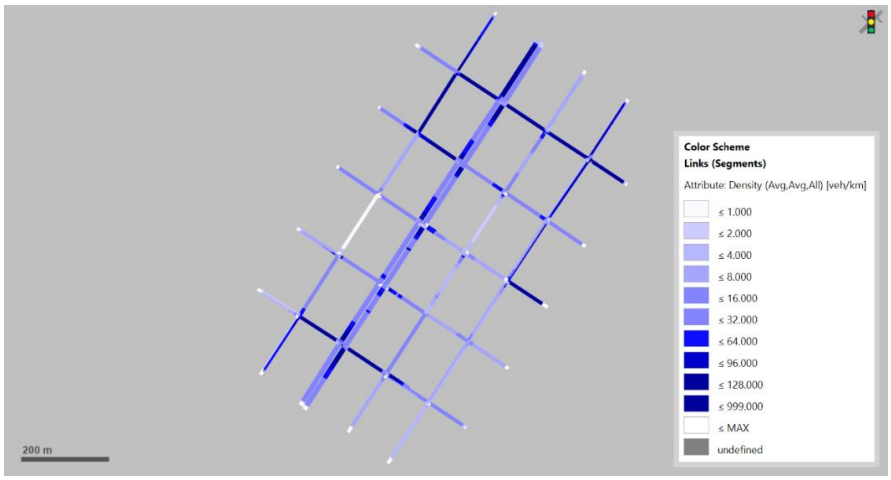
Rua Guiará, com a Rua Desembargador do Vale e com a Rua Ministro Ferreira Alves como as mais problemáticas da rede, especialmente em relação àqueles veículos que pretendem entrar na Avenida Pompeia a partir destas três transversais, provocando uma degradação do desempenho destas subáreas que, no caso da Rua Ministro Ferreira Alves, chega a afetar a circulação na própria Avenida Pompeia.

Figura 6-4: Velocidade média com tempos fixos



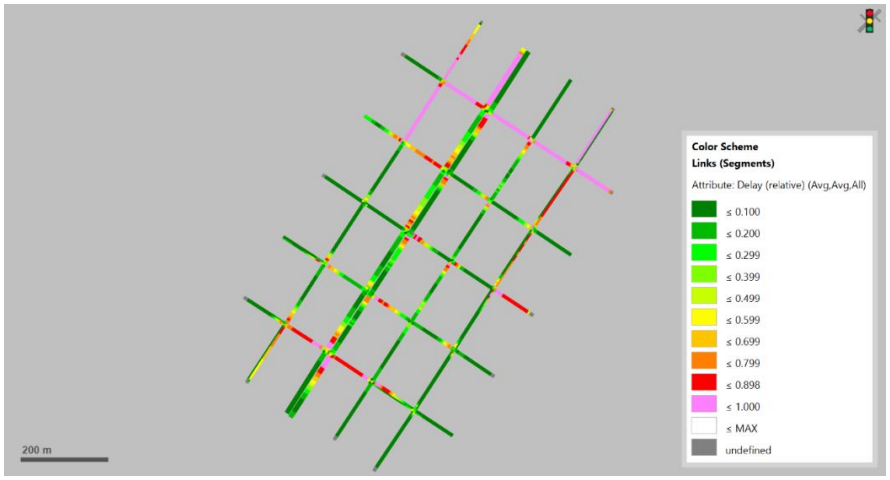
Fonte: VISSIM

Figura 6-5: Densidade média com tempos fixos



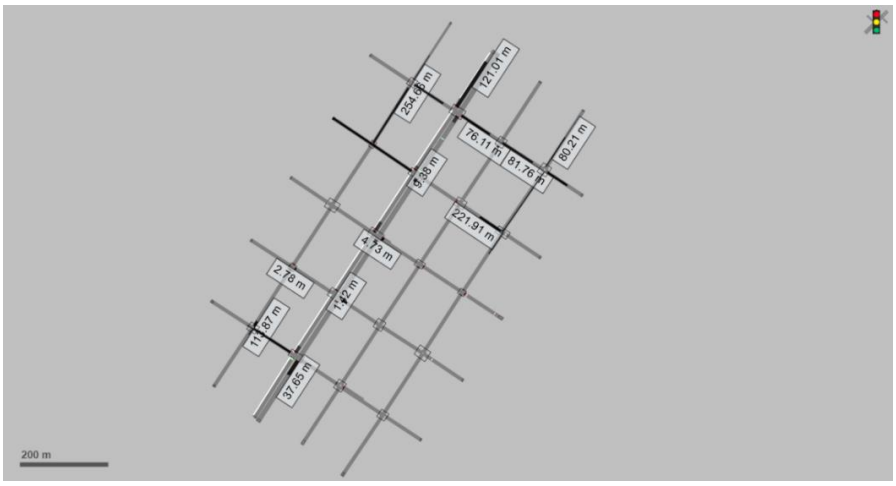
Fonte: VISSIM

Figura 6-6: Atraso médio com tempos fixos



Fonte: VISSIM

Figura 6-7: Comprimento das filas com tempos fixos



Fonte: VISSIM

6.4.2 EPICS

Como foi já explicado com detalhe no Capítulo 3, o EPICS é uma tecnologia de otimização local cujo objetivo é a maximização do desempenho de uma única interseção, dependendo da configuração particular escolhida. Esta característica do EPICS torna ele uma opção cuja implementação é relativamente barata devido à não necessidade de uma comunicação entre

o controlador e a central. A desvantagem principal é constituída pela insensibilidade do controlador pela situação geral das interseções contíguas, situação que merece ser estudada com cuidado sendo que em algumas circunstâncias pode levar à uma severa degradação do desempenho da rede.

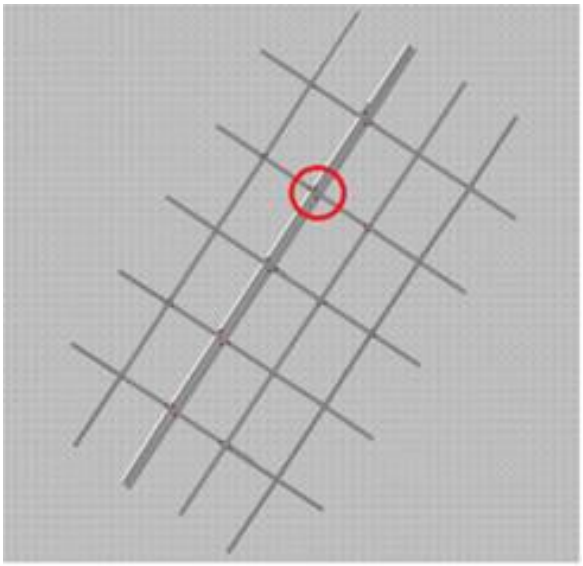
Através do EPICS é possível associar a cada fluxo de veículos pesos diferentes que serão considerados no momento do cálculo dos planos que minimizam o índice de desempenho interno (*Performance Index* – ver Capítulo 3) utilizado para a escolha da melhor estratégia de otimização dentro do horizonte temporal considerado (geralmente 100 segundos).

Para a configuração do EPICS é necessário então que sejam avaliados com cuidado tanto a oportunidade de utilizar este tipo de tecnologia em um determinado cruzamento como, caso se decidir para uma implementação, os possíveis pesos de priorização dos fluxos de forma que a interseção interessada e a rede como um todo possam ter benefícios em termos de desempenho. Este processo geralmente é feito a partir de considerações baseadas nos objetivos que a específica implementação se propõe e deve ser afinada através testes de simulação feitos mudando os pesos relativos dos vários fluxos e avaliando os resultados produzidos.

Neste trabalho foram executadas simulações de diferentes configurações do EPICS com combinações que contemplaram tanto a otimização em todos os controladores da Avenida Pompeia como a aplicação em uma única interseção desta. Os melhores resultados foram obtidos com a otimização do EPICS ocorrendo apenas na interseção entre a Avenida Pompeia e a Rua Desembargador do Vale (Figura 6-8).

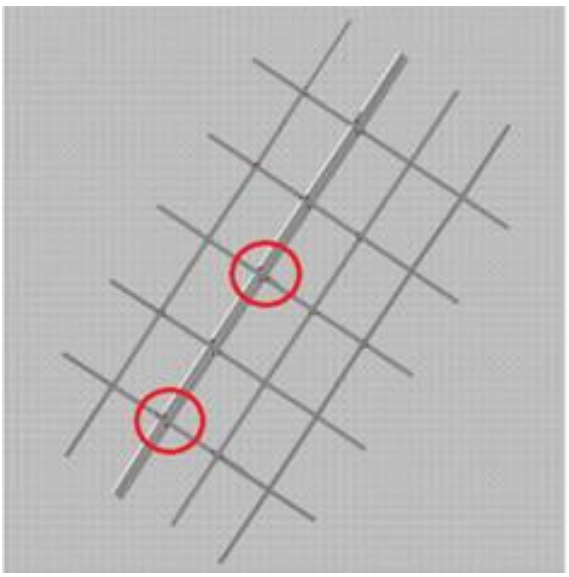
Em função da possibilidade proporcionada pelo EPICS de implementar a priorização para veículos especiais, foram testadas diferentes configurações para selecionar a melhor combinação pela aplicação da prioridade para os ônibus. Os melhores resultados foram obtidos com a otimização do EPICS e a priorização ocorrendo apenas nas interseções entre a Avenida Pompeia, a Rua Guiará e a Avenida Alfonso Bovero, e entre a Avenida Pompeia e a Rua Coronel Melo de Oliveira (Figura 6-9). Neste caso foi aplicado aos ônibus um peso 10, isto é, cada ônibus foi considerado pelo EPICS como 10 automóveis. Os testes evidenciaram que o aumento deste peso tinha como consequência uma degradação geral da rede que afetava também o desempenho dos próprios ônibus.

Figura 6-8: Cenário selecionado para simulação com EPICS (sem prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

Figura 6-9: Cenário selecionado para simulação com EPICS (com prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

Os resultados obtidos das simulações com o otimizador EPICS com e sem a priorização para ônibus são apresentados nas Tabelas 6-3, 6-4, 6-5 e 6-6 a seguir:

Tabela 6-3: Resultados das simulações utilizando o EPICS com e sem priorização para ônibus (agregados)

PRIORIZAÇÃO	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
não	15,59	108,49	3,66	746,94	28,31
sim	10,68	212,78	6,33	1451,8	42,81

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6-4: Resultados das simulações utilizando o EPICS sem priorização para ônibus (desagregados)

	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO MÉDIO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
VALOR	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
MÉDIA	15,59	15,72	13,17	108,49	106,39	169,44	3,66	3,65	3,85
DESVIO PADRÃO	1,76	1,82	1,03	19,9	20,05	18,54	0,69	0,7	0,55
MIN	12,34	12,36	11,51	90,54	88,22	140,35	3	2,99	3,12
MAX	17,28	17,48	14,84	146,71	145,18	200,55	4,95	4,97	4,73

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6-5: Resultados das simulações utilizando o EPICS com priorização para ônibus (desagregados)

	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO MÉDIO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
VALOR	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
MÉDIA	10,68	10,66	11,13	212,78	212,59	221,62	6,33	6,38	5,07
DESVIO PADRÃO	3,5	3,55	2,49	95,46	96,88	68,34	2,26	2,29	1,62
MIN	6,01	5,89	7,32	113,73	111,55	144,39	3,72	3,71	3,22
MAX	14,96	15,07	14,52	353,17	356,65	358,1	9,96	10,08	8,12

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6-6: Variação percentual dos indicadores com EPICS (sem prioridade para ônibus)

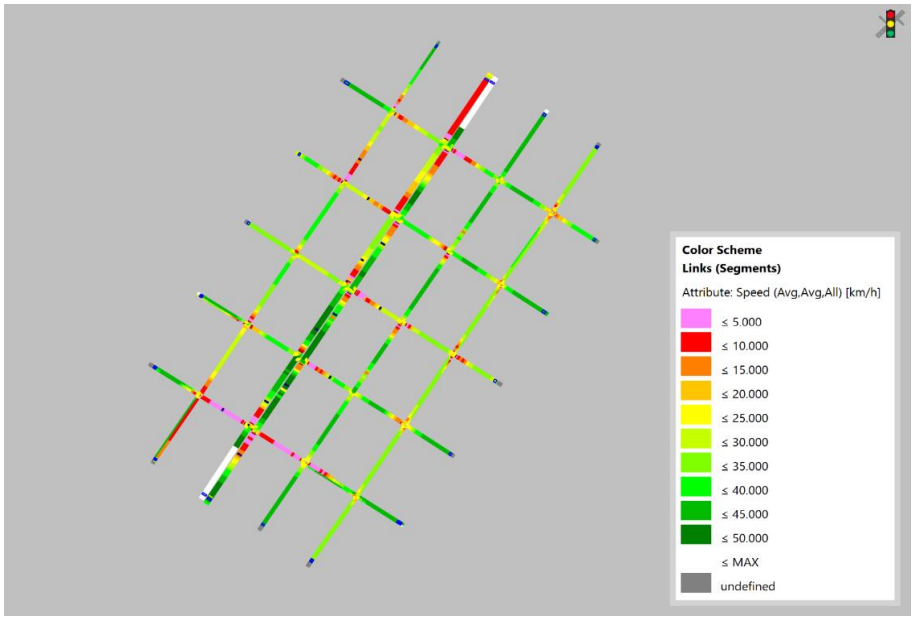
	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
TEMPOS FIXOS	10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76
EPICS	15,59	108,49	3,66	746,94	28,31
VARIAÇÃO%	49,33	-44,65	-42,36	-25,71	-25,03

Fonte: Elaboração própria

Nas Figuras 6-10, 6-11, 6-12 e 6-13 são apresentados os resultados das simulações relativos aos valores médios da velocidade, da densidade, do atraso e o comprimento das filas para o cenário sem prioridade de ônibus (Figura 6-8).

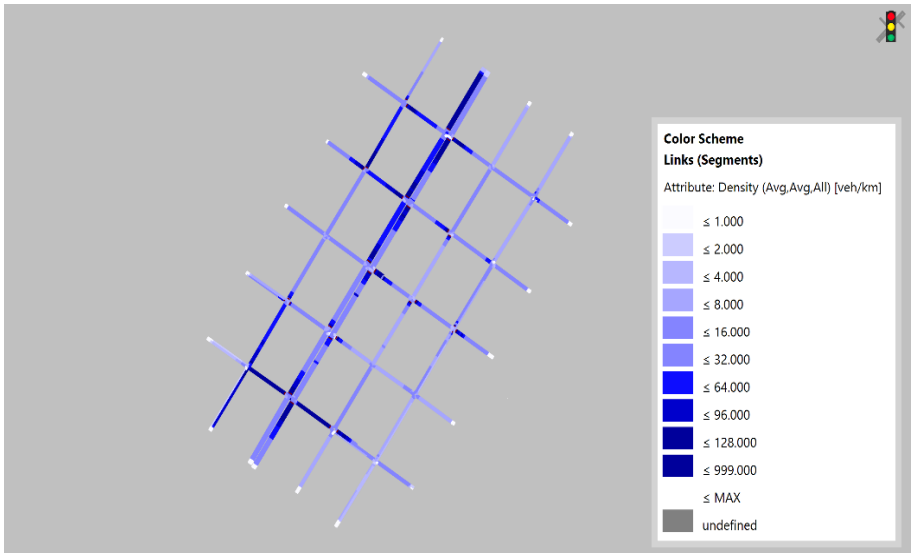
Ao observar os mapas relativos à configuração selecionada do EPICS sem a prioridade de ônibus, aparece evidente uma melhora geral do desempenho da rede, resultados que são confirmados na Tabela 6-6, onde é possível aferir a variação percentual que os indicadores gerais tiveram em comparação ao cenário de referência.

Figura 6-10: Velocidade média com EPICS (sem prioridade para ônibus)



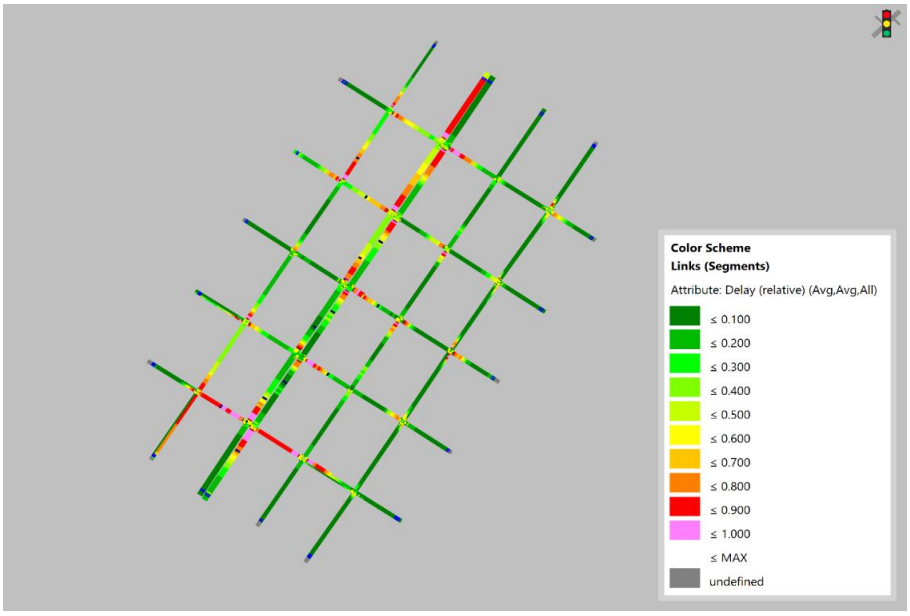
Fonte: VISSIM

Figura 6-11: Densidade média com EPICS (sem prioridade para ônibus)



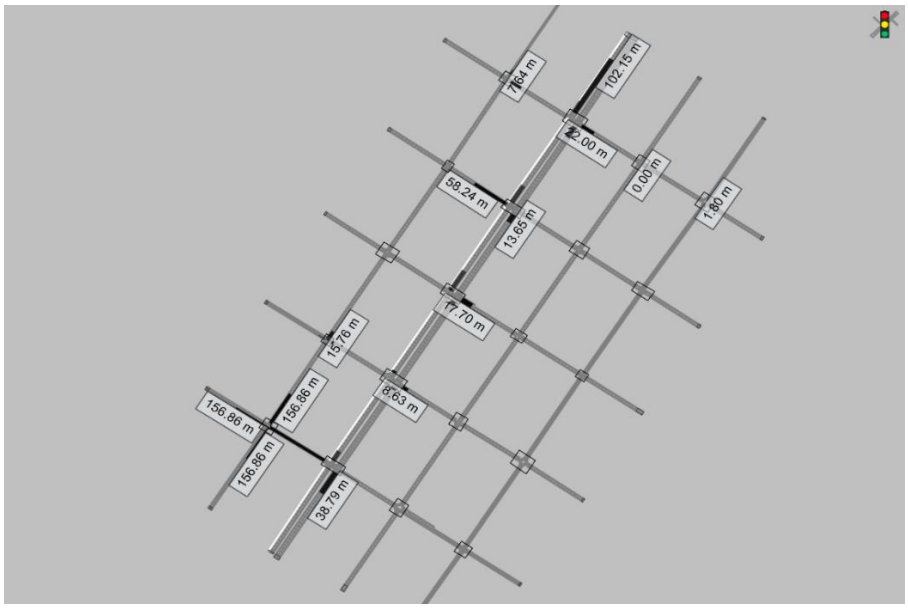
Fonte: VISSIM

Figura 6-12: Atraso médio com EPICS (sem prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

Figura 6-13: Comprimento das filas com EPICS (sem prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

Relativamente ao EPICS com o mecanismo de prioridade para os ônibus ativo, o desempenho da melhor configuração selecionada durante os testes está em geral abaixo do cenário de tempos fixos, conforme os dados reportados na Tabela 6-7. Apesar da velocidade e número

de paradas apresentarem leves melhoras, os outros indicadores apresentam uma degradação que chega a ser significativa no caso do comprimento total da fila (+44,39%).

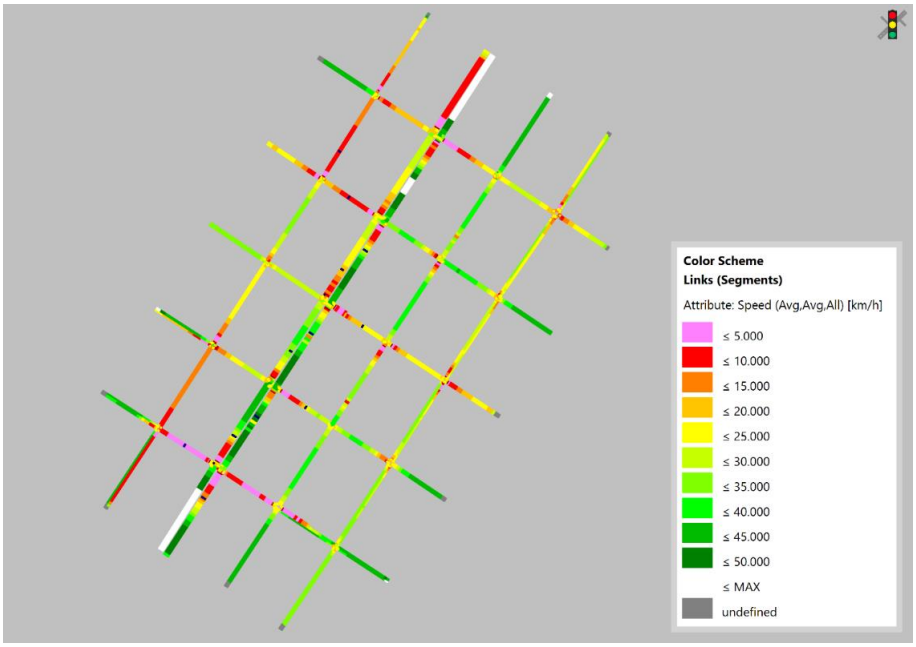
Tabela 6-7: Variação percentual dos indicadores com EPICS (com prioridade para ônibus)

	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
TEMPOS FIXOS	10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76
EPICS	10,68	212,78	6,33	1451,8	42,81
VARIAZIONE %	2,30	8,56	-0,31	44,39	13,37

Fonte: Elaboração própria

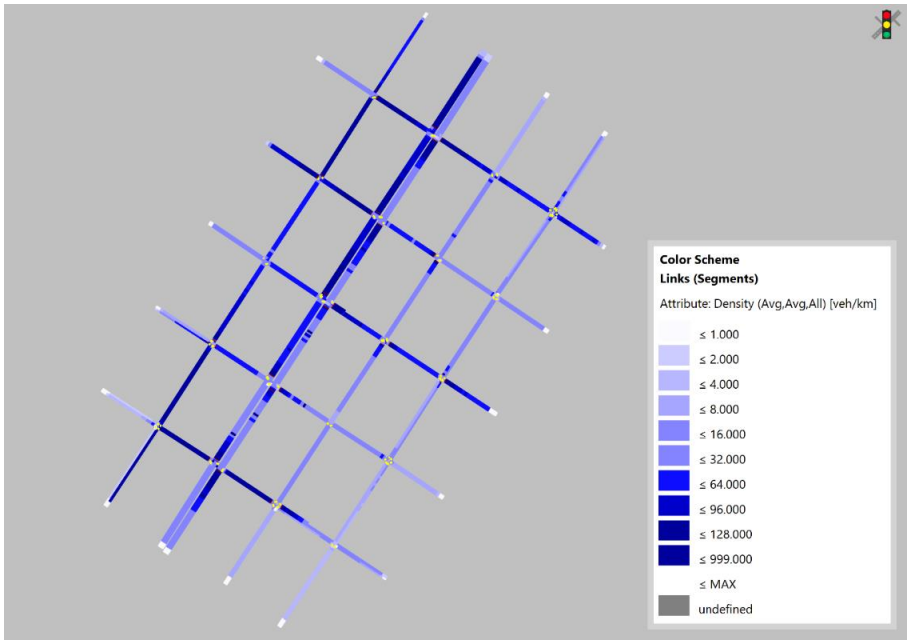
Nas Figuras 6-14, 6-15, 6-16 e 6-17 são apresentados os mapas relativos ao cenário que prevê a prioridade para os ônibus (Figura 6-9). Nota-se uma piora do desempenho especialmente na Avenida Pompeia e na Rua Barão de Bananal onde a velocidade cai e a densidade aumenta em função da formação de filas. Vale destacar como o mecanismo de priorização de ônibus, quando implementado impropriamente ou em lugar não adequado, pode levar a uma deterioração do funcionamento da rede viária, situação que inevitavelmente chega a afetar a circulação dos próprios ônibus, a categoria que queria se privilegiar.

Figura 6-14: Velocidade média com EPICS (com prioridade para ônibus)



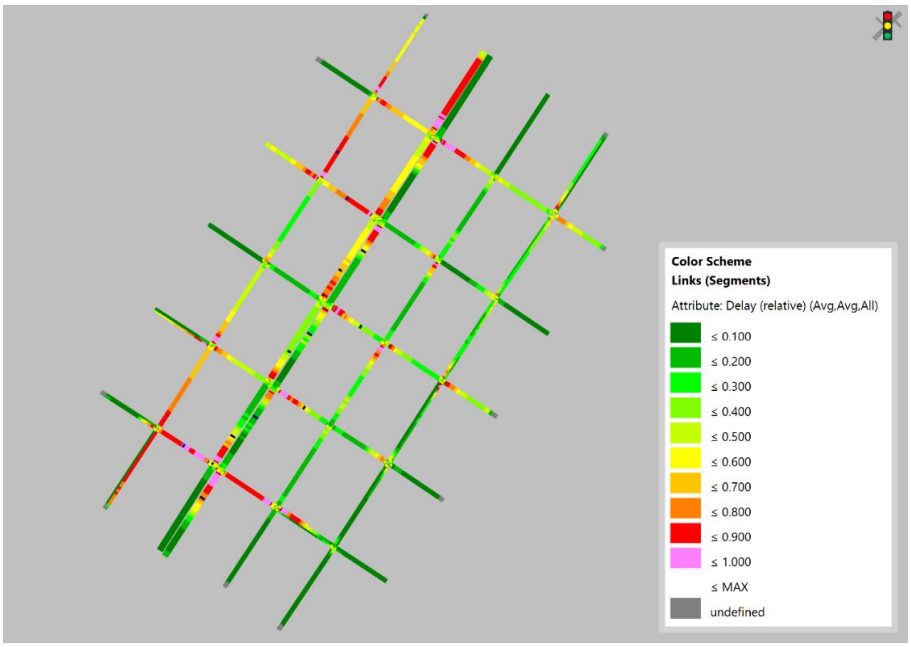
Fonte: VISSIM

Figura 6-15: Densidade média com EPICS (com prioridade para ônibus)



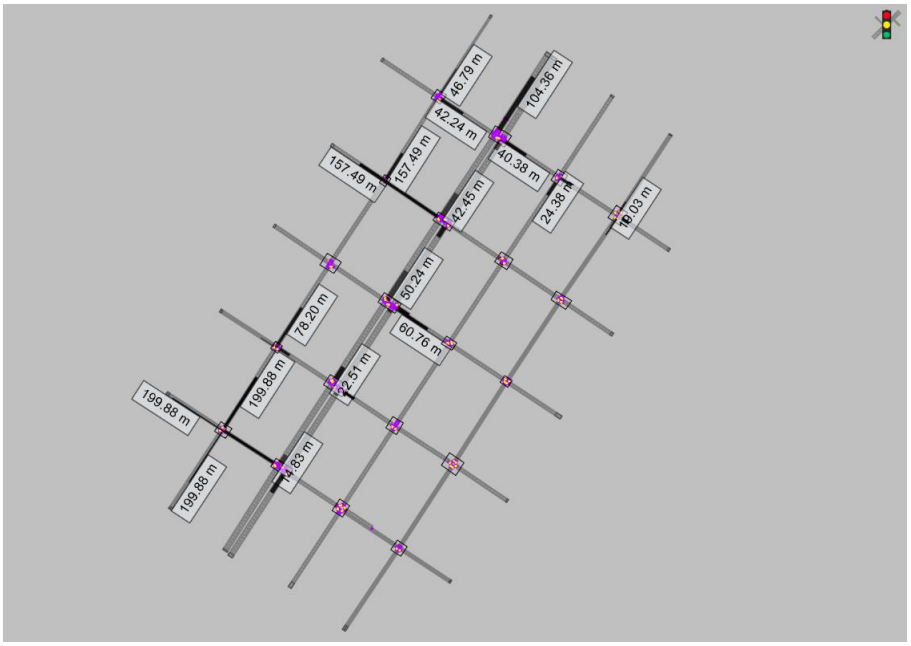
Fonte: VISSIM

Figura 6-16: Atraso médio com EPICS (com prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

Figura 6-17: Comprimento das filas com EPICS (com prioridade para ônibus)



Fonte: VISSIM

6.4.3 BALANCE

O Balance é um otimizador semafórico para macro áreas. Conforme detalhado no Capítulo 3, o processo de otimização é executado a cada 5 minutos com o objetivo de calcular os melhores planos semafóricos para os controladores gerenciados, aqueles que minimizam o próprio índice de desempenho (*PI - Performance Index*) dentro de um horizonte temporal de 15 minutos.

A cada ciclo de otimização os planos semafóricos são enviados aos controladores interessados. Estes planos podem não ser os melhores em absoluto para uma interseção específica, mas são aqueles que, segundo o BALANCE, melhoram o desempenho da área controlada como um todo. A característica destes planos é ter o mesmo tempo de ciclo e de prever uma parte fixa e uma parte não fixa. A parte fixa é aquela que deve ser obrigatoriamente implementada pelo controlador, visando o desempenho da rede, enquanto a parte não fixa representa a porção do plano que um eventual otimizador local poderia mudar, visando a melhora daquela específica interseção (Ex. EPICS).

Para a utilização do BALANCE no contexto desta dissertação, foi selecionada a configuração que prevê a implementação da estratégia de otimização apenas nos controladores da Avenida

Pompeia (com a exclusão da Rua Ministro Ferreira Alves). Esta escolha se baseou nos resultados obtidos nas simulações de teste que apontaram esta configuração como aquela com o melhor desempenho, conforme critérios apresentados no começo da seção 6.4. Nas simulações feitas com a inclusão do semáforo entre a Avenida Pompeia e a Rua Ministro Ferreira Alves sob o controle do BALANCE se observou uma queda do desempenho da área com relação à configuração selecionada. Este resultado pode estar relacionado à falta no modelo de detectores para este cruzamento no sentido Vila Madalena (o mais carregado). Esta situação se apresentou frequentemente nas simulações de teste para determinar a configuração com melhor desempenho (mas não em todas), nas quais a inclusão de um ou mais semáforos desprovidos de detectores próprios levava, na maioria dos casos, a uma piora geral dos indicadores. As simulações efetuadas com a configuração de BALANCE escolhida levaram aos resultados reportados nas Tabelas 6-8 e 6-9.

Tabela 6-8: Resultados das simulações utilizando o BALANCE (agregados)

VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
14,74	120,6	4,03	562,51	30,97

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 6-9: Resultados das simulações utilizando o BALANCE (desagregados)

	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO MÉDIO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
VALOR	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
MÉDIA	14,74	14,76	14,21	120,6	119,66	148,31	4,03	4,06	3,22
DESVIO PADRÃO	0,9	0,93	0,36	10,5	10,77	5,65	0,4	0,41	0,2
MIN	13,26	13,23	13,69	102	100,82	137,32	3,41	3,43	2,81
MAX	16,38	16,44	15	138,2	137,66	157,8	4,67	4,72	3,47

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 6-10 mostra como a utilização do BALANCE na configuração selecionada conseguiu melhorar sensivelmente todos os indicadores considerados, se comparados aos valores destes no cenário atual de tempos fixos.

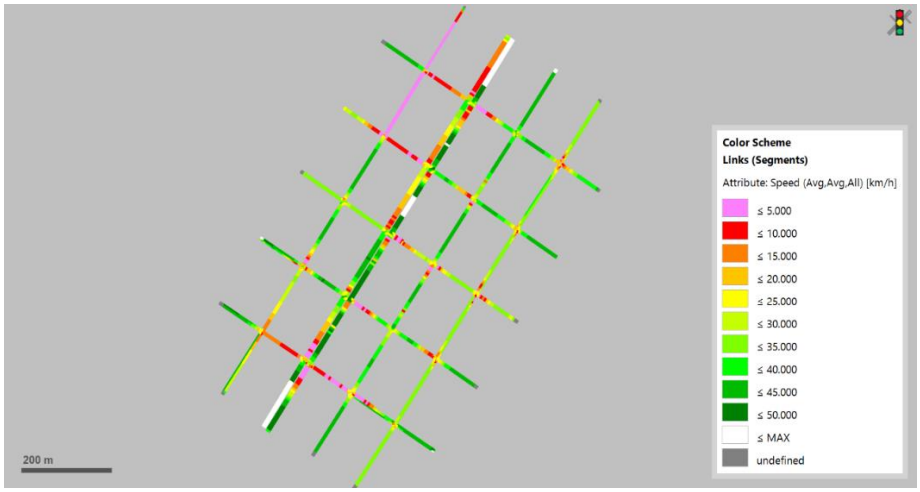
Tabela 6-10: Variação percentual dos indicadores com BALANCE

	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
TEMPOS FIXOS	10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76
BALANCE	14,74	120,6	4,03	562,51	30,97
VARIAÇÃO%	41,19	-38,47	-36,54	-44,06	-17,98

Fonte: Elaboração própria

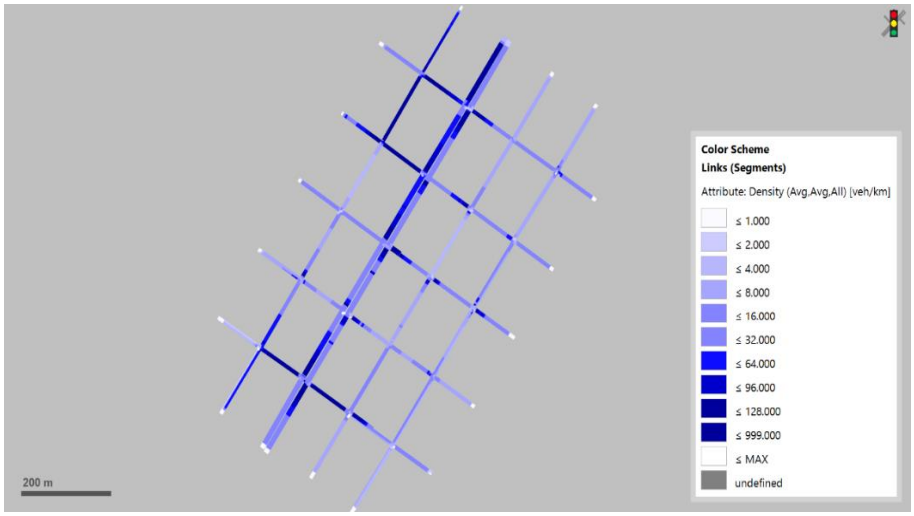
Nas Figuras 6-18, 6-19, 6-20 e 6-21 são apresentados os mapas relativos aos valores médios da velocidade, da densidade, do atraso e o comprimento das filas obtidos pela melhor configuração selecionada do BALANCE. É possível reconhecer uma distribuição mais homogênea de velocidade, atraso e densidade que ocorrem junto a uma diminuição das filas, situação fruto do processo de otimização que aumenta a racionalidade na utilização da rede.

Figura 6-18: Velocidade média com BALANCE



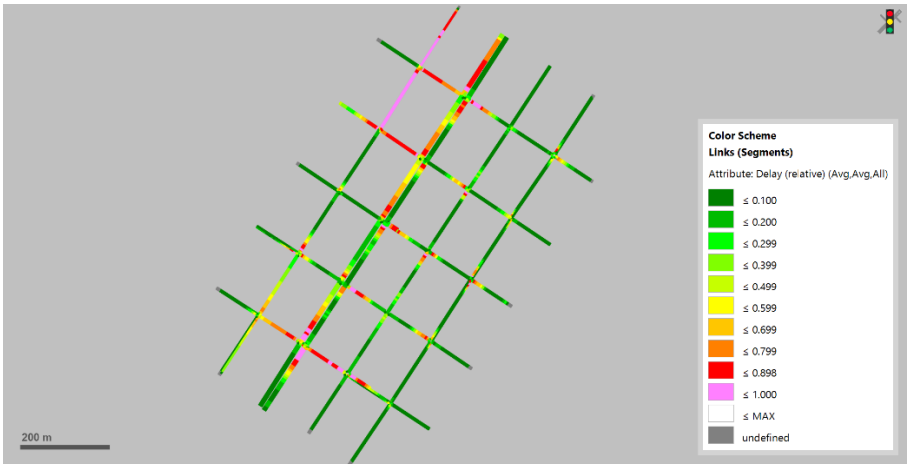
Fonte: VISSIM

Figura 6-19: Densidade média com BALANCE



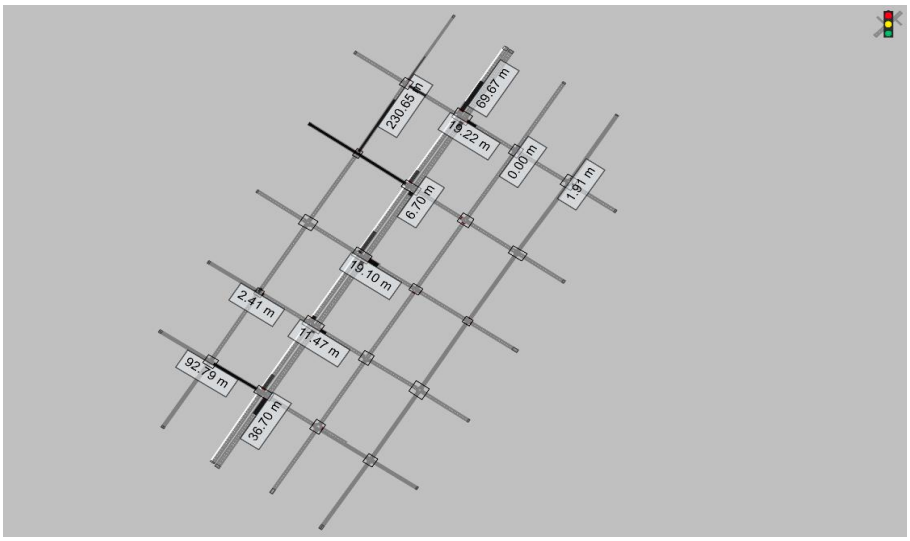
Fonte: VISSIM

Figura 6-20: Atraso médio com BALANCE



Fonte: VISSIM

Figura 6-21: Comprimento das filas com BALANCE



Fonte: VISSIM

6.4.4 BALANCE e EPICS acoplados

O último cenário considerado no âmbito deste trabalho de pesquisa prevê a utilização contemporânea do BALANCE e do EPICS. O acoplamento das duas tecnologias realiza uma estrutura de otimização hierárquica e distribuída cuja otimização é feita primeiramente pelo BALANCE para a área como um todo, para ser continuamente (a cada ciclo) refinada pelo EPICS

apenas nas interseções onde este se encontra ativo, respeitando os limites impostos pelo BALANCE para o plano calculado para a interseção em objeto.

Para avaliar o desempenho desta combinação de tecnologias de otimização, após o teste de diferentes soluções, chegou-se aos melhores resultados na configuração que prevê:

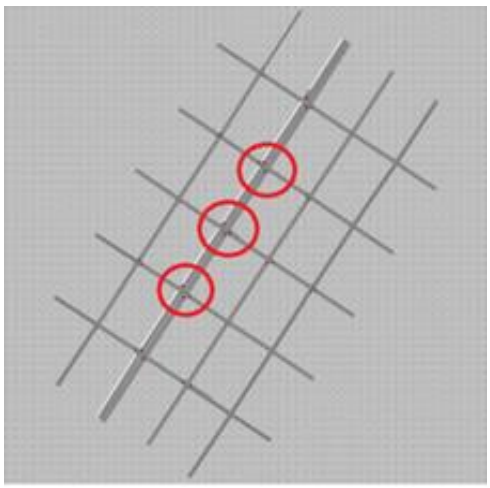
a) o BALANCE funcionando em todas as interseções da Avenida Pompeia (com a exclusão da com a Rua Ministro Ferreira Alves) e nas interseções da Rua Barão do Bananal com a Rua Desembargador do Vale e da Avenida Alfonso Bovero com a Rua Cotoxó (Figura 6-22).

b) o EPICS atuando contemporaneamente nas interseções da Avenida Pompeia com Rua Tavares Bastos, Rua Coronel Melo de Oliveira e Rua Desembargador do Vale (Figura 6-23).

Figura 6-22: Controladores com BALANCE

Fonte: VISSIM

Figura 6-23: Controladores com EPICS



Fonte: VISSIM

Os resultados das simulações executadas com o acoplamento de BALANCE e EPICS na configuração selecionada (Figuras 6-22 e 6-23) são apresentados nas Tabelas 6-11 e 6-12.

Tabela 6-11: Resultados das simulações utilizando BALANCE acoplado com EPICS (agregados)

VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
17,98	86,15	2,61	585,3	21,72

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6-12: Resultados das simulações utilizando BALANCE acoplado com o EPICS (desagregados)

	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO MÉDIO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
VALOR	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
MÉDIA	17,98	18,07	16,33	86,15	84,66	124,64	2,61	2,62	2,46
DESVIO PADRÃO	0,21	0,23	0,15	1,53	1,61	2,02	0,03	0,03	0,06
MIN	17,65	17,72	16,18	84,26	82,71	120,29	2,57	2,58	2,38
MAX	18,24	18,34	16,69	88,4	87,05	126,83	2,65	2,66	2,57

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 6-13 apresenta os resultados gerais da rede em termos de variação percentual obtidos neste cenário. Os números contidos nesta tabela apontam para uma forte melhora de todos os indicadores considerados, com valores que oscilam dos 42,48% da densidade até os 72,22% da velocidade.

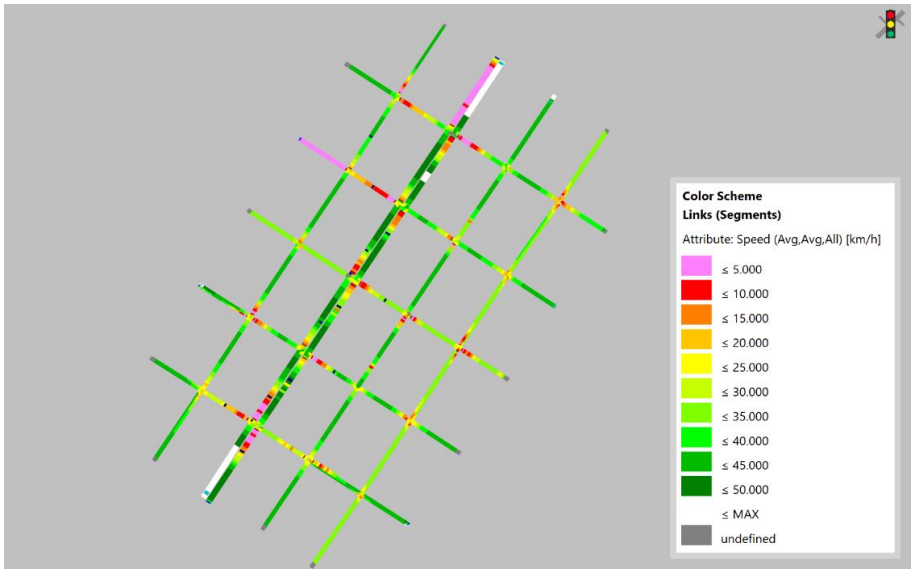
Tabela 6-13: Variação percentual dos indicadores com BALANCE acoplado com EPICS

	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
TEMPOS FIXOS	10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76
BALANCE+EPICS	17,98	86,15	2,61	585,3	21,72
VARIAÇÃO%	72,22	-56,05	-58,90	-41,79	-42,48

Fonte: Elaboração própria

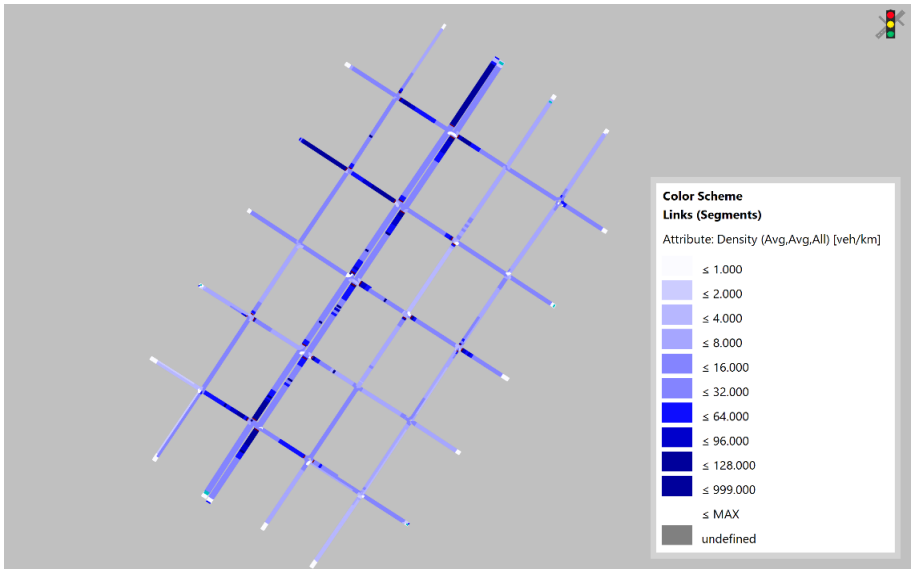
Nas Figuras 6-24, 6-25, 6-26 e 6-27 são apresentados os mapas relativos aos valores médios da velocidade, da densidade, do atraso e o comprimento das filas para o cenário considerado. Como no caso do BALANCE, observa-se uma distribuição espacial dos indicadores sensivelmente mais homogênea do cenário de referência com tempos fixos, sintoma de um uso mais eficiente da rede viária, testemunhada também pela significativa redução do comprimento das filas.

Figura 6-24: Velocidade média com BALANCE e EPICS



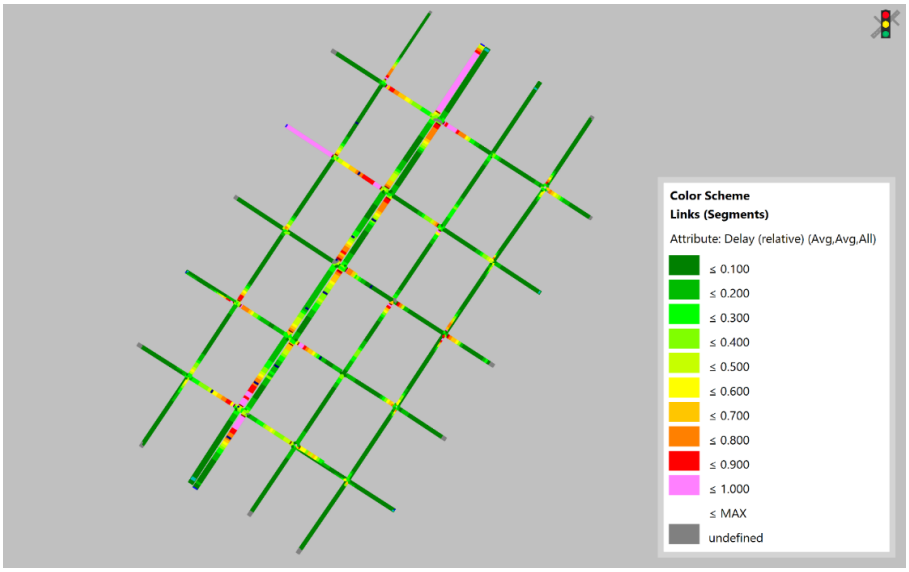
Fonte: VISSIM

Figura 6-25: Densidade média com BALANCE e EPICS



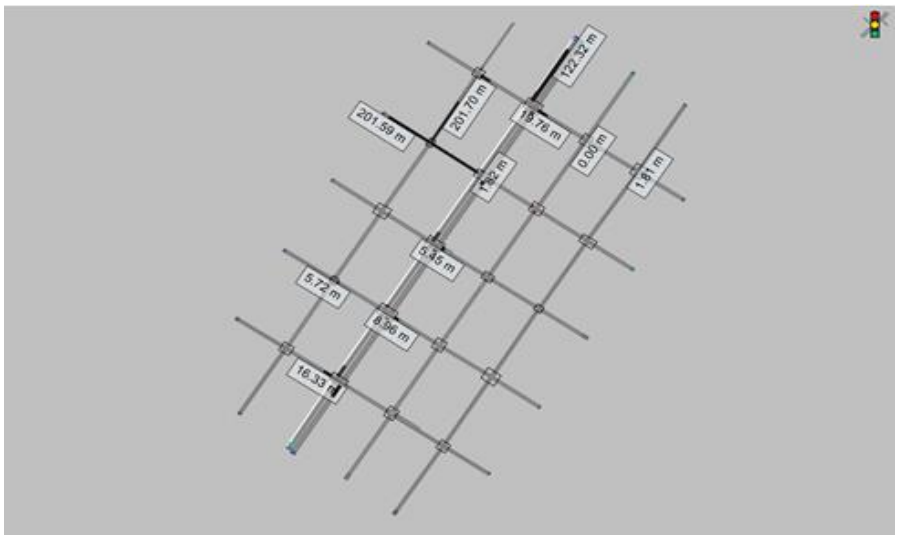
Fonte: VISSIM

Figura 6-26: Atraso médio com BALANCE e EPICS



Fonte: VISSIM

Figura 6-27: Comprimento das filas com BALANCE e EPICS



Fonte: VISSIM

6.4.5 Comparação e classificação das tecnologias de otimização

Depois ter simulado as tecnologias de otimização semafórica BALANCE e EPICS tanto de forma independente, como acoplada entre elas, é possível realizar uma comparação dos resultados obtidos pelas estratégias em tempo real com a situação atual de tempos fixos.

A comparação é feita a partir dos indicadores de desempenho selecionados, obtidos através do processo de simulação para os cenários considerados nesta dissertação.

Para garantir uma maior uniformidade na comparação dos indicadores, optou-se por excluir o cenário do EPICS em que este é configurado para providenciar a prioridade semafórica para os ônibus na Avenida Pompeia.

Na Tabela 6-14 são apresentados os resultados gerais para as tecnologias de otimização simuladas:

Tabela 6-14: Resultados gerais das simulações

CENÁRIOS	VELOCIDADE (KM/H)	ATRASO (SEG)	NÚMERO DE PARADAS	COMPRIMENTO DA FILA (MT)	DENSIDADE (VEH/KM)
TEMPOS FIXOS	10,44	196,01	6,35	1005,49	37,76
EPICS	15,59	108,49	3,66	746,94	28,31
BALANCE	14,74	120,6	4,03	562,51	30,97
BALANCE+EPICS	17,98	86,15	2,61	585,3	21,72

Fonte: Elaboração própria

Os valores dos indicadores de desempenho selecionados foram calculados, nos casos onde fazia sentido, também para as categorias específicas dos automóveis e dos ônibus, conforme reportado na Tabela 6-15:

Tabela 6-15: Resultados das simulações por categoria de veículo

	VELOCIDADE (KM/H)			ATRASO (SEG)			NÚMERO DE PARADAS		
CENÁRIOS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS	GERAL	AUTOMÓVEIS	ÔNIBUS
TEMPOS FIXOS	10,44	10,31	14,06	196,01	197,61	154,11	6,35	6,46	3,42
EPICS	15,59	15,72	13,17	108,49	106,39	169,44	3,66	3,65	3,85
BALANCE	14,74	14,76	14,21	120,6	119,66	148,31	4,03	4,06	3,22
BALANCE+EPICS	17,98	18,07	16,33	86,15	84,66	124,64	2,61	2,62	2,46

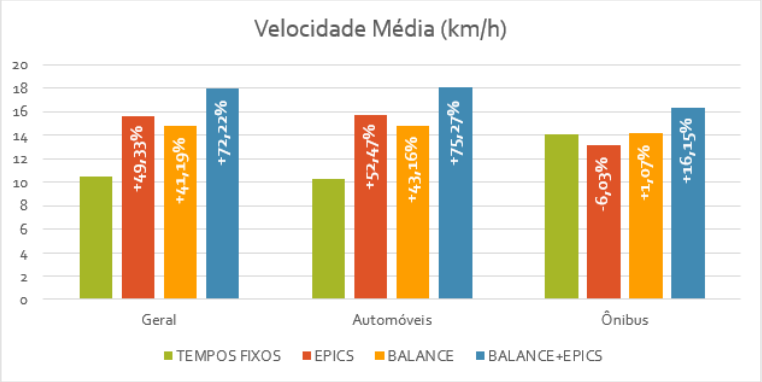
Fonte: Elaboração própria

Nos gráficos e nas figuras a seguir são reportados em detalhe os resultados do processo de comparação de cada indicador separadamente. Esta análise tem o objetivo de entender melhor qual o efeito de uma determinada abordagem de otimização sobre cada um dos parâmetros de desempenho selecionados.

Relativamente à **Velocidade Média**, no Gráfico 6-1 é possível identificar a solução constituída pelo conjunto de BALANCE e EPICS como aquela que garante os resultados melhores, tanto para a rede em geral como para as categorias específicas de veículos consideradas. Uma

sensível melhora deste indicador se obtêm em todas as abordagens de otimização simuladas com a exceção dos ônibus cuja velocidade média aumenta somente com a utilização de BALANCE e EPICS acoplados e, ainda neste caso dos ônibus, se mantêm constante na simulação com o BALANCE e chega a piorar no cenário com uso exclusivo do EPICS.

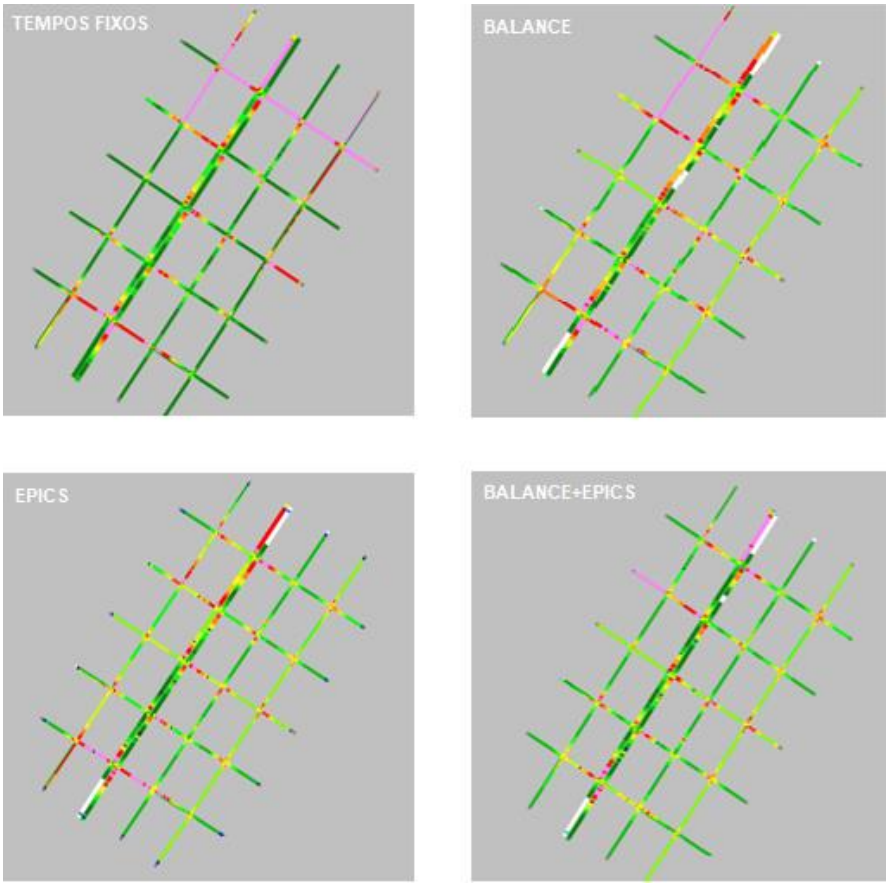
Gráfico 6-1: Comparação da velocidade média



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 6-28 são comparados os mapas relativos aos valores gerais da velocidade média. Nesta é possível observar, para cada cenário, os links onde houve um aumento do desempenho da rede viária. Nota-se uma melhora em todas as transversais e, nos casos de EPICS e BALANCE com EPICS, sem que o eixo central (o com maior capacidade) da Avenida Pompeia seja afetado. Esta melhora se torna evidente no resultado importante obtido especialmente no último caso mencionado (+72,22%).

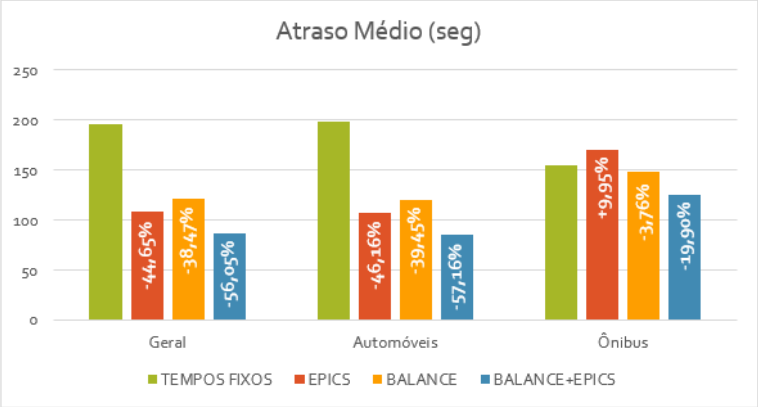
Figura 6-28: Variação da velocidade média



Fonte: Elaboração própria

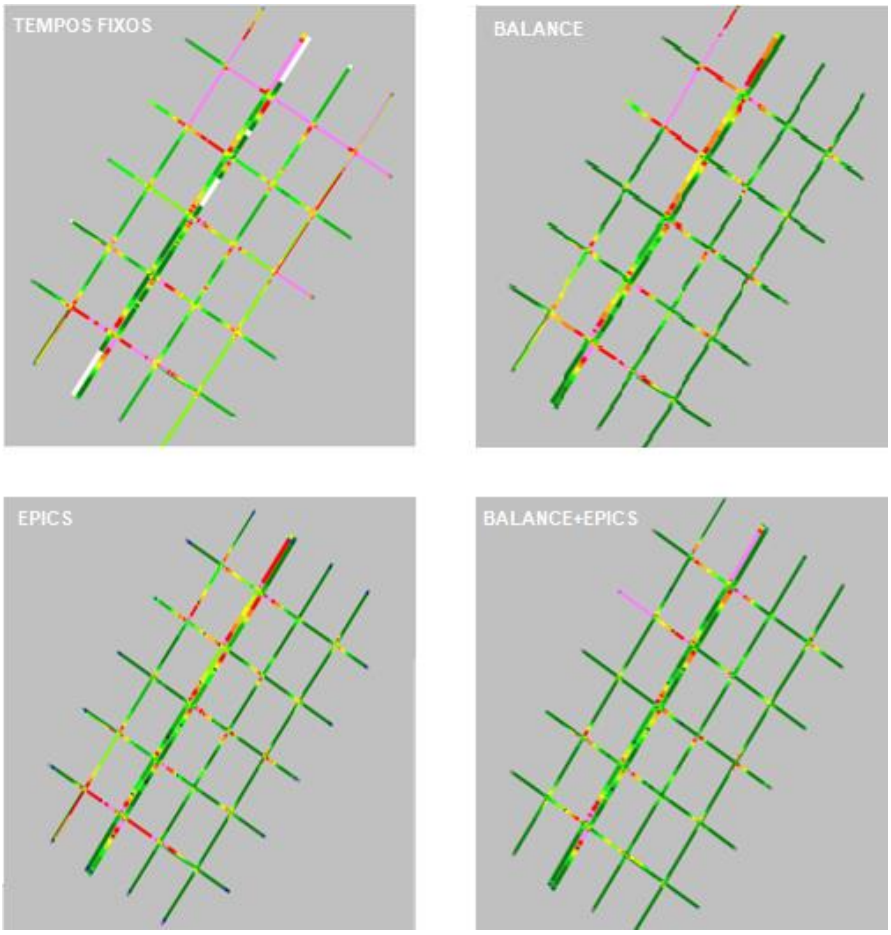
Em relação ao **Atraso Médio** a situação confirma a tendência mostrada pelo indicador já analisado, sendo que a configuração com BALANCE e EPICS acoplados é a que proporciona os maiores benefícios para o desempenho da rede viária. Também neste caso a melhora é grande em todas as tecnologias avaliadas, com exceção da categoria dos ônibus, cujo atraso diminui apreciavelmente só num cenário (BALANCE + EPICS) e chega a aumentar com a utilização apenas do EPICS (Gráfico 6-2).

Gráfico 6-2: Comparação do atraso médio



Fonte: Elaboração própria

Figura 6-29: Variação do atraso médio

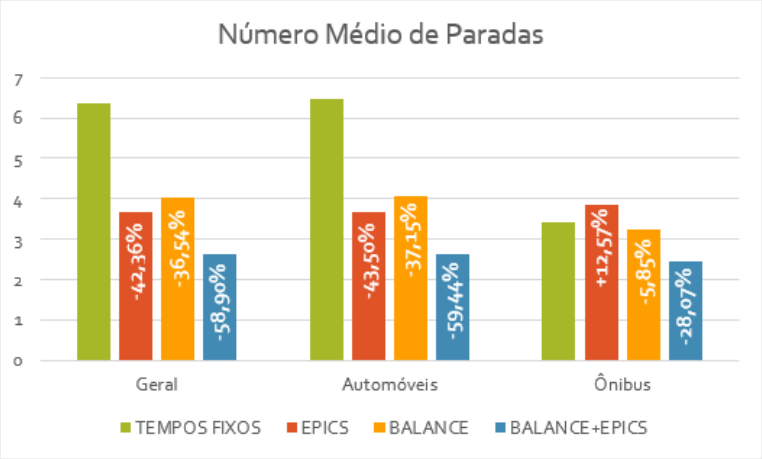


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 6-29 são comparados os mapas relativos aos valores gerais do atraso médio. Nesta é possível identificar os links onde se há uma maior redução do atraso com relação à situação atual de tempos fixos. Entre os cenários considerados merece destaque o elevado grau de homogeneidade que a solução do BALANCE acoplado com o EPICS proporciona, como demostra a significativa redução de atraso alcançada (-56,05%).

Comparando o **Número Médio de Paradas** a situação não muda, conforme apresentado no Gráfico 6-3. O melhor resultado para este indicador (-58,9%) se obtêm na configuração com BALANCE e EPICS acoplados. Também sob este aspecto, no caso dos ônibus os resultados vão entre uma leve melhora e uma piora (EPICS), sendo que para os demais veículos a melhora é sensível em todos os cenários.

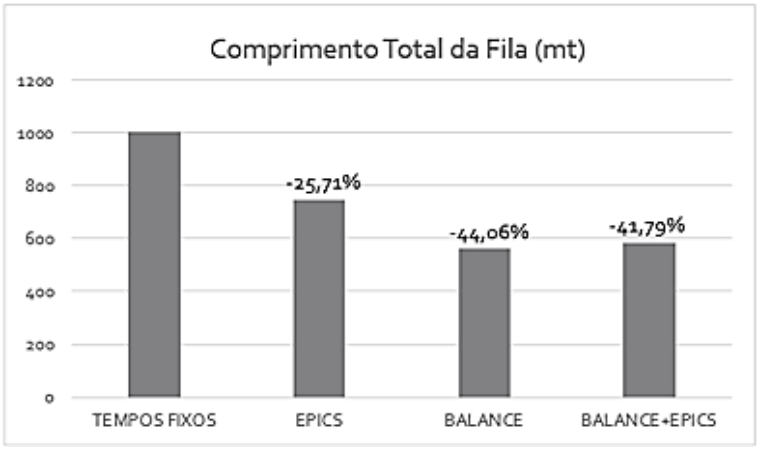
Gráfico 6-3: Comparação do número médio de paradas



Fonte: Elaboração própria

No caso do **Comprimento total da fila,** em todos os cenários houve uma melhora desse indicador, sendo, neste caso, a simulação com o BALANCE a que deu os melhores resultados (- 44,6%), conforme apresentado no Gráfico 6-4:

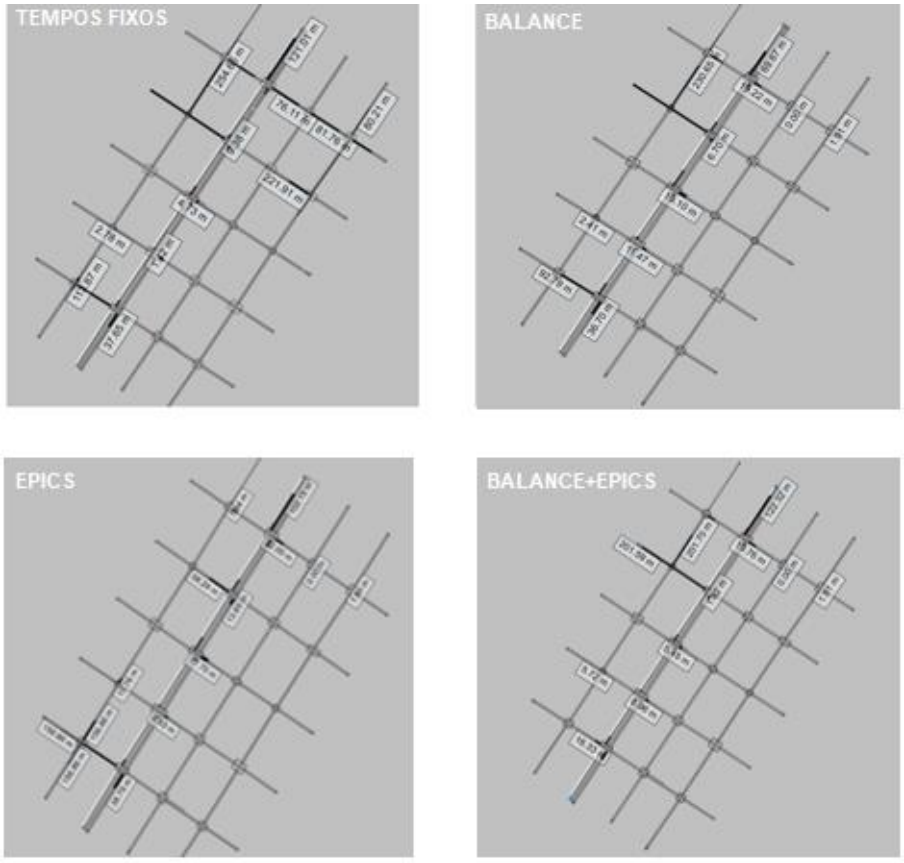
Gráfico 6-4: Comparação do comprimento total da fila



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 6-30 é possível identificar as filas nos vários cenários simulados e os links onde ocorre uma maior redução do comprimento da fila (tendo como referência a situação atual de tempos fixos) e como estas se distribuíram nos casos analisados. No melhor cenário (BALANCE) persiste um problema de fila na interseção entre a Rua Guiará e a Rua Barão do Bananal, mas no restante da rede estas se reduziram consideravelmente ou desapareceram.

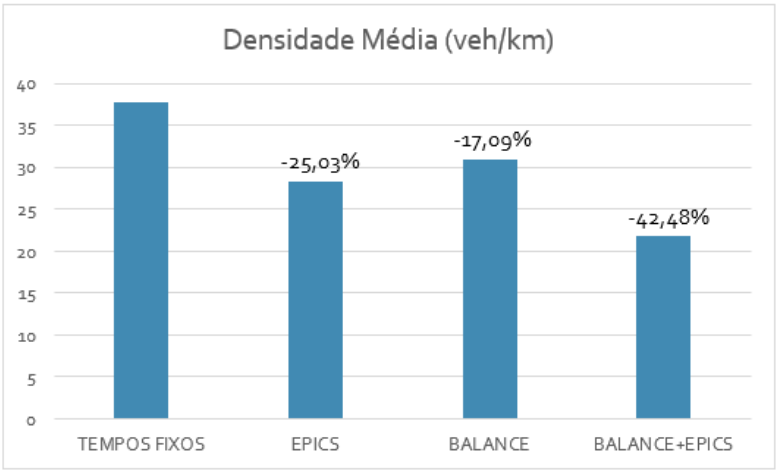
Figura 6-30: Variação do comprimento das filas



Fonte: Elaboração própria

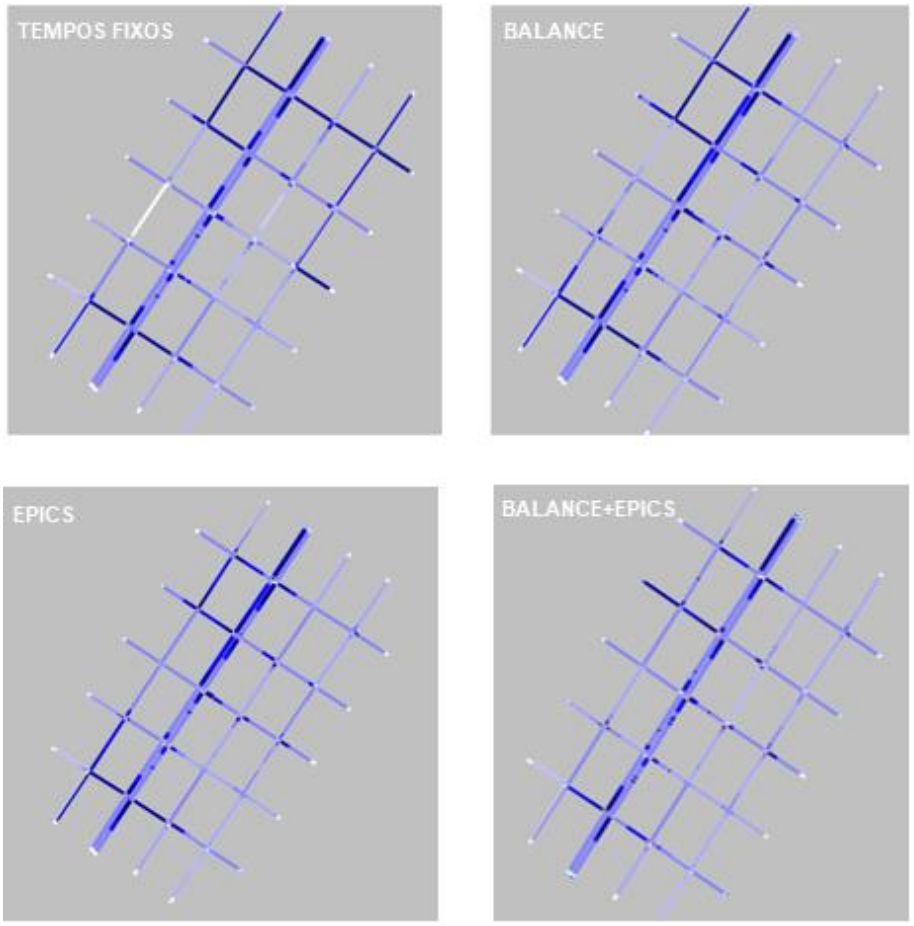
O indicador da **Densidade** confirma os resultados analisados até agora. A otimização semafórica proporciona uma melhor distribuição dos veículos na rede, melhorando o desempenho desta (Gráfico 6-5 e Figura 6-31). Também neste caso o cenário que obteve o melhor êxito foi o do BALANCE acoplado ao EPICS que conseguiu uma redução de 42,48% do valor do indicador.

Gráfico 6-5: Comparação da densidade média



Fonte: Elaboração própria

Figura 6-31: Variação da densidade média



Fonte: Elaboração própria

7 CONCLUSÕES

A pesquisa conseguiu demostrar que a aplicação de sistemas de controle adaptativo em tempo real, baseado nas tecnologias BALANCE e EPICS, proporcionou uma considerável melhora no desempenho geral da rede viária da região de análise em todas os cenários testados.

Apesar da limitação que uma área de estudo pequena representa para um processo de otimização concebido para uma macro área, a estratégia de otimização global do BALANCE forneceu resultados melhores do que a abordagem local operada pelo EPICS, mas foi com a utilização conjunta das duas tecnologias que se conseguiu o desempenho mais satisfatório, como apontam os valores dos indicadores avaliados, cuja melhora oscila entre o 41,79% do comprimento total das filas e os 72,22% da velocidade média em relação ao atual cenário de tempos fixos.

Os automóveis são a categoria mais beneficiada desta melhora, enquanto os benefícios para os ônibus, quando houver, resultam serem mais contidos. A aplicação de estratégias de priorização desta categoria de veículos na área estudada, não reverteu esta situação, mas levou a uma piora geral da rede cujos efeitos negativos afetam principalmente os próprios ônibus. Esta situação, aparentemente paradoxal, pode ser explicada pelos percursos que estes fazem dentro da região considerada, que compreendem também a utilização das vias secundárias, cujo desempenho é afetado pela priorização aplicada no eixo central da Avenida Pompeia. Além disso o ônibus, por sua natureza vinculado a uma rota fixa (e, na Avenida Pompeia, também à utilização da faixa mais à direita), não está em condição de aproveitar plenamente da melhora geral da rede em objeto.

A experiência mostrou que o êxito na utilização destes sistemas está estritamente ligado à capacidade de lidar com o grande número de parâmetros de configuração que cada tecnologia demanda (exemplo: número de detectores por link e distâncias destes da linha de retenção). Nas simulações efetuadas utilizaram-se apenas alguns destes parâmetros tais como fluxos a serem priorizados e relativos pesos, mas é razoável esperar que um conhecimento mais completo dos sistemas leve a resultados melhores em relação ao desempenho dos ônibus.

As simulações mostraram também que os resultados na utilização do BALANCE melhoram sensivelmente quando este for aplicado prioritariamente a interseções que dispõem de

detectores nos próprios links enquanto a incorporação na estratégia de otimização de semáforos que não possuem detectores não se mostrou, em geral, muito eficiente.

Apesar dos resultados atingidos serem consideráveis, devido às características específicas da região analisada (dimensões e fluxo de veículos limitados), talvez não seja possível atingir resultados tão expressivos em regiões mais críticas como os eixos viários representados pelos corredores metropolitanos.

7.1 POSSÍVEIS EVOLUÇÕES DA PESQUISA

Apesar dos sistema de otimização semafórica em tempo real terem acompanhado os avanços da tecnologia e terem evoluído consideravelmente ao longo das últimas décadas, o sistema de detecção sobre o qual estão baseados continua sendo prevalentemente composto por sensores fixos, como câmeras e laços indutivos, tecnologias que têm altos custos de instalação e manutenção e que pode limitar a área de atuação destes sistemas, ou até inviabilizar completamente a sua implementação.

No contexto atual de rápida evolução das tecnologias para a captação e o processamento de dados de um lado, e das comunicações móveis do outro (Big Data, IoT), que proporcionam, como nunca antes, a capacidade de gerar e trocar informações em tempo real, se torna então possível repensar os sistemas de otimização semafórica adaptativos a partir destes novos paradigmas tecnológicos, isto é, sendo possível e desejada uma nova evolução destas tecnologias em direção a se beneficiarem da grande quantidade de dados produzidos pelos os vários atores da rede de transporte, que já estão sendo explorados com grande êxito econômico por entidades privadas, que oferecem serviços de mobilidade ao cidadão, através de aplicativos para smartphones.

A partir da utilização dos dados que são produzidos constantemente pelos dispositivos celulares, se configura então a possibilidade de novas arquiteturas tecnológicas para o tráfego adaptativo, de custo relativamente baixo e que sejam imunes ou muito mais resistentes aos problemas que levaram à inatividade do sistema implantado na Cidade de São Paulo, viabilizando desta maneira a implementação de sistemas desse tipo onde hoje não seria possível.

Estas novas arquiteturas, além de atenderem as necessidades econômicas das administrações, estariam perfeitamente em linha com o incipiente cenário tecnológico das comunicações entre veículos (*Vehicle to Vehicle* – V2V) e entre veículos e a infraestrutura viária (*Vehicle to Infrastructure* – V2I) que, com muita probabilidade, se tornarão uma realidade consolidada dentro da próxima década.

BIBLIOGRAFIA

AHMED, F.; HAWAS, Y. E. An integrated real-time traffic signal system for transit signal priority, incident detection and congestion management. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, V. 60, p. 52–76, 2015.

ALEMÁN, A. M. **Simulation of Transit Signal Priority Strategies for BRT Operations**. Massachusetts Institute of Technology, 2013.

AMBROSINO, G.; FINN, B.; GINI, S.; MUSSONE, L. A method to assess and plan applications of ITS technology in Public Transport services with reference to some possible case studies. **Case Studies on Transport Policy**, v. 1, n. 4, p. 421–430, 2015.

ANTP/IPEA. Redução das deseconomias urbanas com a melhoria nos transportes públicos. **Revista dos Transportes Públicos,** ANTP, ano 21, p. 35-92, Brasília, 1999.

AQUINO, E. A. **Validação do modelo mesoscópico de tráfego do SCOOT para o desenvolvimento de redes viárias urbanas microssimuladas**. 2013. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ARAÚJO, D. R. C. **Comparação das simulações de tráfego dos modelos SATURN e DRACULA**. 2003. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ARIOTTI, P.; ARAÚJO, D. R. C.; MOSCARELLI, F. C.; CYBIS, H. B. B. Associação de Modelos Macroscópicos e Microscópicos de Tráfego para Estudo de Circulação. XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, **Anais**, ANPET, Florianópolis, 2004.

AYALA, R. J. L. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores a serem considerados no processo de calibração**. 2013. 223 p. Dissertação (Mestrado em Transportes) Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2013.

BITTENCOURT, D. **Resultados de pesquisa "Antes e Depois" – Corredor Pompéia.** Nota Técnica nº 205, CET, São Paulo, 1998.

BRAUN, R.; KEMPER, C.; WEICHENMEIER, F.; MENIG, C.; WEGMANN, J. Comparing different adaptive traffic signal control optimization methods – field test results. 15TH WORLD CONGRESS ON ITS, 2008, New York City. **Proceedings...**New York City, 2008.

CHAN, K. Y.; DILLON, T. S.; SINGH, J.; CHANG, E. Neural-network-based models for short-term traffic flow forecasting using a hybrid exponential smoothing using a hybrid exponential smoothing and levenberg-marquardt algorithm**. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 2, p. 644–654, 2012.

CINTRA, M. Os custos dos congestionamentos na Cidade de São Paulo. **Textos para discussão da Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas**, Fundação Getúlio Vargas, Escola de Economia, v. 356, São Paulo, 2014.

CLARK, S. Traffic prediction using multivariate nonparametric regression. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 2, p. 161–168, 2003.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. **Pesquisa Origem-Destino 2017**. Metrô, vers. 4, São Paulo, 2019.

CYBIS, H.; LINDAU, L.; ARAUJO, D. R. C. Implantação de um modelo de simulação e alocação do tráfego em Porto Alegre**. Revista dos Transportes Públicos**, ANTP, ano 24, p. 41-54, Brasília, 2002.

CUCCI NETO, J. **Semáforo: ser ou não ser inteligente? Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real**. CET, Nota Técnica nº 243, São Paulo, 2016.

DARAIO, C.; DIANA, M.; DI COSTA, F.; LEPORELLI, C.; MATTEUCCI, G.; NASTASI, A. Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research. **European Journal of Operational Research**, v. 248, n. 1, p. 1-20, 2016.

DARIDO, G.; PENA, I. **Planejamento em Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) – Perspectivas das Experiências Internacionais**. ANTP, Caderno Técnico 8 - Sistemas Inteligentes de Transportes, Brasília, 2012.

DEY, K. C.; RAYAMAJHI, A.; CHOWDHURY, M.; BHAVSARD, P.; MARTIN, M. *Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network – Performance evaluation*. **Transportation Research Part C**, v. 68, p. 168–184, Elsevier, 2016.

DIMITRIOU, L.; TSEKERIS, T.; STATHOPOULOS, A. Adaptive hybrid fuzzy rule-based system approach for modeling and predicting urban traffic flow. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 16, n. 5, p. 554–573, Elsevier, 2008.

DINOPOULOU, V.; DIAKAKI, C.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIOU, M. Public Transport Priority Strategies: Progress and Prospects. 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND 24TH NATIONAL CONFERENCE ON OPERATIONAL RESEARCH, 2013, Athens. **Proceedings...**Athens, 2013.

DION, F.; HELLINGA, B. A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 36, n.4, p. 325–343, Elsevier, 2002.

DJAHEL, S.; DOOLAN, R.; MUNTEAN, G. M.; MURPHY, J. A Communication-Oriented Perspective on Traffic Management System for Smart Cities. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 1, p. 125 – 151, IEEE, 2015.

EMPLASA. **Região Metropolitana de São Paulo - sobre a RMSP,** disponível em https://emplasa.sp.gov.br/RMSP. Acessado em: 20 jun. 2109.

ERTICO. **Communication Technologies for future C-ITS service scenarios**. Task Force on Communication technologies for C-ITS, Bruxelles, 2015.

FURTH, P. G.; MULLER, T. H. J. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption. **Transportation Research Record**, n. 1731, p. 23-30, Transportation Research Board, Washington, 2000.

GARTNER, N. H.; STAMATIADIS, C.; TARNOFF, P. j. Development of advanced traffic signal control strategies for intelligent transportation systems: multilevel design. **Transportation Research Record**, n. 1494, p. 98–105, Transportation Research Board, Washington, 1995.

GERSHENSON, C.; ROSENBLUETH, D. A. Self-organizing traffic lights at multiple-street intersections**. Complexity**, v. 17, n. 4, p. 23–39, Wiley, 2012.

GUO, J.; WILLIAMS, B. M. Real-time short-term traffic speed level forecasting and uncertainty quantification using layered Kalman filters. **Transportation Research Record**, n. 2175, p. 28–37, Transportation Research Board, Washington, 2010.

HAWAS, Y. E. An integrated simulation-based fuzzy logic model for real-time traffic signal control. **Transportmetrica** , v. 7, n. 4 , p. 247-278, Taylor&Francis, 2011.

HOUNSELL, N. B.; MCLEOD, F. N.; SHRESTHA, B. P. Bus priority at traffic signals investigating the options. 12TH IEE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, London. **Proceedings...** London, 2004.

HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D.; WINTON, R. I. SCOOT—A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. **Report TRRL 1014**. Transport and Road Research Laboratory, London, 1981.

IBOPE. **11º Pesquisa de mobilidade urbana**. São Paulo, 2017.

KOELHER, L. A. **Controle Integrado de prioridade e retenção para operação de sistema de transporte público.** 2009. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Caterina, Florianópolis, 2009.

KUBEK, D.; WIĘCEK, P.; CHWASTEK, K. The impact of short-term traffic forecasting on the effectiveness of vehicles routes planning in urban areas. XII CONFERENCE ON TRANSPORT ENGINEERING, 2016, Valencia. **Proceedings...**Valencia, 2016.

LACERDA, V. M.; CASTRO NETO, M. M. Considerações sobre a calibração do modelo de *car-following* do vissim para vias arteriais urbanas. XXVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, **Anais**, ANPET, Curitiba, 2014.

LEONTIADIS, I.; MARFIA, G.; MACK, D.; PAU, G.; MASCOLO, C. GERLA, M. On the Effectiveness of an opportunistic Traffic Management System for Vehicular Networks. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, IEEE, 2011.

LIU, H. X.; WU, X.; MA, W.; HU, H. Real-time queue length estimation for congested signalized intersections. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies,** v. 17 p. 412–427, Elsevier, 2009.

LOMAX, T.; SCHRANK, D.; EISELE, B. **TTI's 2012 Urban Mobility Report**. Texas A&M Transportation Institute, USA, 2012.

LOWRIE, P. R. SCATS principles, methodologies, algorithm. IEEE CONFERENCE ON ROAD TRAFFIC SIGNAL**,** 1982, London. **Proceedings...**London: IEEE Publications, 1982.

MAIA, F. V. B. **Calibração e validação de modelos de meso e microssimulação do tráfego para a avaliação de intervenções tático-operacionais na malha viária urbana**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MALANDRAKI, G.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIOU, M.; DINOPOULOU, V. Simulation and Evaluation of a Public Transport Priority Methodology. 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF TRANSPORT SIMULATION (ISTS'14), **Selected Proceedings**, Corsica, 2014.

MAURO, V. **L'impatto degli ITS per la riduzione di CO2.** TTS Italia – Associazione Nazionale della Telematica per i Trasporti e la Sicurezza, Roma, 2010.

MAURO, V.; DI TARANTO, C. **Utopia**. Pergamon Press, New York, 1990.

MAY, A. D**. Traffic Flow Fundamentals.** Prentice Hall, New Jersey, 1990.

MCKENNEY, D.; WHITE, T. Distributed and adaptive traffic signal control within a realistic traffic simulation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 1, p. 574–583, Elsevier, 2013.

MEDEIROS, F. C.; LUNA, M. S.; LOUREIRO, C. F. G. Controle do Tráfego em Área de Fortaleza: Uma Nova Experiência na Gerência do Trânsito. 13º CONGRESSO BRASILEIRO DE TRANSPORTE E TRÂNSITO, **Anais**, ANTP, Porto Alegre, 2001.

MERTZ, J. **Ein mikroskopisches Verfahren zur adaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs**. Veröffentlichung des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, 2001.

MING, S. H. **Uma breve descrição do Sistema SCOOT**. Nota Técnica nº 201, CET, São Paulo, 1997.

MING, S. H. **Recursos do SCOOT para Congestionamento**. Nota Técnica nº 203, CET, São Paulo, 1998.

MING, S. H.; POWLER, J. R. **Avaliação Antes / Depois – Semáforos Inteligentes (SEMin) - Eixos Alvarenga / Camargo.** Nota Técnica nº 202, CET, São Paulo, 1998.

MIRCHANDANI, P.; KNYAZYAN, A.; HEAD, L.; WU, W. An Approach Towards the Integration of Bus Priority and Traffic Adaptive Signal Control. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - 80TH ANNUAL MEETING, 2001, Washington. **Proceedings...**Washington, 2001.

MORFOULAKI, M.; MYROVALI, G.; KOTOULA, K. Increasing the attractiveness of public transport by investing in soft ICT based measures: Going from words to actions under an austerity backdrop - Thessaloniki's case, Greece. **Research in Transportation Economics**, v. 51, p 40-48, Elsevier, 2015.

MUTHUSWAMY, S.; MCSHANE, W. R.; DANIEL, J. R. Evaluation of transit signal priority and optimal signal timing plans on transit and traffic operations. **Transportation Research Record,** n. 2034, p. 92–102, Transportation Research Board, Washington, 2007.

NGAN, V.; SAYED, T.; ABDELFATAH, A. Evaluation of Transit Signal Priority Strategy using Vissim. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - 80TH ANNUAL MEETING, 2004, Washington. **Proceedings...**Washington, 2004.

NTU. **Prioridade para o Transporte Coletivo Urbano**. Relatório Técnico, Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos - Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (SEDU/PR), Brasília, 2002.

OLIVEIRA NETO F M. ***Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego*.** 2004. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport.** John Wiley & Sons, UK, 2011.

PERON, L. **Contribuição Metodológica para aplicação de prioridade semafórica condicional em corredores de ônibus**. 2015. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PTV Group. **Balance User Manual**. PTV AG, Karlsruhe, 2016.

PTV Group. **Epics User Manual**. PTV AG, Karlsruhe, 2016.

REDMAN, L., FRIMAN, M.; GÄRLING, T.; HARTIG, T. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. **Transport Policy**, v. 25, p. 119-127, Elsevier, 2013.

ROBERTSON, D. I. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination, **ITE Journal**, London, 1986

ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D. Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time-The SCOOT Method. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 40, IEEE, 1991.

SCHOLLIERS, J.; JUTILA, M.; VALTA, M.; KAUVO, K.; VIRTANEN, A.; PYYKÖNEN, P. Co-operative traffic solutions for hybrid communication environments. 6TH TRANSPORT RESEARCH ARENA, 2016, Warsaw. **Proceedings...**Warsaw, 2016.

SILVA, P. C. M.; TYLER, N. Sobre a validação de modelos microscópicos de simulação de tráfego. **Transportes**, ANPET, Brasília, 2002.

SMITH, B. L.; WILLIAMS, B. M.; OSWALD, R. K. Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, n. 4. p. 303–321, Elsevier, 2002.

SMITH, H. R.; HEMILY, P. B.; IVANOVIC, M. **Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook**. ITS America, Department of Transports (DOT), Washington, 2005.

STEVANOVIC, A. **Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice**. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Synthesis 403, Transportation Research Board, Washington, 2010.

STUDER, L.; KETABDARI, M.; MARCHIONNI, G. Analysis of Adaptive Traffic Control System Design of a Decision Support System for Better Choices. **Journal of Civil & Environmental Engineering**, OMICS International, 2015

TAVARES, J. P. M. P. **Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afectação de Tráfego em Redes Urbanas**. 2003, 261 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2003.

TAVARES J P, PEREIRA J. **Modelos De Simulação E De Previsão De Tráfego.** Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

TIENTRAKOOL, P.; YA-CHI, H.; MAXEMCHUK, N. F. Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC Fall),2011, San Francisco. **Proceedings...**San Francisco, 2011.

TURKSMA, S.; BLOOM, G.; JEFTIC, Z. Bringing research to deployment: Europe's first sustainable implementation of Cooperative Systems**.** 18TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, 2011, Orlando. **Proceedings...**Orlando, 2011.

UNITED NATIONS. **World urbanization prospects: The 2014 revision Highlights (ST/ESA/SER.A/352)**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015.

URBAN ITS EXPERT GROUP. **Guidelines for ITS deployment in urban areas**. ITS Action Plan – Traffic Management Guidelines, 2013.

VAN KATWIJK, R.; VAN KONINGSBRUGGEN, P. Coordination of traffic management instruments using agent technology. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, p. 455–471, Elsevier, 2002.

VASCONCELLOS, E. **Mobilidade Urbana e Cidadania**. Editora Senac, Rio de Janeiro, 2012.

VASCONCELLOS, E. **Políticas de Transporte no Brasil - A Construção da Mobilidade Excludente**. Editora Manole, São Paulo, 2014.

VLAHOGIANNI, E. I.; GOLIAS, J. C.; KARLAFTIS, M. G. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, p. 3-19, Elsevier, 2014.

VLAHOGIANNI, E. I.; KARLAFTIS, M. G. Testing and comparing neural network and statistical approaches for predicting transportation time series. **Transportation Research Record**, v. 2399, Transportation Research Board, Washington, 2013.

VITALE, A.; FESTA, D. C.; GUIDO, G.; ROGANO, D. A Decision Support System based on Smartphone Probes as a Tool to Promote Public Transport, Transportation: Can we do more with less resources? 16TH MEETING OF THE EURO WORKING GROUP ON TRANSPORTATION, 2013, Porto. **Proceedings...**Porto, 2013.

WHAN, Y.; YANG, X.; LIANG, H.; LIU, Y. A Review of the Self-Adaptive Traffic Signal Control System Based on Future Traffic Environment. **Journal of Advanced Transportation,** v. 2018, 2018.

XIE, Y.; YUANCHANG, ZHANG, Y.; YE, Z. Short-term traffic volume forecasting using Kalman filter with discrete wavelet decomposition. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 22, n. 5, p. 326–334, 2007.

YANG, I.; JAYAKRISHNAN, R. Real-time network-wide traffic signal optimization considering long-term green ratios based on expected route flows. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 60, p. 241–257, Elsevier2015.

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; HAGHANI, A. A hybrid short-term traffic flow forecasting method based on spectral analysis and statistical volatility model. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, p. 554–573, 2014.

ZHOU, G.; GAN, A.; SHEN, L. D. Optimization of adaptive transit signal priority using parallel genetic algorithm. **Tsinghua Science Technologies.** v. 12, n. 2, p. 131–140, 2007.

ANEXO A - Configuração de BALANCE e EPICS

Configuração do BALANCE

Como foi mostrado no Capítulo 3, devido ao BALANCE ser um otimizador de macro redes, a complexidade do funcionamento deste resulta ser maior se comparada ao do EPICS. Esta complexidade se reflete também no processo de configuração do BALANCE para microssimulações no VISSIM sendo que neste caso é necessário que a fase de construção da rede e alocação da demanda sejam executadas no VISUM para sucessivamente ser exportadas para o VISSIM (Figura A-1).

Figura A-1: Processo de configuração do BALANCE

Fonte: Elaboração própria

No VISUM:

1. Desenho básico da rede
   - Aquisição base cartográfica rede (OpenStreetMap, GeoSampa, TomTom, etc.)
   - Modelagem da rede (capacidade e velocidades dos links, restrições, etc.)
   - Definição matrizes de demanda

2. Caracterização da rede semafórica
   - Criação dos controladores *Epics\Balance Local*
   - Definição geometria detalhadas dos links
   - Inclusão dos detectores

3. Alocação da demanda
    - Criação das rotas através de uma alocação (ICA e DUE aconselhados)
    - Gravação das rotas criadas a serem exportadas

4. Exportação da rede
    - Exportação dos detalhes da rede
    - Exportação das rotas criadas

No VISSIM:

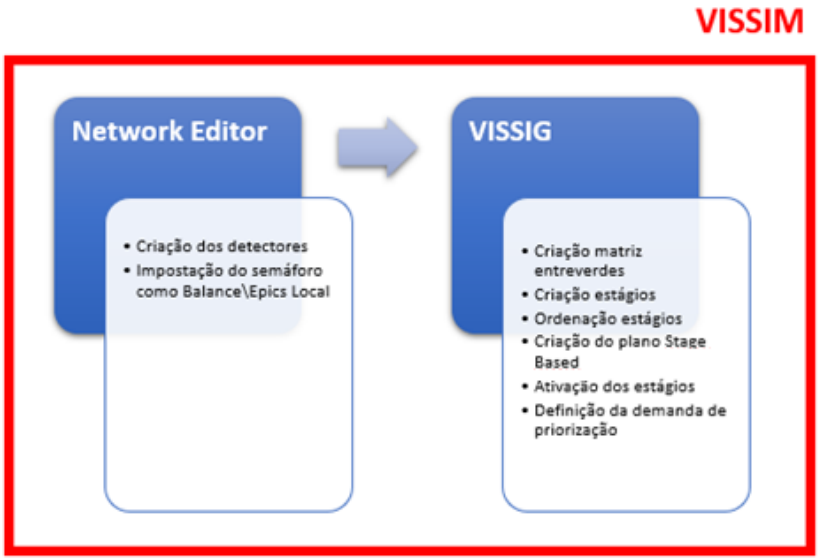
5. Importação da rede
    - Importação dos detalhes da rede
    - Importação das rotas criadas
    - Ajustes de parâmetros importados
    - Criação do controlador Balance Central

6. Calibração e Validação
    - Calibração parâmetros comportamentais (*Driving Behavior*)
    - Calibração parâmetros do BALANCE e do EPICS
    - Validação

Configuração do EPICS

Além da necessária condição de ter a licença do EPICS ativa na versão de VISSIM utilizada, para a simulação do micromodelo da área de estudo com o VISSIM estar apta a utilizar a otimização semafórica do EPICS, é necessário executar um processo de configuração do VISSIM. Este processo é constituído de uma série de etapas é feito inteiramente dentro do próprio VISSIM, conforme explicado a seguir (Figura A-2).

Figura A-2: Fases de configuração do EPICS



Fonte: Elaboração própria

O primeiro ponto importante a ser considerado depois da construção da rede, diz respeito ao sensoriamento do modelo, sendo que o EPICS precisa ter informações sobre os veículos que estão se aproximando à interseção controlada para calcular as variações dos estágios de verde para maximizar o próprio índice de desempenho. À rede no VISSIM devem então ser acrescentados todos os detectores necessários para o correto sensoriamento da área de interesse, conforme o tipo de otimização desejada (com ou sem prioridade para veículos especiais). Em detalhe:

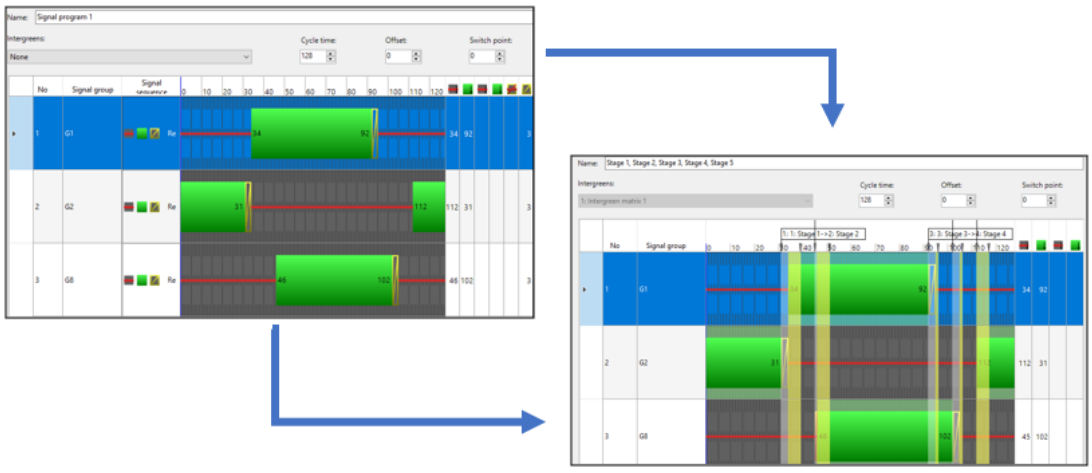
No Network Editor:

1. Desenho básico da rede
    - Aquisição base cartográfica rede (OpenStreetMap, GeoSampa, TomTom, etc.)
    - Modelagem da rede (capacidade e velocidades dos links, restrições, etc.)
    - Definição matrizes de demanda

2. Inclusão dos detectores
    - Inclusão dos detectores nos links selecionados, em número que depende da tipologia de priorização desejada.

Sucessivamente teremos que operar no VISSIG (o módulo do VISSIM que se ocupa da configuração dos controladores, tendo em consideração que para o utilizo do EPICS é necessário que os semáforos passem a funcionar em modalidade *Staged Based* (Figura A-3).

Figura A-3: Resultado da configuração de um controlador em modalidade *Stage-Based*. Em amarelo são evidenciados os períodos de interestágios



Fonte: Elaboração própria

No VISSIG:

1. Criação de uma matriz de entreverdes que define os intervalos entre duas fases de verde que devem ser mantidos fixos.
2. Criação dos estágios e da sua sucessão a partir dos grupos semafóricos atuais "fatiando" verticalmente" o plano semafórico em sucessão de estágios. Nesta fase deve ser especificado o tempo de ciclo do controlador, o tempo mínimo e máximo de verde desejado e eventuais outros parâmetros.
3. Ativação dos estágios na sequência desejada
4. Definição da demanda para a priorização
    a. Demanda de transporte privado
    b. Demanda de transporte público

ANEXO B - Elementos de programação semafórica

O presente anexo esclarece alguns dos principais conceitos de programação semafórica utilizados no trabalho de pesquisa. O texto é extraído do **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V – Sinalização Semafórica** elaborado pela Câmara Temática de Engenharia de Tráfego, da Sinalização e da Via do DENATRAN na gestão 2007/2009 e 2009/2011.

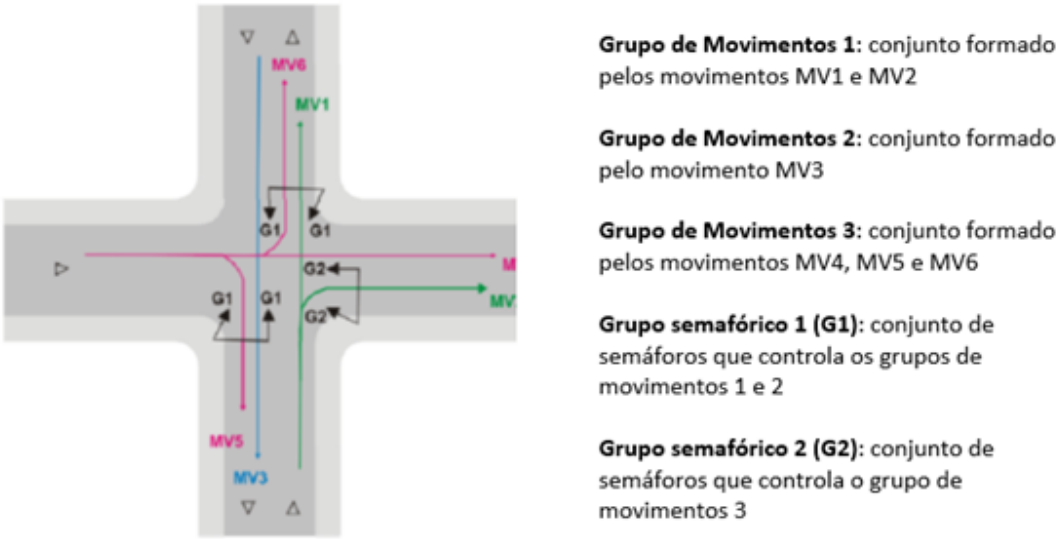
Grupo de movimentos

É o conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem (Figura B-1).

Grupo semafórico

É o conjunto de semáforos (grupos focais) com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos que recebem simultaneamente o direito de passagem (Figura B-1).

Figura B-1: Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupos semafóricos



Fonte: DENATRAN, 2011

Estágio

Denomina-se estágio o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

Entreverdes

É o intervalo de tempo compreendido entre o final do verde de um estágio e o início do verde do estágio subsequente. Para semáforos veiculares, o entreverdes é composto de um tempo de amarelo, acrescido de um tempo de vermelho geral sempre que necessário. Para semáforos de pedestres, o entreverdes corresponde ao tempo de vermelho intermitente seguido de um tempo de vermelho geral.

Vermelho geral

É o intervalo de tempo entre o final do amarelo (ou do vermelho intermitente) de um estágio e o início do verde do próximo estágio.

Ciclo

Denomina-se ciclo a sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica. A duração do ciclo (tempo de ciclo) em uma interseção, ou seção de via, é definida pela soma dos tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

Intervalo luminoso

Trata-se do período de tempo em que permanece inalterada a configuração luminosa dos semáforos (grupos focais) que controlam o tráfego em um determinado local.

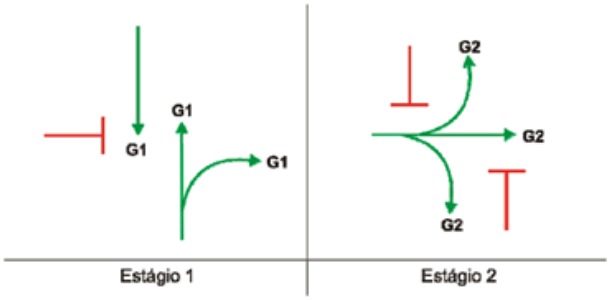
Plano semafórico

Denomina-se plano semafórico ao conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica para uma interseção ou seção de via, num determinado período do dia. O diagrama de estágios e o de intervalos luminosos são partes integrantes do plano semafórico.

Diagrama de estágios

O diagrama de estágios é a representação gráfica da alocação dos movimentos que podem ser realizados (motorizados e não motorizados) em cada estágio do ciclo. O movimento de pedestres e/ou ciclistas só deve ser representado no diagrama de estágios quando for sinalizado por grupos focais específicos. A Figura B-2 mostra um exemplo de diagrama de estágios para o controle dos movimentos apresentados na Figura B-1.

Figura B-2: Exemplo de diagrama de estágios



Fonte: DENATRAN, 2011

Diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras

Consiste na representação da duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio de barras horizontais, associando-os aos grupos semafóricos correspondentes. A Figura B-3 apresenta um exemplo de diagrama de barras para o diagrama de estágios mostrado na Figura B-2.

Figura B-3: Exemplo de diagrama de intervalos

Fonte: DENATRAN, 2011