

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS
EM SISTEMAS CENTRALIZADOS DE CONTROLE DE
TRÁFEGO**

Francisco Moraes de Oliveira Neto

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

**Fortaleza
2004**

FIICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA NETO, FRANCISCO MORAES DE

Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego. Fortaleza, 2004.

XIII, 162 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.

1. Transportes - Dissertação 2. Priorização Semafórica para Ônibus
3. Controle Centralizado do Tráfego Urbano – Sistemas CTA 4. Sistema SCOOT
CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisco Moraes de Oliveira Neto

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego.

Mestre / 2004

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Francisco Moraes de Oliveira Neto

Av. José Leon, 1256

60822-670 – Fortaleza/CE – Brasil

PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS EM SISTEMAS
CENTRALIZADOS DE CONTROLE DE TRÁFEGO

Francisco Moraes de Oliveira Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Ph.D.
(Orientador)

Prof^a. Maria Elisabeth Pinheiro Moreira, D.Sc.
(Examinador Interno)

Prof. Mário Ângelo Nunes de Azevedo Filho, M.Sc.
(Examinador Interno)

Prof. Paulo César Marques da Silva, Ph.D.
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL

OUTUBRO DE 2004

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho, em especial gostaria de expressar meus agradecimentos:

Ao Prof. Felipe Loureiro pela orientação, amizade e aprendizado desde que iniciei a atuar na área de transportes.

Agradeço aos amigos de trabalho do CTAFOR. Aos gerentes Carlos Henrique, Marcus Vinícius e Miguel Ary por possibilitarem o uso da infra-estrutura existente para a realização desta pesquisa. Aos técnicos de tráfego André Schramm, Hamifrancly Meneses, Marcos Timbó, Paulo Marinho, Rodrigo de Menezes, Waldemiro de Aquino e Wesley Vasconcelos pelo companheirismo e amizade. À secretária Vera Lúcia pela atenção que tem com todos os técnicos do CTAFOR. Aos estagiários Arcelino Araújo, Fabiana Marques, Juliana Carla, Makey Nondas, Manuela Feitosa, Marcelo Silva e Tiago Sales pelo auxílio na realização das pesquisas em campo.

Aos esforços imprescindíveis para a realização da coleta de dados em campo de Dante Rosado, Edinardo do Nascimento, Elievam Bessa, Felipe Viana, Gildemir Ferreira, Henrique Nogueira e Igor de França.

Aos amigos Fábio Frota e Manoel Mendonça pelo incentivo e amizade.

Por fim, quero agradecer à minha família por acreditar em mim e permitir que eu possa dar alguma contribuição para a sociedade. Em especial, dedico este trabalho à minha sobrinha Bianca Ulisses Guerra, que nasceu no dia 22 de setembro deste ano, acrescentando motivação e alegria na reta final deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	2
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2	7
REVISÃO BILIOGRÁFICA	7
2.1 CONTROLE SEMAFÓRICO	7
2.1.1 Controle Isolado	8
2.1.2 Controle Coordenado	9
2.1.3 Controle Centralizado.....	11
2.2 PRIORIDADE SEMAFÓRICA	13
2.2.1 Prioridade Passiva	14
2.2.2 Prioridade Ativa	16
2.3 O PROGRAMA TRANSYT	17
2.3.1 Cálculo do Atraso e do Número de Paradas no TRANSYT	21
2.3.2 Processo de Otimização no TRANSYT.....	24
2.3.3 Modelo de Prioridade Passiva para Ônibus do TRANSYT	25
2.4 O SISTEMA SCOOT	27
2.4.1 Prioridade Passiva em Tempo Real no SCOOT	31
2.4.2 Modelo de Prioridade Ativa para Ônibus do SCOOT.....	32
2.5 ESTUDOS SOBRE PRIORIDADE SEMAFÓRICA	43
2.5.1 Estratégias de Prioridade Semafórica.....	43
2.5.2 Benefícios da Prioridade Semafórica	46
2.5.3 Critérios de Avaliação	47
2.5.4 Métodos de Avaliação	48
2.5.5 Principais Conclusões e Resultados dos Estudos	50
2.5.6 Estudo de ZHANG (2001)	54
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	57
CAPÍTULO 3	60
CARACTERIZAÇÃO DO CORREDOR ARTERIAL EM ESTUDO	60

3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	60
3.2	VARIÁVEIS DE CARACTERIZAÇÃO	64
3.3	COLETA DE DADOS EM CAMPO	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E OPERACIONAL	67
3.4.1	Aspectos Geométricos	67
3.4.2	Controle Semafórico.....	68
3.4.3	Condições do Tráfego	69
3.4.4	Operação do Transporte Público	75
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	81
CAPÍTULO 4		84
METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO		84
4.1	INTRODUÇÃO	84
4.2	CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO	86
4.2.1	Cenários de Controle em Tempo Fixo	90
4.2.2	Cenários de Controle em Tempo Real.....	94
4.3	MEDIDAS DE DESEMPENHO	95
4.3.1	Cálculo do Atraso Veicular e do Número de Paradas em Rede	96
4.3.2	Levantamento dos Indicadores de Desempenho.....	97
4.4	ANÁLISE DE INFERÊNCIA ESTATÍSTICA	99
4.4.1	Variáveis de Controle	99
4.4.2	Comparação entre Cenários	103
CAPÍTULO 5		108
ANÁLISES DOS RESULTADOS PARA O CORREDOR ARTERIAL EM ESTUDO		108
5.1	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE	108
5.1.1	Variação Espacial do Fluxo de Tráfego	108
5.1.2	Variação Temporal do Fluxo de Tráfego.....	112
5.1.3	Análise da Variável Tempo Parado nos Pontos de Ônibus	115
5.2	ETAPA I – CONTROLE SEMAFÓRICO E PRIORIZAÇÃO PASSIVA EM TEMPO FIXO	115
5.2.1	Teste de Aderência das Medidas de Desempenho	121
5.2.2	Testes de Comparação entre os Cenários.....	122
5.3	ETAPA II – PRIORIDADE PASSIVA E ATIVA NO CONTROLE EM TEMPO REAL	125
5.3.1	Comparação entre Cenários	129
5.3.2	Análise do Modelo de Prioridade Ativa do SCOOT.....	131

CAPÍTULO 6.....	146
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	146
6.1 CONCLUSÕES.....	146
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	151
REFERÊNCIAS	153
ANEXOS	158
ANEXO I - RESULTADOS DAS PESQUISAS DE TEMPO DE PERCURSO DE AUTOMÓVEIS E DE ÔNIBUS EM CADA CENÁRIO DE AVALIAÇÃO..	159
ANEXO II - ESTATÍSTICAS DAS VARÁVEIS ESTIMADAS PELO SISTEMA SCOOT	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Arquitetura de um sistema centralizado em tempo real (adaptado do TRL, 2000a).....	13
Figura 2.2:	Exemplo de uma estratégia de divisão de estágios (ZHANG, 2001)	15
Figura 2.3:	Exemplo de rede no TRANSYT (VINCENT <i>et al.</i> , 1980).....	19
Figura 2.4:	Modelagem do comportamento do tráfego no TRANSYT (VINCENT <i>et al.</i> , 1980).....	22
Figura 2.5:	Ilustração da defasagem no TRANSYT (VINCENT <i>et al.</i> , 1980)	24
Figura 2.6:	Movimento de ônibus em relação ao movimento de um pelotão de tráfego (VINCENT <i>et al.</i> , 1980)	27
Figura 2.7:	Princípios da Modelagem no SCOOT (TRL, 2000a)	30
Figura 2.8:	Localização do detector de ônibus numa aproximação semafórica (adaptado do TRL, 2000d)	36
Figura 2.9:	Exemplo de uma extensão	37
Figura 2.10:	Exemplo de uma antecipação	38
Figura 2.11:	Exemplos de compensação do tipo DN	39
Figura 2.12:	Exemplos de compensação do tipo MS	40
Figura 2.13:	Exemplos de compensação do tipo DS.....	41
Figura 2.14:	Exemplos de compensação do tipo LS	42
Figura 3.1:	Localização das câmeras, painéis e semáforos sob controle centralizado do sistema CTAFOR.....	61
Figura 3.2:	Funcionamento do sub-sistema SCOOT de controle semafórico do CTAFOR.....	62
Figura 3.3:	Localização do corredor na malha viária de Fortaleza.....	63
Figura 3.4:	Espaçamentos entre interseções semafóricas da Av. 13 de Maio.....	68
Figura 3.5:	Variação diária do volume horário por sentido de tráfego numa seção entre a Av. dos Expedicionários e a Rua Marechal Deodoro.....	70
Figura 3.6:	Níveis de saturação no Controle SCOOT	71
Figura 3.7:	Fluxos médios de tráfego ao longo do corredor	73
Figura 3.8:	Fluxos médios de tráfego nas vias transversais do corredor	74
Figura 3.9:	Principais linhas que servem o corredor de estudo.....	76
Figura 3.10:	Localização dos pontos de parada de ônibus	77
Figura 3.11:	Variação das velocidades médias de percurso	81
Figura 4.1:	Fluxograma de avaliação das estratégias de controle	88

Figura 4.2:	Diagrama espaço x tempo do tempo fixo não coordenado (Cenário 1).	90
Figura 4.3:	Diagrama espaço x tempo do tempo fixo bem ajustado (Cenário 2) no entrepico manhã.....	92
Figura 4.4:	Diagrama espaço x tempo do tempo fixo bem ajustado (Cenário 2) no pico da tarde.....	92
Figura 4.5:	Diagrama espaço x tempo do tempo fixo com prioridade passiva (Cenário 3) no entrepico manhã.....	93
Figura 4.6:	Diagrama espaço x tempo do tempo fixo com prioridade passiva (Cenário 3) no pico da tarde.....	93
Figura 4.7:	Exemplo de detecção manual numa aproximação semaforica.....	95
Figura 5.1:	Perfis espaciais de fluxo de tráfego para o sentido OL no corredor....	109
Figura 5.2:	Perfis espaciais de fluxo de tráfego para o sentido LO no corredor....	110
Figura 5.3:	Perfis espaciais de fluxo de tráfego para as vias transversais.....	111
Figura 5.4:	Perfis temporais de variação do fluxo de tráfego no corredor.....	113
Figura 5.5:	Perfis temporais de variação do fluxo de tráfego nas transversais.....	114
Figura 5.6:	Etapa I - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus e de Automóveis no Entrepico Manhã.....	117
Figura 5.7:	Etapa I - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus e de Automóveis no Pico da Tarde.....	118
Figura 5.8:	Etapa I - Valores Médios de Atraso Veicular.....	119
Figura 5.9:	Etapa I - Valores Médios de Proporção de Paradas.....	120
Figura 5.10:	Etapa II - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus.....	126
Figura 5.11:	Etapa II - Valores Médios de Atraso Veicular.....	127
Figura 5.12:	Etapa II - Valores Médios de Proporção de Paradas.....	128
Figura 5.13:	Situação A - Perda de coordenação devido a uma extensão seguida de antecipação.....	135
Figura 5.14:	Exemplo A.1 – Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a uma detecção no sentido OL durante o período de entrepico manhã.....	136
Figura 5.15:	Exemplo A.2 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a detecções no sentido LO durante o período de entrepico manhã....	137
Figura 5.16:	Exemplo A.3 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a uma detecção no sentido LO durante o período de pico da tarde ...	138
Figura 5.17:	Situação B - Perda de coordenação devido a uma antecipação seguida de extensão.....	140

Figura 5.18:	Exemplo B.1 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a detecções no sentido LO durante o período de pico da tarde.....	141
Figura 5.19:	Exemplo B.2 - Ilustração com imagens da perda de coordenação durante o período de pico da tarde	142
Figura 5.20:	Ilustração de uma extensão de estágio implementada pelo modelo – Av. da Universidade.....	143
Figura 5.21:	Ilustração de uma solicitação de prioridade não atendida pelo modelo devido a restrição de capacidade – Av. da Universidade.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1:	Resultados das pesquisas de tempo de percurso de automóvel	75
Tabela 3.2:	Principais linhas que servem o corredor em estudo.....	76
Tabela 3.3:	Taxas de ocupação de automóvel e de ônibus	78
Tabela 3.4:	Resultados das pesquisas de tempo de percurso de ônibus	79
Tabela 3.5:	Tempo parado nos pontos de ônibus	80
Tabela 4.1:	Linhas detectadas durante a simulação da prioridade ativa	95
Tabela 4.2:	Indicadores de desempenho do SCOOT por sentido de tráfego	97
Tabela 4.3:	Cenários de estudo e indicadores de desempenho	98
Tabela 4.4:	Exemplo de análise dos perfis espaciais de fluxo	101
Tabela 4.5:	Perfis médios de variação temporal do fluxo de tráfego	102
Tabela 4.6:	Comparação entre Cenários: <i>Hipóteses alternativas testadas</i>	106
Tabela 5.1:	Análise da variável tempo parado nos pontos de ônibus	115
Tabela 5.2:	Resultados dos testes de aderência a distribuição normal das medidas de desempenho.....	121
Tabela 5.3:	Etapa I - Resultados dos testes de comparação entre os cenários	123
Tabela 5.4:	Avaliação da prioridade passiva em tempo real.....	130
Tabela 5.5:	Avaliação da prioridade ativa em tempo real	130
Tabela 5.6:	Número de ativações da prioridade nos Cenários 6 e 7	132
Tabela 5.7:	Quantidade de detecções nas aproximações dos cruzamentos críticos do Trecho 2	133
Tabela I.1:	Trecho 1 – Tempo de Percurso de Automóvel e de Ônibus	159
Tabela I.2:	Trecho 2 – Tempo de Percurso de Automóvel e de Ônibus	160
Tabela II.1:	Trecho 1 – Variáveis Estimadas pelo Sistema SCOOT	161
Tabela II.2:	Trecho 2 – Variáveis Estimadas pelo Sistema SCOOT	162

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS EM SISTEMAS
CENTRALIZADOS DE CONTROLE DE TRÁFEGO

Francisco Moraes de Oliveira Neto

Outubro/2004

Orientador: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Nos últimos anos, as técnicas de prioridade para ônibus em semáforos controlados por sistemas centralizados de controle de tráfego vêm se tornando uma opção cada vez mais viável para reduzir os atrasos sofridos pelos ônibus em cruzamentos semaforizados, principalmente em condições de operação compartilhada com os outros veículos na malha viária. Contudo, antes de implantar qualquer estratégia de priorização de veículos em sistemas urbanos de transporte, deve-se avaliar o impacto sobre os diferentes usuários do sistema viário, que são inerentes a cada local específico. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho operacional da prioridade semafórica do tipo passiva e ativa no controle em tempo real do sistema SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimisation Technique*) e em tempo fixo do programa TRANSYT, para períodos de média e alta demanda, de um dos principais corredores arteriais de Fortaleza controlados pelo CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza). Na avaliação dos cenários, foram consideradas as seguintes medidas de desempenho: atraso veicular e número de paradas estimados pelo sistema SCOOT, assim como tempos de percurso de ônibus e de automóvel coletados em campo durante a operação de cada cenário. Os resultados não foram favoráveis à adoção das estratégias testadas de prioridade passiva e ativa no corredor de estudo, levando à conclusão que o controle em tempo real do SCOOT, programado para uma boa progressão semafórica do tráfego geral (ônibus e automóveis), é o mais indicado para um corredor arterial com características semelhantes ao analisado. As causas prováveis para os resultados negativos de desempenho das estratégias avaliadas de prioridade passiva se devem ao aumento da interação entre ônibus e automóveis, assim como à alta variabilidade dos tempos de embarque/desembarque nos pontos de parada de ônibus. Já o baixo desempenho das estratégias de prioridade ativa em tempo real deve estar relacionado à perda de progressão semafórica em virtude das interrupções do modelo de prioridade ativa do SCOOT.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

BUS SIGNAL PRIORITY IN URBAN TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

Francisco Moraes de Oliveira Neto

October/2004

Advisor: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

In the last years, bus priority techniques for signals controlled by urban traffic control (UTC) systems have become a viable alternative to reduce passengers delays at signalized intersections, especially in mixed traffic corridors. However, before deploying any bus signal priority strategy in such corridors, the impacts should be evaluated on the different users of the system. This work had as its main objective to assess the operational performance of passive and active bus priority techniques in fixed and real time signal systems at one of the main arterial corridors in Fortaleza. As a secondary objective, it also evaluated the operational benefits of SCOOT adaptive signal control system, comparing it to well adjusted fixed time plans optimized by TRANSYT, for periods of medium and high traffic volumes. In evaluating alternative scenarios, the following performance measures were considered: vehicle delay and number of stops simulated by SCOOT, as well as buses and autos travel times observed in the field during each scenario's operation. The results did not favor the adoption of passive and active priority schemes in the studied corridor, leading to the conclusion that SCOOT's real time control, programmed for a good signal progression of the general traffic (buses and autos), is the best signal control strategy for an arterial corridor with similar characteristics as the one under analysis. The reasons for negative impacts in the operational performance of the passive priority strategies were related to higher interaction between buses and cars, and also to the significant variability in dwell times at bus stops along the corridor. The low performance of the active priority strategies in real time signal operation was due to the loss in signal progression with traffic disruptions caused by SCOOT active priority model.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O ônibus continua sendo o principal modo de transporte público em muitas cidades do mundo. Embora do ponto de vista social, o transporte coletivo seja mais eficiente do que o transporte privado e ofereça maior potencial para a melhoria da qualidade de vida e para o desenvolvimento sustentado das cidades (BALASSIANO, 1996; NTU, 2002), sua procura vem caindo nos últimos anos. Pesquisas realizadas pela NTU em oito das maiores capitais brasileiras mostram que o transporte público por ônibus perdeu cerca de 25% dos passageiros pagantes entre 1994 e 2001. Dentre as principais causas para o declínio do transporte público por ônibus, conforme o documento da NTU (2002), estão as condições inadequadas de operação do transporte coletivo no sistema viário. Operando no tráfego misto em vias cada vez mais congestionadas por automóveis, motos e veículos de carga, o transporte coletivo é afetado por uma série de problemas que comprometem a sua eficiência e capacidade de competição, tais como: baixas velocidades operacionais e longos tempos de viagem, aumento dos custos operacionais devido aos congestionamentos, com conseqüente aumento das tarifas e maior irregularidade no atendimento.

A eficiência do sistema de transporte urbano pode ser melhorada se estratégias de gerenciamento priorizam o transporte coletivo em relação ao transporte individual. Assim, nos últimos anos, uma tendência das políticas de gerenciamento do tráfego urbano tem sido de tentar implementar meios ou estratégias de priorização para o transporte público (ZHANG, 2001; NTU, 2002), entre as quais vêm ganhando destaque as estratégias de priorização semafórica. Estas estratégias já foram testadas em várias cidades nos Estados Unidos e já vêm sendo usadas no Canadá, Japão e Europa. Em geral, as estratégias de priorização são classificadas em dois níveis (WOOD, 1993; FOX *et al.*, 1995; SUNKARI *et al.*, 1995; AL-SAHILI e TAYLOR, 1996; ZHANG, 2001): prioridade passiva e prioridade ativa. A prioridade passiva consiste em ajustar a programação semafórica manualmente ou através de programas computacionais como o TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980), dando maior peso a aproximações com maior volume de passageiros. Esta técnica é mais adequada para

corredores com volume considerável de ônibus, nos quais os tempos de embarque/desembarque não variam muito (SKABARDONIS, 2000). Já a prioridade ativa envolve a detecção da presença dos coletivos nas proximidades das interseções, e depende da lógica do sistema e das condições do tráfego. Especialmente no caso de cidades que implantaram sistemas centralizados de controle do tráfego (CTA), acredita-se que a utilização de tais estratégias pode resultar em menores atrasos dos ônibus nas interseções semaforizadas, proporcionando reduções significativas nos tempos de deslocamento da população usuária do transporte coletivo.

Em Fortaleza, estudo de caso desta pesquisa, na maior parte da malha viária não é dado nenhum tratamento preferencial para o transporte público por ônibus, que opera disputando espaço com os demais veículos que trafegam no sistema viário. Contudo, Fortaleza dispõe de um sistema moderno de controle de tráfego adaptativo (LOUREIRO *et al.*, 2002a), o sistema SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimisation Technique*) (TRL, 2000a), que opera numa central de controle denominada CTAFOR - Controle de Tráfego em Área de Fortaleza. Esta central controla, atualmente, em tempo fixo ou em tempo real, cerca de 190 dos mais de 400 semáforos da cidade, possibilitando a implementação de várias estratégias de priorização semafórica em corredores arteriais. Além disso, seu sistema operacional permite a avaliação de diferentes estratégias de controle semafórico a partir dos indicadores de desempenho (como atraso e número de paradas) simulados pelo modelo de tráfego SCOOT e armazenados num banco de dados chamado ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*) (TRL, 2000e), em intervalos de agregação de 15 min ao longo do dia.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

À primeira vista, parece injusto propiciar prioridade aos ônibus nos cruzamentos, visto que a quantidade desses veículos circulando no meio urbano é bem menor que a de automóveis e outros veículos. Mas se considerarmos, ao invés de veículos, a quantidade de passageiros sendo transportados, a situação se inverte e a prioridade passa a ser uma questão de equidade social nas grandes cidades brasileiras. No caso específico de Fortaleza, a participação do transporte coletivo por ônibus corresponde a 64% dos deslocamentos motorizados (PMF, 1999). A justificativa para este fato, segundo PEREIRA NETO (2001), não consiste na existência de um serviço público de qualidade e que desestime a utilização do

transporte individual. Na verdade, a maior parcela da população está insatisfeita com o nível de serviço ofertado, mas não migra para o modo de transporte particular em virtude de restrições econômicas decorrentes de seu baixo poder aquisitivo.

As medidas de prioridade para o transporte coletivo usualmente conhecidas consistem em intervenções no sistema viário, com implantação de faixas ou vias exclusivas, e intervenções no *layout* dos pontos de parada. Estas intervenções na infraestrutura viária melhoram a eficiência do transporte público, aumentando a velocidade dos ônibus – com impactos positivos sobre os tempos de viagem e conforto dos usuários, os custos operacionais, as tarifas e a regularidade/confiabilidade dos serviços. Contudo, elas acarretam em elevados custos com desapropriação devido à falta de espaço viário no meio urbano atual. Sabe-se também que os veículos do transporte coletivo perdem parte do tempo de viagem parados nos cruzamentos semaforizados (NTU, 2002) e, quando não há possibilidade de modificar a infraestrutura viária existente, a prioridade por meio dos semáforos torna-se uma opção a ser avaliada. Segundo SUNKARI *et al.* (1995), o atraso em interseções semaforizadas corresponde a cerca de 10 a 20% do tempo de viagem de um ônibus num corredor arterial e aproximadamente a 50% do atraso.

As estratégias de prioridade semafórica tradicionalmente favorecem os usuários do transporte coletivo sobre os usuários do transporte individual, e sua implementação é um assunto que causa polêmica (CHANG *et al.*, 1995). Enquanto o uso da prioridade semafórica tem sido amplamente aceito em interseções isoladas, existe uma resistência à sua implementação em corredores arteriais devido ao potencial de impactos negativos ao tráfego geral (ônibus+automóveis), como acréscimo no número de paradas e atrasos dos veículos (DALE *et al.*, 1999; SKABARDONIS, 2000; BALKE *et al.*, 2000; DION *et al.*, 2002; AGRAWAL *et al.*, 2002) devido, principalmente, à perda de coordenação dos semáforos e aos atrasos excessivos para os veículos das vias transversais ao corredor. Portanto, avaliações rigorosas da complexa interação entre os veículos do transporte coletivo e os veículos do transporte individual num corredor arterial, sob várias condições de tráfego, são necessárias antes que qualquer estratégia possa ser desenvolvida e aplicada.

Dadas as condições de operação do transporte público na malha viária de Fortaleza, tem-se a seguinte hipótese de estudo: “os ônibus circulam nos principais corredores arteriais em velocidades operacionais bem abaixo da velocidade média dos automóveis, o que acarreta em todos os problemas já citados anteriormente; e, como

os veículos do transporte coletivo perdem parte do tempo de viagem parados nos cruzamentos semaforizados, a prioridade semafórica torna-se uma alternativa a ser avaliada, uma vez que não há possibilidade de modificar a infra-estrutura viária existente”.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Considerando os recursos disponíveis no CTAFOR para implementar diferentes estratégias de priorização semafórica e prover medidas de desempenho simuladas em tempo real, este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho operacional de estratégias de prioridade semafórica para o transporte coletivo por ônibus dos tipos passiva e ativa no controle em tempo real e em tempo fixo de um dos principais corredores arteriais de Fortaleza.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, teve-se:

- a. Descrever as estratégias de prioridade semafórica nos dois níveis, passiva e ativa, e identificar na literatura estudos de avaliação destacando: as principais estratégias testadas, os seus impactos, os critérios de avaliação, as metodologias de avaliação e as principais conclusões dos estudos;
- b. Caracterizar operacionalmente o corredor arterial de estudo, quanto aos aspectos geométricos, condições do tráfego, controle semafórico e operação do transporte público por ônibus;
- c. Avaliar os ganhos operacionais para o tráfego geral no corredor, obtidos com o controle adaptativo do SCOOT, comparando-o com cenários de operação em tempo fixo com planos otimizados pelo TRANSYT;
- d. Mensurar os ganhos operacionais para os usuários do transporte coletivo por ônibus, no corredor arterial de estudo, do modelo de

- prioridade passiva para ônibus do TRANSYT e os impactos desta estratégia sobre o tráfego geral (ônibus+automóveis);
- e. Mensurar os ganhos operacionais para os usuários do transporte coletivo por ônibus, no corredor arterial de estudo, de uma estratégia de prioridade passiva para ônibus no controle em tempo real do SCOOT e os impactos desta estratégia sobre o tráfego geral;
 - f. Mensurar os ganhos operacionais para os usuários do transporte coletivo por ônibus, no corredor arterial de estudo, das estratégias de priorização semafórica de ônibus do tipo ativa no controle em tempo real do SCOOT e os impactos destas estratégias sobre o tráfego geral.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo o presente, de caráter introdutório. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos conceitos e estudos já realizados sobre o tema de pesquisa. Inicialmente, são abordados os métodos de controle semafórico existentes: controle isolado, coordenado e centralizado. Em seguida, é apresentada uma descrição conceitual das estratégias de prioridade semafórica do tipo passiva e ativa. Após esta abordagem inicial sobre os tipos de controle e das estratégias de priorização semafórica, são descritos os modelos de otimização do TRANSYT e do sistema SCOOT, com as respectivas técnicas de priorização passiva e ativa avaliadas nesta pesquisa. Ao final do capítulo, são apresentados alguns estudos e metodologias de avaliação das estratégias de prioridade semafórica destacando: as principais estratégias testadas, os seus impactos, os critérios de avaliação, as metodologias de avaliação e as principais conclusões dos estudos.

Considerando que o estudo se propõe a avaliar várias estratégias de controle num sistema centralizado, o Capítulo 3 apresenta o ambiente em que se insere este estudo de avaliação. Para tanto, é apresentado inicialmente o Sistema Centralizado de Controle de Tráfego por Área de Fortaleza (CTAFOR), mostrando a sua área de abrangência e os seus subsistemas componentes. Em seguida, é apresentada uma caracterização física e operacional do corredor selecionado para estudo de caso, destacando aspectos geométricos, de condição e controle do tráfego, assim como da operação do transporte público.

O Capítulo 4 descreve a metodologia de avaliação adotada nesta pesquisa. O capítulo inicia com uma contextualização da operação semafórica atual da malha viária de Fortaleza, definindo uma possível seqüência de evolução na operação semafórica de qualquer corredor arterial com planos desatualizados. A partir desta seqüência, apresentam-se os cenários de controle em tempo fixo e real, propostos e testados na operação do corredor arterial em estudo. Além disso, são apresentadas as medidas de desempenho usadas para avaliação: tempo de percurso de ônibus e de automóvel coletados em campo, atraso e número de paradas veiculares estimadas pelo sistema SCOOT. Por fim, são descritas as análises de inferência estatística necessárias para comparar o desempenho dos cenários de controle semafórico, incluindo as análises comparativas das variáveis de controle e os testes estatísticos de comparação entre os cenários.

O Capítulo 5 discute os resultados da aplicação da metodologia ao corredor arterial em estudo. Primeiro, é realizada uma análise comparativa de variáveis de controle – fluxo veicular e tempo parado em pontos de ônibus – com a premissa de que um mesmo comportamento do tráfego é observado se não existem evidências de que as variâncias e médias destas variáveis sejam diferentes. Depois são apresentados os resultados das análises de inferência estatística para comparação entre os cenários de controle: testes de aderência à distribuição normal das variáveis, testes de comparação entre variâncias e testes *t-student* de comparação entre médias.

Finalizando esta dissertação, o Capítulo 6 reúne todas as suas conclusões, conforme os objetivos específicos definidos inicialmente, assim como recomendações para estudos futuros, na medida em que existem outras abordagens de avaliação e de estratégias de priorização semafórica que podem ser avaliadas com o recurso da simulação computacional ou com o uso de sistemas de informação e localização automática de veículos para o transporte coletivo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BILIOGRÁFICA

Neste capítulo, antes de iniciar a discussão conceitual sobre as estratégias de prioridade semafórica dos tipos passiva e ativa, é apresentada uma descrição dos métodos de controle semafórico. O capítulo apresenta em seguida o *software* TRANSYT, com a descrição do seu modelo de otimização e a técnica de prioridade passiva avaliada nesta pesquisa. Em seguida são apresentados os princípios do modelo SCOOT, o método de prioridade passiva em tempo real e o modelo de prioridade ativa do sistema SCOOT avaliados nesta pesquisa. No final do capítulo são apresentados alguns estudos de avaliação sobre a prioridade semafórica para veículos de transporte coletivo.

2.1 CONTROLE SEMAFÓRICO

Os primeiros sistemas de controle do tráfego urbano tiveram como objetivo melhorar as condições de circulação e fluidez exclusivamente dos veículos privados (WOOD, 1993). Com o tempo, estes objetivos foram se expandindo, passando a incluir, entre outros, a priorização do transporte coletivo, a maximização da segurança dos pedestres e dos ciclistas, além da redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes, melhorando as condições do meio ambiente.

Existem diferentes formas de controle de tráfego para reduzir o número de conflitos e melhorar a segurança nas interseções, porém a mais utilizada é o controle semafórico (LEANDRO, 2001). É importante ter em mente, entretanto, que o controle semafórico não é a solução para todos os problemas de tráfego. A principal função do semáforo é restringir o fluxo contínuo do tráfego veicular, permitindo o direito preferencial de passagem nas interseções com movimentos conflitantes, tendo como vantagem, na maioria das vezes, o fato de requerer menores investimentos de capital. Os principais tipos de controle semafórico do tráfego são designados para operar em interseções isoladas, em corredores ou em áreas de uma rede viária.

Pode-se considerar basicamente, segundo o *Institute of Transportation Engineers* (ITE, 1982), a existência de três estratégias de operação de sistemas semafóricos: controle isolado, controle coordenado e controle centralizado.

2.1.1 Controle Isolado

A estratégia semafórica de controle isolado é o sistema mais simples existente. Neste caso, os semáforos atuam independentemente dos demais, ou seja, não ocorre nenhum tipo de coordenação ou sincronismo semafórico. O controle de tráfego nestas interseções, segundo RIBEIRO (1992), segue, em sua grande maioria, a teoria de WEBSTER (1958), por meio da minimização do atraso veicular. Em controle isolado, existem dois tipos de operação semafórica, a saber: a operação em tempo fixo e a atuada pelo tráfego.

Operação Isolada em Tempo Fixo

Na operação isolada em tempo fixo, os tempos semafóricos (ciclo e tempo de verde) não mudam durante um determinado período e são calculados para atender a volumes médios de tráfego nas aproximações, definindo um plano semafórico. Este tipo de operação é adequada para áreas urbanas onde o tráfego se comporta de maneira aproximadamente cíclica, com volumes de tráfego se repetindo na mesma hora do dia para diferentes dias da semana, sendo apropriada a aplicação de diferentes planos ou programações semafóricas conforme o período do dia.

Operação Isolada Atuada pelo Tráfego

Os sistemas atuados, ou sistemas que variam conforme a demanda veicular, são usados nos casos em que o tráfego não apresenta um comportamento cíclico, ocorrendo variações de volume veicular de um dia para o outro. Por meio da detecção de veículos, o sistema muda a programação do semáforo. O princípio básico do funcionamento em modo atuado é o da variação do tempo de verde associado a um determinado estágio de sinalização entre um valor mínimo e um valor máximo, ambos programáveis. Para a determinação da variação do tempo de verde é necessário que se tenha em campo, além do controlador atuado, unidades detectoras de veículos. O sistema de detecção consiste, em sua grande maioria, em um ou mais laços indutivos locados sob a faixa de rolamento que são capazes de detectar a passagem de um veículo (massa metálica) sobre a via. Estas informações veiculares são enviadas ao controlador atuado que processa as informações provenientes dos detectores e, de

acordo com o programa nele armazenado, realiza a tomada de decisão de prolongar ou encerrar o verde para uma determinada aproximação.

Na operação atuada, cabe inicialmente à lógica do controlador determinar quanto tempo de verde deve ser dado para uma aproximação ou movimento. Com controladores atuados, o intervalo de verde pode terminar em um dos casos abaixo:

- Alcançado o tempo máximo de verde – isto ocorre quando um tempo pré-determinado máximo de verde foi alcançado, dando início ao outro intervalo na seqüência;
- O tráfego na aproximação reduziu o bastante necessário – quando um intervalo da passagem entre dois veículos (gap) for maior que um intervalo pré-determinado, o controlador finaliza o tempo de verde de uma aproximação e libera o direito de passagem para as demais aproximações;
- Semáforo “preempted” – no caso de um veículo de prioridade se aproximar da interseção, o verde pertencente ao veículo que não tenha prioridade é finalizado a favor do veículo com prioridade.

Dependendo da necessidade e do volume existente na via que se deseja controlar, pode-se ter ainda a ação semi-atuada pelo tráfego. Este tipo de operação é recomendada para o caso de uma importante via a ser controlada apresentar os acessos laterais com volumes relativamente baixos. Neste tipo de sistema, são instalados detectores veiculares somente nos acessos laterais, a uma certa distância da faixa de retenção, de modo que, quando for detectado um certo número de veículos, o tempo de verde da via principal seja interrompido – diferentemente da totalmente atuada que necessita de detectores em todas as aproximações da interseção que se deseja controlar.

2.1.2 Controle Coordenado

Com o crescimento do número de veículos nas grandes cidades e o conseqüente adensamento de interseções semaforizadas, surgiu uma nova estratégia de controle semafórico, denominada de controle coordenado. Como o próprio nome diz, esta estratégia tem a finalidade de coordenar o tráfego, seja por progressão na via arterial ou coordenação em uma área. Para tal, basta determinar alguns parâmetros,

como ciclo, tempo de verde de cada aproximação e, principalmente, defasagem (diferença, em segundos ou % do comprimento do ciclo, entre os instantes de acionamento da indicação verde do semáforo de dois cruzamentos). Obviamente, para se ter uma boa coordenação entre os semáforos de uma via arterial é estritamente necessário que estes estejam operando com o mesmo tempo de ciclo semafórico ou em ciclos múltiplos. Uma coordenação em uma via arterial é comumente chamada de onda verde ou banda de passagem, isto é, uma porção do ciclo na qual um pelotão de veículos, movimentando-se a uma velocidade constante, pode cruzar um conjunto de interseções sem ser parado pelo vermelho.

Em muitas cidades, a malha viária é bem complexa, formada por uma densa rede viária sem uma hierarquização bem definida para suas vias. Neste caso, uma simples coordenação com progressão nas vias arteriais não resolveria o problema de tráfego, tornando-se necessário que se tenha uma coordenação por área, incluindo diversas interseções semaforizadas, ou seja, uma coordenação em uma rede fechada.

Na coordenação por área, assim como na progressão arterial, todos os semáforos devem estar operando com o mesmo ciclo semafórico para que seja possível obter uma constante coordenação entre os mesmos. Entretanto, é possível que alguns cruzamentos controlados operem em ciclo duplo, ou seja, alguns semáforos operarem com um valor de tempo de ciclo igual à metade dos demais. Esta operação é necessária, comumente, quando se tem em uma mesma área interseções que necessitam operar com tempos maiores de ciclo, por terem maiores volumes em suas aproximações, e outras interseções que possuem volumes bem menores, podendo, portanto, trabalhar com ciclos mais baixos.

Para obter uma boa coordenação semafórica em áreas ou em corredores é necessário que se tenha uma boa modelagem do tráfego, para que se possa simular eficientemente o seu comportamento. Uma das mais conhecidas e eficientes modelagens do tráfego por área, amplamente utilizada em todo o mundo, é o programa TRANSYT (ROBERTSON, 1969) – *Traffic Network Study Tool* – escrito e desenvolvido pelo *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL).

Com o sucesso da operação coordenada de interseções semaforizadas, e com o aumento do número destas interseções, o próximo passo na tentativa de obter um maior controle dos semáforos foi a centralização da operação semafórica.

2.1.3 Controle Centralizado

O termo Controle de Tráfego por Área (CTA) provém de uma estratégia de controle em que a região a ser controlada é subdividida em sub-regiões (áreas), com suas interseções operadas por controladores em campo que se comunicam com um computador denominado de computador de zona, responsável por gerenciar os controladores de uma determinada área. Estes computadores de zona, por sua vez, se comunicam com um computador central, o qual realiza o controle e direciona as ações para os controladores locais. A estratégia de controle centralizado dos semáforos pode operar da seguinte forma (WOOD, 1993): tempo fixo (tabela horária), seleção dinâmica ou tempo real (adaptativo).

Operação Centralizada em Tempo Fixo

Na operação centralizada em tempo fixo, ou *off-line*, o computador central armazena e implementa os planos semaforicos previamente calculados, com dados que refletem condições padrões esperadas do tráfego. Estas condições são obtidas em dias típicos, periodicamente, ou em ocasiões especiais, como eventos esportivos ou sociais. Nesta operação, o momento da entrada de cada plano de tráfego previamente calculado ocorre por intermédio de uma tabela horária, ou seja, num determinado instante do dia, um determinado plano entra em operação, automaticamente imposto pelo computador central.

Operação Centralizada por Seleção Dinâmica

Nesta centralização dos semáforos, a inserção dos planos fixos de tráfego não é regida por uma tabela horária, diferentemente da centralização em tempo fixo. Na seleção dinâmica, existe uma série de planos semaforicos armazenados no computador, correspondentes a diversos fluxos veiculares. Ou seja, caso em uma determinada área ou interseção, o volume em suas aproximações aumente ou diminua, automaticamente o computador selecionará o plano previamente estabelecido para aquele respectivo volume. Portanto, os planos devem ser previamente dimensionados e armazenados no computador.

Estes planos podem ser obtidos por meio de diversas metodologias, entre elas a do TRANSYT, e inseridos no computador que possui um programa que controla o envio dos planos semaforicos de acordo com o volume detectado na via. Portanto, é indispensável a existência de detectores veiculares nas vias. Neste caso, não é

necessário que se tenha detectores em todas as aproximações, e sim somente em alguns pontos estratégicos, determinados pelos responsáveis pela gerência do tráfego na localidade. Estes detectores estratégicos são responsáveis pela determinação volumétrica nas vias e esses dados são passados ao computador central para seleção e envio do plano para o controlador de campo.

Operação Centralizada em Tempo Real

Os sistemas de controle adaptativo, *ou on-line*, também conhecidos como sistemas de controle em tempo real, consistem na determinação dos parâmetros (ciclo, tempos de verde e defasagens), os quais variam conforme a variação da demanda veicular detectada por detectores em campo (CONRAD *et al.*, 1998). Assim, estes parâmetros são continuamente adaptados no controle em tempo real, por freqüentes ajustes para atender as condições reais do tráfego. O ciclo e os tempos de verde são ajustados para manter um aceitável grau de saturação nas aproximações das interseções, enquanto as defasagens são ajustadas para minimizar os atrasos e/ou paradas dos veículos. Para manter a coordenação ao longo do tempo, grupos de interseções adjacentes são predefinidos para operar num mesmo ciclo. As condições do tráfego são continuamente monitoradas com base na detecção veicular e na informação de mudança nos tempos dos semáforos pelos controladores. Os modelos de otimização são normalmente implementados junto com um computador central numa arquitetura de comunicação, na qual a troca de dados é realizada entre equipamentos nas interseções em campo e o computador central, podendo ou não haver intervenção de operadores de tráfego (ver Figura 2.1).

Fato importante é a correta distinção entre a operação centralizada em tempo real e as demais operações. Não são considerados sistemas de controle em tempo real os sistemas que se baseiam em “seleção dinâmica de planos” ou “seleção automática de planos”. Estes sistemas selecionam planos fixos e pré-determinados a partir das informações de detectores veiculares, não sendo, portanto, capazes de adequar, em tempo real, os parâmetros do plano semaforico às condições presentes do tráfego. Além disso, adotam o plano (já previamente definido) que melhor se ajusta às condições de tráfego detectadas, não eliminando, portanto, a necessidade da elaboração antecipada de planos de tempos fixos para possibilitar sua operação.

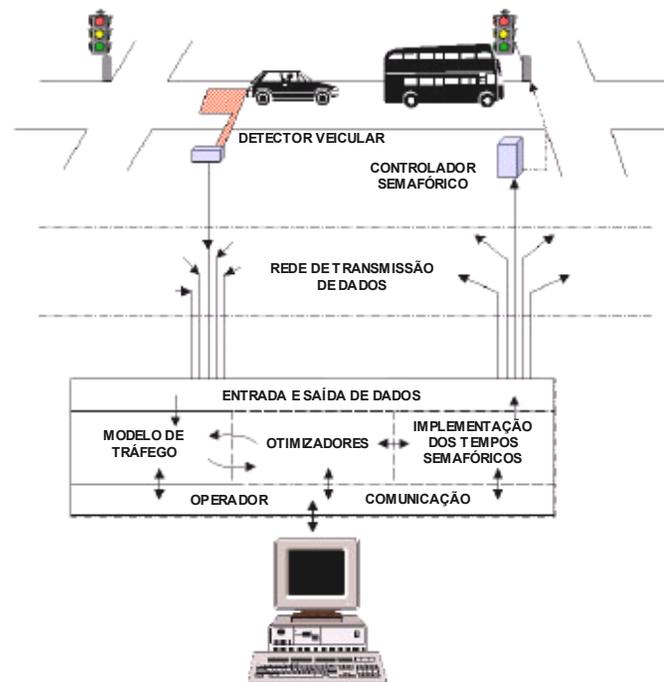


Figura 2.1: Arquitetura de um sistema centralizado em tempo real (adaptado do TRL, 2000a)

Também não são considerados sistemas de controle em tempo real os sistemas que se baseiam em “atuação veicular”, nos quais os tempos de verde são determinados simplesmente em função de extensões de verde geradas pela detecção de veículos. Estes sistemas tratam cada interseção de forma individual e isolada, não existindo uma análise global de toda a subárea controlada por parte dos computadores centrais.

2.2 PRIORIDADE SEMAFÓRICA

A prioridade para ônibus nos semáforos é uma técnica que consiste em antecipar e/ou ajustar a programação semafórica para favorecer os veículos de transporte coletivo. Este conceito de prioridade semafórica não é atual. A primeira experiência com priorização semafórica foi realizada em Washington, D.C., em 1962, na qual as defasagens dos semáforos numa rede arterial foram ajustadas para favorecer as baixas velocidades dos ônibus (AL-SAHILI e TAYLOR, 1996). No passado, entretanto, o principal objetivo do gerenciamento do tráfego urbano era minimizar o atraso dos veículos. Atualmente, este objetivo não é mais exclusivo. O

movimento de pessoas, pedestres e passageiros do transporte público deve ser considerado no meio urbano. Existem várias estratégias de prioridade que podem ser implementadas nos diversos tipos de controle semaforico. A seguir, apresenta-se uma descrição conceitual das estratégias de priorização passiva e ativa.

2.2.1 Prioridade Passiva

A prioridade passiva consiste em ajustar a programação semaforica manualmente ou através de programas computacionais como o TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980), dando maior peso a aproximações com maior volume de passageiros. Os semáforos em corredores arteriais podem operar coordenados para permitir a progressão dos movimentos de tráfego. Muitos sistemas operam com programação semaforica de tempo fixo, com base em dados históricos de fluxos veiculares. Neste tipo de operação, a prioridade para o transporte público pode ser dada por meio de configurações nos tempos semaforicos (ciclo, tempos de verde e defasagem) que favoreçam os veículos do transporte público. A defasagem entre os semáforos pode ser ajustada em função da velocidade dos ônibus e dos tempos de embarque/desembarque nos pontos de parada.

Num sistema adaptativo, os semáforos em corredores arteriais operam coordenados com programação semaforica em tempo real, com base em informações da demanda veicular de laços indutivos localizados nas aproximações semaforicas. Neste tipo de operação os tempos semaforicos (ciclo, defasagens e tempos verde) variam, portando, para atender a qualquer variação do tráfego. Nos períodos de dias típicos (dias úteis da semana) nos quais o ciclo de um corredor arterial apresenta pequena variação, é também possível ajustar as defasagens limitando a sua variação em função da velocidade dos ônibus e dos tempos gastos nos pontos de parada do corredor.

A prioridade passiva também pode ser implementada em semáforos isolados (distantes de outros semáforos da malha viária) ou em conjuntos de semáforos com mesmo ciclo semaforico formando uma área de coordenação. A seguir, são apresentadas as principais estratégias de prioridade passiva (SUNKARI *et al.*, 1995; ZHANG, 2001):

- Ajuste no tempo do ciclo: em interseções isoladas, a seqüência verde-amarelo-vermelho é reduzida para diminuir os atrasos dos veículos do

transporte público; resultando, porém, na redução da capacidade das interseções;

- **Divisão dos estágios:** consiste em dividir o estágio que dá direito de passagem aos ônibus nas interseções isoladas em dois ou mais estágios dentro do ciclo, reduzindo o atraso destes veículos sem necessariamente reduzir o ciclo. Contudo, a capacidade é também reduzida devido aos tempos adicionais de entreverde no final de cada estágio priorizado. Na Figura 2.2, é apresentado um exemplo desta estratégia, em que os ônibus usam o estágio A para atravessar o cruzamento, o qual é separado em dois estágios, com tempo total igual a sua duração original, para permitir a passagem dos veículos em dois momentos dentro do ciclo;

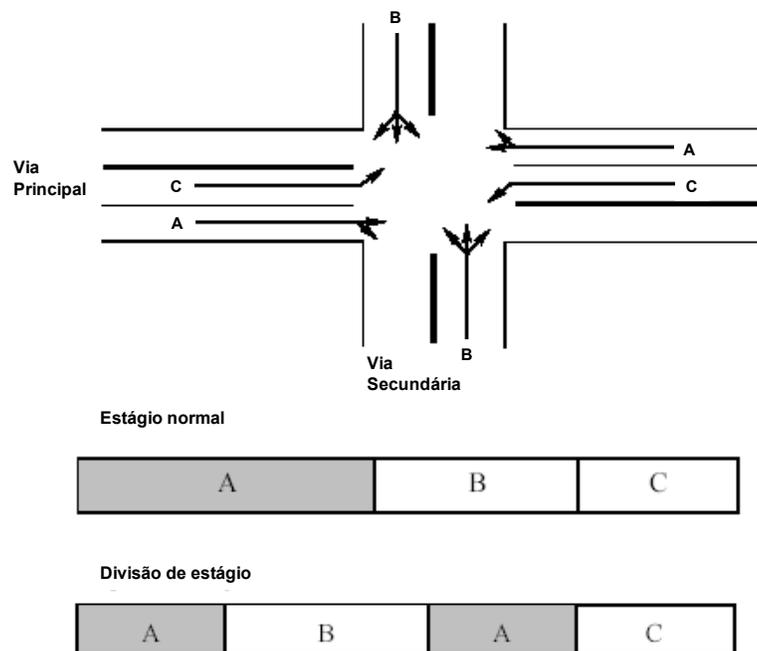


Figura 2.2: Exemplo de uma estratégia de divisão de estágios (ZHANG, 2001)

- **Programação por área:** em redes de semáforos não espaçados, pode-se priorizar aproximações com maior volume de ônibus, utilizando o número de passageiros, em vez do volume veicular, para definir os tempos de verde de cada fase. Uma segunda forma de ajustar os tempos semafóricos com prioridade para os veículos do transporte público é programar a coordenação dos semáforos no corredor

maximizando a banda de passagem dos ônibus (conhecida como onda verde).

2.2.2 Prioridade Ativa

A prioridade ativa envolve a detecção da presença dos coletivos nas proximidades das interseções, e depende da lógica do sistema e das condições do tráfego. O sistema deve ser capaz de detectar a presença de um coletivo e prever o instante da sua chegada na interseção. Para tanto, os ônibus devem ser equipados com dispositivos de identificação veicular como *transponders* (com ou sem código de identificação do veículo), antenas receptoras, GPS ou dispositivos similares. As principais estratégias de priorização ativa (SUNKARI *et al.*, 1995; ZHANG, 2001) são apresentadas a seguir:

- Extensão do verde: extensão do verde no final do estágio de passagem do veículo detectado;
- Antecipação do verde: um tempo de verde adicional é alocado no início do estágio de passagem do veículo detectado, antecipando o início do verde;
- Interrupção do vermelho: um curto período de verde é inserido durante o vermelho da aproximação do veículo detectado, enquanto os veículos da via conflitante são forçados a parar;
- Supressão de estágios: um ou mais estágios de movimentos de baixa demanda podem ser suprimidos em um determinado ciclo, para priorizar determinado movimento ou veículo;
- Interrupção do verde: se o ônibus é detectado distante da interseção, interromper o período de verde de passagem do veículo detectado aumenta a probabilidade deste veículo chegar na interseção no próximo período de verde.

As medidas de prioridade ativa também podem ser classificadas dentro de duas principais categorias: prioridade incondicional e condicional. Na primeira, a prioridade é dada sem nenhuma restrição de variáveis de controle, sendo também conhecida como prioridade absoluta. Na segunda, a prioridade é garantida se

condições predefinidas são satisfeitas, devendo-se estabelecer limites sobre variáveis controladas. Os critérios podem ser: o grau de saturação nas aproximações que não se beneficiam da prioridade; a pontualidade ou aderência à programação dos ônibus; a quantidade de passageiros dentro dos veículos; o tempo decorrido desde a última detecção; o tamanho da fila nas aproximações não priorizadas. A prioridade condicional é usada em redes de semáforos próximos entre si, onde as interseções operam dependentes uma das outras. Portanto, o benefício da rede como um todo deve ser avaliado antes de dar prioridade numa única interseção.

Os critérios da prioridade condicional evitam impactos negativos para a corrente do tráfego não priorizado. Outros procedimentos sugeridos na literatura (SKABARDONIS, 2000) incluem: a) inibir ou limitar a frequência de prioridade para os ônibus; e, b) alocar mais tempo de verde para os movimentos de tráfego não priorizados após a ativação da prioridade, o que é conhecido como compensação. A inibição da prioridade pode não ser necessária quando a prioridade é garantida apenas para os veículos que estão atrasados em relação a sua programação. A compensação não opera bem em sistemas coordenados quando o estágio a ser priorizado é o mesmo que dá direito de passagem aos veículos no corredor principal, acarretando em acréscimos de atrasos e fila para estes veículos.

Nesta dissertação, foram avaliadas três técnicas de prioridade semafórica: o modelo de prioridade passiva para ônibus do software TRANSYT, que é um modelo de priorização por área; um método de prioridade passiva em tempo real implementado no sistema SCOOT e o modelo de prioridade ativa do sistema SCOOT. Assim, no Tópico 2.3, a seguir, é descrito o programa TRANSYT e o seu modelo de prioridade passiva; e no Tópico 2.4 são descritos os princípios do sistema SCOOT e as duas técnicas avaliadas de prioridade passiva e ativa em tempo real.

2.3 O PROGRAMA TRANSYT

O TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980) é um *software* para cálculo de planos de tempo fixo em redes viárias de semáforos coordenados, nas quais os fluxos médios das correntes de tráfego são conhecidos. O método embutido no TRANSYT tem como base dois elementos: o modelo de tráfego e o otimizador semafórico. O modelo de tráfego representa o comportamento do tráfego nas vias, ou rede viária, onde muitas das interseções são controladas por semáforos. O modelo estima o valor do “Índice de

Performance” (*Performance Index - PI*) da rede para qualquer plano de tempo fixo, o qual é uma medida do custo global obtido como uma combinação linear dos atrasos e paradas experimentados pelo tráfego (Equação 2.1). O processo de otimização ajusta os tempos semafóricos e checa, a partir do modelo, se os ajustes resultam em redução no PI, adotando somente aqueles ajustes que reduzem seu valor, sendo os tempos semafóricos sucessivamente melhorados.

$$PI = \sum_{i=1}^N (W \cdot w_i \cdot d_i + K \cdot k_i \cdot s_i) \quad (2.1)$$

em que,

- N = número de *links*;
- W = custo global por atraso médio;
- w_i = peso do atraso sobre o *link* i ;
- d_i = atraso sobre o *link* i ;
- K = custo global por parada;
- k_i = peso da parada sobre o *link* i ;
- s_i = número de paradas sobre o *link* i .

No modelo do TRANSYT assume-se que:

- (I) Todas as interseções na rede são controladas por semáforos, ou por uma regra de prioridade;
- (II) Todos os semáforos da rede têm um ciclo comum ou metade deste valor. Detalhes da seqüência dos estágios e dos seus valores mínimos são conhecidos;
- (III) O fluxo de tráfego médio das correntes de tráfego num determinado período é conhecido, assumindo-o constante.

A rede de estudo é representada por “nós” inter-conectados por “*links*” (ver Figura 2.3). Cada interseção controlada é representada por um nó e cada corrente de tráfego numa aproximação é representada por um *link*. Um *link* pode representar uma ou mais faixas de tráfego, e o tráfego na aproximação de uma interseção semaforizada pode ser representado por um ou mais *links*.

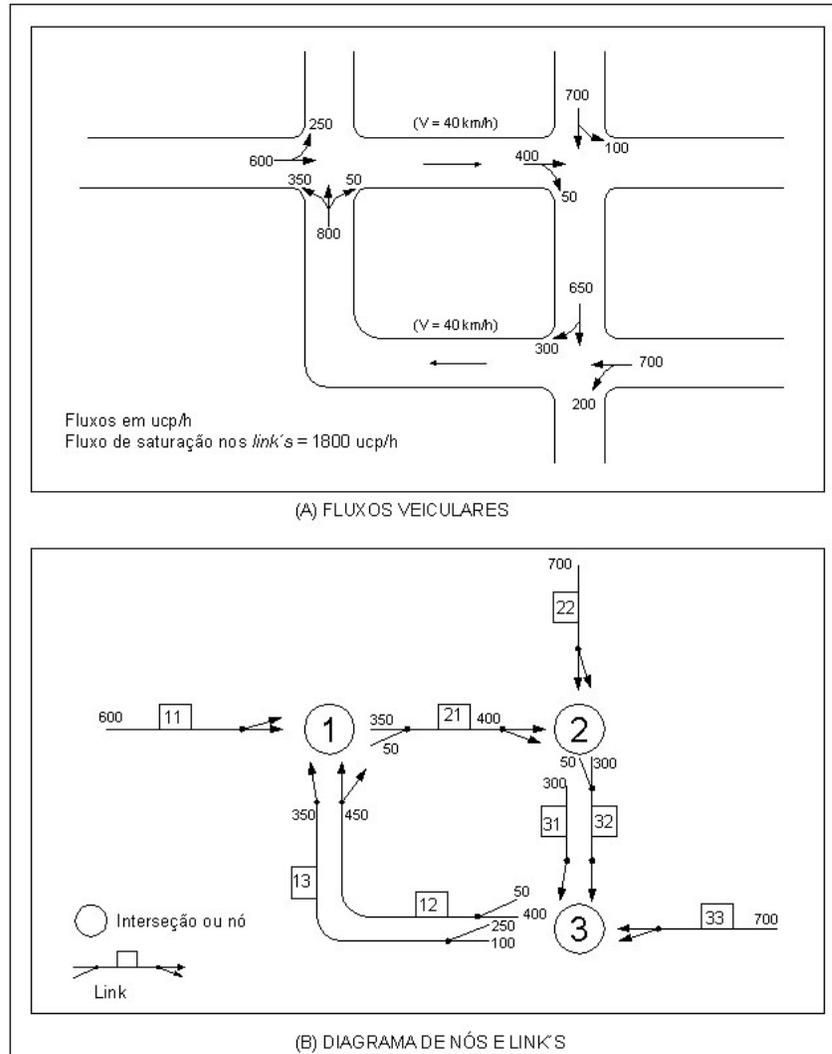


Figura 2.3: Exemplo de rede no TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980)

O ciclo comum dos semáforos dentro da rede é dividido em intervalos chamados passos (*Steps*): tipicamente um passo para cada três segundos. Todos os cálculos no TRANSYT são realizados nos valores médios de fluxo, movimentos de conversão e filas ocorrendo durante cada passo do ciclo. A estes perfis de fluxo dar-se o nome de “Perfis Cíclicos de Fluxo”, que são os perfis de chegada e saída de veículos das interseções semaforizadas. Todos os cálculos no TRANSYT são feitos em função da manipulação destes perfis de fluxo e nenhuma representação do comportamento individual de cada veículo é realizada, o que é também conhecido como meso-simulação de tráfego. Em muitos cálculos é assumido que estes perfis se repetem a cada ciclo. Na prática, contudo, o perfil de fluxo em cada ciclo varia devido ao comportamento aleatório de cada veículo.

Os cálculos do comportamento do tráfego em cada *link* são realizados em função da manipulação de três tipos de perfis de fluxo:

1. O perfil de chegada (*IN*) que é o padrão de tráfego que chegaria na linha de retenção da interseção a jusante, caso o mesmo não fosse interrompido pela indicação semafórica;
2. O perfil de saída (*OUT*) que é o padrão de tráfego que deixa o *link*;
3. O perfil de descarga (*GO*) que é o padrão de tráfego que deixaria a linha de retenção em condições de saturação no período de verde. Este perfil de fluxo corresponde uma descarga do *link* igual ao “Fluxo de Saturação”.

O tráfego dentro do *link* será obtido a partir de uma apropriada repartição dos perfis de saída (*OUT*) dos *links* de alimentação a montante. O perfil de tráfego alimentando o *link* será deslocado no tempo e modificado no percurso ao longo do *link* devido aos diferentes passos dos veículos e à dispersão dos pelotões. O efeito da dispersão de cada pelotão proveniente dos *links* a montante é representando pela aplicação de um fator de suavização de forma exponencial. O grau de suavização é função do “Tempo de Cruzeiro” no *link*, o qual é o tempo médio da corrente de tráfego para percorrer sem atraso o *link* de retenção a retenção. Os tempos de cruzeiro são especificados separadamente para cada origem de fluxo. A relação usada para obter o perfil de chegada do fluxo (*IN*) de uma interseção pela combinação dos seus fluxos de origem (*OUT*) é definido na Equação 2.2.

$$q^1_{(k+t)} = f \cdot q_k \cdot \rho + (1-f) \cdot q^1_{(k+t-1)} \quad (2.2)$$

em que,

- q^1_k = fluxo no passo k do perfil *IN*;
- q_k = fluxo no passo k do perfil *OUT*;
- ρ = proporção do fluxo *OUT* que alimenta o *link*;
- t = 0,8 vezes o tempo de cruzeiro médio (medido em passos) na distância para a qual a dispersão está sendo calculada;
- f = fator de suavização, sendo calculado pela Equação 2.3.

$$f = \frac{1}{(1 + 0,35t)} \quad (2.3)$$

O número de veículos (m_i) na linha de retenção é calculado pela relação:

$$m_i = m_{i-1} + q_i - s_i \text{ ou } 0 \text{ se } m_i < 0 \quad (2.4)$$

em que,

q_i = número de veículos chegando no passo i (dado pelo perfil IN);

s_i = número máximo de veículos deixando a interseção no passo i (dado pelo perfil GO).

O perfil de saída (OUT) em cada passo i será obtido pela relação:

$$m_{i-1} + q_i - m_i \quad (2.5)$$

O TRANSYT simplifica o comportamento do tráfego assumindo que os veículos no *link* não sofrem atraso até a chegada na linha de retenção, ou ao fim da fila, quando se a indicação semafórica está vermelha, ou a fila ainda não descarregou totalmente, o tráfego de chegada sofrerá uma parada instantânea. Também é assumido que a fila de tráfego descarrega na linha de retenção durante o período de verde efetivo atingindo instantaneamente a velocidade de cruzeiro. Deste modo, os instantes dentro do ciclo nos quais os veículos se unem e deixam a fila são, portanto, deslocados para definir o verde efetivo, ou período (verde + amarelo) que é realmente usado pelo tráfego (veja Figura 2.4).

2.3.1 Cálculo do Atraso e do Número de Paradas no TRANSYT

O atraso total do tráfego sobre um *link* é a soma dos atrasos individuais de cada veículo que percorre o *link* durante um determinado período de tempo. O atraso total é geralmente expresso em ucp-horas/hora. Por exemplo, num ciclo de 100 segundos, em que 40 ucp's (unidades de carros de passeio) passam com um atraso médio de 20 segundos cada, encontra-se um atraso total de 800 ucp-segundos por 100 segundos de ciclo, ou 8 ucp-segundos/segundo, ou ainda 8 ucp-horas/hora. Esta taxa de atraso pode ser interpretada como uma fila média durante o ciclo considerado. Isto é verdade somente para o modelo de tráfego do TRANSYT em que os veículos iniciam e param o movimento instantaneamente. Desta forma, o atraso total numa

rede de semáforos será a soma de todas as filas médias de todos os *links* que compõem a rede de semáforos.

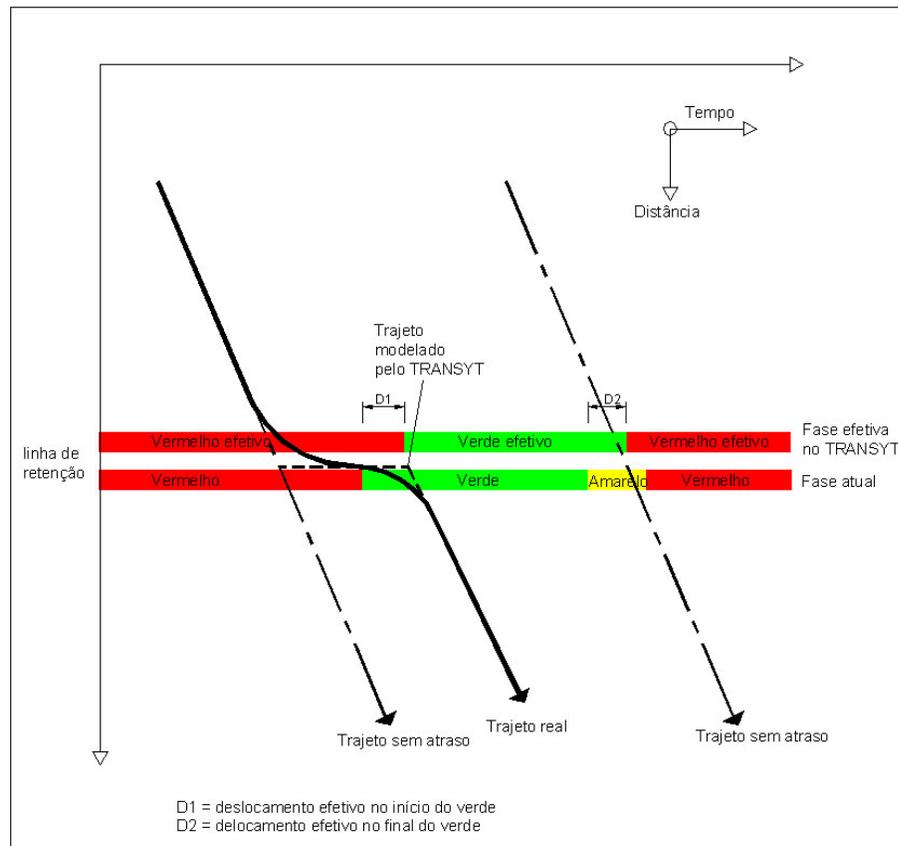


Figura 2.4: Modelagem do comportamento do tráfego no TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980)

O tamanho da fila em cada *link* é estimado com base nos perfis de fluxo *IN*, *GO* e *OUT* durante cada passo de um ciclo típico; a fila média no ciclo é determinada destes valores de fila. Para os *links* sobre os quais o fluxo de chegada não excede a capacidade (grau de saturação menor do que 100%), esta fila média corresponde à taxa na qual o atraso ocorre para um mesmo padrão de chegada do tráfego durante cada ciclo, que é chamada de “taxa de atraso uniforme”. No caso de supersaturação, o atraso uniforme durante um ciclo típico não considera o atraso adicional devido à sobre-saturação (acréscimos nas filas), que é chamado de “atraso supersaturado”. No TRANSYT, este atraso é calculado como um valor médio das filas supersaturadas (fila excedente) para o período especificado. As variações do tráfego de chegada, ciclo a

ciclo, acarretam num atraso conhecido como “atraso aleatório”. No TRANSYT, este atraso é calculado como uma taxa média na qual é observado e pode ser interpretado como a fila média no início do vermelho. O TRANSYT calcula a combinação dos atrasos supersaturados e aleatórios como:

$$A_{aleatório} + A_{supersaturado} = \left(\frac{T}{4}\right) \left\{ \left[(q-s)^2 + \frac{4q}{T} \right]^{\frac{1}{2}} + (q-s) \right\} \text{ [ucp.horas/hora]} \quad (2.6)$$

em que,

- $q =$ o fluxo de chegada médio no *link* [ucp/hora];
- $s =$ o fluxo máximo que pode ser descarregado do *link* [ucp/hora];
- $T =$ a duração da condição de fluxo para a qual os tempos semafóricos foram considerados [horas].

O TRANSYT calcula a taxa total de paradas em ucp's dos veículos num *link* como a soma das taxas de paradas uniformes, aleatórias e supersaturadas. Assim como o atraso, a taxa de parada uniforme é resultante dos perfis de fluxo e as taxas de paradas aleatórias e supersaturadas são calculadas em função da fila média no início do período de vermelho. Todo o tráfego que sofre atraso uniforme contribui para uma taxa de parada uniforme, mas os pequenos atrasos não contribuem para uma parada completa. Desta forma, no TRANSYT existe uma correção para curtos atrasos, que corresponde a uma fração de uma parada completa. Esta correção é proporcional à estimativa da perda de energia cinética no *link*, a qual é calculada em função da velocidade de cruzeiro.

Como discutido anteriormente, as taxas de atraso aleatório e supersaturado podem ser visualizadas como um número médio de ucp's no início do período de vermelho. Desta forma, todas as ucp's param quando o semáforo torna-se vermelho, sendo o número médio de paradas estimado pela razão entre a fila média de veículos no início do vermelho e o número médio de ucp's que descarregam do *link* durante cada verde.

2.3.2 Processo de Otimização no TRANSYT

A coordenação entre interseções controladas se dá relacionando os períodos de verde de uma interseção com outras interseções adjacentes da rede. No TRANSYT, isto é feito relacionando os “instantes de mudança de estágio” dos semáforos da rede a um zero arbitrário como mostra a Figura 2.5. Um instante de mudança de estágio de uma interseção é o instante no qual a indicação de verde do estágio termina e a mudança para a próxima indicação de verde é iniciada. A “defasagem” de uma interseção é definida aqui como o instante de mudança de estágio correspondente ao início do estágio 1. Deste modo, a defasagem pode ser pensada como o instante de início do ciclo para o nó a partir do início do estágio 1. Se subtrairmos a defasagem de dois nós adjacentes, a “diferença de defasagem” define o início do ciclo de um nó relativo ao outro nó, estabelecendo assim a coordenação de qualquer *link* conectando dois nós da rede.

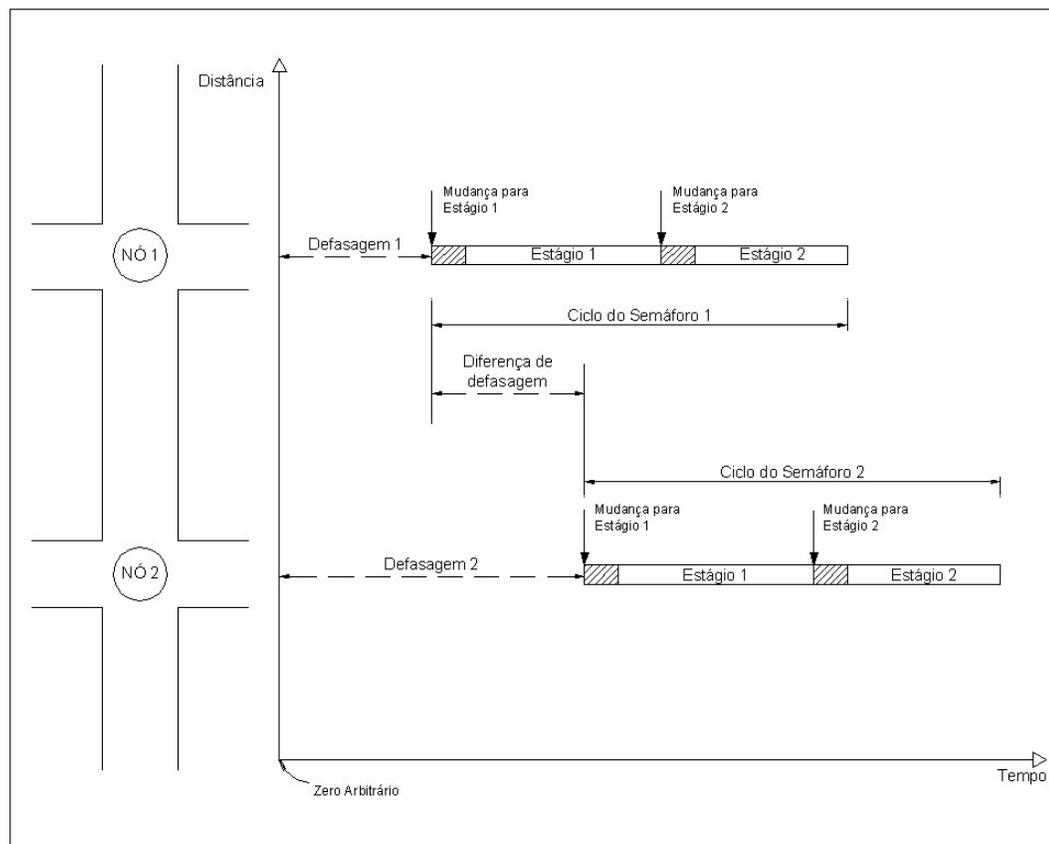


Figura 2.5: Ilustração da defasagem no TRANSYT (VINCENT *et al.*, 1980)

O TRANSYT obtém uma configuração ótima por um processo do tipo “*hill climbing*”. Inicialmente, o TRANSYT calcula o Índice de Performance (PI) da rede para uma configuração inicial de tempos semafóricos. Qualquer configuração que não viole os tempos mínimos de verde e seja capaz de suportar o tráfego é adequada. O programa, então, altera a defasagem de um semáforo da rede por um número de passos predefinido, recalculando o seu PI. Se o valor do PI é reduzido, a defasagem é alterada sucessivamente na mesma direção por um mesmo número de passos até o valor mínimo do PI ser alcançado. Se a alteração inicial da defasagem acrescenta o valor do PI, a defasagem do semáforo é alterada na direção oposta até que o valor mínimo seja obtido.

Uma característica importante do método “*hill climbing*”, como descrito, é que a configuração ótima encontrada não necessariamente é a melhor, podendo ser um mínimo local. Para aumentar a possibilidade de se obter uma boa otimização, o TRANSYT normalmente alterna entre pequenas e elevadas alterações dos tempos para otimização de cada semáforo.

Durante a otimização das defasagens, todos os instantes de mudança de estágio de um nó são deslocados simultaneamente, sem alterar os tempos de verde de cada estágio. No TRANSYT é possível otimizar os tempos de verde deslocando os instantes de mudança de estágio em cada nó individualmente com o objetivo de reduzir o índice de performance da rede. A alteração nos tempos de verde em cada nó é limitada aos tempos de verde mínimos. Para eliminar a necessidade de se especificar uma configuração inicial, os tempos de verde dos estágios em cada nó podem ser calculados pelo TRANSYT, com o critério de que o grau de saturação das aproximações críticas em cada nó seja o mesmo.

2.3.3 Modelo de Prioridade Passiva para Ônibus do TRANSYT

No TRANSYT, o comportamento dos diferentes tipos de veículos que circulam numa rede arterial é modelado separadamente por uma técnica chamada de “retenção compartilhada”. Ou seja, o *link* principal de cada aproximação é acompanhado de *links* adicionais para representar a chegada de outros tipos de veículos na aproximação. Esta técnica foi desenvolvida inicialmente para permitir o cálculo de planos de tempo fixo que minimizem o atraso dos usuários do transporte público, ficando o método conhecido como “BUS TRANSYT”. A técnica de retenção compartilhada foi posteriormente aprimorada para ser usada em outros propósitos como no cálculo de

planos de tempo fixo com uma onda verde especial para veículos de emergência. A técnica permite a representação de até cinco classes de veículos, que podem ser usadas para separar diferentes origens de fluxo (como saídas de estacionamento), diferentes tipos vias, assim como para separar ônibus que seguem rotas específicas e servem determinados pontos de parada. Cada classe numa mesma aproximação é representada por um *link*.

O efeito de representar os ônibus separadamente numa corrente de tráfego pode ser ilustrado por um exemplo. A Figura 2.6 apresenta o diagrama de tempo versus distância mostrando a progressão entre dois semáforos que operam com um mesmo ciclo semaforico. O movimento do pelotão de tráfego é representado por uma banda de passagem e o ônibus cruzando o semáforo 1 no centro do pelotão. A velocidade de cruzeiro do ônibus é menor do que a média do pelotão e existe um ponto de parada entre as duas interseções. Como resultado, o ônibus chega na interseção 2 após o pelotão principal. Se o comportamento do ônibus não é representado, o período de verde no semáforo 2 será otimizado para permitir uma progressão para o pelotão de tráfego e o ônibus sofrerá atraso durante o período de vermelho. Na Figura 2.6, o período de verde é retardado para eliminar o atraso do ônibus, provocando um acréscimo de atraso no pelotão de tráfego.

Devido à complexa interação entre os ônibus e os outros tipos de veículos na corrente de tráfego, os ônibus são modelados no TRANSYT usando a técnica de retenção compartilhada combinada com um método de “dispersão para ônibus”. Esta dispersão considera a variação do tempo de jornada do ônibus no *link*, que depende dos tempos gastos nos pontos de parada. O coeficiente de dispersão ou fator de suavização para ônibus na Equação 2.2 passa a ser:

$$f = \frac{1}{(1 + 0,7b + 0,3t)} \quad (2.7)$$

em que,

$t =$ 0,8 vezes o tempo de cruzeiro médio (medido em passos);

$b =$ tempo médio parado num ponto de ônibus (em passos).

Como os atrasos e paradas são calculados separadamente para os ônibus e para os outros veículos, usando a técnica de “retenção compartilhada”, o atraso por

passageiro pode ser estimado ponderando os resultados de cada classe pelo número médio de passageiros. A rotina de otimização tentará, então, encontrar a configuração semafórica que minimize o atraso total por passageiro. Para tanto, devem ser atribuídos pesos de atraso e parada nos *links* compartilhados na Equação 2.1.

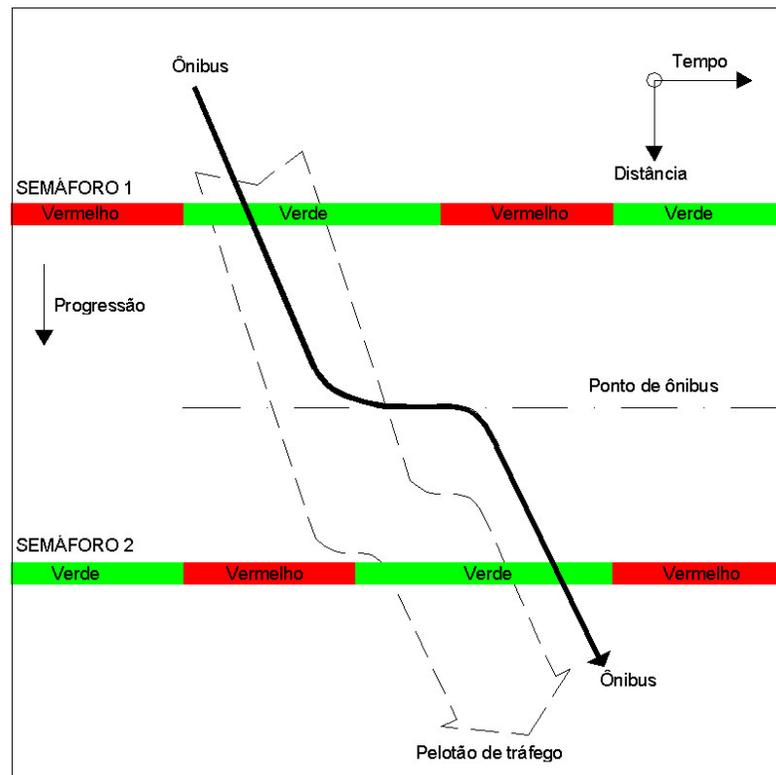


Figura 2.6: Movimento de ônibus em relação ao movimento de um pelotão de tráfego (VINCENT *et al.*, 1980)

2.4 O SISTEMA SCOOT

O sistema SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimisation Technique*) incorpora uma técnica de otimização em tempo real de repartições de verde, ciclo e defasagens. A estrutura do SCOOT é similar à do TRANSYT – programa para cálculo de planos de tempo fixo. Ambos os métodos usam “modelos de tráfego” similares para prever atrasos e paradas causadas por uma particular configuração dos semáforos (TRL, 2000a).

O SCOOT é uma ferramenta de gerenciamento e controle do tráfego em interseções semaforizadas de áreas urbanas que foi desenvolvida na Inglaterra e já era usada em 170 localidades no mundo (ZHANG, 2001). A otimização no SCOOT e

no TRANSYT se dá através de alterações sistemáticas nos tempos semafóricos e implementação da configuração que, conforme o modelo, acarreta em maiores benefícios ou na minimização dos atrasos e paradas. A diferença é que no SCOOT os dados são fornecidos de detectores veiculares localizados na rua, com o sistema tentando acompanhar as variações do tráfego ao longo do dia, ou seja, é um sistema em tempo real. De maneira geral, o SCOOT é um TRANSYT em tempo real.

As pesquisas para o desenvolvimento do SCOOT foram iniciadas nos anos 70 e, em 1975, uma versão preliminar foi testada em Glasgow. Os resultados obtidos, especialmente em aumento da velocidade média de percurso no pico da tarde, fizeram com que os Departamentos de Transporte e da Indústria ingleses, juntamente com empresas do setor privado, financiassem o TRL para o desenvolvimento de uma versão comercial do SCOOT (TRL, 2000b).

O SCOOT estima em tempo real o tamanho das filas a cada ciclo, em cada aproximação semafórica, e calcula o atraso como a soma destas filas em todas as aproximações (semelhante ao atraso do TRANSYT). Os otimizadores do SCOOT tentam continuamente reduzir as filas nas aproximações de uma rede semafórica por freqüentes mudanças nos tempos semafóricos. O SCOOT estima também o número de paradas e combina com os atrasos para definir o Índice de Performance ou PI (*Performance Index*) da rede; este, assim como no TRANSYT, é uma função ponderada de atrasos e paradas. Uma outra importante medida do comportamento do tráfego estimada pelo SCOOT é o grau de saturação em cada aproximação semafórica, que é definido pela razão entre demanda de tráfego e a capacidade de descarga da aproximação. Todas estas medidas de desempenho, inclusive os fluxos veiculares, são armazenadas em intervalos de agregação de 15min num banco de dados denominado ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*) (TRL, 2000e).

Conforme descrito em detalhes por LOUREIRO *et al.* (2002b), a filosofia do SCOOT é reagir às mudanças no tráfego por meio de freqüentes, mas pequenas, mudanças nos tempos de verde, ciclo e defasagem de um determinado plano para um conjunto de semáforos que formam uma área de controle, visando à adequação deste plano à variação no comportamento do tráfego. Para tanto, o SCOOT conta com três otimizadores (TRL, 2000a): otimizador de ciclo, repartições de verde e defasagem. O otimizador de ciclo avalia, para cada área de controle, a cada 5 ou 2,5 minutos, se o ciclo comum em todas interseções controladas deve ser mudado para manter um grau

de saturação dos cruzamentos críticos da área abaixo de 90%. As mudanças no ciclo são limitadas para um máximo de 8 segundos com o objetivo de manter uma estabilidade na operação. O otimizador de repartições de verde avalia, antes de cada mudança de estágio, se o corrente período de verde deve ser mantido, antecipado ou estendido para minimizar o grau de saturação de uma determinada aproximação. Para evitar distúrbios, as mudanças nos tempos de estágio são limitadas para um máximo de 8 segundos em cada interseção. O otimizador de defasagens avalia, a cada ciclo, a necessidade de alterar a defasagem de cada interseção da área de controle para reduzir a quantidade de atrasos e paradas nas aproximações das interseções. Estas mudanças também são limitadas a um máximo de 8 segundos.

Para determinar se as mudanças nos tempos semafóricos são apropriadas, o SCOOT monitora a demanda de tráfego continuamente em cada interseção controlada, por meio de laços detectores de presença, instalados nas aproximações a montante de cada interseção (Figura 2.7). Estes detectores são tipicamente localizados próximos ao cruzamento que fica a montante da interseção controlada para permitir ao sistema obter uma informação mais precisa do perfil de chegada dos veículos na linha de retenção da interseção controlada. A informação coletada pelos laços detectores é usada para gerar os perfis cíclicos de fluxo (PCF's) que são uma estimativa do perfil de fluxo de chegada dos veículos ao longo de cada ciclo, conforme a Figura 2.7, e que são armazenados num computador e usados a cada posterior otimização. Estes perfis são gerados no SCOOT pela combinação do mais recente fluxo de tráfego observado com os dados históricos anteriormente coletados. Isto é feito para garantir uma estabilidade na operação no sistema, evitando que mudanças bruscas ou erros de coleta possam causar distúrbios na operação semafórica. Como resultado deste processo, o perfil que é gerado pelo sistema não representa a atual condição de tráfego, mas caracteriza as condições médias de tráfego observadas recentemente. O modelo de fila do SCOOT utiliza os PCF's para estimar a formação de fila dos veículos na linha de retenção da interseção controlada.

Parâmetros Básicos de Calibração do Modelo

No sistema SCOOT é necessária a calibração em campo de alguns parâmetros básicos do modelo (TRL, 2000c):

- Tempo de Percurso (*JTIM* - *Journey Time*): tempo médio que um veículo viajando em um agrupamento (pelotão), em condições de fluxo

livre, leva do ponto de detecção (laço detector) até ultrapassar a linha de retenção;

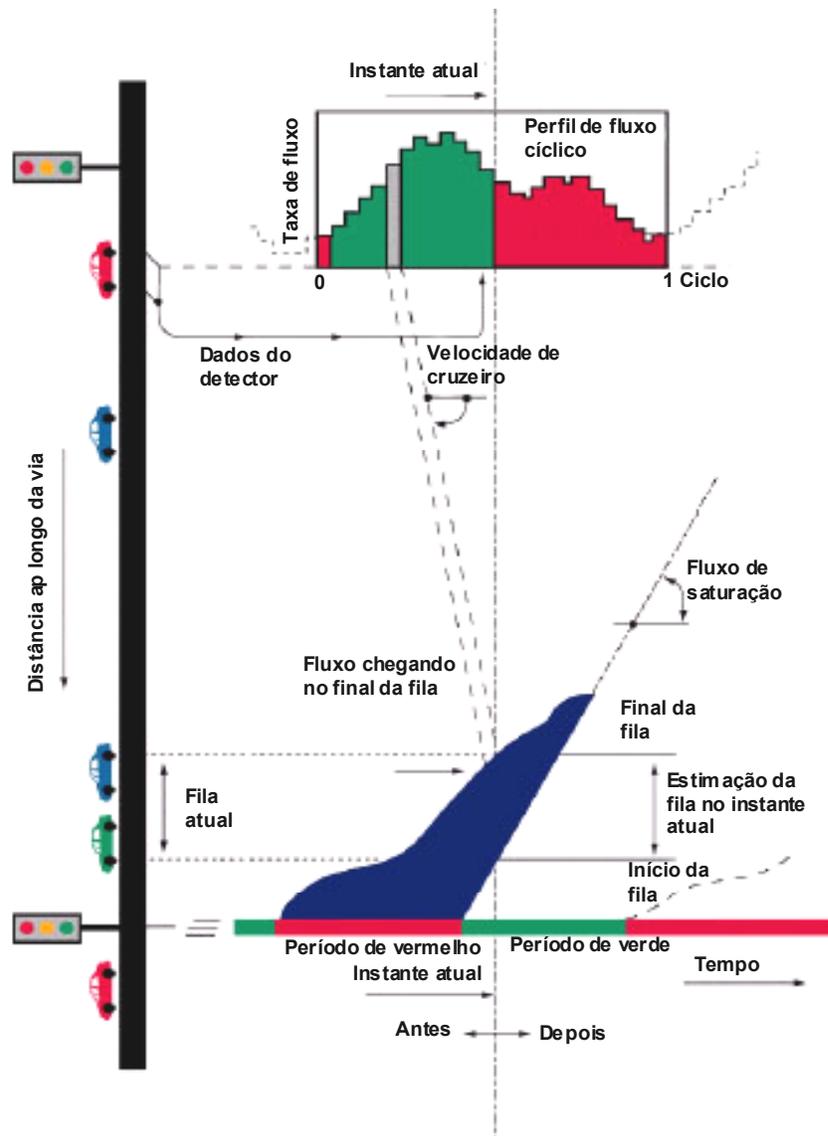


Figura 2.7: Princípios da Modelagem no SCOOT (TRL, 2000a)

- Tempo de Dispersão de Fila Máxima (MAXQ – Maximum Queue): Fila Máxima é uma fila que se estende pela via desde a linha de retenção até o laço detector. O tempo de dispersão de fila máxima para um *link* é

o tempo de verde necessário para que todos os veículos que formam a fila máxima passem pela linha de retenção;

- Ocupação de Saturação (*SATO – Saturation Occupancy*): a ocupação de saturação de um *link* é a taxa máxima de saída do fluxo de uma fila na linha de retenção (semelhante ao fluxo de saturação);
- Defasagem Padrão (*DEFO – Default Offset*): é a diferença de tempo entre o início do estágio do nó anterior (estágio do nó anterior que libera a maior parte do fluxo recebido pelo *link*) e o início do estágio do nó posterior (estágio do nó posterior que libera a maior parte do fluxo do *link*) que dá a melhor possibilidade de progressão no *link*.

2.4.1 Prioridade Passiva em Tempo Real no SCOOT

No sistema SCOOT, o ajuste de alguns parâmetros pode garantir uma melhor progressão para os ônibus, priorizando os *links* mais carregados do corredor arterial. Uma primeira alternativa consiste em alterar parâmetros para a otimização das frações de verde. No SCOOT, a partição de verde procura manter iguais as saturações de todos os *links* de um determinado nó. Entretanto, a partir da alteração dos parâmetros *Split Weighting Multiplier (SPWM)* e *Split Weighting Saturation (SPWS)*, é possível estabelecer uma maior ou menor priorização dos *links* (TRL, 2000c). Portanto, a utilização deste recurso permite que seja fornecida uma maior parcela do tempo de verde para os *links* de um corredor de ônibus, favorecendo a obtenção de melhores defasagens. O parâmetro *SPWM* determina a intensidade na qual a saturação de um determinado *link* será desfavorecida. Já o parâmetro *SPWS* estabelece o valor de saturação no *link* penalizado que o SCOOT irá considerar como limite para restabelecer a condição de equilíbrio entre as saturações dos *links* do nó. No caso de situações de congestionamento, o SCOOT permite ainda o ajuste de um terceiro parâmetro, denominado *Congestion Importance Fator (CGIF)*, para cada *link* da interseção. O comportamento do sistema será o de tentar dar mais tempo de verde para o *link* que tiver o valor de *CGIF* mais alto (MING, 1997), possibilitando priorizar os *links* com maior percentual de ônibus no corredor.

Outra alternativa de priorização passiva no SCOOT, correspondendo à estratégia testada neste estudo, consiste na definição de um estreito intervalo de variação das defasagens entre as interseções do corredor, considerando os tempos de

percurso dos ônibus e os tempos gastos em pontos de parada. Isto é obtido ajustando o valor do parâmetro *Link Bias*, que varia entre 0 e 127, sendo o valor 0 a situação de total liberdade para que o sistema faça variar as defasagens e 127 o valor que irá fixá-las ao máximo. Este parâmetro é, então, aplicado ao valor *default* da defasagem (*DEFO*) que representa um valor fixo ou o ponto central em torno do qual o otimizador poderá variar a defasagem. Nesta pesquisa, os valores do parâmetro *DEFO*, para cada *link* do corredor, foram calculados utilizando-se o modelo de retenção compartilhada do TRANSYT.

2.4.2 Modelo de Prioridade Ativa para Ônibus do SCOOT

A técnica de prioridade semafórica ativa no SCOOT foi implementada em 1995 (ZHANG, 2001). A lógica de priorização consiste em implementar extensões do verde para permitir a passagem do ônibus ainda no estágio atual, ou antecipar o verde executando o estágio antes de seu início normal para reduzir o tempo de espera até que os ônibus ganhem o direito de passagem (esta técnica recebe o nome de Antecipação de Estágio - *Recall*). As extensões e/ou antecipações podem ser implementadas de uma central de controle ou o controlador do semáforo pode ser programado para implementar mudanças localmente (extensões ou antecipações locais). As extensões locais podem ser vantajosas por eliminar de 3 até 4 segundos na transmissão do controlador na rua para o computador na central, assim como o retorno para o controlador, permitindo desta forma que o sistema garanta extensões para os veículos que chegam nos instantes finais do período de verde. Este tipo de operação é adequado para *links* curtos, com os pontos de parada próximos à interseção controlada.

De forma a não prejudicar os usuários dos veículos não priorizados, a decisão de fazer uma extensão ou uma antecipação de estágio, bem como os limites impostos, é definida de acordo com o grau de saturação ou a capacidade de reserva da rede (TRL, 2000d), caracterizando uma prioridade condicional, com o grau de saturação como variável de controle. Isto significa que a prioridade para os ônibus será mais efetiva em redes onde se tem reserva de capacidade (ZHANG, 2001).

Método de Detecção

O método de detecção de veículos de transporte coletivo no SCOOT pode ser baseado em *transponders*, em sistemas de Localização Automática de Veículos (AVL -

Automatic Vehicle Location) ou em qualquer outro sistema que forneça as informações adequadas. O SCOOT tentará fazer uso de todas as informações fornecidas, sendo que a informação mínima é a presença ou não dos veículos a um determinado tempo fixo da linha de retenção (tempo de percurso para coletivos) em cada *link* (aproximação da interseção). Os *transponders* consistem em “placas de registro eletrônicas” instalados nos ônibus que enviam mensagens para detectores específicos capazes de ler as mensagens quando os veículos passam por eles; neste caso, se tem uma localização precisa do veículo num ponto. Num sistema AVL todas as posições dos veículos são registradas e comunicadas a uma central de controle de tráfego para gerenciar as ações de prioridade. Os veículos podem ser equipados com um sistema de posicionamento por GPS, que envia a localização do veículo quase que continuamente para uma central de controle, ou somente quando os veículos passam por pontos predeterminados. Além disso, este sistema também permite o gerenciamento da frota com informação em tempo real da posição, ocupação e situação dos veículos (atrasado, pontual ou adiantado) em relação à programação predefinida, o que permite a chamado na literatura de “prioridade semafórica inteligente”.

Modelo de otimização

Quando um ônibus é detectado, o otimizador de priorização de ônibus determina se uma extensão ou antecipação de estágio é necessária para priorizar o ônibus. O otimizador calcula quanto tempo o veículo necessita para passar pela linha de retenção, conforme Equação 2.8.

$$t = t_C + t_Q - (l_{RX} + l_{AE} + l_{LE}) + \delta t \quad (2.8)$$

em que,

- $t =$ tempo necessário para o ônibus passar pela linha de retenção [s];
- $t_C =$ tempo de percurso do ônibus, desde o detector até a linha de retenção [s];
- $t_Q =$ tempo de dispersão da fila formada por todos os veículos que estão à frente do ônibus [s];

l_{RX} = atraso na comunicação, isto é, o atraso da transmissão desde a detecção até o recebimento da informação pelo computador central [s];

l_{AE} = *Area end Lag* [s] – intervalo de tempo usado pelos condutores dentro do período de amarelo (geralmente 3 segundos desde o início do entreverdes até o fim do verde efetivo);

l_{LE} = *Link End Lag* [s] – um ajuste do *Area End Lag* para um link específico (geralmente zero);

δt = *Bus Vary* [s] – variação para ônibus (tipicamente em torno de 5 segundos).

O parâmetro *Bus Vary* (δt) é uma constante de cada *link* que permite variações:

- No tempo de percurso (t_c) para diferentes ônibus;
- No atraso de transmissão (l_{RX});
- No período em que o ônibus pode passar pela linha de retenção no final do verde efetivo.

O valor t de um determinado *link* varia somente com o tempo de dispersão da fila à frente do ônibus (t_Q). Se este último for igual a zero, o valor t será constante para o *link*.

As seguintes condições devem ser satisfeitas antes que uma extensão seja garantida:

$$t - t_{NS} \leq a \quad (2.9)$$

$$t - t_{NS} \leq c - c_{req} \quad (2.10)$$

em que,

a = extensão máxima permitida (tempo de verde adicional); tipicamente varia entre 10 e 20 segundos;

t_{NS} = tempo desde a detecção até o início do próximo estágio [s];

- $c =$ duração atual do ciclo do nó [s];
- $c_{req} =$ duração do ciclo de referência ou ciclo saturado do nó [s].

Isto significa que a extensão real necessária não deve exceder o valor máximo permitido (a), e que deve existir reserva de capacidade suficiente no nó. Se estas condições forem satisfeitas, o otimizador de priorização indica que uma extensão é apropriada; caso contrário, indica que uma antecipação de estágio é apropriada. Se $t - t_N < 0$, o ônibus deve passar na interseção sem necessidade de extensão.

O ciclo de referência (c_{req}) de um nó é calculado pela soma dos verdes de extensão (g_e) das aproximações, mais os períodos de entreverdes I de cada fase i , conforme a Equação 2.11.

$$c_{req} = \sum_i (g_e + I_i) \quad (2.11)$$

Os verdes de extensão são calculados em função do limite de saturação para extensão (x_e), imposto pelo técnico de tráfego para o nó, e dos verdes suavizados (\bar{g}_{sat}) de cada aproximação, como segue:

$$g_e = \frac{100\bar{g}_{sat}}{x_e} \quad (2.12)$$

O \bar{g}_{sat} é obtido por um processo de suavização do verde saturado (g_{sat}) em cada estágio do nó por um fator de suavização (α):

$$\bar{g}_{sat} = \alpha \bar{g}_{sat} + (1 - \alpha)g_{sat} \quad (2.13)$$

e o verde saturado é calculado como segue:

$$g_{sat} = \frac{Q_R + q_{RG}}{S} \quad (2.14)$$

em que,

- $g_{sat} =$ verde saturado de um *link* [s];
- $Q_R =$ fila de veículos no início do vermelho para um *link*;

q_{RG} = quantidade de veículos que chegam durante o período de vermelho;

s = parâmetro que define a descarga máxima dos veículos durante o verde.

Do mesmo modo, no caso em que limites de saturação para antecipação (x_r) são impostos, o verde de antecipação para cálculo do ciclo de referência é determinado pela Equação 2.15.

$$g_r = \frac{100 \bar{g}_{sat}}{x_r} \quad (2.15)$$

O tempo de dispersão da fila à frente do ônibus (t_Q) é estimado adiante no tempo, ou seja, no momento em que o ônibus é detectado, o modelo já estima a fila que existe desde a linha de retenção do cruzamento até o ponto de detecção do ônibus. O tempo de atraso que o ônibus sofrerá com a fila à sua frente é determinado pela divisão da fila pelo parâmetro SATO. No modelo é possível prever a formação da fila adiante no tempo porque os detectores (laços indutivos) de tráfego estão localizados antes dos detectores de ônibus, conforme mostra a Figura 2.8:

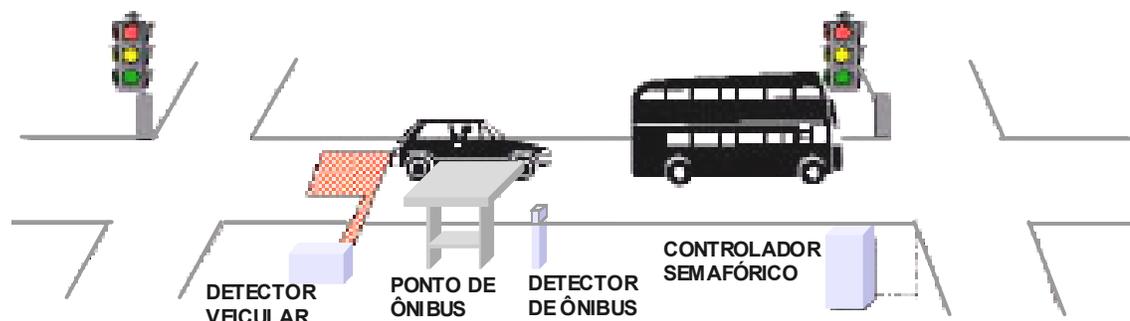


Figura 2.8: Localização do detector de ônibus numa aproximação semafórica (adaptado do TRL, 2000d)

No caso de mais de um ônibus ser detectado numa aproximação semafórica a determinação da previsão de chegada na linha de retenção é realizada independente para cada ônibus, e o modelo pode decidir implementar ou não uma extensão ou antecipação para contemplar todos os ônibus detectados.

Estratégia de Extensão

Uma extensão causa a continuação do estágio corrente através da inibição de qualquer mudança de estágio solicitada pelo SCOOT até que todos os ônibus no *link* (que receberam o benefício da extensão) passem pela linha de retenção.

A Figura 2.9 mostra o exemplo de uma extensão. O símbolo # indica o momento da detecção de um ônibus e o símbolo → indica o momento que o ônibus está passando pela linha de retenção. Um ônibus foi detectado, o qual possui direito de passagem no estágio 1. Isto resulta em uma extensão do estágio 1, e um atraso na execução do estágio 2.

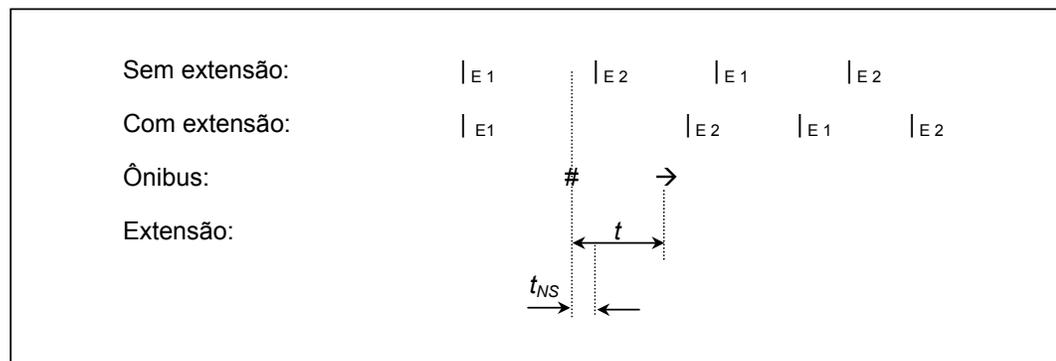


Figura 2.9: Exemplo de uma extensão

Estratégia de Antecipação

O objetivo de uma antecipação de estágio é reduzir o atraso que o ônibus sofrerá, executando o estágio que lhe dá direito de passagem o mais breve possível. Uma antecipação de estágio faz com que todos os estágios sejam executados em seqüência até que seja executado o estágio que dá direito de passagem ao ônibus. As seguintes condições se aplicam à execução da seqüência de estágios:

- Todos os estágios serão executados e nenhum estágio será omitido pelo SCOOT;
- Cada estágio deve executar pelo menos sua duração mínima;

- Uma antecipação de estágio não fará com que um estágio fique mais longo do que seria se fosse determinado normalmente pelos otimizadores SCOOT;
- Se um limite de saturação para antecipação for utilizado (isto é, diferente de zero), cada estágio será mantido até que cada *link* receba direito de passagem suficiente para satisfazer a saturação desejada, ou até que a duração do estágio normalmente determinada pelo SCOOT seja alcançada (o que acontecer primeiro).

A Figura 2.10 mostra um exemplo de antecipação de estágio. Um ônibus que possui direito de passagem no estágio 1 foi detectado durante o estágio 2, fazendo com que o estágio 2 termine antes, a duração do estágio 3 fique menor e o estágio 1 seja executado antecipadamente. O estágio 1 é mantido até o ônibus ultrapassar a linha de retenção. Neste ponto, o processo de antecipação acaba, e um processo de compensação é executado.

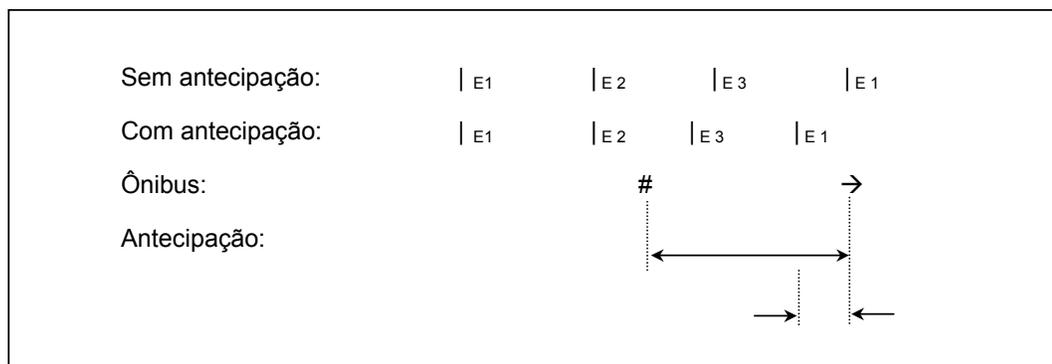


Figura 2.10: Exemplo de uma antecipação

Métodos de Compensação

Depois que o ônibus atravessa a interseção, após uma extensão ou antecipação de estágio, um período de compensação ocorre para trazer o semáforo para sua operação normal. Quatro métodos de compensação são possíveis para operação após as extensões ou antecipações (TRL, 2000d): DN (*Do Nothing*), MS (*Minimum Stage*), DS (*Degree of Saturation*) e LS (*Long Stage*).

(1) Compensação DN

Nesta compensação nenhuma alteração é realizada para retornar à operação normal do SCOOT. A alteração de defasagem realizada pelo modelo de priorização de ônibus é mantida, e os tempos de estágio são normalmente otimizados pelo SCOOT. A Figura 2.11 mostra exemplos de compensação após uma extensão ou antecipação, sendo o estágio 1 que dá direito de passagem ao ônibus.

Veja na Figura 2.11, que o deslocamento dos estágios devido ao modelo de priorização é mantido após a prioridade. A compensação DN tem a vantagem de ser rápida e causar o mínimo de distúrbio à divisão de verdes, mas pode causar distúrbios à defasagem. Pode ser um bom método para compensação onde a defasagem não é importante.

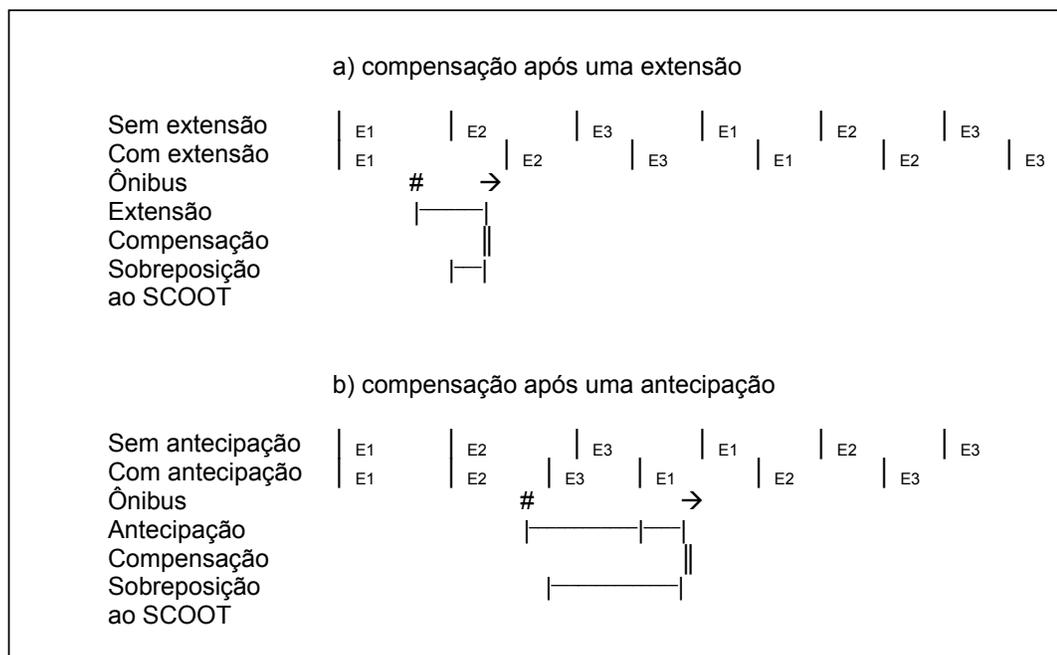


Figura 2.11: Exemplos de compensação do tipo DN

(2) Compensação MS

A compensação MS consiste em executar os estágios com a duração mínima permitida para retornar à operação normal do SCOOT. Este tipo de compensação, embora não prejudique a defasagem do nó, pode causar supersaturação dos *links*.

A Figura 2.12 mostra um exemplo de uma compensação MS depois de uma extensão e de uma antecipação. Na Figura 2.12a, depois do estágio 1 ter uma duração maior devido à extensão, o estágio 2 é executado com sua duração mínima e o estágio 3 com uma duração menor que a normal para retornar com a otimização normal do SCOOT. Na Figura 2.12b, após uma antecipação, os estágios são executados com seus tempos mínimos de duração até retornar a operação normal.

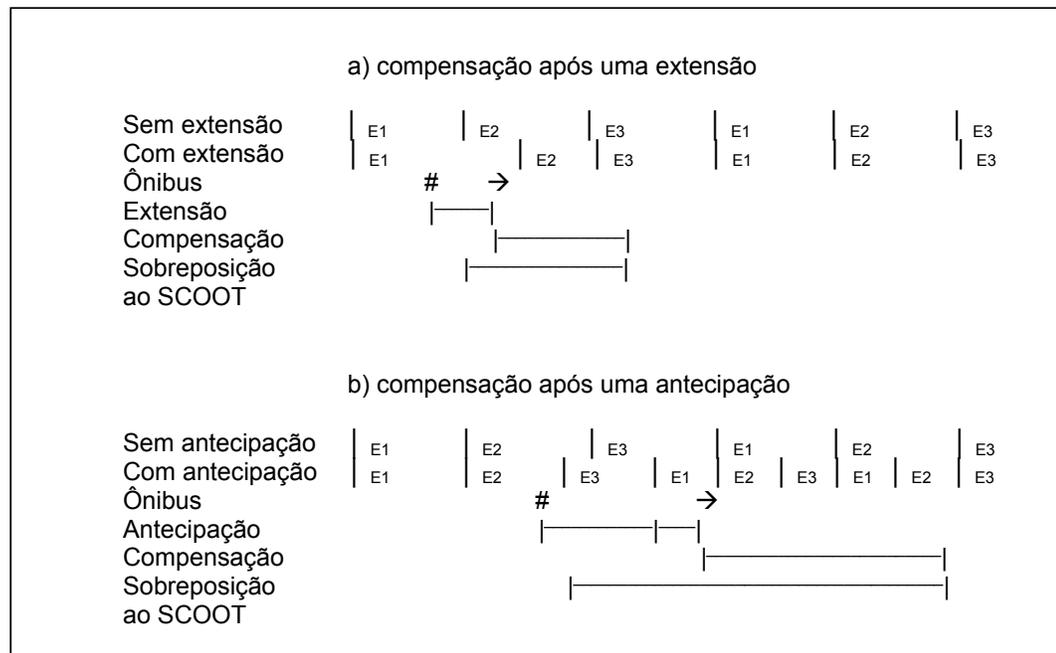


Figura 2.12: Exemplos de compensação do tipo MS

(3) Compensação DS

A compensação DS é similar à MS, porém em vez de executar estágios com a duração mínima permitida, executa os estágios com uma duração menor do que o SCOOT executaria, e que satisfaça a um grau de saturação desejado até retornar à operação normal do SCOOT. As durações dos estágios são menores (mas não menores que os estágios mínimos) e, até onde possível, nenhum *link* estará mais saturado do que a saturação desejada para compensação (x_v); este valor pode ser configurado estando normalmente entre 85% e 95%.

A Figura 2.13 mostra um exemplo de compensação DS após uma extensão e após uma antecipação. A recuperação DS tem a vantagem de não causar distúrbios

método depois de uma antecipação são o rápido ressincronismo com a operação normal do SCOOT e o fato de não causar distúrbios permanentes à defasagem.

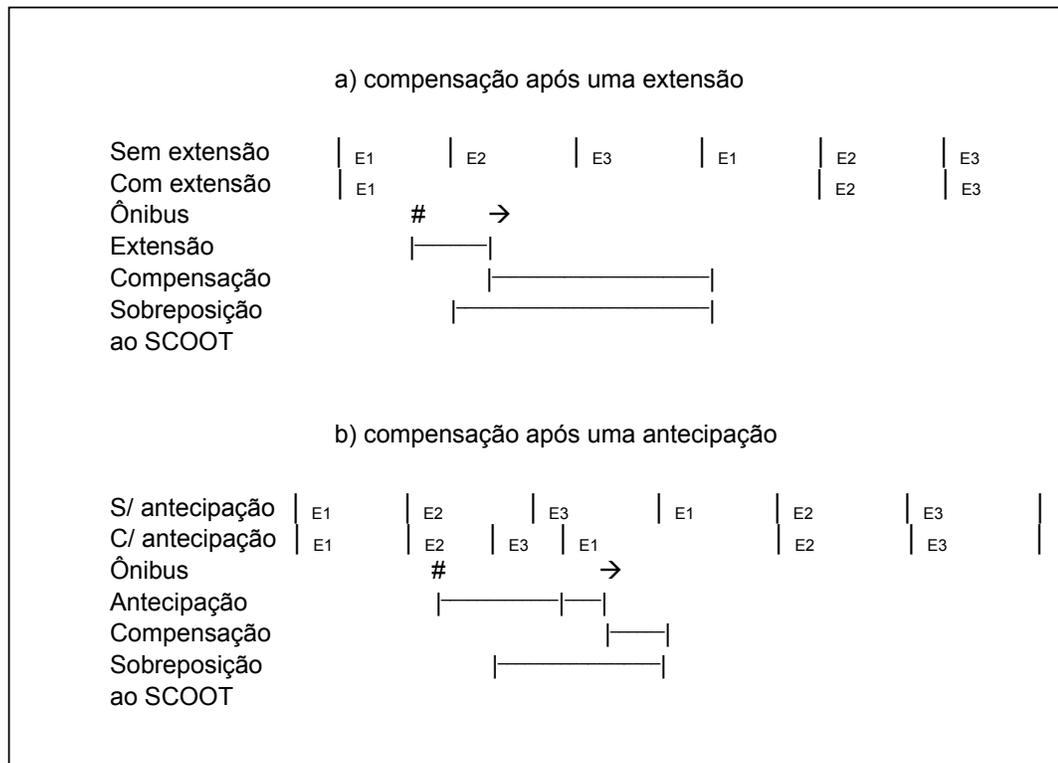


Figura 2.14: Exemplos de compensação do tipo LS

Parâmetros de Calibração do Modelo de Prioridade Ativa do SCOOT

O modelo de prioridade do sistema SCOOT requer a calibração dos seguintes parâmetros básicos em campo:

- Tempo de Percurso de Ônibus (BJTM – Bus Journey Time): é o tempo de percurso (t_c) dos ônibus em fluxo livre do ponto de detecção até a linha de retenção;
- Tempo de Dispersão de Fila Máxima para Ônibus (BQUC – Bus Queue Clear Time): é o tempo de dispersão da fila veicular formada desde a linha de retenção até o ponto de detecção dos ônibus;
- Extensão Máxima Permitida (BAUT – Bus Authority): é o máximo tempo (a) de verde adicional em segundos para extensão;

- Limite de Saturação para Extensão (*BEXS – Bus Extension Saturation*): é a saturação máxima desejada (x_e) para o nó quando o sistema executa uma extensão de estágio;
- Limite de Saturação para Antecipação (*BRES – Bus Recall Satuaration*): é a saturação máxima desejada (x_r) para os *links* não priorizados num nó quando o sistema executa uma antecipação de estágio;
- Limite de Saturação para Compensação (*BRYS – Bus Recovery Saturation*): é a saturação máxima desejada (x_v) para o nó quando o sistema executa uma compensação do tipo DS.

2.5 ESTUDOS SOBRE PRIORIDADE SEMAFÓRICA

Os estudos sobre prioridade semafórica envolvem a avaliação de desempenho de estratégias de prioridade em interseções isoladas ou em corredores arteriais, com ênfase na análise de benefícios para o transporte público por ônibus e os impactos destas estratégias sobre o tráfego geral (ônibus+automóveis).

2.5.1 Estratégias de Prioridade Semafórica

As principais estratégias avaliadas são do tipo ativa: extensões e antecipações. Estas estratégias podem ser implementadas no tempo fixo (DION *et al.*, 2002), ou integradas ao controle em tempo real (CHANG *et al.*, 1995; CONRAD *et al.*, 1998; MIRCHANDANI *et al.*, 2001; ZHANG, 2001). As estratégias de prioridade passiva têm sido pouco estudadas:

- SILVA *et al.* (1993) avaliaram a aplicabilidade do modelo de simulação de fluxos de ônibus do TRANSYT a determinadas condições de comportamento do tráfego no Brasil, adaptando este modelo às condições de tráfego observadas em grandes cidades brasileiras. O modelo proposto foi testado numa rede arterial composta por seis interseções, na cidade do Rio de Janeiro. Segundo os autores, o modelo original do TRANSYT é insuficiente para representar situações típicas do comportamento da interação entre ônibus e automóveis em grandes cidades brasileiras. Foi desenvolvido um artifício para responder a estas circunstâncias, que considera a utilização dos

recursos que representam gargalos e interseções controladas com regras de prioridade para simular as interseções entre correntes de tráfego na situação citada;

- GARROW e MACHEMEHL (1998) avaliaram as estratégias de redução de ciclo e a divisão de estágios num corredor arterial em Austin, Texas. Segundo os autores, estas estratégias podem ser eficientes em períodos de entropico para priorizar os ônibus de linhas locais;
- CONRAD *et al.* (1998) citam em seu trabalho uma tentativa de integrar a prioridade passiva ao controle em tempo real do SCOOT. A prioridade passiva foi implementada no SCOOT (WOOD e BAKER, 1993), limitando as defasagens (pesos para defasagens) para favorecer a operação do transporte público e especificando altos graus de saturação para estágios não priorizados (pesos para frações de verdes).

Alguns estudos avaliam apenas a prioridade incondicional, ou seja, a prioridade é sempre garantida quando o veículo é detectado numa aproximação. BALKE *et al.* (2000) e DION *et al.* (2002) apontam alguns problemas com este tipo de estratégia:

- Os algoritmos de prioridade incondicional usam muitas vezes a mesma estratégia de prioridade (extensão ou antecipação do verde para a via principal) sem considerar o instante do ciclo em que o ônibus chega na interseção. Isto pode causar atrasos excessivos aos estágios não priorizados;
- Muitos controladores semafóricos implementam a prioridade antecipando a operação normal dos semáforos o que causa uma perda da coordenação. Muitas vezes são necessários vários ciclos até que a coordenação entre duas interseções seja restabelecida. Durante este tempo, os semáforos estão operando com tempos não ótimos para as condições de tráfego;
- Um outro problema com muitos sistemas de prioridade semafórica é que os controladores não consideram se o ônibus realmente necessita de prioridade, ou seja, não consideram critérios como a aderência a programação e/ou ocupação dos veículos;

- Um outro problema é a variabilidade dos tempos de embarque/desembarque dos ônibus que acarretam em incertezas nas previsões de chegada dos ônibus nas interseções e na requerida mudança nos tempos semaforicos.

Devido a estas limitações, muitas agências de transporte consideram que os impactos negativos de interromper a progressão e acrescentar atraso para as aproximações não priorizadas superam os benefícios da prioridade para os veículos do transporte público, e hesitam de implementar a prioridade em suas jurisdições. Contudo, com a integração da prioridade ao controle em tempo real e a sistemas de informação e identificação/localização automática de veículos (*AVI/AVL – Automatic Vehicle Identification / Automatic Vehicle Location*) é possível propor um sistema de prioridade “inteligente” (BALKE *et al.*, 2000; GIFFORD *et al.*, 2001; CHADA, 2004) em que a prioridade é dada desde que alguns objetivos sejam atendidos:

- O sistema deve ser capaz de estimar o instante de chegada dos ônibus em cada interseção;
- Providenciar prioridade sem interromper a progressão da via principal;
- Providenciar prioridade sem significativamente alterar a seqüência normal e duração dos estágios;
- Providenciar prioridade somente para aqueles ônibus que realmente necessitam de prioridade com base num critério predefinido, que pode ser a aderência à programação e/ou a ocupação de passageiros do veículo;
- Providenciar prioridade somente quando existir capacidade reserva na interseção. Isto pode ser feito colocando limites de saturação no controle em tempo real, definindo até que ponto a prioridade pode ser dada.

O sistema ideal é, portanto, um sistema com prioridade ativa condicional com as características citadas acima. FURTH e MULLER (2002) destacam ainda que, neste tipo de estratégia, as interrupções devido à prioridade num corredor podem ser reduzidas variando os limites em que o atraso do ônibus pode variar em relação à sua programação: em nós críticos este limites podem assumir valores maiores, enquanto que em nós com reserva de capacidade estes limites serão menores. Isto faz com que

os ônibus sejam priorizados em nós com reserva de capacidade e passem pelos nós críticos sem receberem prioridade. Um outro aspecto importante que deve ser considerado na implementação da prioridade condicional, segundo FURTH e MULLER (2002), é se o sistema atual apresenta ou não folga em relação à programação estabelecida. Num sistema com programação muito justa, os veículos tendem a estar sempre atrasados e o sistema irá operar com prioridade quase incondicional. Por outro lado, num sistema com flexibilidade na programação os veículos tendem a estar sempre adiantados, fazendo com que o sistema não necessite de uma estratégia de prioridade.

2.5.2 Benefícios da Prioridade Semafórica

Os principais benefícios esperados da prioridade semafórica em corredores arteriais são (AGRAWAL *et al.*, 2002; CHANG e ZILIASKOPOULOS, 2003; SOO *et al.*, 2004):

- Potencial redução dos atrasos dos ônibus nas interseções;
- Os veículos que estão atrasados na programação podem receber prioridade, enquanto os veículos adiantados podem ser penalizados com acréscimos de atraso nos semáforos. Desta forma, as estratégias de prioridade podem servir como instrumento de controle da programação dos ônibus, reduzindo a variabilidade dos tempos de viagem e com isso aumentando a confiabilidade no serviço;
- Reduções no tempo de viagem dos ônibus e um maior cumprimento da programação planejada acarretam em reduções nos custos operacionais, visto que o nível de serviço desejado pode ser alcançado com uma frota menor;
- A prioridade pode beneficiar alguns veículos não priorizados que circulam ao longo de corredores priorizados, mas pode afetar veículos de movimentos não priorizados em vias secundárias, com acréscimos de atraso ou perda da coordenação, caso as vias secundárias façam parte de corredores arteriais coordenados;

- A prioridade deve melhorar a eficiência do sistema de tráfego urbano, com a redução de veículos e congestionamentos devido ao potencial deslocamento da demanda para o transporte público.

2.5.3 Critérios de Avaliação

Geralmente são usados como critérios de avaliação: o tempo de viagem por ônibus, o tempo de viagem por automóvel, o atraso e o número de paradas em interseção por ônibus e por automóvel, o tempo de viagem por pessoa, o atraso em interseção por pessoa, e o tamanho da fila. A confiabilidade na programação dos ônibus é avaliada em função da variabilidade no seu tempo de viagem, pois embora possa não existir diferença no tempo de viagem dos ônibus, é possível ocorrer redução no desvio padrão do tempo de viagem.

Poucos são os estudos que avaliaram alterações nas emissões (HC, CO e NOx) e no número de acidentes com a implementação das estratégias de prioridade. DION *et al.* (2002) concluíram que as emissões não são dependentes apenas do número de paradas e atrasos dos veículos, mas também dependem do comportamento individual dos condutores e, em particular, da variabilidade das velocidades ao longo do corredor. DALE *et al.* (1999) consideram que a possível redução das emissões ocorre a longo prazo, devido a um possível deslocamento da demanda de automóveis para o transporte público. Não se espera, entretanto, que as estratégias de prioridade mudem o comportamento da demanda e o modo de decisão das viagens a curto prazo. Também não é esperado redução na frequência de acidentes com implementação das estratégias de prioridade, mas pode ocorrer uma mudança no número e tipo de acidentes em interseções.

MIRCHANDANI *et al.* (2001) citam em seu trabalho que a prioridade semafórica para o transporte público deve contribuir com um conjunto de objetivos do sistema de transporte. Alguns desses objetivos (como redução de emissões) são atrativos para os órgãos gestores do transporte público e do tráfego urbano. Outros objetivos (redução de custos operacionais dos ônibus) são principalmente de interesse para os órgãos gestores do transporte público. Alguns objetivos podem ser parcialmente conflitantes (redução do atraso médio de todos os veículos e dos ônibus, e redução do atraso por pessoa). A implementação de qualquer estratégia de prioridade semafórica requer a determinação dos objetivos operacionais e, se necessário, deve-se conseguir um equilíbrio entre objetivos conflitantes.

2.5.4 Métodos de Avaliação

A experiência (testes na Europa e na América do Norte) mostra que existe uma incerteza sobre os reais impactos e benefícios da combinação da prioridade semafórica com uma particular condição do tráfego (FOX *et al.*, 1998; HOUNSELL e WALL, 2002; CHANG e ZILIASKOPOULOS, 2003; NGAN *et al.*, 2004). O primeiro passo para decisão de implementação de qualquer estratégia de prioridade é a pesquisa de experiências em outras localidades, com intuito de se conhecer as principais estratégias de priorização semafórica testadas e os métodos de avaliação empregados. Vale ressaltar que, devido a diferenças de comportamento, de configuração do espaço geográfico e de condições do tráfego entre as cidades, os resultados observados numa cidade não podem ser transferidos para a área que se deseja analisar. Portanto, estudos de simulação computacional e/ou testes em campo são necessários. As simulações computacionais carecem do realismo dos testes em campo, mas são mais flexíveis e de menor custo. O realismo e a precisão nas simulações computacionais podem ser melhorados com um conjunto de dados representativo da área de estudo e com o uso de modelos que representem a realidade com uma boa precisão.

A avaliação das estratégias de prioridade envolve a comparação de cenários de controle, com base em critérios de avaliação. A maior parte dos estudos propõe modelos de micro-simulação para avaliar as estratégias de prioridade. DALE *et al.* (1999) e LIU *et al.* (2004) destacam alguns benefícios e limitações da simulação computacional:

- (a) A simulação computacional apresenta os seguintes benefícios quando comparada à coleta de dados em campo:
 - Reduzidos custos – permitem análise de sensibilidade do tipo: o que ocorre se? Evita a coleta de dados em campo quando o sistema é modificado;
 - Menores riscos – pois evitam que observações tenham que ser repetidas devido a incidentes na via de estudo, ou em vias adjacentes, atrasos de pesquisadores, atraso no projeto com o uso de um grupo menor de pesquisadores;

- Maior controle sobre o estudo – em estudo de comparação antes e depois é necessário que sejam observadas as mesmas condições de tráfego, exceto para as variáveis de estudo. Embora algumas medidas de controle possam ser incorporadas em estudos de campo, alguns fatores externos podem influenciar os resultados levando a conclusões erradas. Estes fatores podem incluir: mudanças no volume, modificações nos tempos semafóricos não comunicadas ao grupo de estudo, alteração na programação dos ônibus, ou erro humano. A simulação elimina esta influência externa, por permitir que seja alterado apenas o fator que se deseja avaliar, no caso as estratégias de prioridade;
- Melhoram a comunicação com o uso de animações – provavelmente o aspecto mais positivo dos modelos de simulação é a sua habilidade para ilustrar graficamente as condições do tráfego por meio de simulações.

(b) A simulação computacional também apresenta algumas limitações em relação a pesquisas em campo:

- Podem não representar fielmente a realidade. A tolerância aceitável nos modelos de simulação é $\pm 10\%$ das condições atuais de tráfego (volumes e tempos de viagem);
- As estimativas podem não ser confiáveis. Se não existe confiança no modelo pelos técnicos, então não se deve usar determinado modelo de simulação.

Embora exista uma tendência de se usar a simulação computacional para avaliar estratégias de prioridade semafórica em interseções ou em corredores arteriais, os experimentos em campo não devem ser esquecidos devido ao realismo dos resultados encontrados. Para tanto, algumas variáveis de controle podem ser coletadas junto com as variáveis de avaliação como: volumes de tráfego, tempos de embarque/desembarque dos ônibus. Os estudos de simulação computacional, na verdade, devem servir como complemento aos experimentos de campo.

Outro aspecto identificado, relativo aos métodos de avaliação, é que os veículos de movimentos não priorizados (vias secundárias), afetados negativamente

pelas estratégias de prioridade, podem desviar seu itinerário passando a usar outras rotas. Em contrapartida, os corredores arteriais priorizados podem se tornar mais atrativos para outros veículos que se beneficiam, junto com os ônibus, das estratégias de prioridade, caso estas não resultem em perda da coordenação semafórica no próprio corredor. Este comportamento afeta não somente os corredores que recebem tratamento especial de prioridade nos semáforos, como também outras vias usadas como opções de rotas para desviar dos atrasos causados pela prioridade semafórica ou que passam a ser menos usadas devido à atratividade dos corredores priorizados. Por esse motivo ABDELGHANY *et al.* (2001), AGRAWAL *et al.* (2002), CHANG e ZILIASKOPOULOS (2003) propõem uma análise mais abrangente, a longo prazo, que envolve o uso de modelos de alocação de tráfego para avaliar os impactos das estratégias de prioridade em redes de transporte, não apenas em porções (interseções ou corredores específicos) da malha viária, mas numa rede de corredores arteriais.

Com relação aos critérios de avaliação, algumas das análises requerem apenas a comparação de estatísticas descritivas como médias, desvio padrão e o percentual de mudança. Além das análises descritivas, podem ser realizados testes de inferência de comparação entre médias (DALE *et al.*, 1999). Os testes têm como função averiguar se diferenças entre médias são resultados da aleatoriedade da variável ou se as diferenças de magnitude superam esta aleatoriedade. Os testes consideram três possibilidades que podem ocorrer: (1) maior do que, (2) menor do que ou (3) diferente do que o caso anterior. Para reduzir erros devido à aleatoriedade dos dados, nos casos em que as variáveis não seguem distribuições normais, devem ser coletadas amostras maiores que 30 observações. Já no caso de variáveis que seguem distribuições normais, o tamanho da amostra pode ser menor, sendo determinado a partir da média e do desvio padrão obtidos de uma amostra piloto, para um erro desejado na estimativa da média.

2.5.5 Principais Conclusões e Resultados dos Estudos

CHANG *et al.* (1995) avaliaram a integração de estratégias de prioridade ativa (extensão e antecipação) ao controle em tempo real. Após simulações computacionais no TRAF-NETSIM, concluíram que o modelo proposto opera bem em condições de tráfego moderado, mas exibe um decréscimo nos benefícios quando o estado do tráfego é altamente congestionado. A razão para isto é que em condições de

congestionamento o ônibus tem que competir com longas filas de veículos de passeio para receber a prioridade.

GARROW e MACHEMEHL (1998) concluíram também, após simulações no TRAF-NETSIM, que a prioridade incondicional para linhas expressas ao longo de um corredor arterial durante o entropico é uma técnica com grande potencial de benefícios, contudo seu uso deve ser restringido com limites sobre as extensões de verde e antecipações, principalmente em interseções com nível elevado de saturação nas vias transversais. Durante o período de pico, a prioridade ativa deve ser usada com cuidado. O sucesso da prioridade é função da localização dos pontos de parada ao longo do corredor e da proporção de viagens de passageiros por ônibus (considerando como critério o atraso por passageiro). A prioridade é recomendada para corredores com pontos de ônibus distantes e com elevadas taxas de viagens pelo transporte público.

BALKE *et al.* (2000) estudaram o uso de estratégias de extensão, antecipação e inserção de estágio especial para ônibus com previsão do seu instante de chegada no ponto de parada e na interseção. Concluíram, com uso de simulações computacionais no TexSIM (programa de micro-simulação), que a lógica desenvolvida pode ser usada em níveis moderados de saturação (até uma relação v/c de 0,9) sem significativamente causar acréscimos de atraso ao tráfego das aproximações não priorizadas.

MIRCHANDANI *et al.* (2001) avaliaram duas estratégias de prioridade no controle em tempo real: “fase-restrita” e a “ponderação para ônibus”. Na primeira, é atribuído um peso elevado para um ônibus detectado e o sistema providencia uma fase especial para permitir a passagem do veículo. Na segunda, o peso é proporcional a quantidade de passageiros e à aderência à tabela horária. Com uso de simulações computacionais, concluíram que a inclusão das estratégias de prioridade ao controle adaptativo resultaram em alguma redução de atraso por ônibus e no tempo de viagem por passageiro com pequeno efeito sobre o tráfego geral. Em particular, o método com ponderação para ônibus é capaz de reduzir o desvio padrão dos tempos de viagem por ônibus. A redução da variância dos tempos de viagem melhora a confiabilidade no sistema e, conseqüentemente, atrai mais passageiros para os ônibus.

AGRAWAL *et al.* (2002) propuseram uma nova abordagem para avaliar as estratégias de prioridade semafórica, que é uso de modelos de alocação de tráfego no

ROUTESIM para analisar as mudanças de comportamento dos usuários. O estudo mostrou que os usuários do sistema de transporte podem mudar o seu padrão de viagens com as mudanças de estratégias de controle. Em especial, alguns veículos que circulam junto com os ônibus podem ser beneficiados com as estratégias de prioridade e outros podem ser afetados nos movimentos não priorizados. Segundo os autores, estudar o efeito das estratégias de prioridade numa única interseção ou rota não dá o verdadeiro entendimento dos efeitos comportamentais dos usuários, o qual não somente afeta o tráfego do local analisado, mas de toda a rede. O estudo também mostrou que os benefícios e impactos das estratégias de prioridade são dependentes da frequência do serviço, ou seja, quanto maior a frequência de ônibus menos impactos negativos são observados ao tráfego geral; no entanto, com menos benefícios para os ônibus. Os tempos de viagem globais crescem com o aumento da frequência de ônibus e o comportamento do sistema tende a ser o mesmo independente do método de controle.

FURTH e MULLER (2002) avaliaram a prioridade condicional em Eindhoven, Holanda. Três cenários de controle foram testados: sem prioridade, prioridade incondicional e prioridade condicional. Neste estudo, foi avaliado ao longo de uma linha de ônibus o desvio da programação nos cenários com e sem prioridade condicional. Também foram comparados o atraso veicular e o atraso por ônibus entre os cenários. Os resultados mostraram que a prioridade condicional funciona como um meio de controle operacional, por controlar os *headways* dos ônibus, causando menos distúrbios ao tráfego geral.

Um método de avaliação que envolve uma análise econômica de benefício/custo foi proposto por LEHTONEN e KULMALA (2002), em Helsinki, Finlândia. O estudo avaliou os impactos socioeconômicos e de desempenho operacional da implementação de sistemas de informação e prioridade condicional para ônibus. O método baseou-se em estudos de campo, levantamentos, entrevistas aos usuários, simulação e análise econômica. Os estudos indicaram que os atrasos em interseções controladas foram reduzidos por até 40%. A regularidade e pontualidade foram melhoradas. Nas linhas avaliadas no projeto piloto houve crescimento do número de passageiros. Os estudos indicaram entre 1 a 5% de redução na emissão de poluentes e no consumo de combustível. O sistema de informação foi considerado positivo por parte dos usuários especialmente para os usuários de linhas com *headways* elevados. A relação benefício/custo da avaliação

econômica foi estimada em 3,3 e o acréscimo no retorno de capital para os operadores de ônibus foi calculado em 6%.

TENG *et al.* (2003) avaliaram o uso de estratégias de extensão e antecipação para ônibus no controle atuado simulado pelo CORSIM. Os testes foram realizados em três interseções e os resultados indicaram que este tipo de estratégia não é adequada para interseções críticas (com níveis de saturação próximos a 0,9 nas vias transversais), ou para períodos de alta demanda veicular.

NGAN *et al.* (2004) avaliaram estratégias de extensão e antecipação num corredor arterial em Vancouver, usando o *software* de micro-simulação VISSIM. Os resultados indicaram que estas estratégias são mais efetivas: em condições de tráfego moderado (com saturação entre 0,6 e 0,9); nas aproximações com pontos de paradas distantes; quando o *headway* dos ônibus priorizados é próximo a 10 min, considerado como *headway* ótimo; e quando a coordenação semafórica não é afetada.

Experiências com prioridade no SCOOT

Registros de estudos sobre prioridade semafórica no SCOOT são principalmente encontrados na Inglaterra cuja capital, Londres, é a principal referência no desenvolvimento e implementação da prioridade semafórica. Em Londres, a prioridade semafórica é usada em cerca de 300 interseções isoladas das quais 200 sob o controle SCOOT (HOUNSELL e WALL, 2002). Vários estudos de avaliação usando simulação computacional e testes em campo têm sido feitos em Londres. Em geral, os resultados destes testes mostraram que: o atraso médio dos ônibus é reduzido entre 3 a 5 segundos/ônibus/interseção nos cruzamentos controlados pelo SCOOT; e o tempo médio de viagem pode ser reduzido em até 22%, sem impactos negativos sobre o tráfego não priorizado. Resultados semelhantes de redução do atraso médio dos ônibus (5 segundos/ônibus/interseção) foram observados em Southampton (FOX *et al.*, 1998). Estudos de simulação em Leeds (FOX *et al.*, 1995) indicaram que o tempo de viagem é reduzido em até 4% para veículos equipados com *transponder*. Os testes em campo mostraram uma redução de até 8% do tempo de viagem, com um acréscimo marginal no tempo de viagem dos veículos não priorizados.

FENG *et al.* (2003) avaliaram a performance do SCOOT num corredor arterial em Salt Lake City, constituído de nove interseções, por meio de simulações numa interface com o micro-simulador VISSIM (SCOOT-VISSIM). Foram definidos três

cenários de controle: atuado-coordenado, controle SCOOT com e sem prioridade. Os resultados indicaram que a lógica de prioridade do SCOOT, quando comparada ao controle atuado-coordenado, reduz o atraso dos veículos não priorizados em 16%, ou 4,4 segundos por pessoa por interseção, e o atraso dos ônibus em 27%, ou 9,2 segundos por pessoa. Já o controle SCOOT sem prioridade, comparado ao controle atuado, reduz o atraso dos veículos não priorizados em 21%, ou 5,9 segundos por pessoa, e o atraso dos ônibus em 5%, ou 1,8 segundos por pessoa. Comparando os dois controles do SCOOT, com e sem prioridade, os resultados indicaram que a lógica de prioridade do SCOOT proporciona reduções no atraso médio dos ônibus em 5,2 segundos por pessoa, mas com pequeno acréscimo de 1,5 segundos de atraso sobre os veículos não priorizados.

2.5.6 Estudo de ZHANG (2001)

Neste tópico é descrito o estudo realizado por ZHANG (2001), que foi a principal referência no desenvolvimento desta pesquisa, por ser um trabalho recente sobre o tema e por tentar avaliar a integração da prioridade semafórica com o controle adaptativo do sistema SCOOT. No seu trabalho de dissertação, o autor avaliou, inicialmente, o potencial de benefícios de se usar um sistema de controle adaptativo de tráfego para controlar um corredor arterial de transporte e a integração da prioridade semafórica com o controle de tráfego adaptativo. Foi utilizado o *software* de micro-simulação INTEGRATION para avaliar vários cenários de prioridade com distinção do tipo da linha (regular ou expressa) e da rota (ao longo do corredor ou nas vias transversais) a que era dada prioridade. Foram também avaliados vários cenários de controle: um com controle de tempo fixo, outro com a representação aproximada do SCOOT, e três com os tempos otimizados pelo micro-simulador INTEGRATION.

Em cada cenário de prioridade, uma lógica bem simples foi aplicada. Os veículos eram detectados a 100m da interseção controlada. A lógica de prioridade providenciava extensões ou antecipações do verde para acomodar os veículos detectados. As extensões e antecipações eram determinadas usando incrementos de 5 segundos e com a restrição de manter o comprimento do ciclo. Restrições no tamanho dos tempos de verde mínimo e máximo foram também aplicadas para evitar largas extensões ou antecipações.

Segundo ZHANG (2001), os resultados deste estudo são limitados conforme as limitações do modelo de avaliação usado. Embora um grande esforço tenha sido feito

para considerar grande parte dos fatores envolvidos, não foi possível considerar todos os elementos que poderiam afetar os benefícios da prioridade semafórica ao longo do corredor. Por exemplo, uma lógica simplificada de prioridade semafórica foi utilizada. Lógicas mais complexas de prioridade condicional com base em critérios como a ocupação dos veículos do transporte público, o nível de congestionamento nas interseções controladas e o grau no qual os veículos aderem à sua programação, não pôde ser avaliado. O estudo também assumiu que os ônibus paravam em todos os pontos de parada ao longo do corredor, quando na realidade isto nem sempre ocorre.

As avaliações do controle adaptativo no SCOOT foram realizadas com uma representação aproximada das capacidades do sistema SCOOT. Os tempos observados no sistema SCOOT foram simulados com planos de tempos médios em intervalos de 15min. Na realidade, as mudanças dos tempos semafóricos no sistema SCOOT são realizadas a cada ciclo. Além disso, os fluxos simulados podiam não estar verdadeiramente associados aos fluxos que geraram os tempos semafóricos simulados. Devido à natureza de controle adaptativo do sistema SCOOT, uma melhor avaliação pode ser feita por meio de pesquisa em campo ou de uma modelagem mais detalhada do controle no corredor usando programações semafóricas e dados de fluxo coletados no mesmo dia.

Os resultados das simulações indicaram que é geralmente difícil para o controle adaptativo melhorar o controle de tempo fixo ótimo, especialmente quando os fluxos controlados demandam poucas mudanças ou para condições de tráfego congestionadas. A vantagem do controle adaptativo é a capacidade de ajustar os tempos semafóricos às condições de tráfego observadas. Quando existem poucas mudanças no tráfego, um controle em tempo fixo bem ajustado pode operar já próximo do ótimo. Quando a demanda de tráfego é elevada, todo o período de verde alocado para cada aproximação é utilizado, o que implica numa condição de controle em tempo fixo virtual. Em ambas as situações o controle adaptativo pode provocar algum benefício, devido a sua capacidade de reagir às flutuações do tráfego ciclo a ciclo, mas estes benefícios serão marginais.

Considerando os cenários de prioridade semafórica, os resultados mostraram que durante o pico manhã, as simulações claramente indicam que os benefícios são tipicamente obtidos com impactos negativos para o tráfego geral. Além disso, desde que circulem significativamente mais carros do que ônibus ao longo do corredor, os impactos negativos experimentados para o tráfego geral superam em muitos casos os

benefícios para os veículos do transporte público. Para o período do meio dia, devido à capacidade reserva da rede para acomodar os veículos do transporte público nas interseções controladas, nenhum impacto negativo foi obtido para o tráfego geral. Outro fator que contribuiu para os resultados no meio dia é que a frequência de ônibus é menor e, portanto, o número de ativações da prioridade é também menor causando menos distúrbios para a coordenação semafórica no corredor. Em interseções críticas com altos volumes de veículos nas vias transversais, foram observados acréscimos de atraso nestes movimentos, revelando a necessidade de uma lógica de prioridade que considere o nível de congestionamento nas interseções. Resultados semelhantes aos encontrados neste estudo são descritos no artigo publicado por DION *et al.* (2002) que avaliaram estratégias de extensão e antecipação no controle em tempo fixo usando o software de micro-simulação INTEGRATION no mesmo corredor arterial analisado por ZHANG (2001).

Segundo ZHANG (2001), é difícil identificar os impactos de alguns fatores sobre a prioridade semafórica analisando um corredor arterial. Assim, ele também estudou os impactos das condições do tráfego, da operação do transporte público e dos tempos semafóricos sobre os benefícios da prioridade semafórica numa interseção isolada modelada no INTEGRATION. Foram consideradas nove variáveis no estudo que incluem o instante que o ônibus chega no ciclo, os esquemas de estágios dos semáforos, a demanda de tráfego total na interseção, a distribuição da demanda nas aproximações, o comprimento de ciclo, as repartições de verde, a aproximação na qual o ônibus chega, os tempos de embarque/desembarque e a frequência dos ônibus. Os resultados encontrados nesta avaliação foram também apresentados no artigo publicado por RAKHA e ZHANG (2004). Neste estudo, portanto, as seguintes hipóteses foram confirmadas:

- Em geral os veículos do transporte público são beneficiados com a prioridade semafórica. Contudo, os benefícios dependem do instante de chegada dos veículos dentro do ciclo;
- Para demandas baixas, o impacto sobre a prioridade semafórica é marginal. Contudo, quando o nível de demanda aumenta, a prioridade para o transporte público acarreta em impactos negativos para o sistema;

- O impacto da prioridade semafórica sobre o sistema depende da frequência dos veículos do transporte público. Quanto mais alta a frequência, maior será o impacto negativo observado;
- A prioridade semafórica é sensível à distribuição da demanda de tráfego na interseção. Se os veículos priorizados chegam em aproximações carregadas, resulta em benefícios se a aproximação conflitante possui tráfego leve. Por outro lado, se o veículo priorizado chega numa aproximação de tráfego leve pode produzir impactos negativos consideráveis sobre o sistema quando a aproximação conflitante possui tráfego pesado;
- Os benefícios da prioridade semafórica são dependentes do estágio de chegada do veículo priorizado, principalmente se o tempo de ciclo é mantido constante na lógica de prioridade. Quando os veículos priorizados chegam durante o estágio inicial, os distúrbios no tráfego geral são mínimos, enquanto que a chegada dos veículos no último estágio produz consideráveis impactos negativos para o sistema;
- Os tempos de embarque/desembarque em paradas de ônibus próximas às interseções controladas podem ter impactos significativos sobre os benefícios da prioridade semafórica. Quanto maior o tempo de embarque/desembarque maior será o impacto negativo.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Considerando as estratégias de controle nos dois níveis de prioridade semafórica passiva e ativa, foi visto que ambas podem ser implementadas no controle em tempo fixo e em tempo real. Nesta pesquisa foram avaliados os métodos descritos de prioridade passiva em tempo fixo do TRANSYT e de priorização passiva em tempo real com ajustes de parâmetros do SCOOT para priorização de corredores arteriais. A prioridade ativa foi avaliada no controle em tempo real do SCOOT.

O sistema SCOOT é caracterizado como um sistema de controle de tráfego em tempo real, sendo um modelo de otimização semelhante ao do TRANSYT. Esse sistema é usado atualmente em Fortaleza no CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza). Vale destacar que o controle SCOOT é a principal estratégia de controle

do sistema CTAFOR, que também possibilita a implementação de controles em tempo fixo centralizado ou local (sem comunicação entre o computador central e os controladores am campo). Para que este sistema opere corretamente é necessária a calibração em campo de vários parâmetros básicos de controle (tempo de jornada do laço à linha de retenção, tempo máximo de desmanche da fila, descarga máxima dos veículos durante o verde, etc) e de outros parâmetros de ajuste fino (fator de importância para congestionamento, peso para frações de verde, peso para defasagem, defasagem fixa ou com variação limitada, etc). Com o uso dos parâmetros de ajuste fino, o técnico de tráfego tem várias possibilidades de operação, inclusive com a priorização de corredores arteriais em tempo real.

A lógica de prioridade ativa do sistema SCOOT é caracterizada como prioridade condicional: (1) o instante do ciclo em que o ônibus chega na interseção é previsto por meio de equipamentos de detecção e por um modelo que estima o tempo de percurso do ônibus desde o ponto de detecção até a linha de retenção do cruzamento, considerando o atraso devido à fila de veículos adiante; (2) as estratégias possíveis são extensão e antecipação do estágio de direito de passagem do ônibus; e (3) a prioridade é implementada somente quando uma condição de saturação da interseção e um limite de extensão são atendidos. Contudo, o modelo descrito de prioridade para ônibus do SCOOT não considera outros critérios descritos na literatura para implementação da prioridade como: providenciar prioridade somente para os veículos que estão atrasados em relação à sua programação, e com uma restrição no intervalo entre detecções. Estes critérios são importantes para permitir o controle da operação dos ônibus, melhorando a confiabilidade no serviço.

Os estudos sobre prioridade semafórica evidenciam que esta estratégia se apresenta como uma alternativa com potenciais benefícios para o transporte público em corredores arteriais. A prioridade passiva é pouco estudada e as principais estratégias avaliadas de prioridade ativa são a extensão e a antecipação do verde. Os métodos de avaliação geralmente usam modelos de simulação computacional para comparar vários cenários de controle com e sem prioridade. Contudo, os experimentos de campo são de essencial importância devido ao realismo dos resultados encontrados. Para comparação dos indicadores de desempenho podem ser realizadas análises de comparação entre médias e variâncias das variáveis.

Existem várias estratégias de prioridade semafórica que podem ser implementadas em corredores arteriais, cabe ao técnico de tráfego selecionar aquelas

que atendam as condições do tráfego e a operação do transporte público local. O ponto de partida para avaliar alternativas de prioridade semafórica é conhecer a realidade do local ou corredor arterial em estudo e identificar aspectos que podem influenciar a efetividade das estratégias de prioridade, em especial para saber qual a origem dos atrasos sofridos pelos ônibus (se devido aos semáforos, à operação de embarque/desembarque e à interação com os outros veículos em tráfego misto).

Os principais fatores identificados na literatura que influenciam ou restringem os benefícios das estratégias de prioridade semafórica são: o nível de saturação das interseções, a localização dos pontos de parada ao longo do corredor e a frequência dos ônibus. Com exceção da localização dos pontos de ônibus, os outros fatores variam com o período do dia para um corredor específico, sendo necessárias avaliações em períodos específicos do dia (picos e entrepicos do tráfego).

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DO CORREDOR ARTERIAL EM ESTUDO

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

Considerando que a pesquisa se propõe a avaliar estratégias de priorização semafórica em sistemas de controle centralizado por área (CTA), é descrito inicialmente o controle centralizado de Fortaleza, o qual foi o ambiente deste estudo de avaliação. Conforme MEDEIROS *et al.* (2001), o sistema de controle centralizado do tráfego em área da cidade de Fortaleza, denominado CTAFOR, foi implantado em dezembro de 2001, numa área de 55 km² da malha viária do referido município. Contudo, em 2003, o sistema sofreu uma expansão da sua área de controle, passando a controlar também os semáforos dos corredores das avenidas 13 de Maio, Jovita Feitosa e Engenheiro Santana Júnior.

O sistema CTAFOR é composto por três sub-sistemas distintos que atuam de forma integrada na gestão do tráfego urbano de Fortaleza. O primeiro sub-sistema, denominado sub-sistema CFTV (Circuito Fechado de TV), efetua o monitoramento remoto do tráfego por meio de 30 câmeras em pontos críticos da cidade. Já o segundo sub-sistema, denominado sub-sistema PMV (Painéis de Mensagens Variáveis), veicula informações aos usuários das vias, por meio de 20 painéis de mensagens variáveis instalados em campo. O terceiro sub-sistema, chamado de sub-sistema semafórico, é responsável pelo controle centralizado da operação de interseções semaforizadas por meio de *software* e equipamentos específicos (MEDEIROS *et al.*, 2001).

A seguir, a Figura 3.1 apresenta a localização dos painéis, câmeras e semáforos sob controle centralizado do sistema CTAFOR, que compõem os três sub-sistemas descritos anteriormente.



Figura 3.2: Funcionamento do sub-sistema SCOOT de controle semafórico do CTAFOR

Além disto, o sistema SCOOT também dispõe de dados sobre a demanda do tráfego e a temporização semafórica para os técnicos na central de controle, via computadores terminais. Por sua vez, com base nestes dados, os técnicos podem efetuar modificações nos parâmetros operacionais do sistema de controle semafórico. Estas alterações são enviadas para os controladores semafóricos em campo, em tempo real.

Segundo LOUREIRO *et al.* (2002b), o sub-sistema de controle semafórico pode trabalhar em três níveis de controle: local em tempo fixo, centralizado em tempo fixo e centralizado em tempo real. No primeiro, os controladores em campo executam planos semafóricos de tempo fixo (previamente estabelecidos) usando tabela horária. Este tipo de controle é implementado quando há falha de comunicação com a central ou necessidade de manutenção. Os dois últimos níveis funcionam a partir da central de controle, diferindo apenas na estratégia de controle semafórico adotada. O sistema também possibilita a implementação de várias estratégias de prioridade semafórica em tempo fixo e em tempo real.

Para este estudo, foi selecionado o trecho que corresponde ao corredor da Av. 13 de Maio (veja mapa de localização na Figura 3.3), que é um dos principais corredores arteriais de Fortaleza e um trecho representativo das características (físicas, operacionais e de condições do tráfego) que podem ser observadas na maior

parte da malha viária. Além disso, se apresenta também como importante eixo de transporte público por ônibus. Neste corredor os semáforos passaram a ser controlados pelo sistema SCOOT do CTAFOR em maio de 2003. Este capítulo, portanto, teve como objetivo caracterizar o corredor arterial escolhido e assim conhecer a realidade do ambiente de estudo.



Figura 3.3: Localização do corredor na malha viária de Fortaleza

3.2 VARIÁVEIS DE CARACTERIZAÇÃO

Segundo SKABARDONIS (2000) e ZHANG (2001), a escolha do tipo de estratégia de controle semafórico e o modo para implementá-la, assim como sua efetividade, dependem de vários fatores, dos quais se destacam:

- As características e a configuração da rede: semáforos em corredor ou em área, espaçados ou não espaçados, número de faixas nas vias, atividade de pedestres e tipo de controle de tráfego no local (controle de tempo fixo ou em tempo real);
- Padrão de tráfego da rede: volumes de tráfego, movimentos de conversão, variabilidade dos volumes de tráfego, nível de congestionamento, grau no qual o congestionamento do tráfego interfere na operação do transporte público e natureza da interferência;
- Operação do transporte público: volume de ônibus, tipos de linhas (expressas ou locais), rotas dos ônibus (conflitos de movimentos dos ônibus em interseções semafóricas), localização e *layout* dos pontos de parada, quantidade e variabilidade dos tempos de embarque/desembarque, além da existência de equipamentos de comunicação e monitoramento dos veículos.

SKABARDONIS (2000) também enfatiza que a efetividade das estratégias de prioridade semafórica depende do valor e da origem do atraso para os veículos do transporte público. Se o atraso devido ao controle semafórico é uma pequena fração do atraso total ao longo de toda a rota do ônibus, a efetividade de qualquer medida de prioridade semafórica será limitada. Portanto, observações em campo devem ser realizadas para quantificar as origens e a magnitude dos atrasos (em semáforos, na operação de embarque/desembarque e devido à interação entre os ônibus e automóveis em tráfego misto) com o objetivo de caracterizar a realidade e propor melhorias antes de desenvolver e implementar qualquer estratégia de prioridade semafórica.

O corredor de estudo foi, então, caracterizado quanto a: aspectos geométricos, operação semafórica, condições de tráfego e operação do transporte público. Os aspectos geométricos são as características espaciais da rede que foram obtidas de bases digitalizadas e de levantamentos em campo. A operação semafórica consiste no

tipo de controle e na programação a ser implementada para cada cenário de avaliação proposto. As condições de tráfego foram avaliadas a partir de dados de fluxos veiculares levantados em campo e de pesquisas de velocidade ao longo do corredor. A operação do transporte público foi caracterizada a partir de levantamentos em campo e tabelas horárias do órgão gestor do transporte público.

3.3 COLETA DE DADOS EM CAMPO

Para a caracterização do corredor de estudo e a avaliação das estratégias de controle, a coleta de dados em campo compreendeu os seguintes levantamentos:

- Contagem classificatória do tráfego veicular numa seção (das 07:00 às 19:00h) e contagem por movimento nas interseções ao longo do corredor em cada período de estudo. Esta informação teve como objetivo caracterizar a composição do tráfego veicular e a distribuição dos movimentos ao longo do corredor. Os dados de volumes foram também utilizados para atualização dos planos de tempo fixo;
- Coleta de tempo de percurso e tempo parado por automóvel em interseções pelo método do veículo teste médio. Desta coleta, foi também determinada a velocidade média operacional de automóvel;
- Coleta de tempo de percurso e tempo parado em semáforos e nos pontos de ônibus para veículos de transporte público. Os tempos médios parados em pontos de ônibus foram importantes para ajustar os tempos dos semáforos considerando os tempos perdidos na operação de embarque/desembarque. Deste levantamento, foi também obtida a velocidade média operacional de ônibus;
- Coleta de taxa de ocupação veicular de ônibus e automóvel. Este levantamento foi realizado pelo método visual, ou seja, pesquisadores em pontos predeterminados classificavam em níveis de ocupação os veículos que passavam na seção de coleta. Os dados de ocupação foram usados para determinar os pesos para os *links* compartilhados no método de prioridade passiva em tempo fixo do TRANSYT.

Para avaliação das estratégias de controle foram definidos sete cenários de avaliação (descritos no Capítulo 4), que foram aplicados na operação semafórica do

corredor. Os dados deste estudo de caracterização foram levantados ainda sob operação do Cenário Pré-CTAFOR, que é o controle semafórico antes da implantação do sistema SCOOT do CTAFOR. Neste cenário, não existiam laços detectores nas aproximações semafóricas para estimar o fluxo veicular e, portanto, os dados de volume foram coletados em campo. Vale ressaltar que as variáveis que podem variar conforme o tipo de controle, como os tempos de percurso de automóveis e de ônibus, foram coletadas em campo para cada cenário de operação semafórica, conforme será descrito no Capítulo 4.

Os cenários foram observados nos dias úteis da semana (terças, quartas e quintas) no entropico manhã (08:30 às 10:30h) e no pico da tarde (17:15 às 18:45h). Estes períodos do dia foram escolhidos por representarem situações de média e alta demanda no corredor, respectivamente.

Pesquisa de Tempo de Percurso

Os dados de tempo de percurso foram levantados em campo segundo o método do veículo teste médio (GARBER e HOEL, 2001). Esta técnica consiste em percorrer o corredor em um veículo teste, numa velocidade que, segundo o condutor, é a velocidade média da corrente de tráfego. Utiliza-se um cronômetro para anotar os instantes de passagem em cada seção de controle (pontos predefinidos) e outro para os tempos perdidos em cada trecho do corredor. Nos levantamentos, o número de percursos varia conforme a extensão do corredor e o período que é realizada a pesquisa. Para os ônibus, a coleta foi realizada embarcada, ou seja, pesquisadores realizaram as medidas dentro dos veículos. Para facilitar os levantamentos em campo, em vez de cronômetros, foram utilizados *PalmTops* (computadores de mão). Foi desenvolvido um programa na linguagem *PocketC* que possibilitou o registro, por um único pesquisador, dos instantes de passagem em cada seção de controle e dos tempos perdidos nos semáforos e em pontos de parada.

A determinação do tamanho da amostra para as pesquisas de tempo de percurso no corredor foi feita com base nos dados obtidos durante a operação do Cenário Pré-CTAFOR, sendo considerada como amostra piloto para os outros cenários. Este cenário foi observado durante seis dias úteis. Da amostra obtida foi determinada a quantidade de observações necessárias para os outros cenários de estudo, definindo-se assim o número de dias de coleta para os outros cenários. O tamanho da amostra foi calculado usando a seguinte equação:

$$n = \left(\frac{t_{(1-2\alpha, n'-1)} \cdot S}{e \cdot \bar{x}} \right)^2 \quad (3.1)$$

em que,

n = tamanho estimado da amostra;

n' = amostra piloto;

\bar{x} = tempo médio de percurso;

S = desvio padrão da amostra piloto;

$t_{(1-2\alpha, n'-1)}$ = estatística da distribuição *t-student* para um nível de significância α e $n'-1$ graus de liberdade;

e = erro relativo da estimativa do tempo médio de percurso.

O tamanho da amostra variou de 5 a 20 observações de tempos de percurso tanto de ônibus como de automóvel, para um nível de significância de 5% e um erro de 10%, tendo sido adotado três dias úteis de coleta com os recursos disponíveis (2 pesquisadores para as pesquisas embarcadas de ônibus e um automóvel com dois pesquisadores para a coleta dos tempos de percurso de automóveis).

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E OPERACIONAL

O corredor da Av. 13 de Maio representa um dos principais canais da ligação leste-oeste em Fortaleza, com volumes diários da ordem de 30.000 veículos e até 180 ônibus circulando por hora nos dois sentidos de tráfego.

3.4.1 Aspectos Geométricos

O trecho de análise possui uma extensão de 2,1km, estendendo-se desde a Av. Carapinima, a oeste, até a Rua Paula Rodrigues, próximo à Igreja Nossa Senhora de Fátima. O corredor apresenta um alinhamento horizontal praticamente retilíneo, com duas faixas de tráfego (cada uma com largura igual a 3,6m) por sentido, separadas por canteiro central (com largura igual a 1,0m). As interseções semaforizadas são pouco espaçadas, com distância entre estas interseções em média de 230m. O maior espaçamento entre interseções é em torno de 400m e o menor espaçamento é em torno de 90m (Veja Figura 3.4). Quanto ao alinhamento vertical, o

corredor é praticamente plano. Isto é favorável aos veículos de transporte público, já que greides elevados podem causar algum impacto na efetividade da priorização semafórica, considerando que os veículos de transporte público apresentam uma maior dificuldade para acelerar em trechos ascendentes do corredor.

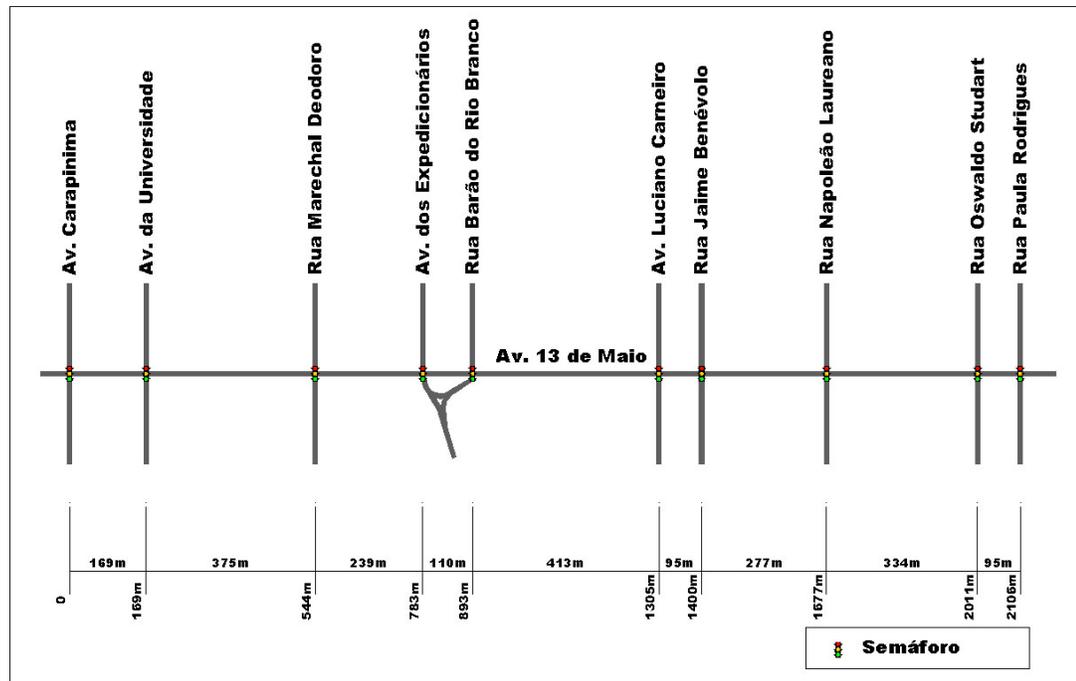


Figura 3.4: Espaçamentos entre interseções semafóricas da Av. 13 de Maio

3.4.2 Controle Semafórico

O trecho de análise contém 10 interseções semafóricas. O movimento de tráfego no corredor de estudo, antes da implantação do sistema SCOOT em maio de 2003, era controlado pela utilização de equipamentos eletro-mecânicos com apenas um plano semafórico, sem qualquer coordenação. Os ciclos semafóricos eram diferentes em grupos de interseções próximas variando de 68s a 105s. Existiam dois controladores eletrônicos: nos cruzamentos com a Rua Paula Rodrigues e com a Rua Oswaldo Studart. Os controladores eletrônicos permitiam a utilização de até quatro planos de tempo fixo, mas estes semáforos operavam com um plano único durante todo o dia. Após a centralização do controle de suas interseções, o corredor vem operando exclusivamente em tempo real.

Foram elaborados oito planos de tempo fixo no programa TRANSYT com dados atuais de fluxo veicular para servirem como planos reserva do sistema SCOOT, em caso de perda de comunicação da central de controle com os controladores em campo. Nestes planos os ciclos variam de 80s a 96s nos entrepicos e de 104s a 112s nos picos.

Quanto à configuração dos estágios, todos os cruzamentos operam com dois estágios de movimento veicular, sendo que os cruzamentos com a Rua Paula Rodrigues e com a Rua Oswaldo Studart possuem tempos especiais para travessia de pedestres, que são executados quando há uma solicitação de pedestres em equipamentos (botoeiras) localizados nos pontos de travessia. O cruzamento com a Rua Oswaldo Studart também possui, como terceiro estágio de operação, um estágio para conversão à esquerda para os veículos da aproximação LO. Com a atualização da programação semafórica e a implantação do controle SCOOT, houve também a implantação de fase de pedestres no cruzamento com a Av. da Universidade e numa seção entre os cruzamentos com a Av. dos Expedicionários e com a Rua Marechal Deodoro. Vale ainda destacar que nos pontos descritos de travessia de pedestres, houve também um trabalho de conscientização dos usuários sobre a importância do uso da botoeira, o que pode ter acarretado num maior acionamento deste dispositivo, reduzindo a capacidade viária.

3.4.3 Condições do Tráfego

Os gráficos apresentados na Figura 3.5 mostram o resultado da contagem volumétrica realizada entre 07:00 e 19:00h numa seção entre a Av. dos Expedicionários e a Rua Marechal Deodoro. O perfil de variação do volume de tráfego no sentido oeste-leste (OL) apresenta um padrão aproximadamente uniforme, com pequenas variações. Já no sentido leste-oeste (LO), observa-se um ápice do tráfego no período de 18:00 às 19:00 horas. Outro fato é que, ao longo do dia, o sentido LO é sempre mais carregado que o sentido OL. Os volumes de tráfego variaram de 1000 veic/h a 1600 veic/h no sentido LO, 10% a 23% superiores aos do sentido OL, que variaram de 900 veic/h a 1300 veic/h. O elevado volume de tráfego (1600 veículos em média) observado no sentido LO durante o período de 18:00 às 19:00 horas provoca filas excessivas, principalmente em cruzamentos críticos, acarretando em baixas velocidades operacionais dos veículos que circulam no corredor.

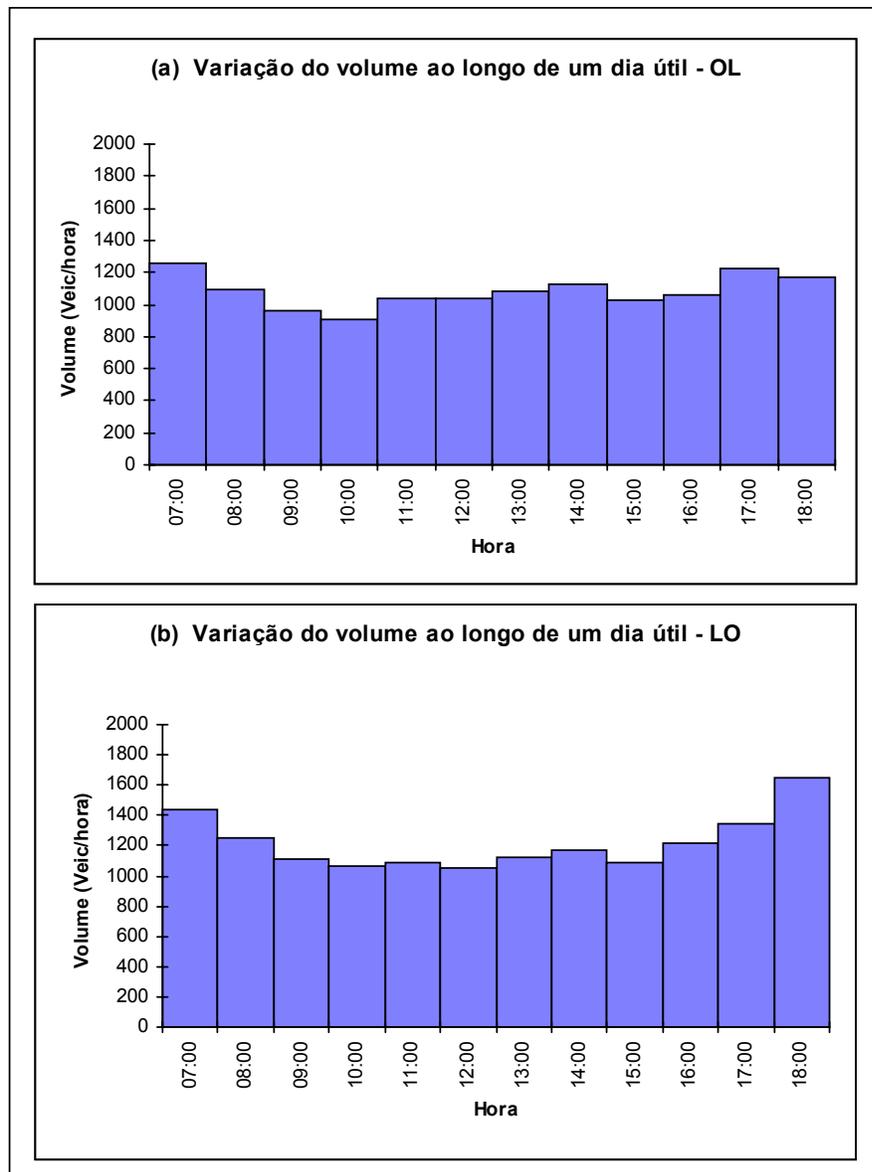


Figura 3.5: Variação diária do volume horário por sentido de tráfego numa seção entre a Av dos Expedicionários e a Rua Marechal Deodoro

As Figuras 3.6a e 3.6b apresentam os níveis de saturação estimados pelo sistema SCOOT durante a operação do cenário em tempo real em três dias úteis. No trecho entre as avenidas dos Expedicionários e Carapinima, os níveis de saturação nas aproximações das vias transversais permaneceram os mesmos comparando os dois períodos de estudo, variando entre 80 a 120%. Este trecho, portanto, apresenta os conflitos críticos com as vias transversais, principalmente com a Av. da Universidade e a Av. dos Expedicionários. No trecho entre a Rua Br. do Rio Branco e a Rua Paula Rodrigues, observa-se uma maior variação nos níveis saturação das

aproximações semaforizadas (no corredor e nas vias transversais), comparando os dois períodos de estudo.

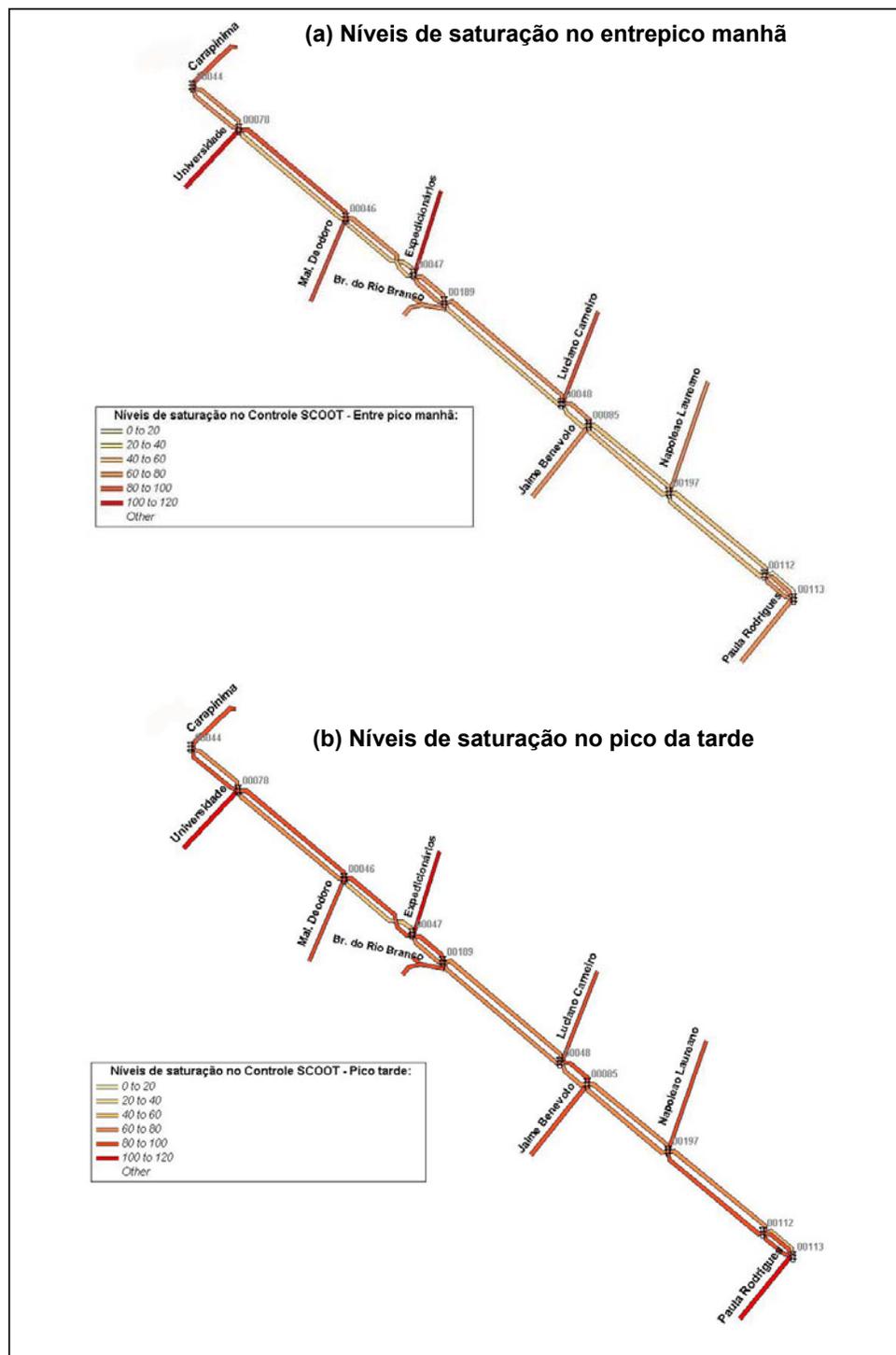


Figura 3.6: Níveis de saturação no Controle SCOOT

Resultados das Contagens Volumétricas

As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam os fluxos de tráfego médios no corredor e nas vias transversais obtidos nas pesquisas de contagem veicular em interseções. No sentido LO, observou-se uma grande quantidade de veículos que viram à esquerda no cruzamento com a Rua Oswaldo Studart (cerca de 50% no entrepico e 40% no pico do volume da aproximação) causando um gargalo na aproximação leste deste cruzamento, que é mais intensificado no período de pico da tarde. O sentido LO é o que apresenta os maiores fluxos veiculares em toda a extensão do corredor no entrepico manhã e em quase toda a extensão no pico da tarde.

Quanto aos volumes de tráfego nas vias transversais, foi observado que uma maior proporção de veículos cruzam o corredor, destacando-se as seguintes vias com fluxos veiculares elevados e níveis de saturação acima de 90%: Av. da Universidade e a Av. dos Expedicionários. Os cruzamentos com estas avenidas são, portanto, os principais pontos de conflito do tráfego no corredor. Nos gráficos da Figura 3.8 são apresentados também os percentuais de conversão dos movimentos de veículos das vias transversais. Observa-se, nos dois períodos de estudo, uma maior proporção de conversões adentrando o corredor na via de sentido OL. O sentido LO, em quase toda a extensão do corredor, é praticamente de passagem, sofrendo pouca alimentação das vias transversais. Os dois períodos de estudo também apresentaram percentuais de conversão muito próximos.

Resultados da Pesquisa de Tempo de Percurso de Automóvel

A Tabela 3.1 mostra um resumo dos resultados das pesquisas de tempo de percurso de automóvel durante o cenário Pré-CTAFOR. Para a realização destas pesquisas, foram definidas as interseções semaforicas como seções de controle. Entende-se como seção de controle o ponto da via onde o instante de passagem em cada percurso, existindo ou não atraso, foi registrado. O número de observações que foram coletadas permitiu que fosse testada a normalidade da variável tempo de percurso de automóvel por sentido de tráfego. A hipótese de normalidade desta variável foi confirmada para os dois períodos de estudo, a partir de testes de aderência do tipo qui-quadrado para um nível de significância de 5%. Portanto, o tempo de percurso de automóvel no corredor da Av. 13 de Maio é uma variável aleatória que segue uma distribuição normal.

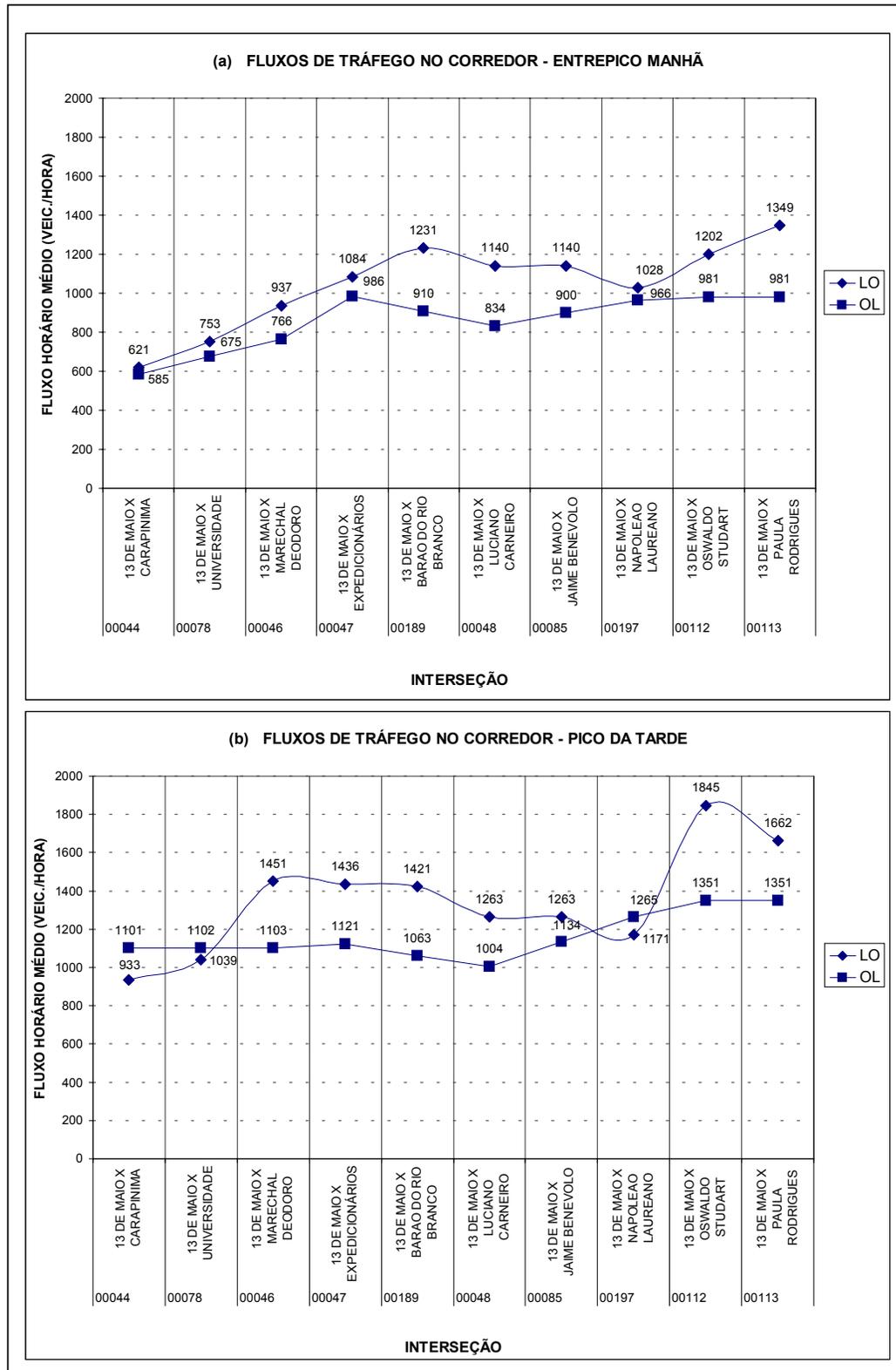


Figura 3.7: Fluxos médios de tráfego ao longo do corredor

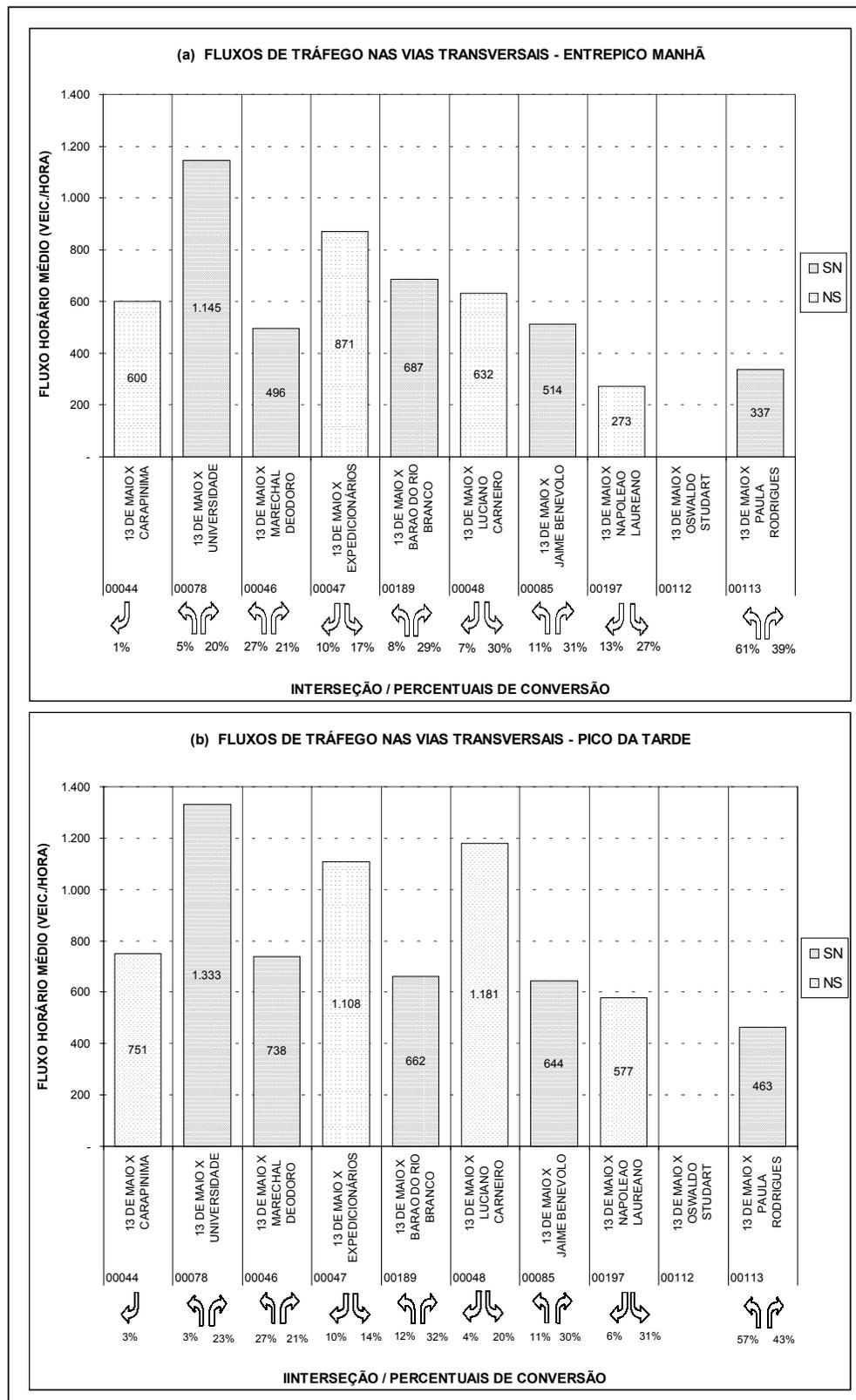


Figura 3.8: Fluxos médios de tráfego nas vias transversais do corredor

Tabela 3.1: Resultados das pesquisas de tempo de percurso de automóvel

Sentido	Período	Tamanho da Amostra	Extensão (km)	Tempo de Percurso (mm:ss)	Tempo Parado em Semáforo (s)	Tempo parado %		Velocidade média (km/h)
						Semáforo	Outros	
OL	Entrepico manhã	34	2,10	05:01	13,2	39,4%	3,8%	25
	Pico da tarde	23		06:21	21,9	51,8%	1,0%	20
LO	Entrepico manhã	34	2,10	05:09	14,0	40,8%	1,9%	24
	Pico da tarde	22		08:09	31,5	57,9%	3,2%	16

Observa-se na Tabela 3.1, que a proporção média do tempo de percurso parado nos semáforos ficou em torno de 40% em ambos os sentidos no entropico manhã, 50% no sentido OL e 58% no sentido LO para o pico da tarde. Esta elevada proporção de tempo parado em semáforo no período da tarde, principalmente no sentido LO, se deve em parte ao aumento significativo de volume neste sentido de tráfego. Este efeito é confirmado pela baixa velocidade média para percorrer o corredor no sentido LO no pico da tarde: 16 km/h. O tempo parado médio em semáforo ficou em torno de 14 segundos no entropico manhã, em ambos sentidos de tráfego, e no pico da tarde ficou em torno de 22 segundos no sentido OL e 32 segundos no sentido LO.

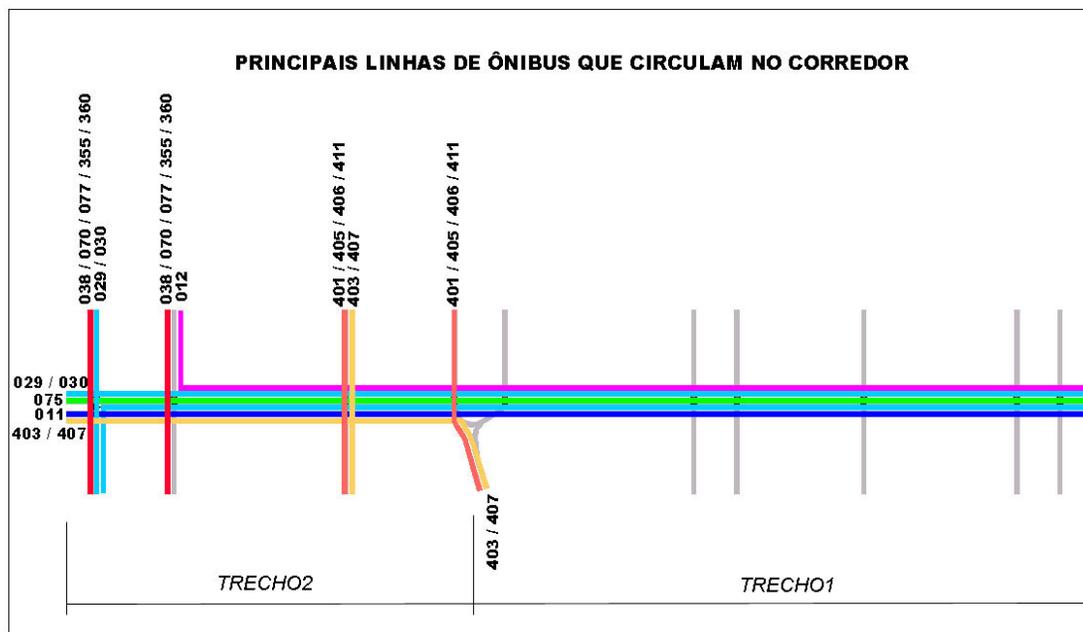
3.4.4 Operação do Transporte Público

Os dados da operação do transporte público incluem: descrição das linhas que servem o corredor de estudo, a localização dos pontos de parada, frequências das linhas estimadas a partir de tabelas horárias, medidas de ocupação veicular em campo e do tempo médio parado em pontos de ônibus.

As principais linhas que servem o corredor estão listadas na Tabela 3.2 e as rotas correspondentes estão ilustradas na Figura 3.9. Ao lado de cada rota são apresentados os códigos das linhas correspondentes. Observando as linhas que trafegam no corredor, pode-se identificar vias transversais onde é possível a prioridade semaforica conflitante devido ao elevado número de linhas que atravessam ou adentram o corredor, destacando-se a Av. da Universidade e a Av. Carapinima.

Tabela 3.2: Principais linhas que servem o corredor em estudo

Sentido	Linhas	Descrição	Volume médio diário de passageiros	Headway no Entrepico (min)	Headway no Pico (min)
Corredor	075	Campus do Pici / Unifor	14300	7	6
	011	Circular 1	9700	6	4
	012	Circular 2	9200	6	4
	029	Parangaba / Náutico	10300	10	6
	030	Siqueira Papicu/13 de Maio	11500	10	5
Transversais	038	Parangaba / Papicu	12400	8	4
	070	Clube de Regatas / Parangaba	7000	15	10
	077	Parangaba / Mucuripe	9800	12	7
	355	Siqueira / José Bastos	8000	5	4
	360	Siqueira / João Pessoa	9800	6	4
	401	Montese / Parangaba	10200	5	4
	403	Itaoca / Expedicionários	6600	10	6
	405	Pq. Dois Irmão / Expedicionários	7500	8	6
	406	Pantanal / Expedicionários	6500	11	9
	407	José Walter / Expedicionários	5000	11	9
	411	Montese / Lagoa	5000	10	7

**Figura 3.9:** Principais linhas que servem o corredor de estudo

O corredor da Av. 13 de Maio apresenta, portanto, dois trechos com características diferentes em relação à operação de ônibus nas vias transversais. No

Trecho 2, da Figura 3.9, o corredor é cortado por outros corredores importantes de transporte onde circulam várias linhas de ônibus. Já no Trecho 1, o tráfego das vias transversais é menos intenso e composto apenas de automóveis. Desta forma, os estudos de avaliação foram realizados separadamente para estes dois trechos.

Os pontos de parada de ônibus no corredor não possuem baias e durante a operação de embarque/desembarque o movimento dos outros veículos na faixa direita de circulação é interrompido. A Figura 3.10 mostra a localização dos pontos de parada ao longo do corredor.

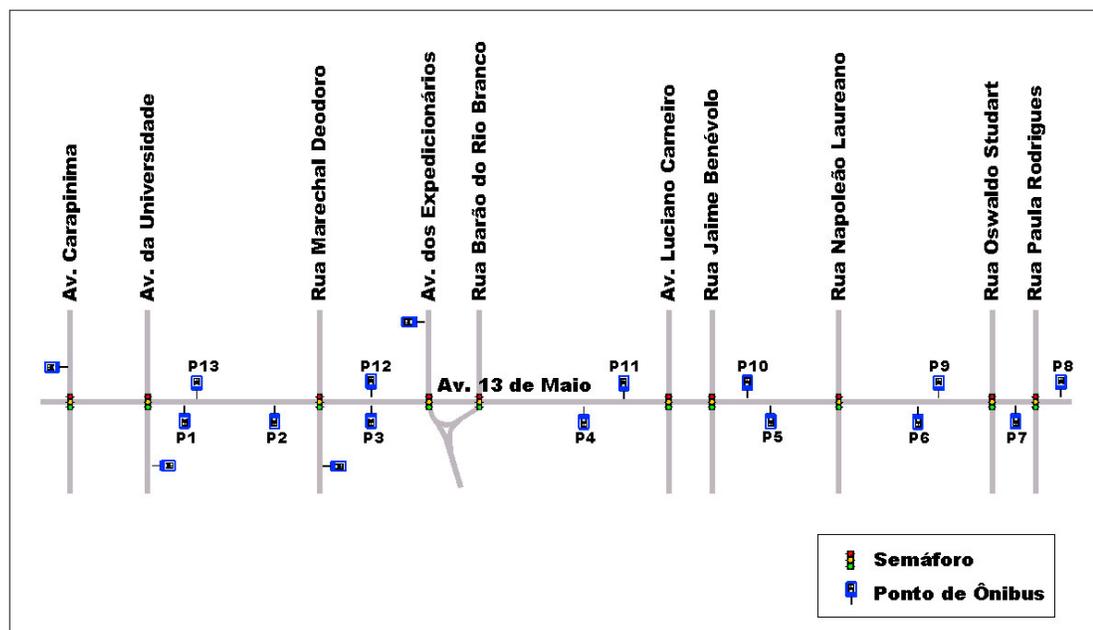


Figura 3.10: Localização dos pontos de parada de ônibus

A Tabela 3.3 apresenta os resultados das pesquisas de taxa de ocupação veicular e os correspondentes fluxos de ônibus e de automóveis nos períodos de estudo. A pesquisa de ocupação de ônibus foi realizada em quatro aproximações do corredor (duas no sentido LO e duas no sentido OL) e em quatro aproximações das vias transversais, sendo duas no sentido norte-sul (NS) e duas no sentido sul-norte (SN). Os levantamentos foram realizados nos cruzamentos com as avenidas Expedicionários, Marechal Deodoro, Universidade e Carapinima. A pesquisa de ocupação de automóvel foi realizada numa seção do corredor para ambos os sentidos de tráfego, sendo adotado o valor médio de 1,5 passageiros por veículo para as vias transversais. Os fluxos veiculares apresentados na Tabela 3.3 correspondem às

médias por sentido de todas as aproximações observadas no Trecho 2. Os fluxos de ônibus foram estimados a partir dos *headways* (intervalo entre ônibus) das tabelas horárias obtidas junto ao órgão gestor.

Tabela 3.3: Taxas de ocupação de automóvel e de ônibus

Sentido	Período	Automóvel			Ônibus		
		Ocupação Média (pass./veic)	Fluxo Médio (veic./h)	Total de usuários / hora	Ocupação Média (pass./veic.)	Fluxo Médio (ônibus/h)	Total de usuários / hora
OL	Entrepico manhã	1,5	700	1050	20	50	1000
	Pico da tarde	1,5	1030	1545	30	70	2100
LO	Entrepico manhã	1,5	805	1208	20	45	900
	Pico da tarde	1,6	1140	1824	50	60	3000
Transversais - SN	Entrepico manhã	1,5	700	1050	26	100	2600
	Pico da tarde	1,5	850	1275	12	150	1800
Transversais - NS	Entrepico manhã	1,5	570	855	14	130	1820
	Pico da tarde	1,5	720	1080	40	180	7200

Na Tabela 3.3 é também apresentado o volume horário estimado de usuários de automóveis e de ônibus nos dois períodos de estudo. Pelos dados, estima-se que cerca de 62% dos movimentos de pessoas ao longo do corredor e das vias transversais sejam realizados por ônibus. Nas aproximações das vias transversais do Trecho 2 foi estimado em torno de 70% de usuários usando o ônibus e nas aproximações ao longo do corredor foi estimado em torno de 50% de usuários do transporte público. Isto, para uma proporção de ônibus em torno de 6% do tráfego veicular nas aproximações do corredor e de aproximadamente 14% nas aproximações transversais do Trecho 2. Este fato confirma a hipótese de que este corredor é um importante eixo de transporte público no município de Fortaleza.

Resultados das Pesquisas de Tempo de Percurso de Ônibus

As pesquisas de tempo de percurso foram realizadas de forma embarcada nas linhas 075 (Campus do Pici / Unifor), 011 (Circular 1) e 012 (Circular 2). Foram definidas as interseções semaforizadas e os pontos de ônibus como seções de controle. Desta forma, durante os levantamentos, foram registrados os tempos parados em

semáforos e nos pontos de ônibus. Os valores médios para o Cenário Pré-CTAFOR são apresentados na Tabela 3.4. Da amostra obtida foi testada a normalidade da variável tempo de percurso de ônibus por sentido de tráfego. A hipótese de normalidade desta variável foi confirmada para os dois períodos de estudo, a partir de testes de aderência do tipo qui-quadrado para um nível de significância de 5%. Portanto, o tempo de percurso de ônibus por sentido de tráfego no corredor da Av. 13 de Maio é uma variável que segue uma distribuição normal.

Tabela 3.4: Resultados das pesquisas de tempo de percurso de ônibus

Sentido	Período	Tamanho da Amostra	Extensão (km)	Tempo de Percurso (mm:ss)	Tempo Parado em Semáforo (s)	Tempo parado %			Velocidade média (km/h)
						Parada	Semáforo	Outros	
OL	Entrepico manhã	38	1,93	07:10	14,1	25,4%	26,3%	2,3%	16
	Pico da tarde	27		07:48	17,6	25,6%	30,1%	2,4%	15
LO	Entrepico manhã	38	1,97	07:04	18,3	15,2%	34,6%	1,8%	17
	Pico da tarde	28		09:09	25,3	16,5%	36,8%	7,6%	13

Observa-se na Tabela 3.4 que a proporção média do tempo de percurso parado por ônibus nos semáforos ficou em torno de 30% no sentido OL e em torno de 35% no sentido LO. O tempo médio parado em semáforo no entropico manhã ficou em torno de 14 segundos no sentido OL e 18 segundos no sentido LO, e no pico da tarde ficou em torno de 18 segundos no sentido OL e 25 segundos no sentido LO. Estes resultados mostram que existe uma diferença de desempenho operacional da operação dos ônibus entre os dois sentidos de tráfego no cenário Pré-CTAFOR.

O percentual de ônibus que não param em cada ponto de parada e a variabilidade do tempo parado nos pontos de ônibus determinam o grau de incerteza na previsão do instante com que os ônibus chegam nas interseções. Estes resultados estão apresentados na Tabela 3.5, na qual se observa uma alta dispersão da variável tempo parado no ponto de ônibus em ambos os sentidos do corredor, e em muitos pontos a proporção de veículos que não param foi maior que 10%. Foi testada a hipótese de normalidade desta variável, concluindo-se haver evidências de que o tempo parado em pontos de ônibus segue uma distribuição normal, ao nível de significância de 5%.

Tabela 3.5: Tempo parado nos pontos de ônibus

Código	Período	Tempo médio parado (seg.)	Desvio (seg.)	Coefficiente de Variação	Número de Observações	Proporção de veículos que não param
P1	Entrepico manhã	28	12	42%	37	0%
	Pico da tarde	25	9	36%	27	0%
P2	Entrepico manhã	12	7	53%	38	16%
	Pico da tarde	15	8	54%	27	15%
P3	Entrepico manhã	16	9	56%	38	11%
	Pico da tarde	17	9	51%	27	11%
P4	Entrepico manhã	14	7	49%	37	8%
	Pico da tarde	12	8	66%	27	15%
P5	Entrepico manhã	15	8	50%	38	5%
	Pico da tarde	19	11	56%	27	4%
P6	Entrepico manhã	8	7	90%	37	35%
	Pico da tarde	11	7	57%	27	15%
P7	Entrepico manhã	16	7	42%	38	3%
	Pico da tarde	19	10	53%	27	0%
P8	Entrepico manhã	17	7	42%	38	5%
	Pico da tarde	26	11	39%	31	0%
P9	Entrepico manhã	4	5	125%	38	55%
	Pico da tarde	13	7	56%	28	18%
P10	Entrepico manhã	18	10	54%	38	8%
	Pico da tarde	19	12	65%	28	11%
P11	Entrepico manhã	11	8	72%	38	26%
	Pico da tarde	15	7	50%	28	14%
P12	Entrepico manhã	15	7	48%	38	5%
	Pico da tarde	25	15	61%	28	7%
P13	Entrepico manhã	17	16	93%	37	24%
	Pico da tarde	19	16	84%	28	29%

Os intervalos de 95% de confiança da variável tempo de percurso foram calculados e são apresentados na forma de velocidades médias de percurso no gráfico da Figura 3.11. As velocidades dos automóveis foram em média superiores às dos ônibus em 53% (OL) e 45% (LO) para o entrepico manhã; e 34% (OL) e 24% (LO) para o pico da tarde. À medida que aumenta a demanda de tráfego, diminuem as velocidades médias e aumenta a interação entre ônibus e automóveis, aproximando o desempenho destes dois modos. Observa-se também, na Figura 3.11, que não há

evidências de diferença significativa de desempenho operacional de ônibus no sentido OL, comparando os dois períodos de estudo.

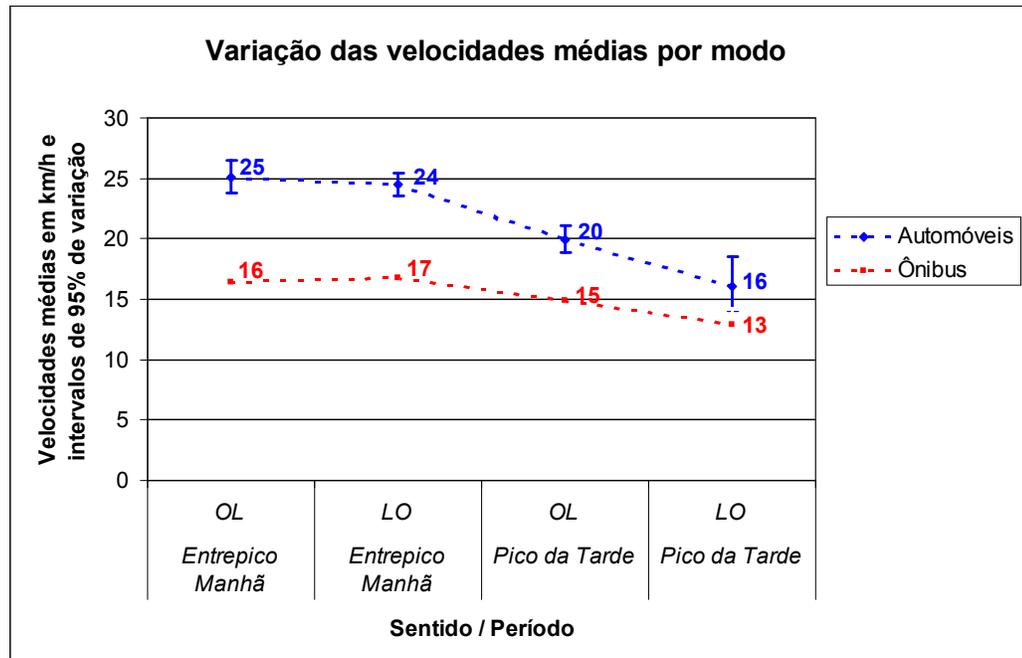


Figura 3.11: Variação das velocidades médias de percurso

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os aspectos considerados na caracterização do corredor arterial como etapa inicial do estudo de avaliação. A motivação deste estudo de pesquisa foi a adoção de uma tecnologia de controle semafórico centralizado em tempo real para a cidade de Fortaleza, o sistema SCOOT, assim como a recém implantação deste controle no corredor da Av. 13 de Maio, onde será implementada com este sistema a prioridade semafórica para ônibus. Desta forma, foi necessário um estudo de caracterização do corredor de estudo com o intuito de conhecer a sua realidade operacional.

O corredor apresenta dois trechos distintos em relação ao comportamento do tráfego. O trecho entre a Av. dos Expedicionários e a Av. Carapinima foi caracterizado como crítico em relação ao conflito com o movimento das vias transversais, apresentando níveis de saturação observados do sistema SCOOT acima de 80% nas

aproximações transversais no entropico manhã e no pico da tarde. Os corredores transversais que cruzam a Av. 13 de Maio neste trecho também são importantes eixos de transporte público por ônibus. Já no trecho entre a Rua Br. do Rio Branco e a Rua Paula Rodrigues, o tráfego das vias transversais é menos intenso e composto apenas de automóveis. Considerando estas características, o corredor de estudo foi separado neste dois trechos de análise no estudo de avaliação.

As pesquisas de tempo de percurso de automóveis durante a operação do controle antes da implantação do CTAFOR, mostraram que as velocidades médias de automóvel são geralmente baixas ao longo do corredor com valores em torno de 25 km/h (OL) e 24 km/h (LO) no entropico manhã, e 20 km/h (OL) e 16 km/h (LO) no pico da tarde. Valores nesta ordem de magnitude foram observados em vários corredores de Fortaleza na operação em tempo real do SCOOT. Conforme o estudo de PEREIRA NETO *et al.* (2003), o nível de serviço da operação do tráfego veicular na Av. 13 de Maio é classificado como bom no entropico manhã e, no pico da tarde, como regular no sentido OL e ruim no sentido LO. O sentido LO no pico da tarde foi considerado como o mais crítico do corredor, devido em parte ao aumento da demanda de veículos neste período.

O transporte público por ônibus representa um papel importante no corredor, com cerca de 62% do movimento de pessoas. Contudo, as velocidades médias operacionais dos ônibus obtidas em campo foram consideradas baixas: 16 km/h (OL) e 17 km/h (LO) no entropico manhã; e 15 km/h (OL) e 13 km/h (LO) no pico da tarde. O atraso dos ônibus em interseções semaforicas na operação do Cenário Pré-CTAFOR representou uma parcela considerável do seu tempo de percurso, variando entre 26 e 35% nos dois períodos de estudo. Resultados similares foram encontrados na literatura.

Os tempos parados em pontos de ônibus levantados em campo, em geral, apresentam uma alta dispersão, não sendo indicado, conforme a literatura, aplicar estratégias de prioridade passiva com progressão para a velocidade média dos ônibus e em função dos tempos médios parados em pontos de parada. Contudo, devido ao elevado número de linhas que atravessam ou trafegam no corredor, foram testados na operação semaforica do corredor cenários com estratégias de prioridade passiva em tempo fixo modelada no TRANSYT e em tempo real com os parâmetros do modelo SCOOT. Na literatura foi visto também que a prioridade ativa no controle em tempo real pode reduzir ou eliminar a incerteza na previsão de chegada dos ônibus nas

interseções devido à variação dos tempos parados durante a operação de embarque/desembarque. No entanto, a prioridade ativa pode não ser capaz de reduzir os tempos de viagem dos ônibus ao longo do corredor, mas pode melhorar a pontualidade e a regularidade do serviço, desde que a prioridade seja condicional com base na aderência à programação e/ou intervalo entre detecções dos veículos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

A malha viária de Fortaleza é constituída atualmente por 467 semáforos que operam de forma isolada, em pequenos grupos, em corredores arteriais ou em áreas de coordenação. Os semáforos que não operam sob o controle SCOOT, em sua maioria, operam com controladores monoplanos, possibilitando a implementação de uma única programação semafórica ao longo do dia. Muitos destes semáforos, inclusive, operam em eixos importantes de transporte com demanda considerável de usuários de ônibus. Nestes corredores, portanto, a atualização do controle significa não somente a implementação de um plano único para atender ao período mais crítico do dia, mas também uma mudança na tecnologia de controle para possibilitar uma adequação da operação semafórica às mudanças de volume veicular que ocorrem ao longo de um dia.

Neste contexto, o sistema SCOOT do CTAFOR possui capacidade física para ser expandido e controlar toda a rede semafórica da malha viária de Fortaleza. Entretanto, nas áreas que já operam sob o controle SCOOT, é preciso avaliar quais são os ganhos do controle em tempo real, comparando-o a outras alternativas de controle em tempo fixo atualizado. Além disso, sabendo que a maior parte das viagens realizadas pelo transporte motorizado na malha viária de Fortaleza utiliza o transporte público por ônibus, é preciso avaliar alternativas de controle com priorização semafórica para ônibus. Assim, esta pesquisa considerou uma seqüência de evolução na operação semafórica de um corredor arterial, como segue:

- a) Atualização dos planos semafóricos em tempo fixo (ciclo, verde e defasagens);
- b) Programação com priorização passiva para ônibus em tempo fixo;
- c) Controle em tempo real;

- d) Priorização passiva no controle em tempo real;
- e) Priorização ativa em tempo real.

A atualização dos planos semaforicos em tempo fixo significou uma mudança na tecnologia de controle que permitiu a coordenação de todos os semaforos do corredor e a programação de vários planos de tempo fixo, conforme a variação do volume veicular observada ao longo de um dia útil.

Na seqüência apresentada acima, algumas questões de pesquisa foram formuladas, relativas ao ganho de desempenho operacional (redução nas medidas de desempenho de tempo de percurso, de atraso veicular e de número de paradas) com implementação das estratégias de controle semaforico:

- Quais os ganhos de desempenho operacional com a atualização dos planos semaforicos em tempo fixo de um corredor arterial?
- Quais os ganhos de desempenho operacional com a implementação de uma estratégia de controle com prioridade para ônibus do tipo passiva no controle de tempo fixo?
- Quais os ganhos de desempenho operacional com a implantação do controle em tempo real num corredor arterial?
- Quais os ganhos de desempenho operacional com a implementação de uma estratégia de controle com prioridade para ônibus do tipo passiva no controle em tempo real?
- Quais os ganhos de desempenho operacional com a implementação de uma estratégia de controle com prioridade para ônibus do tipo ativa no controle em tempo real?
- Qual a melhor estratégia de controle semaforico para um corredor arterial, com base em indicadores de desempenho de atraso, número de paradas e tempo de percurso?

As cinco primeiras perguntas acima fazem parte dos objetivos específicos do estudo de caso. O último questionamento é o foco principal do estudo proposto e é o que se busca responder num estudo como este. Portanto, seguindo a seqüência

apresentada, e buscando responder às perguntas acima, o estudo de avaliação das estratégias de controle semafórico foi dividido em duas etapas:

- Etapa I: Avaliação dos ganhos de desempenho operacional quanto à atualização dos planos semafóricos, à priorização passiva em tempo fixo e ao controle em tempo real;
- Etapa II: Avaliação dos ganhos de desempenho operacional quanto à priorização passiva e a priorização ativa em tempo real.

As Etapas I e II do estudo correspondem a duas situações: (I) um corredor arterial possui uma operação semafórica desatualizada ao longo do dia e se deseja avaliar qual a melhor opção para melhorar o desempenho do tráfego e reduzir congestionamentos. Existe também uma grande demanda por transporte público neste corredor, sendo adequada uma operação semafórica com prioridade para ônibus. Portanto, deve-se decidir entre: manter a mesma tecnologia de controle semafórico e atualizar os planos de tempo fixo; atualizar os planos com prioridade para o transporte público; ou implantar uma tecnologia de controle em tempo real; (II) o mesmo corredor arterial já opera com um controle em tempo real e se deseja avaliar qual o melhor sistema de prioridade semafórica para ônibus a ser implementado, do tipo passiva ou ativa.

Neste capítulo é descrito o método utilizado no corredor teste de Fortaleza para os estudos de avaliação dos cenários de controle semafórico, em especial para avaliar o desempenho operacional das estratégias de prioridade semafórica do tipo passiva e ativa consideradas nesta pesquisa.

4.2 CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO

As estratégias de priorização foram avaliadas na operação em tempo fixo e em tempo real contemplando os seguintes cenários de controle semafórico:

- Cenário 1 – Pré-CTAFOR: este cenário corresponde à programação em tempo fixo convencional antes da implantação do CTAFOR, com planos únicos, não coordenados;
- Cenário 2 – Tempo Fixo Bem Ajustado (TFBA): este cenário corresponde à programação dos semáforos em tempo fixo, sem

nenhuma prioridade, com os tempos semaforicos calculados no *TRANSYT* utilizando os dados das contagens volumétricas;

- Cenário 3 – Priorização Passiva em Tempo Fixo (PPTF): neste cenário as configurações semaforicas para todos os semaforos da rede foram calculadas no *TRANSYT* pelo método *BUS TRANSYT*;
- Cenário 4 – Controle SCOOT sem Prioridade: tempos semaforicos gerados pelo controle adaptativo do sistema SCOOT, sem prioridade para ônibus;
- Cenário 5 – Priorização Passiva em Tempo Real (PPTR): este cenário corresponde ao controle em tempo real do SCOOT com uma progressão ajustada por parâmetros de defasagem para se adequar ao comportamento dos ônibus na corrente de tráfego;
- Cenário 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor (PATR1): neste cenário foi simulada a lógica de prioridade semaforica ativa na programação em tempo real otimizada pelo SCOOT, com prioridade para ônibus nas aproximações do corredor;
- Cenário 7 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais (PATR2): neste cenário foi simulada a lógica de prioridade semaforica ativa na programação em tempo real otimizada pelo SCOOT, com prioridade para ônibus nas aproximações do corredor e das vias transversais.

Os cenários foram observados em dias úteis da semana (terças, quartas e quintas) no entropico manhã (08:30 às 10:30h) e no pico da tarde (17:15 às 18:45h). Estes períodos do dia foram escolhidos por representarem situações de média e alta demanda no corredor, respectivamente. Desta forma, foi possível avaliar o efeito sobre o tráfego em condições de média e de alta saturação.

O fluxograma da Figura 4.1 apresenta a seqüência de avaliações que foram realizadas. A Etapa I do estudo foi separada em três avaliações: avaliação da atualização dos planos; avaliação da prioridade passiva em tempo fixo; e avaliação do controle em tempo real. A Etapa II consistiu de três avaliações: avaliação da prioridade passiva em tempo real no corredor; avaliação da prioridade ativa em tempo real no

corredor; e avaliação da prioridade ativa em tempo real no corredor e nas vias transversais.

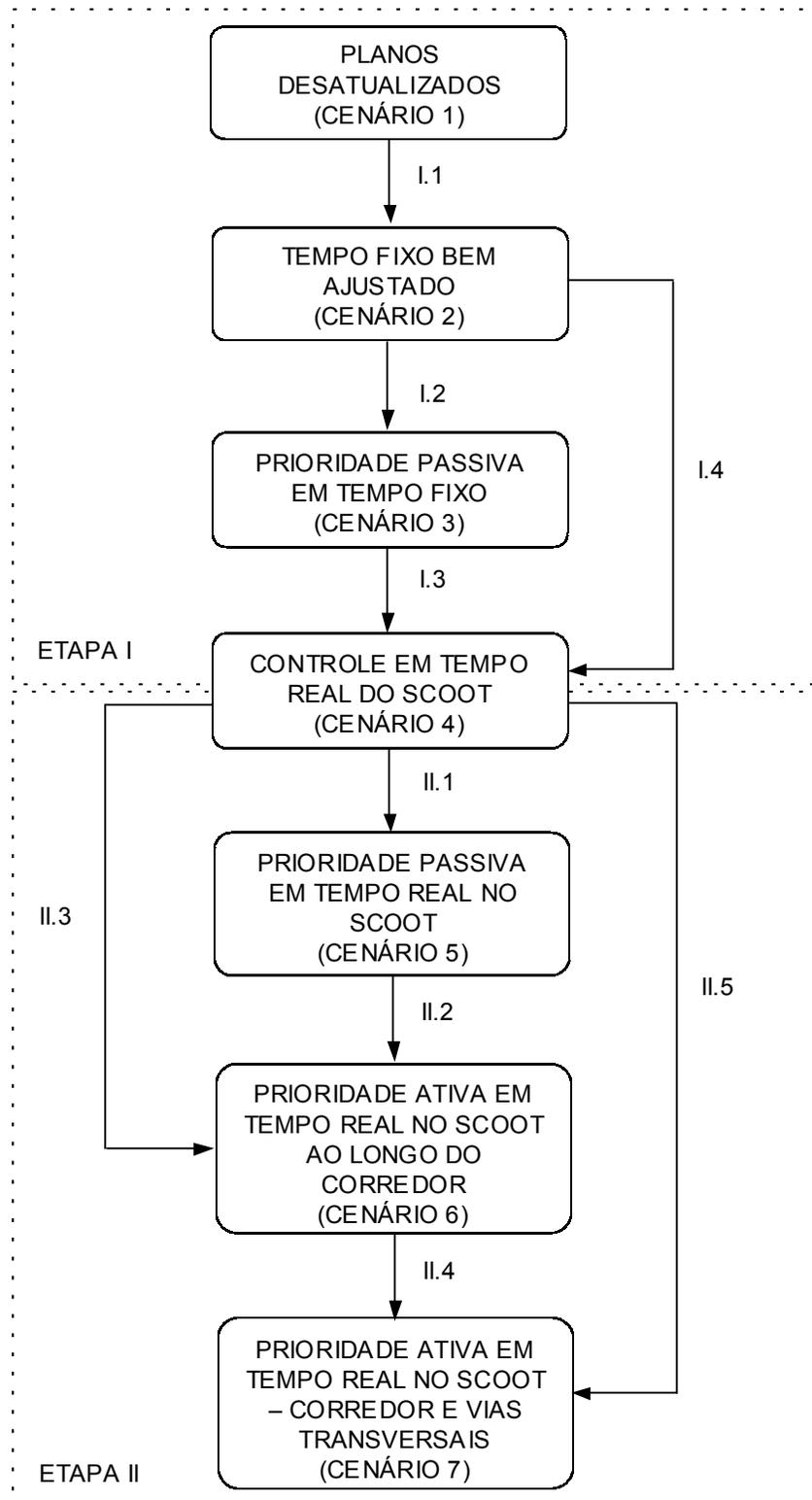


Figura 4.1: Fluxograma de avaliação das estratégias de controle

Considerando as duas etapas de estudo, representadas no fluxograma da Figura 4.1, foram propostas as seguintes comparações:

Etapa I:

- (I.1): Cenário 2 x Cenário 1 – Tempo Fixo Bem Ajustado x Pré-CTAFOR;
- (I.2): Cenário 3 x Cenário 2 – Priorização Passiva em Tempo Fixo x Tempo Fixo Bem Ajustado;
- (I.3): Cenário 4 x Cenário 3 – Controle SCOOT sem Prioridade x Priorização Passiva em Tempo Fixo;
- (I.4): Cenário 4 x Cenário 2 – Controle SCOOT sem Prioridade x Tempo Fixo Bem Ajustado.

Etapa II:

- (II.1): Cenário 5 x Cenário 4 – Priorização Passiva em Tempo Real x Controle SCOOT sem Prioridade;
- (II.2): Cenário 6 x Cenário 5 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Priorização Passiva em Tempo Real;
- (II.3): Cenário 6 x Cenário 4 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Controle SCOOT sem Prioridade;
- (II.4): Cenário 7 x Cenário 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Priorização Ativa no Corredor;
- (II.5): Cenário 7 x Cenário 4 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Controle SCOOT sem Prioridade.

Cada avaliação consistiu em comparações entre um ou mais pares de cenários indicados no fluxograma. Nas comparações I.3 e I.4 o controle em tempo real é

comparado a dois cenários de operação em tempo fixo: um sem prioridade e outro com prioridade passiva; sendo que a comparação I.4 substitui a comparação I.3 no caso da comparação I.2 não propiciar melhora significativa de desempenho. Do mesmo modo, nas comparações II.2 e II.3, a prioridade ativa em tempo real no corredor foi comparada a dois outros tipos de operação em tempo real: um sem prioridade e outro com prioridade passiva; sendo que a comparação II.3 é proposta para substituir a comparação II.2 no caso da comparação II.1 não propiciar melhora significativa de desempenho. Por fim, a comparação II.5 será realizada apenas no caso das comparações anteriores (II.1 a II.4) não propiciarem melhoras significativas de desempenho operacional.

4.2.1 Cenários de Controle em Tempo Fixo

Cenários sem Prioridade Semafórica (Cenários 1 e 2)

O Cenário 1 – Pré-CTAFOR, conforme descrito no Capítulo 3, consistia numa operação com apenas um plano semafórico, desatualizado e sem qualquer coordenação. O diagrama espaço x tempo é apresentado na Figura 4.2, destacando os ciclos diferentes entre os grupos de semáforos.

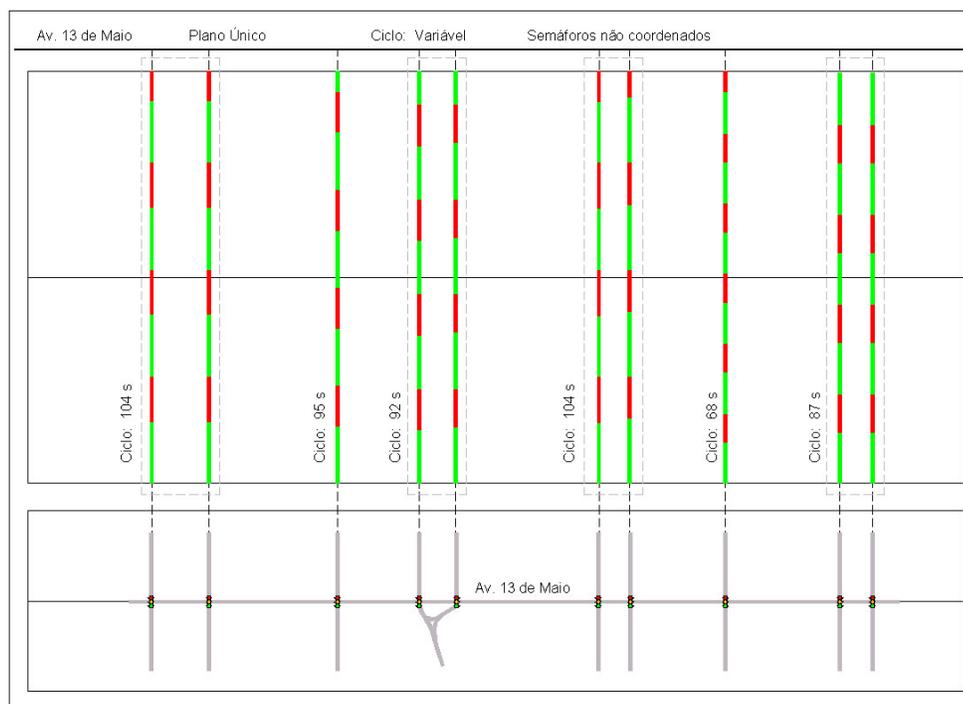


Figura 4.2: Diagrama espaço x tempo do tempo fixo não coordenado (Cenário 1)

Já no Cenário 2 – Tempo Fixo Bem Ajustado (TFBA), os tempos semaforicos foram calculados no TRANSYT com dados atuais de volume veicular e ajustados em campo por técnicos de tráfego do CTAFOR. Portanto, o controle semaforico do Cenário 2 representa uma operação semaforica em tempo fixo bem ajustada, sem prioridade, nos dois períodos de estudo. O ciclo da rede no entropico manhã foi de 96s e no pico da tarde foi de 112s. Os diagramas espaço x tempo são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4 em que é ilustrada a velocidade de progressão dos pelotões numa situação de fluxo livre.

Cenário com Prioridade Semaforica do Tipo Passiva (Cenário 3)

O Cenário 3 – Priorização Passiva em Tempo Fixo (PPTF) corresponde à operação semaforica com prioridade passiva em tempo fixo calculada pelo método *BUS-TRANSYT*, descrito no Capítulo 2. Foram criados *links* adicionais, compartilhados com *links* principais, na rede do corredor arterial para representar o comportamento do movimento de ônibus nas aproximações do corredor e nas vias transversais. Nas vias transversais, foram criados *links* adicionais somente no Trecho 2 do corredor, pois o Trecho 1 não apresenta tráfego de ônibus na suas vias transversais. Para cada *link* foi atribuída a frequência dos ônibus, a velocidade de cruzeiro média de ônibus, o tempo médio parado no ponto de parada (caso existisse ponto de parada no *link*), assim como pesos de atraso e número de paradas de ônibus (parâmetros w_i e k_i na Equação 2.1, respectivamente). Os pesos de atraso e número de paradas foram calculados como a razão entre o número médio de passageiros transportados por ônibus pelo de automóveis. Nos *links* principais, estes pesos foram unitários. Os ciclos semaforicos da rede foram os mesmos do Cenário 2: 96s no entropico manhã e 112s no pico da tarde. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os diagramas espaço x tempo da programação obtida no TRANSYT, em que é ilustrado o movimento de um ônibus e os tempos perdidos nos pontos de parada em ambos os sentidos de tráfego, numa velocidade de progressão de 30km/h.

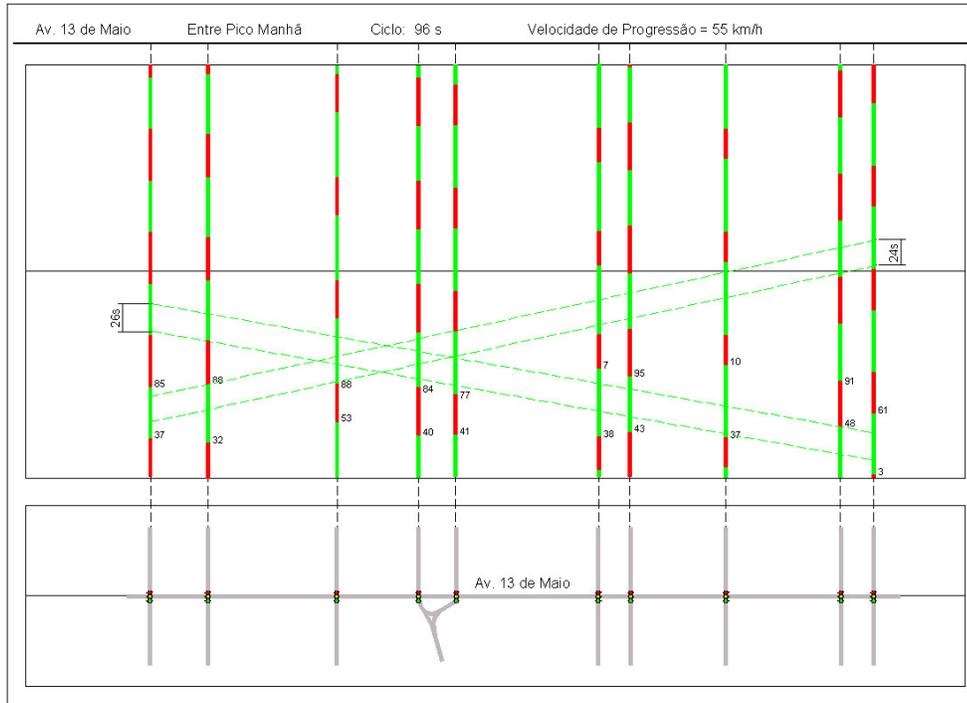


Figura 4.3: Diagrama espaço x tempo do tempo fixo bem ajustado (Cenário 2) no entrepico manhã

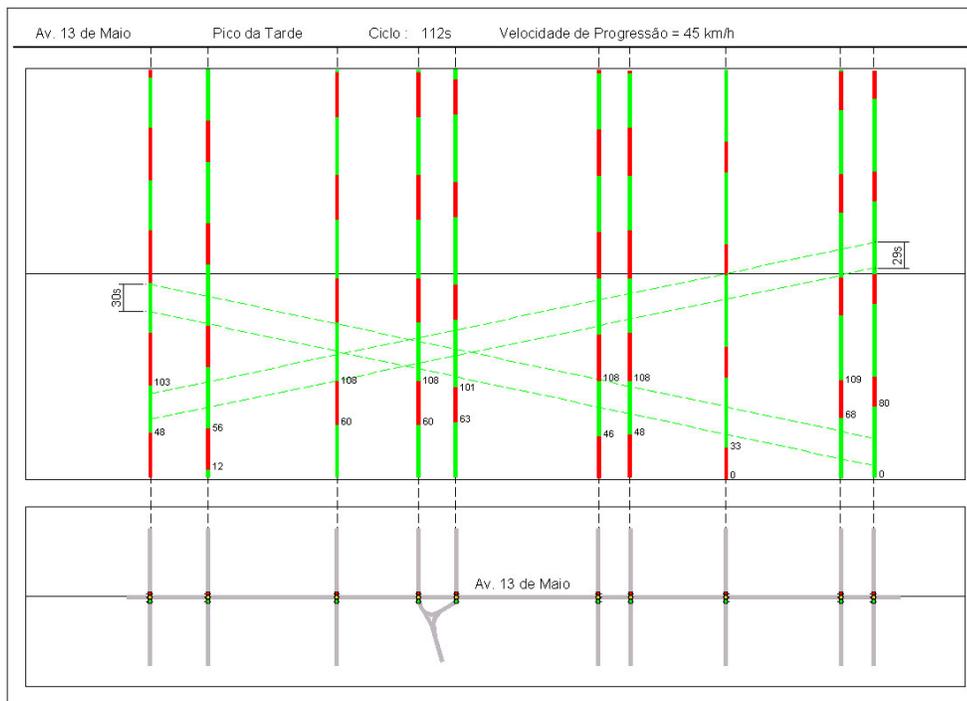


Figura 4.4: Diagrama espaço x tempo do tempo fixo bem ajustado (Cenário 2) no pico da tarde

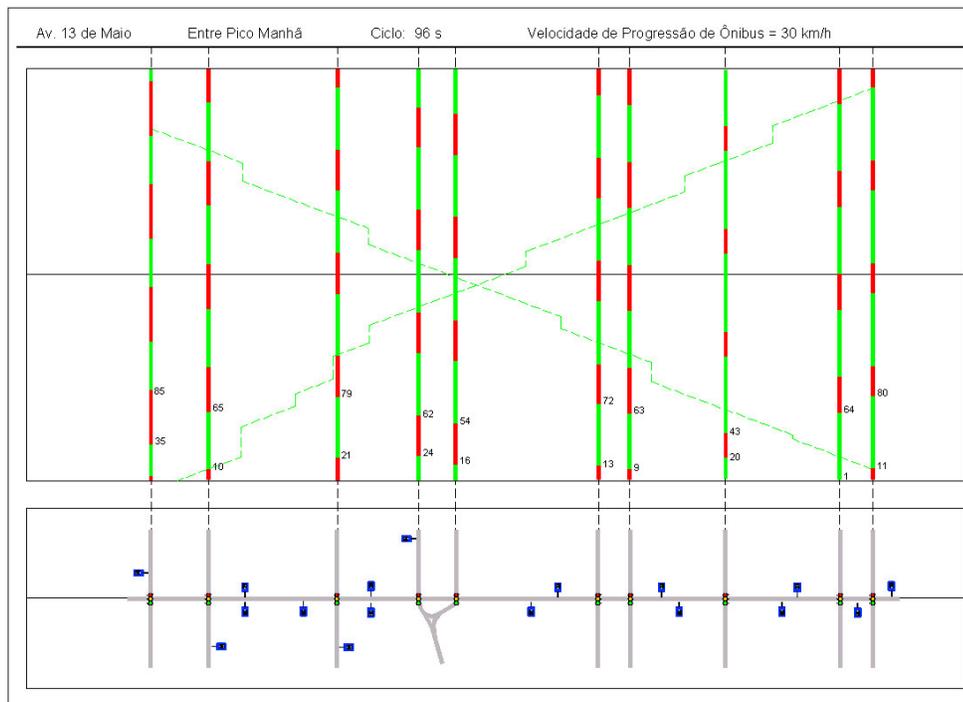


Figura 4.5: Diagrama espaço x tempo do tempo fixo com prioridade passiva (Cenário 3) no entropico manhã

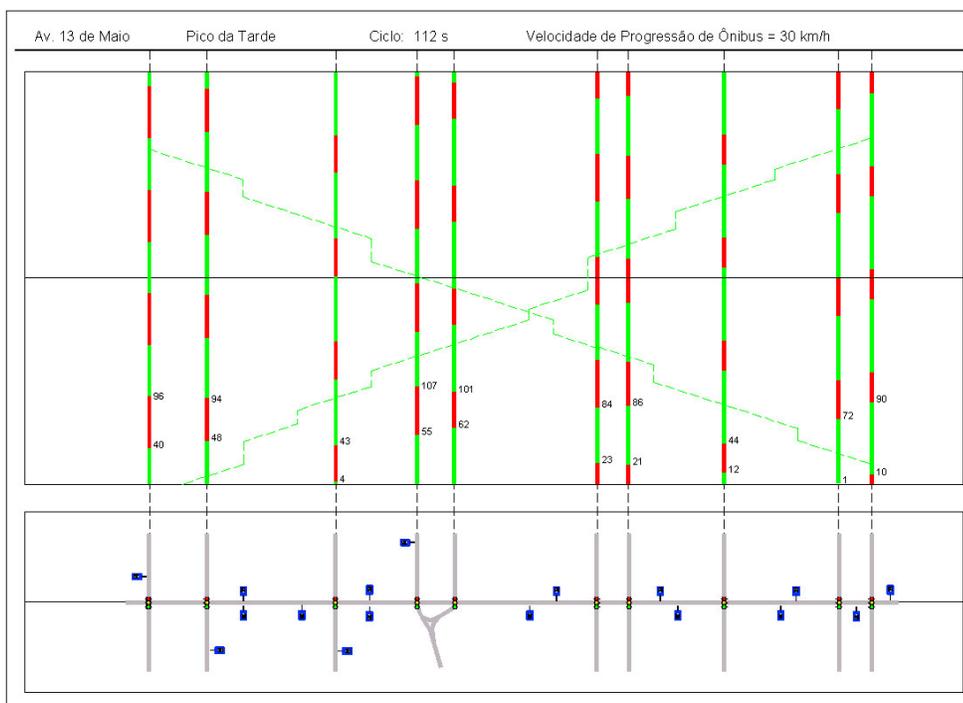


Figura 4.6: Diagrama espaço x tempo do tempo fixo com prioridade passiva (Cenário 3) no pico da tarde

4.2.2 Cenários de Controle em Tempo Real

Cenário sem Prioridade Semafórica (Cenário 4)

O Cenário 4 – Controle SCOOT sem Prioridade corresponde à operação em tempo real do modelo SCOOT sem priorização semafórica para ônibus. Para tanto, foram calibrados em campo todos os parâmetros básicos do modelo (*JTIM*, *MAXQ*, *SATO* e *DEFO*), e ajustados os parâmetros descritos no Capítulo 2 (*SPWM*, *SPWS*, *CGIF* e *BIAS*). Na operação normal do SCOOT, foram atribuídos como valor de defasagem (*DEFO*), em cada *link* do corredor, a defasagem obtida no TRANSYT para o Cenário 2. A variação dos valores de defasagem também foi limitada pelo parâmetro *BIAS* (com valores de 80, 100 e 120). Optou-se também por priorizar o tráfego no corredor, reduzindo a capacidade das vias transversais com o uso dos parâmetros *SPWM* e *SPWS* (variando entre 80 a 120% de saturação). Como ciclos mínimos e máximos da rede foram definidos os seguintes valores, respectivamente: 88s a 96s no entropico manhã, e 96s a 112s no pico da tarde.

Cenários com Prioridade Semafórica (Cenários 5, 6 e 7)

No Cenário 5 – Priorização Passiva em Tempo Real (PPTR) foi testada uma priorização passiva para ônibus no controle em tempo real. Para tanto, os valores do parâmetro *DEFO*, para cada *link* do corredor, foram calculados utilizando-se o modelo de retenção compartilhada do TRANSYT.

Já nos Cenários 6 e 7 foi testado o modelo de prioridade ativa do SCOOT, sendo que, no Cenário 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor (PATR1) foram detectados somente os ônibus que trafegam no corredor, enquanto que no Cenário 7 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais (PATR2) foram detectados também os ônibus nas aproximações das vias transversais. Para simular o método de detecção dos veículos do transporte público, pesquisadores foram posicionados nos pontos de detecção (em cada *link*) do corredor, informando a chegada do veículo a ser priorizado através de equipamentos de detecção manual, conectados aos controladores semafóricos, conforme mostrado na Figura 4.7. A simulação foi realizada somente no Trecho 2. Dessa forma, no Cenário 6, foram distribuídos um total de 9 pesquisadores nas aproximações do corredor, sendo adicionados no Cenário 7, mais 4 pesquisadores nas aproximações transversais. A Tabela 4.1 apresenta as linhas que foram detectadas durante a operação de cada cenário.



Figura 4.7: Exemplo de detecção manual numa aproximação semafórica

Tabela 4.1: Linhas detectadas durante a simulação da prioridade ativa

Sentido	Aproximação	Linhas	Frequência no Entrepico (ônibus/h)	Frequência no Pico (ônibus/h)
Corredor	9 Aproximações	075 / 011 / 012 / 029 / 030	41	62
	Expedicionários	401 / 405 / 406 / 411	31	40
Transversais	Marechal Deodoro	401 / 403 / 405 / 406 / 407 / 411	42	57
	Universidade	029 / 030 / 038 / 070 / 077 / 355 / 360	51	82
	Carapinima	029 / 030 / 038 / 070 / 077 / 355 / 360	51	82

Os parâmetros básicos do modelo de prioridade do SCOOT (*BJTM* e *BQUC*) foram calibrados em campo nos *links* do corredor. O parâmetro *BAUT* foi definido com o valor de 20 segundos e os valores de saturação (*BEXS*, *BRES* e *BRYS*) foram definidos conforme a capacidade reserva de cada nó do corredor.

4.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO

As principais medidas para avaliar o desempenho de corredores arteriais são o tempo de percurso e o atraso nas interseções (VINCENT *et al.*, 1980; MCSHANE e ROESS, 1990). Estas variáveis são medidas de performance muitas vezes usadas para avaliar as mudanças no sistema de controle semafórico. A vantagem de se usar o tempo de percurso e o atraso é que são variáveis de nível de serviço de fácil percepção pelos usuários da rede e que podem ser observadas diretamente por meio de levantamentos em campo.

Conforme visto na literatura, a definição dos indicadores é também condicionada aos objetivos de se implantar determinada estratégia de prioridade

semafórica. Neste caso existem três visões diferentes dos atores envolvidos: órgão gestor, empresas de ônibus e usuários. O objetivo do órgão gestor deve ser o mais geral possível, para atender os interesses tanto das empresas operadoras como dos usuários do sistema. Já as empresas têm a visão de reduzir custos operacionais, enquanto os usuários desejam reduzir o seu tempo de viagem (individual ou coletivo). Desta forma, se o objetivo da prioridade semafórica é reduzir o consumo de combustível, o melhor indicador é o número de paradas no corredor. No caso de o objetivo ser o aumento da fluidez ou velocidade operacional dos veículos no corredor, o melhor indicador é o atraso nos semáforos e o tempo de percurso ao longo do corredor de estudo.

Neste estudo foram utilizados indicadores estimados pelo sistema SCOOT e coletados em campo. Desta forma, os benefícios operacionais do controle adaptativo do SCOOT e das estratégias de priorização semafórica foram avaliados usando as medidas de desempenho atraso veicular e número de paradas, estimadas pelo sistema SCOOT para o tráfego geral, assim como tempo de percurso para ônibus e automóveis coletados em campo durante a operação de cada cenário.

4.3.1 Cálculo do Atraso Veicular e do Número de Paradas em Rede

O atraso veicular e o número de paradas foram coletados no banco de dados do SCOOT para os *links* (aproximações) do corredor e das vias transversais. As variáveis foram obtidas originalmente de forma desagregada: uma observação por *link* da rede, para cada intervalo de 15 min. Os valores foram então agregados espacialmente sobre os *links* da rede, em cada intervalo dentro do período de pesquisa, da seguinte forma:

- Atraso Veicular: Soma ponderada pelo fluxo a cada 15 min dentro do período de análise:

$$AT_{15} = \sum_i At_i \cdot F_i \text{ [min.veíc]} \quad (4.1)$$

em que,

At_i = Atraso médio no *link* i [min/veíc.];

F_i = Fluxo no *link* i [veíc./h].

- Número de Paradas: Soma a cada 15 min dentro do período de análise:

$$NP_{15} = \sum_i NP_i \text{ [veíc./h]} \quad (4.2)$$

em que,

NP_i = Número de paradas no *link* i [veíc./h].

As medidas de desempenho foram agregadas por sentido de tráfego do corredor e para os *links* das vias transversais, considerando os dois trechos de análise. Portanto, para cada trecho de análise e intervalo de 15 min, foram computadas observações para três indicadores, dois para os sentidos de tráfego (LO e OL) e um para as vias transversais, conforme disposto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Indicadores de desempenho do SCOOT por sentido de tráfego

<i>Sentido</i>	<i>Atraso Veicular</i>	<i>Número de Paradas</i>
<i>OL</i>	AT_{15OL}	NP_{15OL}
<i>LO</i>	AT_{15LO}	NP_{15LO}
<i>Transversais</i>	AT_{15TV}	NP_{15TV}

As medidas de desempenho para o corredor foram comparadas por testes de variância e testes de comparação entre médias. As hipóteses gerais deste estudo foram as seguintes:

- A operação semafórica sob o controle adaptativo produz benefícios quando comparada com a operação em tempo fixo bem ajustada e com o controle em tempo fixo com prioridade passiva;
- As estratégias de prioridade semafórica (passiva e ativa) produzem benefícios para os usuários do sistema de transporte público, sem prejuízo para o tráfego geral.

4.3.2 Levantamento dos Indicadores de Desempenho

Os cenários de controle foram observados em campo na operação semafórica do corredor de estudo. Definiu-se a coleta de dados conforme as etapas do estudo e o

tipo de operação semafórica: cenários com e sem prioridade. Nos cenários com prioridade foi avaliado o ganho de desempenho para os ônibus (redução no tempo de percurso de ônibus) e o efeito (variação no atraso médio e no número médio de paradas) da operação com prioridade sobre o tráfego geral (ônibus + automóveis). Nos cenários sem prioridade, foi avaliado o ganho de desempenho (redução no valor médio do atraso e do número de paradas) para o tráfego geral (ônibus + automóveis) e de redução no tempo de percurso para os modos ônibus e automóveis, separadamente.

Os indicadores coletados em cada cenário de estudo estão listados na Tabela 4.3. No Cenário 1 – Pré-CTAFOR, conforme descrito no Capítulo 3, foi levantado apenas o indicador tempo de percurso para automóveis e ônibus, já que neste cenário não foi possível obter dados de atraso e número de paradas para o tráfego geral. Para os cenários sem prioridade (1, 2 e 4) foram realizadas pesquisas em campo de tempo de percurso para automóveis e ônibus para avaliar o desempenho operacional dos dois modos separadamente. Já para os cenários com prioridade para ônibus (3, 5, 6 e 7), foram realizadas pesquisas de tempo de percurso somente para ônibus, visto que nestes cenários foi avaliado o ganho de desempenho somente para este modo e o consequente impacto sobre o tráfego geral. As medidas de desempenho para avaliação do tráfego geral em cada cenário, com exceção do Cenário 1, foram estimadas pelo sistema SCOOT e extraídas com auxílio da interface TRANSCOOT (MENESES, 2003), sendo armazenadas em arquivos do tipo DBF.

Tabela 4.3: Cenários de estudo e indicadores de desempenho

	Cenários	Indicadores
<i>Cenários sem prioridade</i>	Cenário 1 – Pré-CTAFOR	<i>Tempo de Percurso de Ônibus Tempo de Percurso de Automóveis</i>
	Cenário 2 – TFBA	<i>Tempo de Percurso de Ônibus Tempo de Percurso de Automóveis</i>
	Cenário 4 – SCOOT	<i>Atraso Veicular Número de Paradas</i>
<i>Cenários com Prioridade</i>	Cenário 3 – PPTF	
	Cenário 5 – PPTR	<i>Tempo de Percurso de Ônibus Atraso Veicular</i>
	Cenário 6 – PATR1	<i>Número de Paradas</i>
	Cenário 7 – PATR2	

4.4 ANÁLISE DE INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

As análises de inferência tiveram como objetivo comparar dois ou mais conjuntos de dados amostrais, permitindo inferir sobre as populações de onde provêm. Para tanto, foram realizados testes de inferência sobre variáveis de controle (fluxo de tráfego e tempo parado nos pontos de ônibus) para avaliar se o comportamento do tráfego era semelhante nos cenários observados. Foram também realizados testes de comparação entre variâncias e médias das medidas de desempenho (tempo de percurso, atraso e número de paradas) para cada dois conjuntos de amostras obtidos de cenários de controle semafórico que se deseja comparar, conforme fluxograma da Figura 4.1.

4.4.1 Variáveis de Controle

Como se deseja comparar o desempenho operacional de estratégias de controle semafórico em cenários reais de operação, é necessário que os indicadores de desempenho sejam afetados apenas pela operação semafórica. Assim, algumas variáveis de controle foram analisadas para garantir que o comportamento do tráfego não variou significativamente entre cenários. Para o tráfego geral, foi assumido que se o fluxo médio de tráfego não varia ao longo do corredor e das vias transversais, entre os cenários, as mesmas condições de tráfego são observadas. Com relação à operação dos ônibus no corredor, assumiu-se que se o tempo médio parado nos pontos de ônibus ao longo do corredor fosse o mesmo em cada cenário, o comportamento da operação dos ônibus ao longo de cada sentido do corredor também não mudaria. Desta forma, o comportamento do tráfego deve ser afetado apenas pelo modo de operação semafórica.

Os fluxos de tráfego foram coletados do banco de dados do sistema SCOOT, durante a operação dos cenários 2 a 7; já que o Cenário 1 corresponde ao Cenário Pré-CTAFOR. Assim como o atraso e o número de paradas, esta variável foi obtida de forma desagregada por *link* da rede e em intervalos de 15 min dentro de cada período de análise. Uma mesma condição de fluxo de tráfego é observada quando os perfis de fluxo temporal e espacial são os mesmos. Então, para comparar o comportamento do fluxo de tráfego entre os cenários, foram definidos dois parâmetros médios de fluxo: o fluxo médio por *link* e o fluxo médio a cada 15 min por sentido do tráfego. O fluxo médio por *link* da rede foi calculado fazendo a média das observações de 15 min para cada *link*. Os fluxos médios ao longo de cada sentido do corredor foram obtidos

fazendo a média dos fluxos sobre os *links* para cada período de 15 min. O fluxo médio para as vias transversais foi obtido da mesma forma.

Varição Espacial do Fluxo de Tráfego

Os perfis espaciais médios de fluxo de tráfego ao longo de cada sentido do corredor devem ser os mesmos entre os cenários de estudo, quando não existe relação de dependência entre o período de observação dos cenários e os *links* da rede, além de não existir diferença significativa entre os valores médios de cada *link* entre os cenários de estudo. Isto significa que se compararmos quaisquer duas ou mais amostras de fluxo de tráfego dentro de um mesmo período de dias típicos, selecionados de semanas ou meses diferentes, seus perfis espaciais médios não deverão apresentar diferenças significativas.

Para testar a hipótese de que os fluxos de tráfego apresentam o mesmo perfil espacial de variação, os dados foram organizados em tabelas para cada sentido de tráfego e período de análise, relacionando os fluxos por *link* com os cenários de estudo (veja Tabela 4.4 como exemplo). Nesta tabela, os dados foram separados em amostras de mesmo tamanho, n no exemplo, para cada efeito combinado (*link* x cenário). Foram selecionados dados em cada cenário para três dias de coleta, garantindo uma mesma quantidade de observações de fluxos de tráfego para cada combinação. Para cada tabela foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para dois fatores de variação (*link* x cenário de estudo) com amostras de mesmo tamanho. As hipóteses do teste foram que:

- H_0^i : não existe interação entre os fatores de variação: *link* da rede e o cenário de estudo;
- H_0^{ii} : não existe diferença significativa nos valores médios de fluxo de tráfego para os *links* da rede entre os cenários de estudo.

No exemplo da Tabela 4.4 tem-se uma amostra de $a \times b$ populações de tamanho n cada, sendo 'a' o número de *links* e 'b' o número de cenários. Cada valor de fluxo q_{ijk} representa uma observação de 15 min dentro do período de estudo (entrepico ou pico da tarde) em cada cenário. Para realizar o teste foi assumido que as $a \times b$ populações seguem distribuições normais com mesma variância.

Tabela 4.4: Exemplo de análise dos perfis espaciais de fluxo

Cenário	Links				Totais	Médias
	1	2	...	a		
1	q_{111}	q_{211}		q_{a11}	$Q_{.1.}$	$\bar{q}_{.1.}$
	q_{112}	q_{212}		q_{a12}		
	\vdots	\vdots		\vdots		
	q_{11n}	q_{21n}		q_{a1n}		
2	q_{121}	q_{221}		q_{a21}	$Q_{.2.}$	$\bar{q}_{.2.}$
	q_{122}	q_{222}		q_{a22}		
	\vdots	\vdots		\vdots		
	q_{12n}	q_{22n}		q_{a2n}		
:						
b	q_{1b1}	q_{2b1}		q_{ab1}	$Q_{.3.}$	$\bar{q}_{.b.}$
	q_{1b2}	q_{2b2}		q_{ab2}		
	\vdots	\vdots		\vdots		
	q_{1bn}	q_{2bn}		q_{abn}		
Totais	$\underline{Q}_{1..}$	$\underline{Q}_{2..}$		$\underline{Q}_{a..}$		$\underline{Q}_{...}$
Médias	$\underline{q}_{1..}$	$\underline{q}_{2..}$		$\underline{q}_{a..}$		$\underline{q}_{...}$

Variação Temporal do Fluxo de Tráfego

O teste realizado anteriormente não garante que o mesmo perfil de variação temporal do fluxo seja observado entre os cenários de estudo. O perfil temporal de tráfego por sentido de circulação é o mesmo quando o comportamento do tráfego no corredor não sofre alterações com o cenário de observação, ao longo dos intervalos de 15 min de coleta. Ou seja, não existe relação de dependência do fluxo de tráfego com o período de observação dos cenários de estudo e com o intervalo de 15 min de coleta dos dados. Isto significa que se compararmos quaisquer duas ou mais amostras de um mesmo período de dias típicos, obtidas de semanas ou meses diferentes, seus perfis temporais não deverão apresentar diferenças significativas.

Para testar a hipótese de que os fluxos de tráfego apresentam o mesmo perfil temporal de variação, quatro *links* representativos da rede, dois do corredor e dois transversais, foram selecionados em cada período de estudo e os seus dados foram organizados em tabelas relacionando os fluxos médios (q_{ij}) por sentido de cada intervalo de 15 min, com os cenários de estudo (veja Tabela 4.5). Um perfil médio geral foi determinado fazendo a média dos fluxos de cada intervalo de 15 min entre os cenários, sendo realizado um teste de aderência para comparar o perfil médio de cada cenário com este perfil geral. A hipótese do teste foi que os perfis de variação temporal

do fluxo de tráfego em cada cenário não apresentam diferenças significativas em relação ao perfil médio geral, e que, portanto, os perfis médios entre os cenários não apresentam diferenças significativas.

Tabela 4.5: Perfis médios de variação temporal do fluxo de tráfego

<i>Perfis Médios</i>	<i>Intervalo de 15 min</i>		
	1 ^o	2 ^o ...	a ^o
Perfil 1	q_{11}	q_{21}	q_{a1}
Perfil 2	q_{12}	q_{22}	q_{a2}
:			
Perfil b	q_{1b}	q_{2b}	q_{ab}
<i>Perfil Médio Geral</i>	$\bar{q}_{1..}$	$\bar{q}_{2..}$	$\bar{q}_{a..}$

Tempo Parado nos Pontos de Ônibus

O tempo parado nos pontos de ônibus ao longo de cada sentido do corredor foi observado em campo durante as pesquisas de tempo de percurso. O tempo parado por sentido de tráfego (soma dos tempos parados nos pontos de ônibus em cada sentido) ao longo do corredor foi a variável de controle utilizada. Para comparação desta variável de controle entre os cenários de análise foram realizados testes estatísticos de comparação entre múltiplas variâncias e médias (ANOVA). A hipótese dos testes é que se as variâncias e as médias do tempo parado nos pontos de ônibus entre os cenários não variam significativamente, as mesmas condições de operação nos pontos de ônibus são observadas em cada cenário.

A seqüência de testes foi a seguinte:

1. Teste de aderência do tipo qui-quadrado para verificar a normalidade das variáveis de controle ao nível de significância de 5%. A normalidade da variável foi testada com os dados da pesquisa de tempo de percurso para o Cenário 1;
2. Teste de Bartlett para comparação entre variâncias de várias amostras, com nível de significância de 5%;

3. Análise de variância (ANOVA) com fator único de variação, ao nível de 5%.

4.4.2 Comparação entre Cenários

Este tópico descreve como foram realizadas as comparações entre os cenários de estudo e quais hipóteses foram levantadas em cada comparação. A análise comparativa dos cenários de controle semafórico baseou-se nas seguintes hipóteses de pesquisa:

Etapa I: Controle Semafórico e Priorização Passiva em Tempo Fixo

(a) Quanto à atualização dos planos:

- Hipótese I - A atualização dos planos semafóricos de um corredor arterial reduz o valor médio do tempo de percurso dos ônibus e automóveis, sem alterar a dispersão destas variáveis.

(b) Quanto à priorização passiva em tempo fixo:

- Hipótese II - A priorização passiva em tempo fixo produz ganhos operacionais (redução do tempo médio de percurso) aos veículos do transporte público, sem prejuízo (sem alteração do atraso e número de paradas veiculares) para o tráfego geral do corredor e das vias transversais, quando comparada à operação em tempo fixo bem ajustada.

(c) Quanto ao controle em tempo real:

- Hipótese III - O controle em tempo real se adapta às variações do tráfego, reduzindo a dispersão dos tempos de percurso e atrasos veiculares, assim como produzindo ganhos operacionais (redução do tempo médio de percurso e do atraso veicular) quando comparado à operação em tempo fixo bem ajustada e à operação em tempo fixo com prioridade passiva.

Etapa II: Prioridade Passiva e Ativa no Controle em Tempo Real

(d) Quanto à priorização passiva em tempo real:

- Hipótese IV - A priorização passiva em tempo real produz ganhos operacionais aos veículos do transporte público, sem prejuízo para o tráfego geral do corredor e das vias transversais, quando comparada ao controle em tempo real.

(e) Quanto à priorização ativa em tempo real:

- Hipótese V - A priorização ativa em tempo real reduz a dispersão dos tempos de percurso dos ônibus sem prejuízo para o tráfego geral, assim como produz ganhos operacionais (redução do tempo médio de percurso) aos veículos do transporte público, sem prejuízo para o tráfego geral do corredor e das vias transversais, quando comparada ao controle em tempo real e à operação com prioridade passiva em tempo real.

Testes Estatísticos para Comparação entre Cenários

A comparação dos indicadores de desempenho seguiu a seqüência de testes estatísticos:

1. Teste de aderência: para verificar a normalidade de cada variável, foi realizado o teste do tipo qui-quadrado ao nível de significância de 5%. A realização deste tipo de teste requer uma quantidade de observações mínima. Para testar a normalidade das variáveis atraso veicular e número de paradas foram coletadas amostras adicionais do banco de dados do SCOOT para duas semanas de operação do tempo real. A normalidade da variável tempo de percurso foi testada com os dados da pesquisa de tempo de percurso para o Cenário 1. A normalidade das variáveis é uma premissa para os testes de comparação entre variâncias;
2. Teste de comparação entre variâncias: testes de variâncias para comparar a variabilidade dos indicadores entre os cenários de estudo;
3. Teste de comparação entre médias: teste de médias duas a duas para comparar os valores médios dos indicadores de desempenho.

Critérios de Avaliação

Na Tabela 4.6 estão detalhadas as hipóteses alternativas dos testes de significância realizados nesta análise. O que se buscou com os testes descritos na Tabela 4.6 foi avaliar, para cada indicador de desempenho, se houve redução no seu valor com a mudança de operação semaforica, sendo que, para os cenários com estratégias de prioridade na programação semaforica, buscou-se uma redução nos tempos de percurso dos ônibus sem efeito significativo sobre o tráfego geral (sem causar impactos negativos sobre o atraso e número de paradas dos veículos). Já para os cenários sem prioridade na programação é esperada uma redução nos tempos de percurso de ônibus e de automóveis, redução no atraso veicular e nenhuma mudança no número de paradas. Uma redução no número de paradas no corredor indicaria uma melhora na coordenação semaforica, o que não é esperado nos cenários de estudo.

Os níveis de significância dos testes foram definidos conforme a ordem de grandeza das variáveis observadas. O tempo de percurso de automóvel, em cada sentido de tráfego no corredor, depende do valor dos atrasos nos semáforos; portanto, definiu-se como significativas diferenças nas médias de tempo de percurso de automóveis que resultassem na rejeição da hipótese nula para um nível de significância de 5% e em reduções de tempo de percurso maiores que 5 segundos por semáforo do corredor. Para o tempo de percurso de ônibus, o nível de significância dos testes de médias foi definido do mesmo modo, embora esta variável dependa também dos tempos de embarque/desembarque nos pontos de parada do corredor.

As diferenças de atraso veicular médio entre os cenários foram consideradas significativas para níveis de 1% de significância e que resultassem numa diferença de 5 *s/link* por veículo que sofre parada ao longo do corredor ou nas vias transversais, calculado pela Equação 4.3:

$$AT_L = 60 \times \frac{\bar{AT}}{\bar{NP}} \text{ [s/veic./link]} \quad (4.3)$$

em que,

AT_L é o atraso médio em segundos por veículo que sofre parada em cada *link*;

\bar{AT} é o atraso veicular médio e

\bar{NP} é o número médio de paradas por sentido.

Tabela 4.6: Comparação entre Cenários: *Hipóteses alternativas testadas*

Etapa I: Controle Semafórico e Priorização Passiva em Tempo Fixo				
Quanto à atualização dos planos:				
Indicadores →	Tempo Médio de Percurso por sentido		Variabilidade do Tempo Médio de Percurso	
(I.1) 2 x 1 – Tempo Fixo Bem Ajustado x Pré-CTAFOR	Ônibus: $H_1: \mu_{tpo2} < \mu_{tpo1}$ Autos: $H_1: \mu_{tpc2} < \mu_{tpc1}$		Ônibus: $H_1: \sigma_{tpo2}^2 \neq \sigma_{tpo1}^2$ Autos: $H_1: \sigma_{tpc2}^2 \neq \sigma_{tpc1}^2$	
Quanto à priorização passiva em tempo fixo				
Indicadores →	Corredor		Corredor e Vias Transversais	
	Tempo Médio de Percurso de Ônibus	Tempo Médio de Percurso de Automóveis	Atraso Veicular	Número de Paradas
(I.2) 3 x 2 – Priorização Passiva em Tempo Fixo x Tempo Fixo Bem Ajustado.	$H_1: \mu_{tpo3} < \mu_{tpo2}$ $H_1: \sigma_{tpo3}^2 \neq \sigma_{tpo2}^2$	---	$H_1: \mu_{AT3} \neq \mu_{AT2}$ $H_1: \sigma_{AT3}^2 \neq \sigma_{AT2}^2$	$H_1: \mu_{NP3} \neq \mu_{NP2}$ $H_1: \sigma_{NP3}^2 \neq \sigma_{NP2}^2$
Quanto ao controle em tempo real:				
(I.3) 4 x 2 – Controle SCOOT sem Prioridade x Tempo Fixo Bem Ajustado	$H_1: \mu_{tpo4} < \mu_{tpo2}$ $H_1: \sigma_{tpo4}^2 < \sigma_{tpo2}^2$	$H_1: \mu_{tpc4} < \mu_{tpc2}$ $H_1: \sigma_{tpc4}^2 < \sigma_{tpc2}^2$	$H_1: \mu_{AT4} < \mu_{AT2}$ $H_1: \sigma_{AT4}^2 < \sigma_{AT2}^2$	$H_1: \mu_{NP4} \neq \mu_{NP2}$ $H_1: \sigma_{NP4}^2 \neq \sigma_{NP2}^2$
(I.4) 4 x 3 – Controle SCOOT sem Prioridade x Priorização Passiva em Tempo Fixo	$H_1: \mu_{tpo4} < \mu_{tpo3}$ $H_1: \sigma_{tpo4}^2 < \sigma_{tpo3}^2$	---	$H_1: \mu_{AT4} < \mu_{AT3}$ $H_1: \sigma_{AT4}^2 < \sigma_{AT3}^2$	$H_1: \mu_{NP4} \neq \mu_{NP3}$ $H_1: \sigma_{NP4}^2 \neq \sigma_{NP3}^2$
Etapa II: Prioridade Passiva e Ativa no Controle em Tempo Real				
Quanto à priorização passiva em tempo real				
(II.1) 5 x 4 – Priorização Passiva em Tempo Real x Controle SCOOT sem Prioridade	$H_1: \mu_{tpo5} < \mu_{tpo4}$ $H_1: \sigma_{tpo5}^2 \neq \sigma_{tpo4}^2$	---	$H_1: \mu_{AT5} \neq \mu_{AT4}$ $H_1: \sigma_{AT5}^2 \neq \sigma_{AT4}^2$	$H_1: \mu_{NP5} \neq \mu_{NP4}$ $H_1: \sigma_{NP5}^2 \neq \sigma_{NP4}^2$
Quanto à priorização ativa em tempo real				
(II.2) 6 x 5 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Priorização Passiva em Tempo Real	$H_1: \mu_{tpo6} < \mu_{tpo5}$ $H_1: \sigma_{tpo6}^2 < \sigma_{tpo5}^2$	---	$H_1: \mu_{AT6} \neq \mu_{AT5}$ $H_1: \sigma_{AT6}^2 \neq \sigma_{AT5}^2$	$H_1: \mu_{NP6} \neq \mu_{NP5}$ $H_1: \sigma_{NP6}^2 \neq \sigma_{NP5}^2$
(II.3) 6 x 4 – Priorização Ativa em Tempo Real x Controle SCOOT sem Prioridade	$H_1: \mu_{tpo6} < \mu_{tpo4}$ $H_1: \sigma_{tpo6}^2 < \sigma_{tpo4}^2$	---	$H_1: \mu_{AT6} \neq \mu_{AT4}$ $H_1: \sigma_{AT6}^2 \neq \sigma_{AT4}^2$	$H_1: \mu_{NP6} \neq \mu_{NP4}$ $H_1: \sigma_{NP6}^2 \neq \sigma_{NP4}^2$
(II.4) 7 x 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor	$H_1: \mu_{tpo7} < \mu_{tpo6}$ $H_1: \sigma_{tpo7}^2 < \sigma_{tpo6}^2$	---	$H_1: \mu_{AT7} \neq \mu_{AT6}$ $H_1: \sigma_{AT7}^2 \neq \sigma_{AT6}^2$	$H_1: \mu_{NP7} \neq \mu_{NP6}$ $H_1: \sigma_{NP7}^2 \neq \sigma_{NP6}^2$
(II.5) 7 x 4 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Controle SCOOT sem Prioridade	$H_1: \mu_{tpo7} < \mu_{tpo4}$ $H_1: \sigma_{tpo7}^2 < \sigma_{tpo4}^2$	---	$H_1: \mu_{AT7} \neq \mu_{AT4}$ $H_1: \sigma_{AT7}^2 \neq \sigma_{AT4}^2$	$H_1: \mu_{NP7} \neq \mu_{NP4}$ $H_1: \sigma_{NP7}^2 \neq \sigma_{NP4}^2$

Onde: tpo = tempo de percurso de ônibus;
 tpc = tempo de percurso de automóveis;
 AT = atraso veicular por sentido de tráfego;
 NP = número de paradas por sentido de tráfego.

Para a variável número de paradas, consideram-se significativas diferenças médias entre os cenários para níveis de significância de 1% e que resultassem numa diferença de 5% na proporção média de paradas, calculada pela Equação 4.4:

$$PP = \frac{\bar{NP}}{n \times \bar{Q}} \quad [\%] \quad (4.4)$$

em que,

PP = proporção média de paradas;

\bar{NP} = número médio de paradas por sentido de tráfego;

\bar{Q} = fluxo veicular médio por link;

n = número de *link*'s por sentido de tráfego.

Níveis de significância superiores a 1% para as variáveis atraso e número de paradas correspondiam a diferenças bem menores tanto no atraso por veículo em cada *link*, como para a proporção de paradas ao longo do corredor, não sendo significativas na prática.

Num corredor arterial, o tempo de percurso dos veículos e/ou atraso nas interseções é função da coordenação dos tempos semafóricos. O ideal é que os veículos parem pouco, ao longo de um sentido do corredor, e com atraso total menor. Parar pouco e com atrasos curtos significa que os tempos dos semáforos estão bem coordenados permitindo uma progressão do pelotão. No entanto, mesmo numa situação de boa coordenação é possível se obter amostras de tempo de percurso bem dispersas, pois o instante em que os veículos se inserem na corrente de tráfego de um corredor arterial nunca é o mesmo, o que pode acarretar em valores dispersos de atraso veicular e de número de paradas e, conseqüentemente, de tempo de percurso. Desta forma, considerou-se diferença significativa de variâncias dos tempos de percurso apenas aquelas que resultassem na rejeição da hipótese nula para um nível de 5%. Já para o atraso veicular e o número de paradas assumiu-se que as diferenças de variâncias foram significativas quando a hipótese nula era rejeitada para níveis de significância de 2,5% (para os testes unilaterais) e 5% (para os testes bilaterais).

CAPÍTULO 5

ANÁLISES DOS RESULTADOS PARA O CORREDOR ARTERIAL EM ESTUDO

5.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE

Os resultados das análises das variáveis de controle (fluxo veicular e tempo parado nos pontos de ônibus) evidenciaram que o mesmo comportamento do tráfego foi observado em cada cenário, conforme será apresentado neste capítulo. Como os cenários foram observados em dias úteis de semanas diferentes, assumiu-se que se o mesmo comportamento do tráfego fosse observado na Etapa I entre os cenários de controle, os valores das variáveis de controle (fluxo veicular e tempo parado nos pontos de ônibus) também não difeririam significativamente na Etapa II. Portanto, as análises foram realizadas somente para a Etapa I de estudo, sendo os resultados estendidos para a Etapa II.

5.1.1 Variação Espacial do Fluxo de Tráfego

Os gráficos das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os perfis de variação espacial para ambos os sentidos de tráfego (OL, LO) no corredor, assim como nas vias transversais, obtidos nos dois períodos de estudo, considerando os dois trechos de análise. Observa-se nos gráficos que os perfis para o entropico manhã apresentam a mesma tendência de variação, com diferenças em alguns *links* de no máximo 100 veic./hora, algo em torno de 3 veic./ciclo (para um ciclo de 96 s), assumindo-se não significativo na prática. Já para o pico da tarde, os perfis espaciais também apresentaram a mesma tendência de variação, contudo com diferenças de até 200 veic./hora (6 veic./ciclo para um ciclo 112 s) em alguns *links* do sentido OL, devido a um desvio de comportamento no Cenário 3. Na prática, devido às baixas diferenças de fluxo observadas, pode-se considerar que estas variações não afetam os valores das medidas de desempenho do tráfego (tempo de percurso, atraso e número de paradas).



Figura 5.1: Perfis espaciais de fluxo de tráfego para o sentido OL no corredor

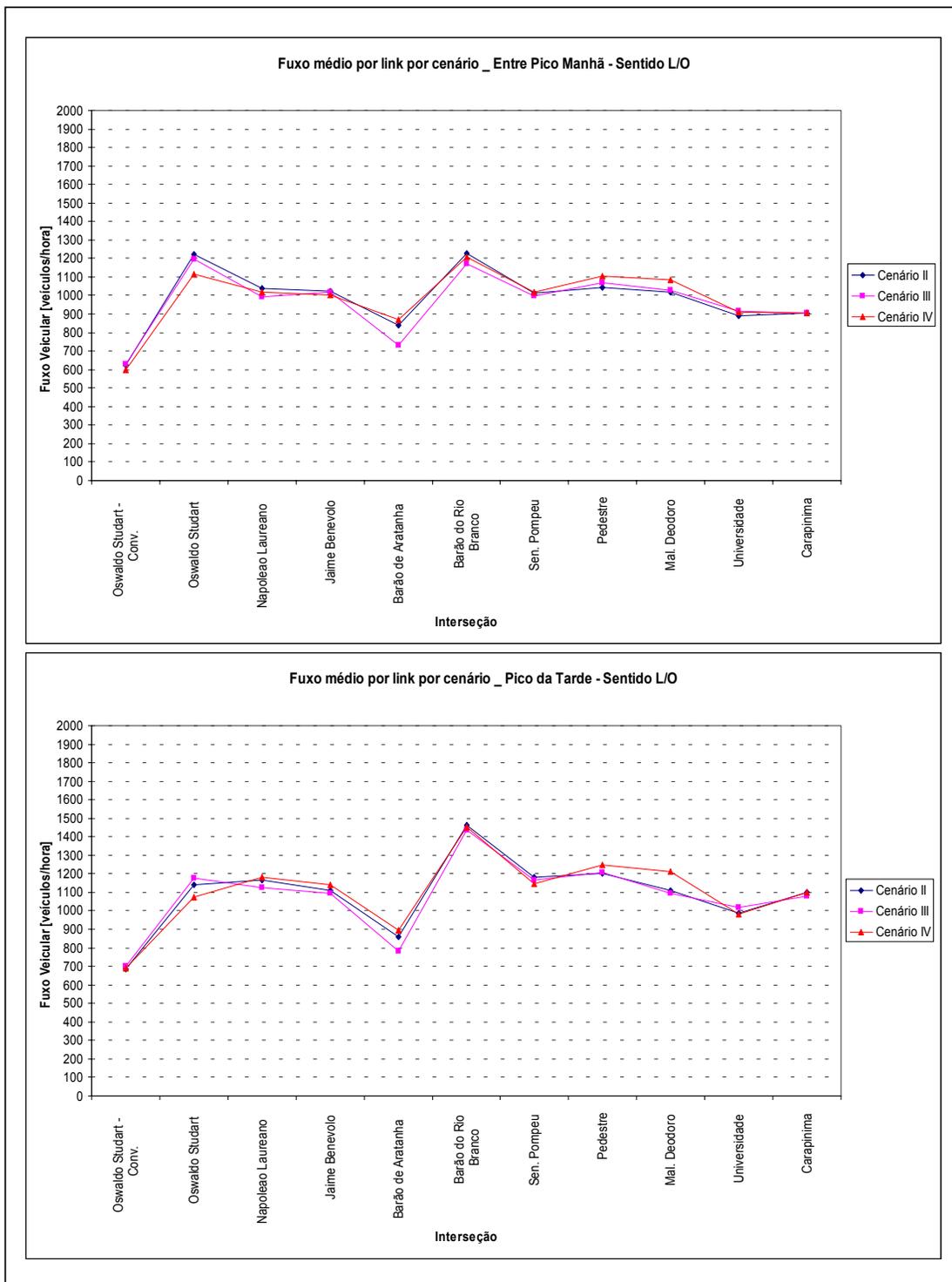


Figura 5.2: Perfis espaciais de fluxo de tráfego para o sentido LO no corredor

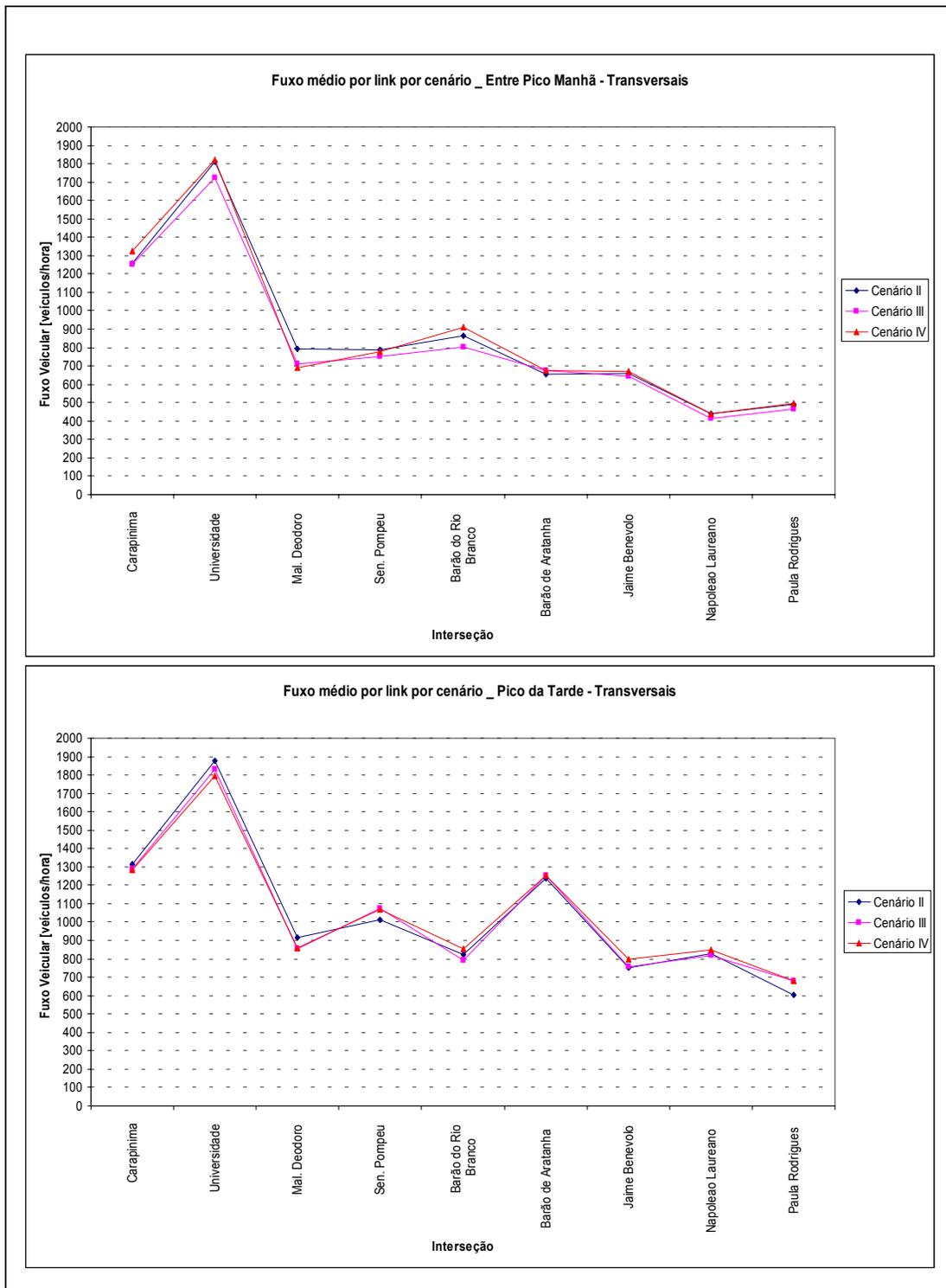


Figura 5.3: Perfis espaciais de fluxo de tráfego para as vias transversais

As análises de variância (ANOVA) para dois fatores de variação (*link* x cenário de estudo) mostraram não haver evidências de que os perfis de fluxo das vias transversais no pico da tarde apresentam comportamento diferente, ao nível de significância de 5%. Entretanto, para os outros casos, as análises mostraram existir evidências de variação dos perfis espaciais de fluxo médio entre os cenários (com valores da estatística p abaixo de 0,01). Estas diferenças nos perfis de fluxo se devem aos valores baixos de desvio padrão do fluxo veicular em cada *link* (ver Anexo II), resultando em rejeição da hipótese nula para pequenas diferenças de fluxo veicular, que, conforme abordado anteriormente, não são significativas na prática.

5.1.2 Variação Temporal do Fluxo de Tráfego

Para avaliar a variação temporal do fluxo de tráfego foram selecionadas aproximações representativas do comportamento do tráfego no corredor: o *link* LO no cruzamento com a Rua Barão do Rio Branco, o *link* OL no cruzamento com a Av. Luciano Carneiro, o *link* SN com a Av. da Universidade e o *link* NS no cruzamento com a Av. dos Expedicionários. Os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os perfis de variação temporal obtidos para as aproximações selecionadas, mostrando haver uma mesma tendência de variação entre os cenários. As diferenças médias de fluxo chegaram no máximo a 200 veic./hora em poucos intervalos nos *links* do corredor e em alguns intervalos nos *links* transversais. Por isso, considerou-se que as diferenças encontradas não afetam os valores médios das medidas de desempenho.

Os testes de aderência (qui-quadrado) para comparar o perfil médio de cada cenário com o perfil geral mostraram que nas aproximações do corredor (OL e LO) não houve evidências de que os perfis de fluxo apresentam variação temporal diferente ao nível de significância de 1%. Já para as aproximações nas vias transversais (SN e NS) ocorreu rejeição da hipótese nula, com os perfis temporais de fluxo, portanto, não apresentando o mesmo comportamento de variação entre os cenários. No entanto, os resultados destes testes apontam que existem diferenças de fluxo veicular em alguns intervalos de 15min que, conforme os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5, não são significativas na prática.

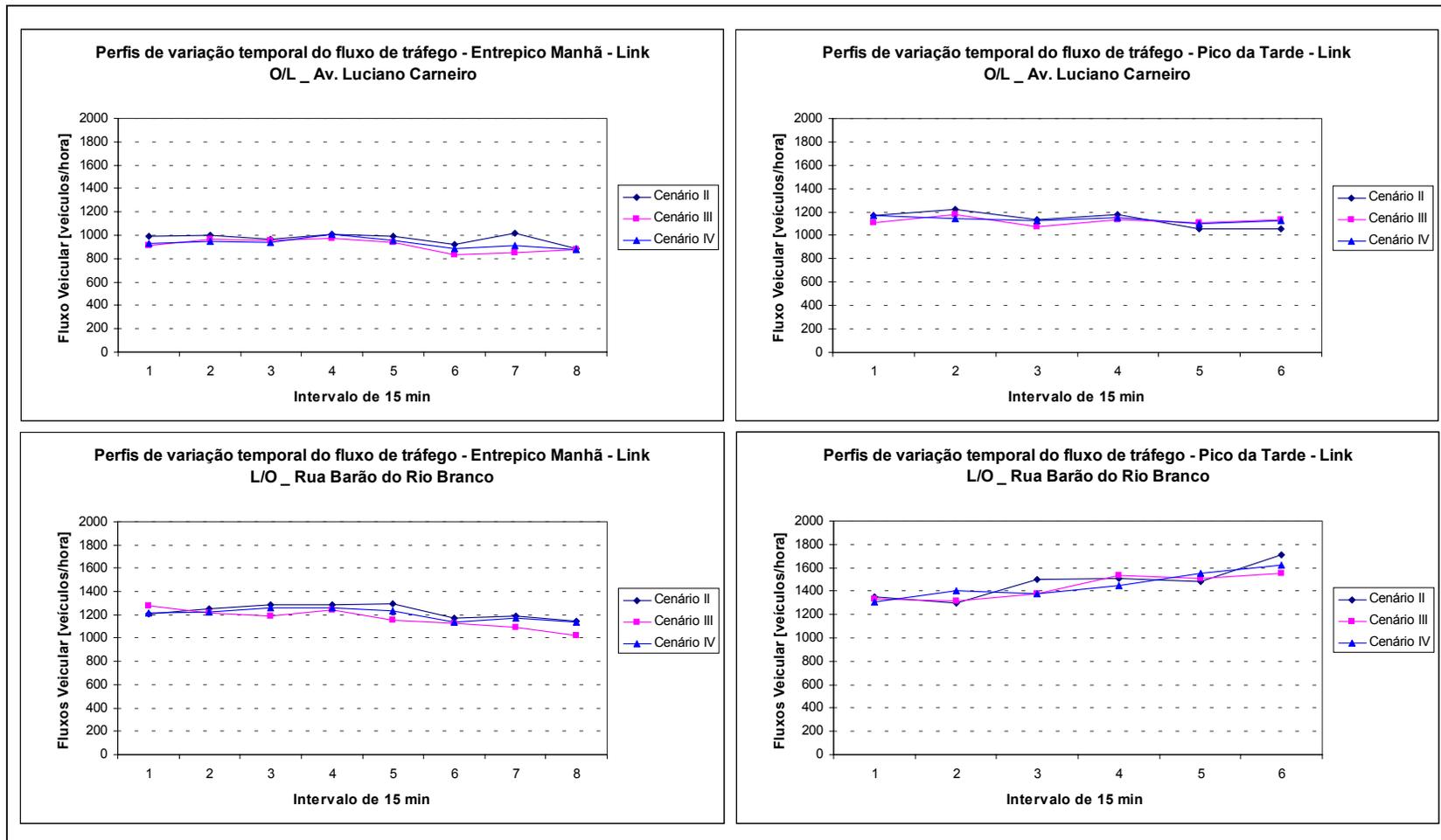


Figura 5.4: Perfis temporais de variação do fluxo de tráfego no corredor

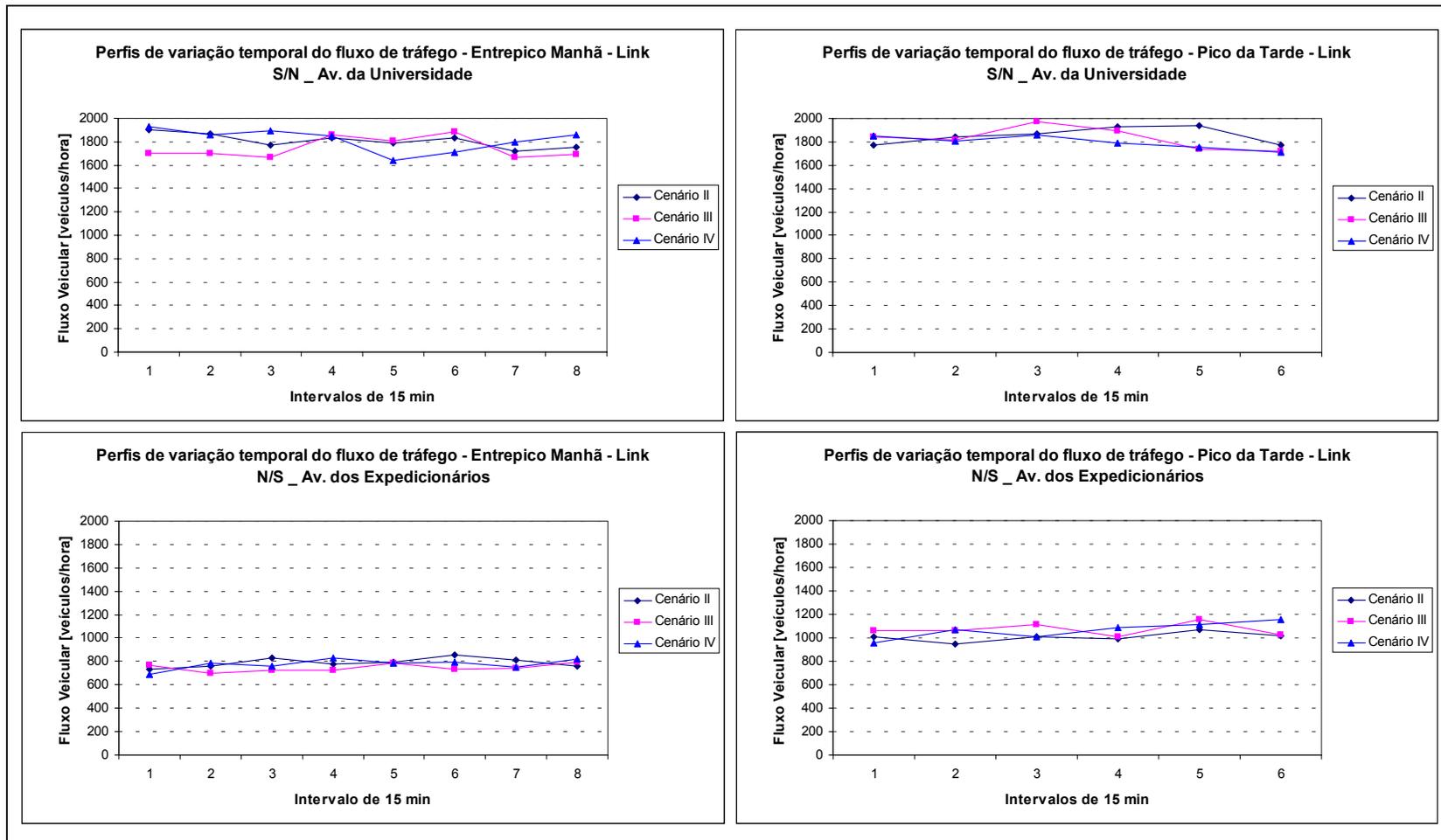


Figura 5.5: Perfis temporais de variação do fluxo de tráfego nas transversais

5.1.3 Análise da Variável Tempo Parado nos Pontos de Ônibus

Os valores da estatística p dos testes de normalidade (qui-quadrado), de comparação entre variâncias (teste de Bartlett) e de análise de variância (ANOVA) estão apresentados na Tabela 5.1. A análise desta variável mostrou não haver indícios de que as amostras obtidas em cada cenário pertencem a populações diferentes, ao nível de significância de 5%. Portanto, o comportamento do movimento de ônibus com relação à operação de embarque/desembarque em cada cenário foi similar.

Tabela 5.1: Análise da variável tempo parado nos pontos de ônibus

Sentido	Trecho 1: Valor-p			Trecho 2: Valor-p		
	(a) Teste Qui-quadrado	(b) Teste de Bartlett	(c) ANOVA	(a) Teste Qui-quadrado	(b) Teste de Bartlett	(c) ANOVA
Entrepico Manhã						
OL	0,13	0,21	0,66	0,32	0,21	0,30
LO	0,90	0,50	0,34	0,30	0,30	0,12
Pico da Tarde						
OL	0,28	1,00	0,12	0,28	1,00	0,07
LO	0,06	0,05	0,42	0,67	0,73	0,27

5.2 ETAPA I – CONTROLE SEMAFÓRICO E PRIORIZAÇÃO PASSIVA EM TEMPO FIXO

Neste tópico, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia ao estudo de caso proposto para a Etapa I de avaliação. Com relação às variáveis modeladas pelo sistema SCOOT (fluxo veicular, atraso e número de paradas), existem estudos anteriores (CASTRO NETO, 2003; PAIVA NETO *et al.*, 2004), indicando que estas variáveis, para a realidade operacional das interseções controladas pelo CTAFOR, estão sendo bem modeladas pelo sistema SCOOT. Portanto, tais medidas podem ser usadas como indicadores para comparar os cenários de controle.

Nos gráficos das Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, são apresentados os valores médios das medidas de desempenho: tempo de percurso, atraso veicular e número de paradas. Na coluna da esquerda, são apresentados os resultados para o Trecho 1 em estudo e, na coluna da direita, para o Trecho 2. Nas Figuras 5.6 e 5.7, são apresentados os valores médios de tempo de percurso de ônibus e de automóvel em

segundos; na Figura 5.8, são apresentados os valores médios de atraso veicular em s/veic./link e, na Figura 5.9, são apresentadas as proporções médias de paradas em unidades percentuais. Os valores médios de atraso e número de paradas foram calculados conforme as equações 4.3 e 4.4, respectivamente. Nos Anexos I e II, são apresentadas todas as estatísticas das variáveis de desempenho: a média, o desvio padrão e o número de observações para cada variável de desempenho (tempo de percurso de ônibus e de automóvel, assim como para o atraso e o número de paradas do tráfego geral) em cada cenário, período, trecho e sentidos analisados.

Comparando as medidas de desempenho entre os cenários nos gráficos das Figuras 5.6 a 5.9, pode ser destacado o seguinte:

- Tempo de percurso de ônibus: durante o entropico manhã, houve uma tendência de redução nos outros cenários em relação ao cenário Pré-CTAFOR, para ambos os sentidos de tráfego do Trecho 1. Durante o período de pico da tarde, em geral, não se pode observar diferença entre os cenários;
- Tempo de percurso de automóvel: durante o entropico manhã, semelhante ao que ocorreu com a variável anterior, houve uma tendência de redução nos outros cenários em relação ao cenário Pré-CTAFOR, para ambos os sentidos de tráfego do Trecho 1. Durante o período de pico da tarde, houve uma tendência de redução no Cenário 4 (Controle SCOOT sem Prioridade ou Tempo Real) para ambos os sentidos de tráfego do Trecho 1 e para o sentido LO do Trecho 2;
- Atraso veicular: nos dois períodos de estudo, podem ser observadas tendências de reduções no Cenário 3 (Prioridade Passiva em Tempo Fixo) para as vias transversais do Trecho 2; e acréscimos, também no Cenário 3, para o sentido LO do Trecho 2;
- Proporção de paradas: nos dois períodos de estudo, pode ser observada uma tendência de redução no Cenário 4 em relação aos outros cenários, para ambos os sentidos de tráfego do Trecho 2.

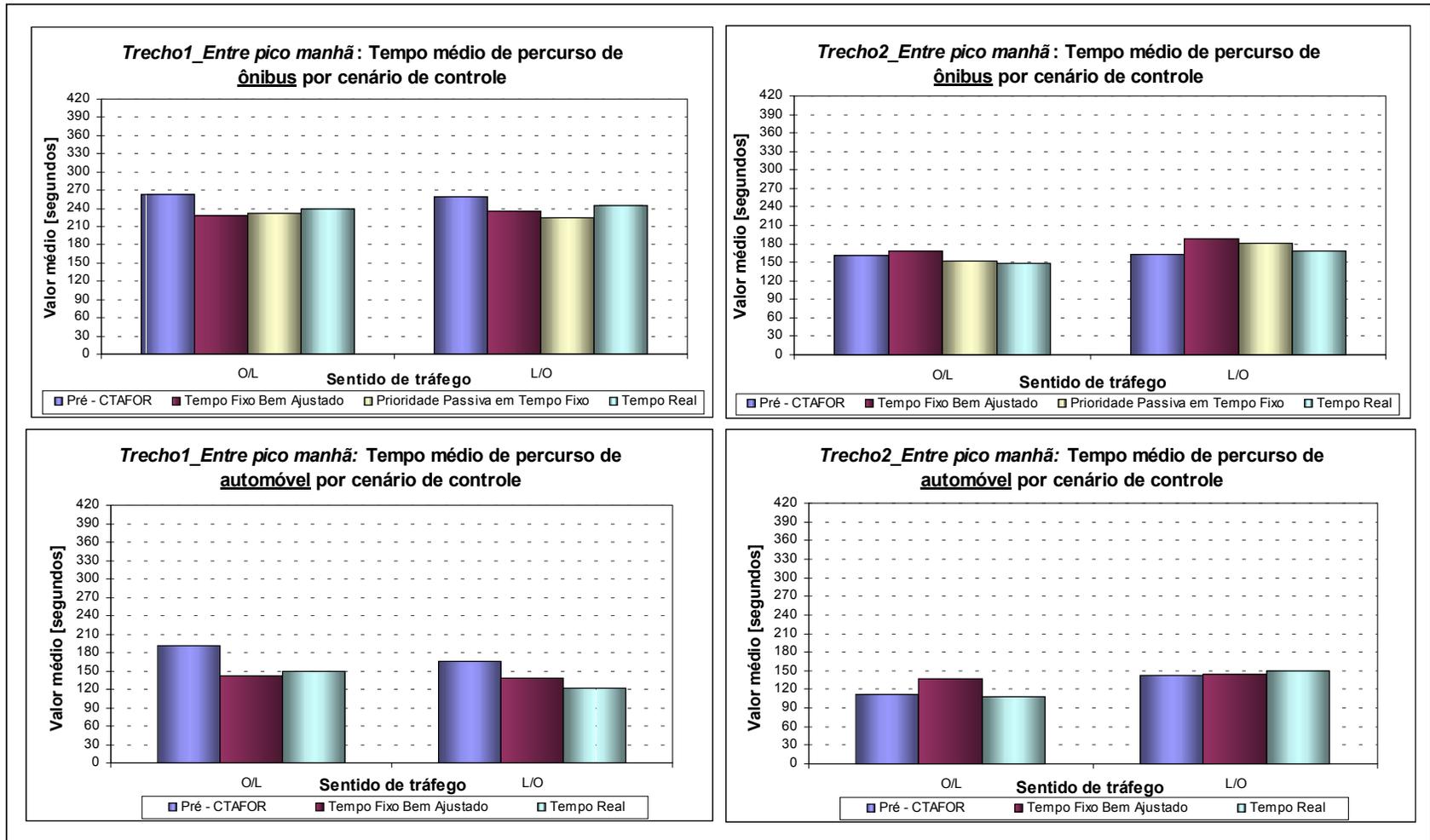


Figura 5.6: Etapa I - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus e de Automóveis no Entrepico Manhã

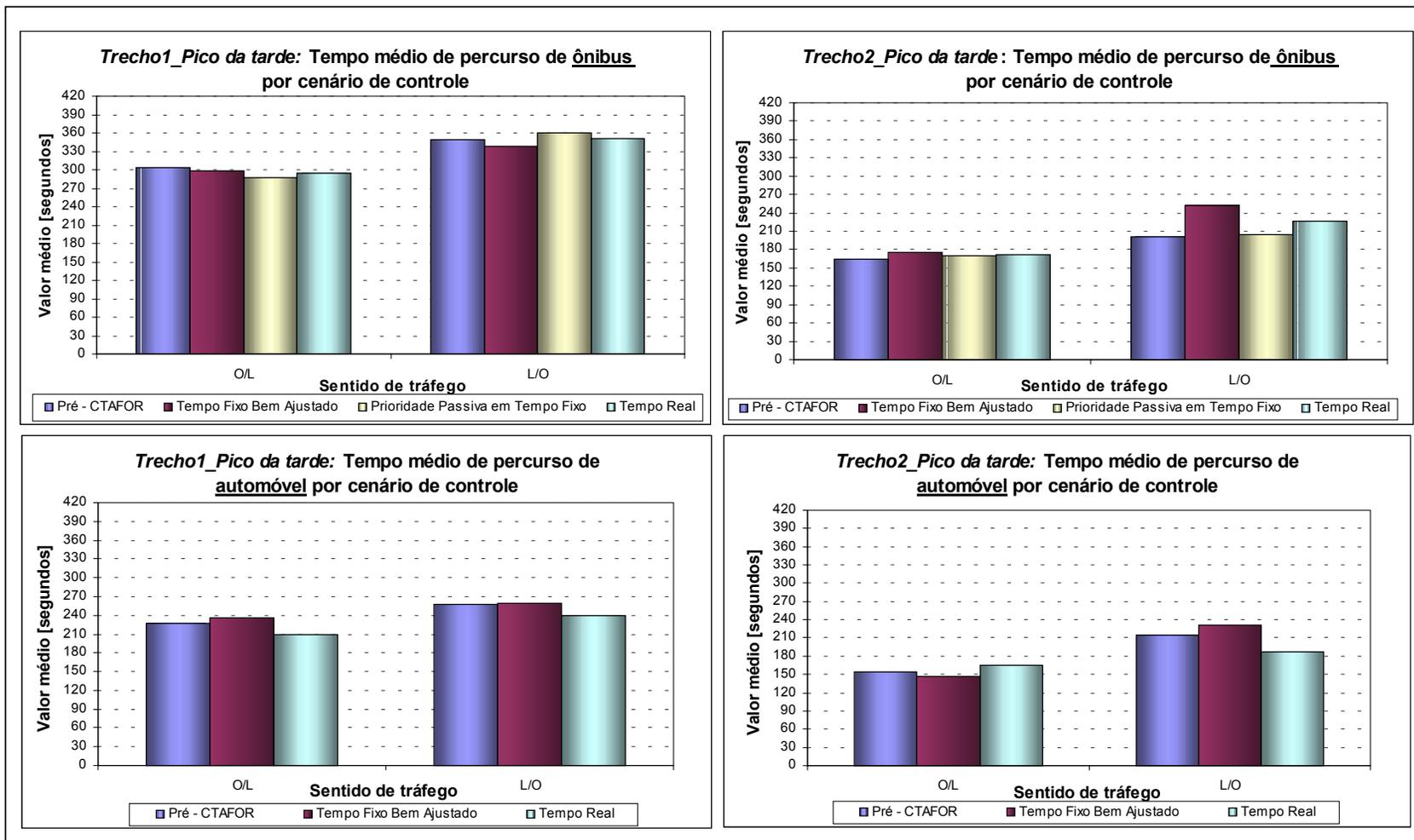


Figura 5.7: Etapa I - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus e de Automóveis no Pico da Tarde

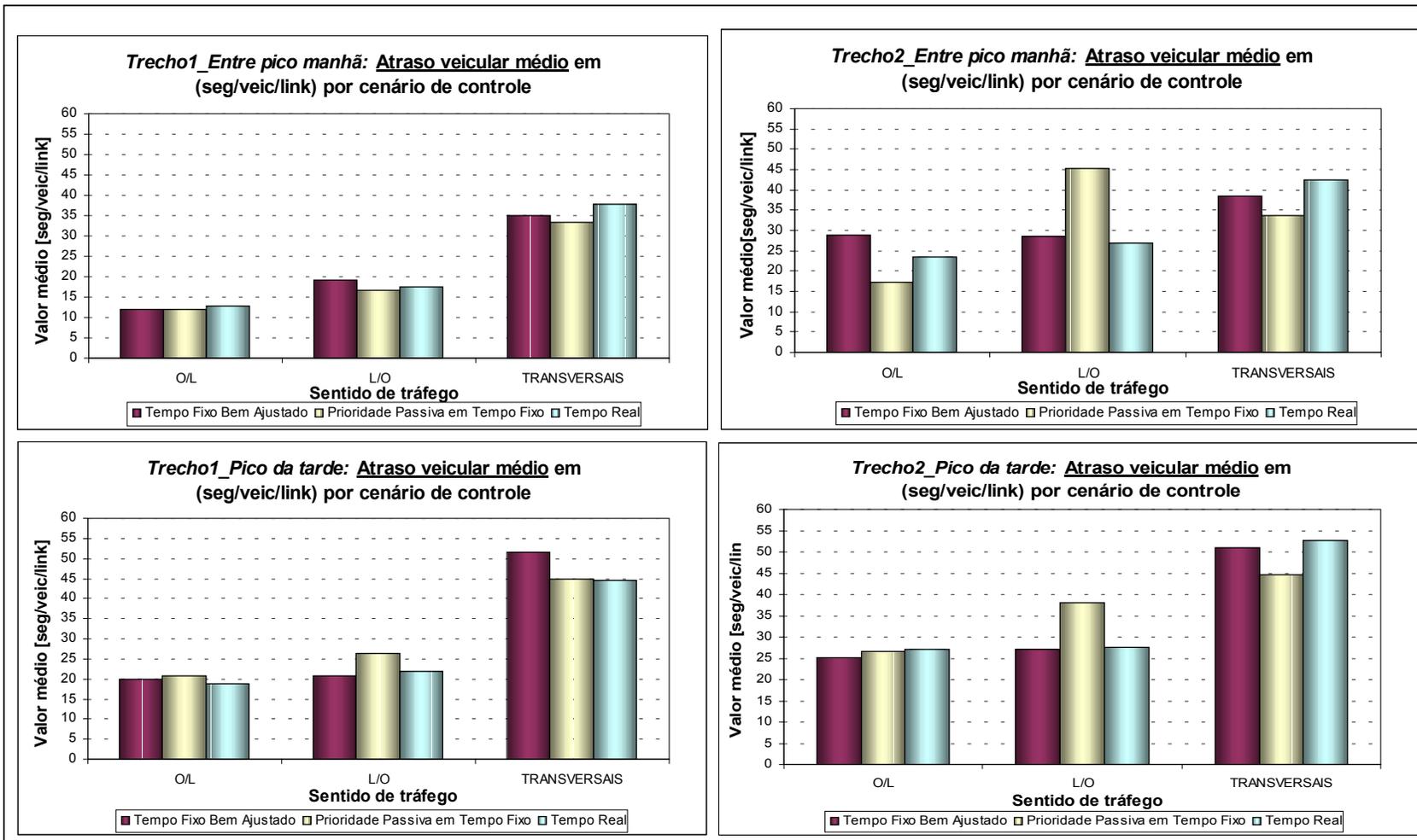


Figura 5.8: Etapa I - Valores Médios de Atraso Veicular

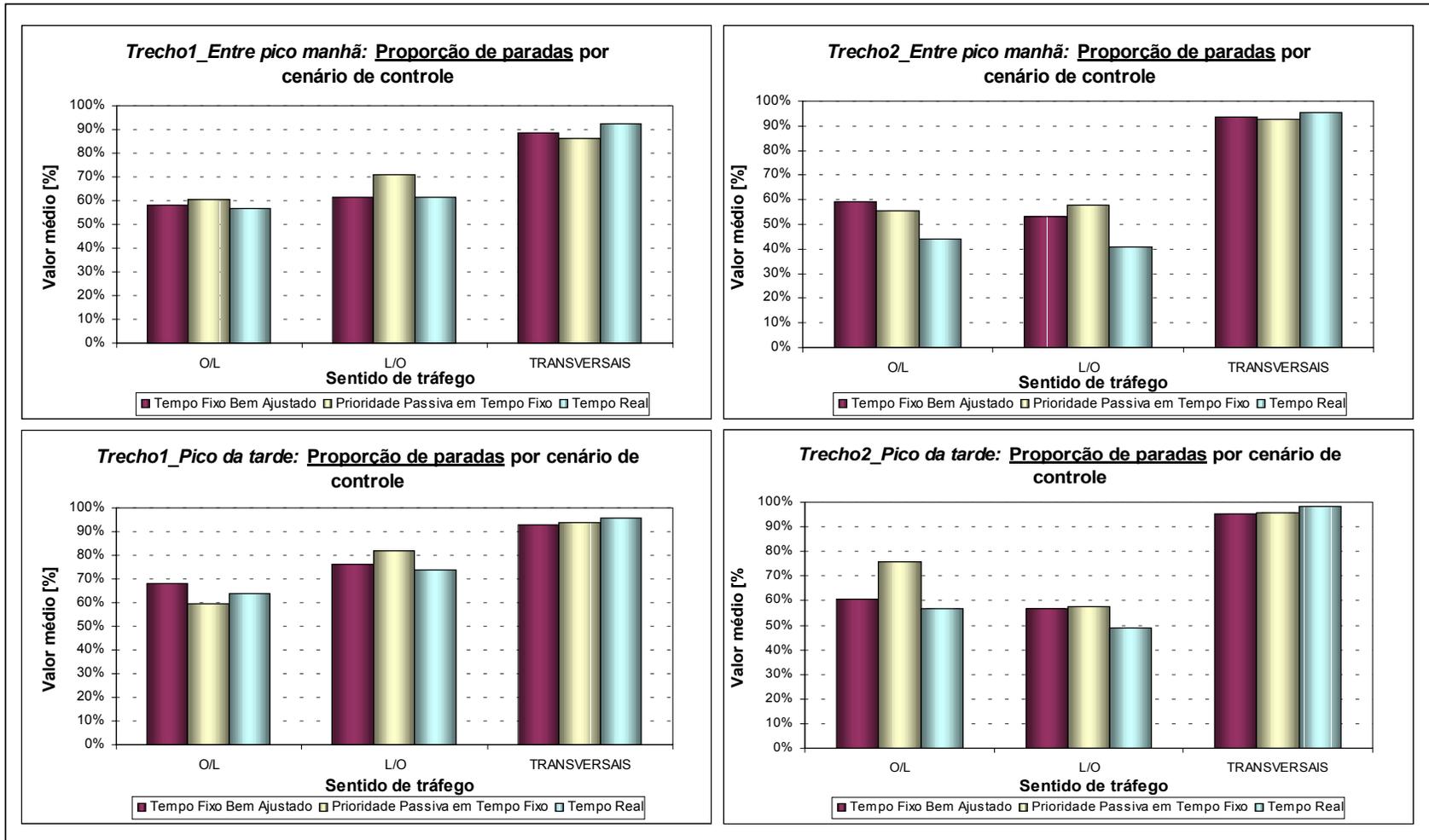


Figura 5.9: Etapa I - Valores Médios de Proporção de Paradas

A análise apresentada acima representa apenas um retrato inicial do desempenho dos cenários propostos, sendo que as diferenças destacadas devem ser corroboradas por testes de significância (que serão apresentados no Tópico 5.2.2).

5.2.1 Teste de Aderência das Medidas de Desempenho

Sabe-se que a normalidade das variáveis é uma premissa para realização dos testes de variância e também dos testes de comparação entre médias no caso em que as amostras são pequenas. Para testar a normalidade das variáveis atraso veicular e número de paradas, foram coletadas amostras adicionais do banco de dados do SCOOT para duas semanas de operação do tempo real. Já a normalidade da variável tempo de percurso foi testada com os dados da pesquisa de tempo de percurso para o Cenário 1. Os valores da estatística p dos testes de normalidade estão apresentados na Tabela 5.2, mostrando que não existem evidências de que as variáveis de desempenho seguem distribuições diferentes da normal, ao nível de significância de 5%.

Tabela 5.2: Resultados dos testes de aderência a distribuição normal das medidas de desempenho

Variável	Trecho 1: Valor-p do teste qui-quadrado			Trecho 2: Valor-p do teste qui-quadrado		
	OL	LO	Transversais	OL	LO	Transversais
Entrepico Manhã						
Tempo de Percurso de Automóvel	0,763	0,644	-	0,339	0,908	-
Tempo de Percurso de Ônibus	0,429	0,335	-	0,335	0,413	-
Atraso Veicular	0,136	0,061	0,073	0,102	0,090	0,076
Número de Paradas	0,464	0,648	0,639	0,060	0,963	0,518
Pico da Tarde						
Tempo de Percurso de Automóvel	0,910	0,708	-	0,870	0,296	-
Tempo de Percurso de Ônibus	0,292	0,235	-	0,519	0,170	-
Atraso Veicular	0,415	0,112	0,484	0,481	0,333	0,057
Número de Paradas	0,317	0,692	0,052	0,086	0,063	0,907

5.2.2 Testes de Comparação entre os Cenários

Os resultados dos testes de variância e de médias para as comparações de cenários da Etapa I estão apresentados na Tabela 5.3, sendo mostrados, para cada período de estudo, os valores obtidos das diferenças entre as médias e os desvios padrões das medidas de desempenho. Os valores com sinal negativo, destacados em azul, significam haver indícios nas amostras, conforme o critério de avaliação, de diferenças significativas entre os dois cenários analisados, corroborando a hipótese de pesquisa em questão. Já diferenças positivas em vermelho significam um resultado contrário à hipótese levantada. No geral, os resultados obtidos evidenciaram que:

- A hipótese I de estudo – de eficiência da atualização dos planos semafóricos – foi confirmada somente no entropico manhã, no Trecho 1;
- A hipótese II de estudo – de eficiência da prioridade passiva em tempo fixo – não foi confirmada em nenhum dos casos analisados;
- A hipótese III de estudo – de eficiência do controle em tempo real do SCOOT sem prioridade – foi confirmada em muitos casos, principalmente com relação à redução do tempo de percurso, redução do número de paradas no corredor e redução da variância do atraso veicular nas vias transversais.

A atualização dos planos semafóricos se provou eficiente, especialmente no entropico da manhã do Trecho 1. Os resultados de não confirmação da hipótese I podem ser justificados pela redução de capacidade viária advinda da priorização da segurança de pedestres na programação semafórica pós-CTAFOR. No Trecho 1, conforme descrito no Capítulo 3, nos cruzamentos adjacentes à Igreja N. S. de Fátima, houve um trabalho de conscientização da população sobre o uso da botoeira de pedestres já existente, o que acarretou num maior acionamento deste dispositivo, principalmente no período da tarde, quando o volume de travessias aumenta. Além disso, no Trecho 2, devido à implantação de fase de pedestres no cruzamento com a Av. da Universidade, ocorreu uma redução da capacidade do cruzamento, alterando assim o comportamento do tráfego.

Tabela 5.3: Etapa I - Resultados dos testes de comparação entre os cenários

2 x 1 – Tempo Fixo Bem Ajustado x Pré-CTAFOR						
Diferenças nas variáveis	Trecho 1			Trecho 2		
	OL	LO	Transversais	OL	LO	Transversais
<i>Entrepico Manhã</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	-5,8	-4,5	-	3,3	7,9	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	-26	6	-	17	-4	-
Δt_{pc} (seg/auto/semáforo)	-8,2	-5,5	-	8,4	0,3	-
$\Delta\sigma_{\text{auto}}$ (segundos)	-1	25	-	11	7	-
<i>Pico da Tarde</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	-1,0	-1,8	-	5,8	17,0	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	17	5	-	7	-17	-
Δt_{pc} (seg/auto/semáforo)	1,7	0,2	-	-2,2	4,3	-
$\Delta\sigma_{\text{auto}}$ (segundos)	6	33	-	11	-28	-
3 x 2 – Priorização Passiva em Tempo Fixo x Tempo Fixo Bem Ajustado						
<i>Entrepico Manhã</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	0,5	-2,2	-	-8,1	-1,9	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	40	9	-	-22	-4	-
ΔAT (seg/veic/link)	0,1	-2,4	-1,8	-11,6	16,5	-4,9
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	26	13	-25	135	168	-90
ΔPP (%)	2,3%	9,4%	-2,2%	-3,7%	4,6%	-1,1%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	-2	-6	-10	128	-86	8
<i>Pico da Tarde</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	-1,7	4,1	-	-3,3	-16,1	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	-15	23	-	1	3	-
ΔAT (seg/veic/link)	0,7	5,6	-6,9	1,4	10,9	-6,2
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-2	-126	98	3	118	-384
ΔPP (%)	-8,6%	5,7%	0,7%	15,3%	0,8%	0,7%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	130	-109	89	-17	-29	-32
4 x 2 – Controle SCOOT x Tempo Fixo Bem Ajustado						
<i>Entrepico Manhã</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	1,6	1,8	-	-9,3	-6,6	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	16	5	-	-17	-9	-
Δt_{pc} (seg/auto/semáforo)	1,3	-3,4	-	-9,6	1,2	-
$\Delta\sigma_{\text{auto}}$ (segundos)	-1	-21	-	5	-17	-
ΔAT (seg/veic/link)	0,8	-1,5	2,8	-5,3	-1,7	3,8
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-12	133	-63	5	-111	-410
ΔPP (%)	-1,2%	-0,2%	4,1%	-15,3%	-12,4%	1,8%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	30	19	-95	34	6	-48
<i>Pico da Tarde</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	-0,6	2,5	-	-2,2	-8,2	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	-17	15	-	-12	14	-
Δt_{pc} (seg/auto/semáforo)	-4,6	-4,0	-	6,0	-10,9	-
$\Delta\sigma_{\text{auto}}$ (segundos)	-10	16	-	-2	-15	-
ΔAT (seg/veic/link)	-1,1	1,0	-7,2	1,9	0,4	1,7
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-42	26	-200	54	13	-525
ΔPP (%)	-4,5%	-2,5%	2,8%	-3,7%	-7,6%	3,1%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	-39	-8	9	26	109	-42

onde: Δt_{pc} = diferença de tempos de percurso para automóveis por semáforo em cada sentido;

$\Delta\sigma_{auto}$ = diferença de desvio padrão do tempo de percurso de automóvel;

Δt_{po} = diferença de tempos de percurso para ônibus por semáforo em cada sentido;

$\Delta\sigma_{ônibus}$ = diferença de desvio padrão do tempo de percurso de ônibus;

ΔAT = diferença de atraso por veículo por *link* da rede;

$\Delta\sigma_{AT}$ = diferença de desvio padrão do atraso veicular;

ΔPP = diferença das proporções de paradas entre os cenários.

$\Delta\sigma_{NP}$ = diferença de desvio padrão do número de paradas;

Já a não confirmação da hipótese 2, em quase todos os casos considerados, atesta a baixa eficiência da priorização passiva em tempo fixo, provavelmente devido ao aumento da interação entre os ônibus e automóveis, assim como às fortes variações nos tempos de embarque/desembarque nos pontos de parada ao longo do corredor. Por outro lado, a confirmação da hipótese 3 para quase todos os indicadores analisados comprova as expectativas de ganhos significativos com a implantação do controle em tempo real. Vale lembrar que no cenário 4, as defasagens (valores *default* – *DEFO*) foram determinadas atribuindo para cada *link* os valores obtidos da programação semafórica de tempo fixo calculada no TRANSYT, limitando a sua variação com valores do parâmetro *Link BIAS* entre 80 a 120. Mesmo assim, os resultados apontaram para uma redução significativa do número de paradas ao longo do corredor. Isto significa que é possível se obter boa progressão semafórica para corredores arteriais de sentido duplo com o SCOOT, desde que a variação dos valores de defasagem sejam limitados a um valor central que permita uma boa progressão do tráfego em ambos os sentidos do corredor.

Vale lembrar ainda que na operação em tempo real foi adotada também uma postura de priorizar o tráfego no corredor, aumentando a saturação dos *links* das vias transversais com os parâmetros *SPWM* e *SPWS* (com valores de saturação variando entre 80 a 100%). Este fato, além de ajudar a explicar as reduções do número de paradas observadas em alguns casos ao longo do corredor, também explica as reduções significativas dos tempos de percursos de automóveis e de ônibus. Vale ressaltar que, anteriormente a este estudo, nos corredores de sentido duplo controlados pelo CTAFOR, as defasagens não eram fixas, definindo-se valores baixos do parâmetro *Link BIAS* para permitir que o otimizador de defasagens do SCOOT

decidisse qual o “melhor valor” a ser atribuído aos *links*. Contudo, após os bons resultados observados com a operação em tempo real no corredor da Av. 13 de Maio, estão sendo testadas defasagens diferentes ao longo dos *links* de outros corredores arteriais para permitir uma boa progressão do tráfego em períodos de entropico.

Ainda com relação ao controle em tempo real, em ambos os períodos, houve redução significativa das variâncias do atraso veicular para as vias transversais, o que não foi observado em geral para o corredor. Nas vias transversais, o tráfego se apresenta mais saturado que no corredor e, como os semáforos adjacentes das vias transversais são distantes, a chegada dos veículos nas interseções é aleatória, diferentemente das aproximações do corredor. Isto significa que as alterações dos tempos de verde na operação em tempo real acompanham a aleatoriedade do tráfego em *links* isolados e saturados. Em *links* coordenados, no entanto, isto não foi observado, visto que, nesses *links*, o tráfego se apresenta menos saturado e a chegada dos veículos é função da operação semaforica das interseções à montante, caracterizando um comportamento determinístico, sendo possível prever em qual intervalo do ciclo (intervalo de indicação verde ou vermelha) os veículos trafegando no corredor chegam nas interseções.

5.3 ETAPA II – PRIORIDADE PASSIVA E ATIVA NO CONTROLE EM TEMPO REAL

Neste tópico, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia ao estudo de caso proposto para avaliação. Nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, são apresentados, para cada cenário de avaliação, os valores médios das medidas de desempenho: tempo de percurso, atraso veicular e número de paradas. Na coluna da esquerda, são apresentados os resultados para o Trecho 1 em estudo e, na coluna da direita, para o Trecho 2, lembrando que a prioridade ativa (Cenários 6 e 7) foi testada somente no Trecho 2. Na Figura 5.10, são apresentados os valores médios de tempo de percurso de ônibus em segundos; na Figura 5.11, são apresentados os valores médios de atraso veicular em s/veic./link; e, na Figura 5.12, são apresentadas as proporções de paradas em unidades percentuais. Os valores médios de atraso e número de paradas foram calculados conforme as equações 4.3 e 4.4, respectivamente. Nos Anexos I e II, são apresentadas todas as estatísticas das variáveis de desempenho, conforme descrito no Tópico 5.2.

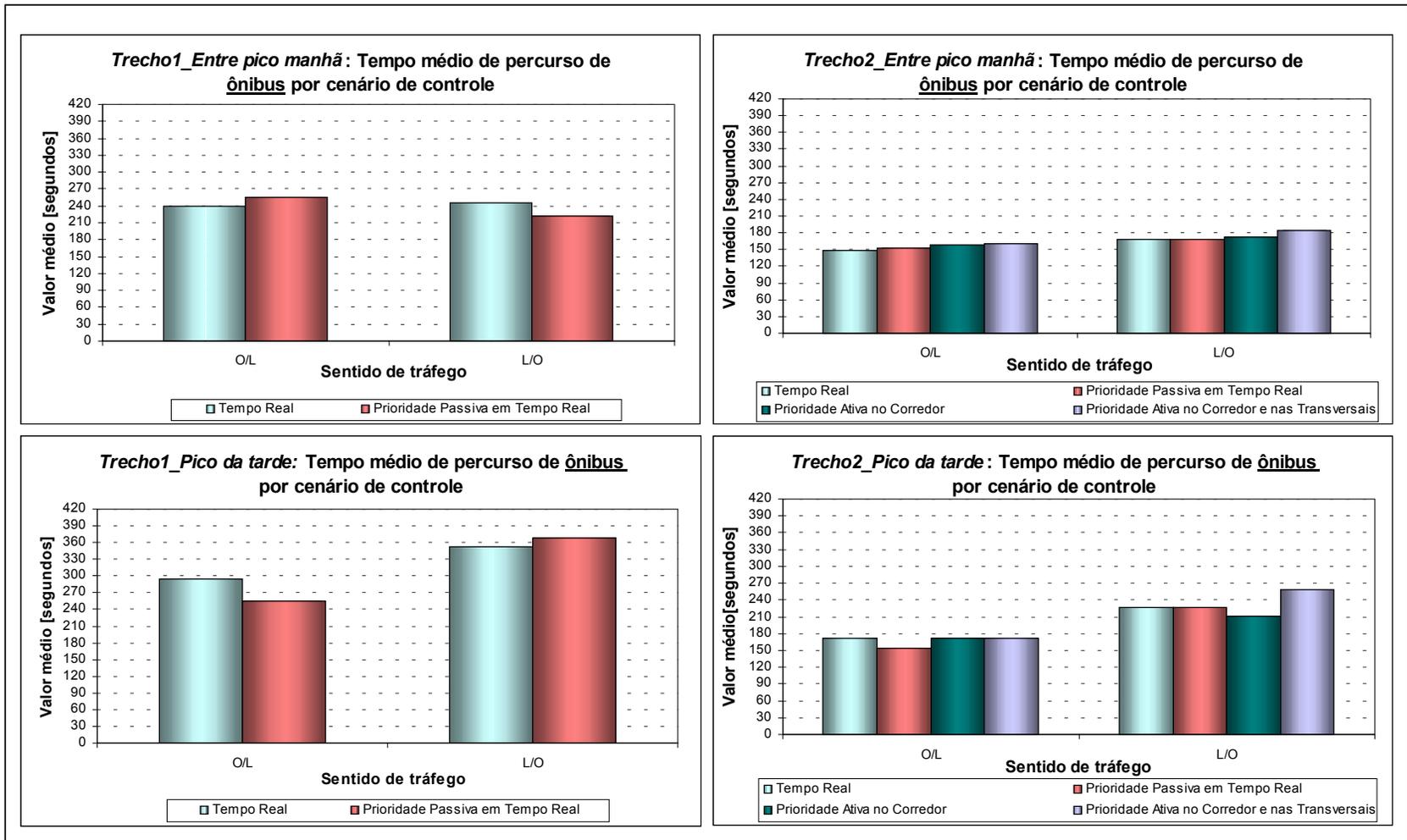


Figura 5.10: Etapa II - Valores Médios de Tempo de Percurso de Ônibus

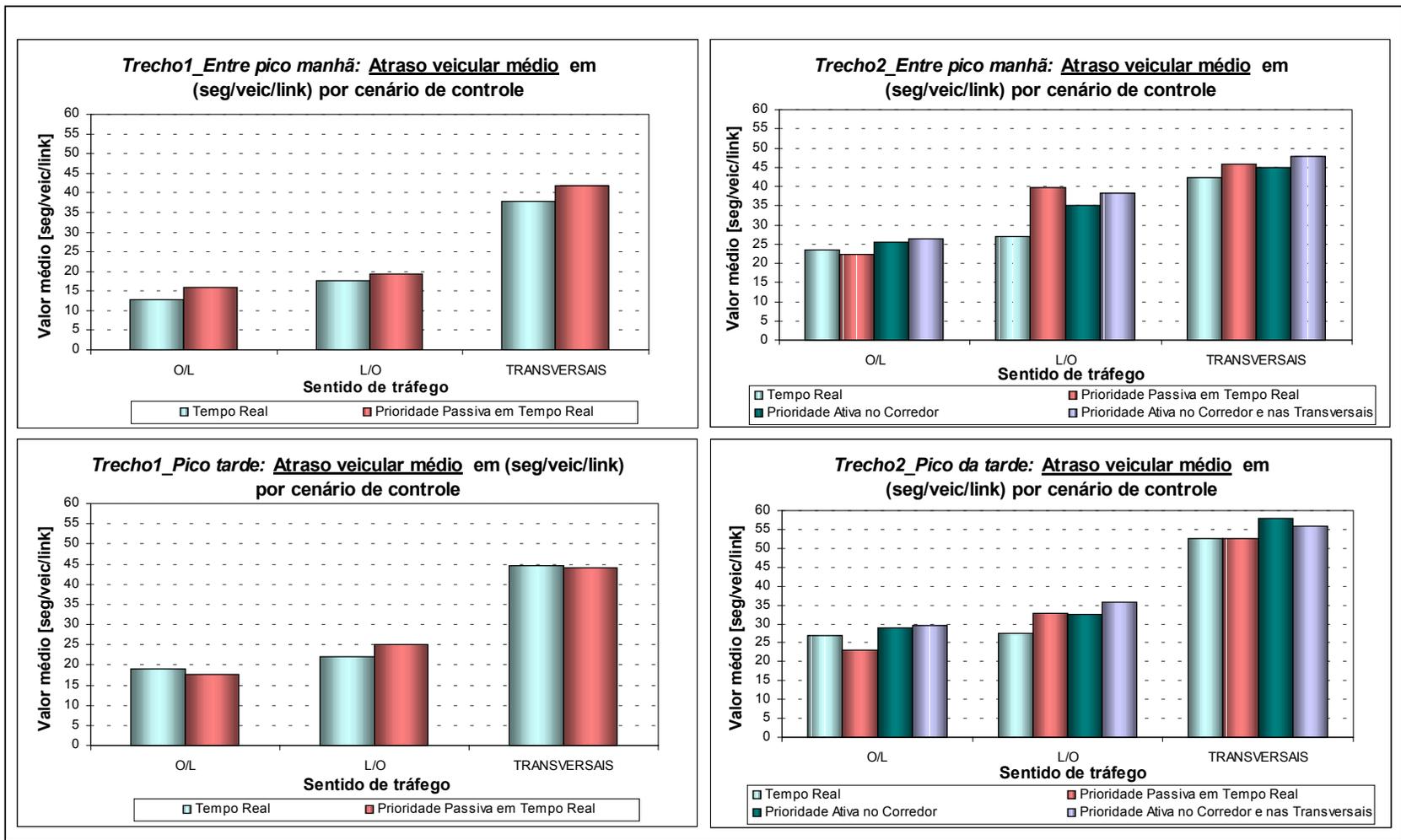


Figura 5.11: Etapa II - Valores Médios de Atraso Veicular

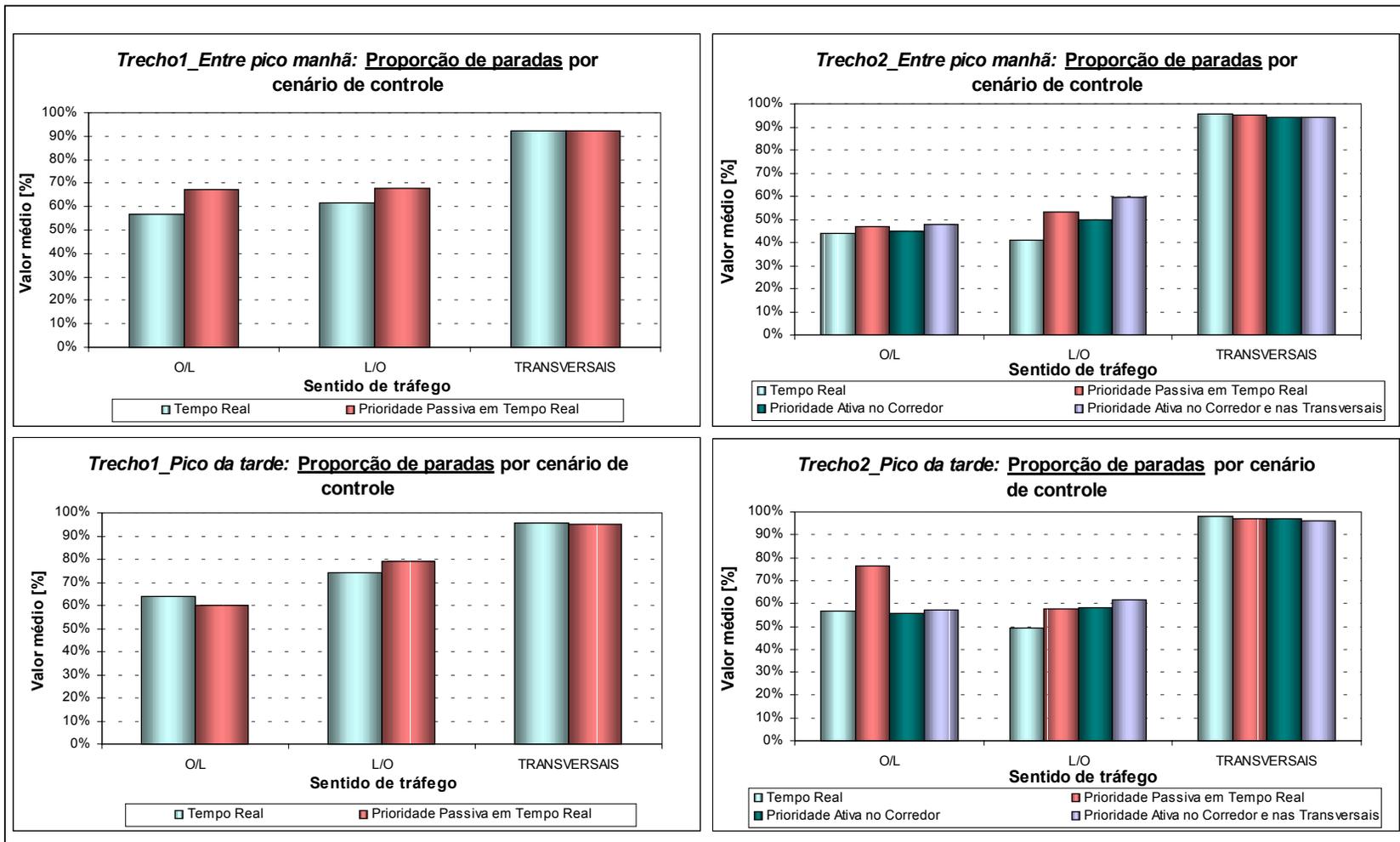


Figura 5.12: Etapa II - Valores Médios de Proporção de Parada

Comparando as medidas de desempenho entre os cenários nos gráficos das Figuras 5.10 a 5.12, pode-se observar, em geral, que não existiu uma tendência de redução dos tempos médios de percurso de ônibus dos cenários com prioridade em relação ao Cenário 4 (Tempo Real). Além disso, nos dois períodos de estudo, houve uma tendência de acréscimo nos valores médios das medidas de desempenho (atraso veicular e proporção de paradas) para o tráfego geral, principalmente nos cenários com prioridade ativa em relação ao Controle SCOOT.

5.3.1 Comparação entre Cenários

Os resultados dos testes de variância e de médias para avaliação da prioridade passiva em tempo real estão apresentados na Tabela 5.4 e os resultados para avaliação da prioridade ativa (Comparações 6 x 4 e 7 x 4) estão apresentados na Tabela 5.5. No geral, os resultados obtidos evidenciaram que:

- A hipótese IV de estudo – de eficiência da prioridade passiva em tempo real – foi confirmada somente no pico da tarde, no sentido OL do Trecho 1;
- A hipótese V de estudo – de eficiência da prioridade ativa em tempo real – não foi confirmada em nenhum dos casos analisados.

No Cenário 5, foi testada uma priorização passiva para ônibus no controle em tempo real com os valores do parâmetro *DEFO*, para cada *link* do corredor, calculados com a utilização do modelo de retenção compartilhada do TRANSYT. Portanto, como os parâmetros do tempo real (SPWM, SPWS) foram ajustados para dar prioridade ao movimento no corredor, esperava-se uma melhora no desempenho dos ônibus, ajustando apenas as defasagens ao seu movimento. Contudo, a não confirmação da hipótese 4, em quase todos os casos considerados, atesta a baixa eficiência da priorização passiva em tempo real, provavelmente devido ao aumento da interação entre os ônibus e automóveis, assim como às fortes variações nos tempos de embarque/desembarque nos pontos de parada ao longo do corredor, semelhante ao que ocorreu no Cenário 3. Conforme a Tabela 5.4, os impactos negativos são mais evidentes no sentido LO do Trecho 2, que contém as aproximações no corredor com maiores níveis de saturação.

Tabela 5.4: Avaliação da prioridade passiva em tempo real

5 x 4 – Priorização Passiva em Tempo Real x Controle SCOOT						
Diferenças nas variáveis	Trecho 1			Trecho 2		
	OL	LO	Transversais	OL	LO	Transversais
<i>Entrepico Manhã</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	2,6	-4,5	-	1,4	8,1	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	18	1	-	-5	4	-
ΔAT (seg/veic/link)	3,2	1,7	4,0	-1,3	12,9	3,5
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	8	98	754	15	286	351
ΔPP (%)	10,3%	6,6%	0,0%	2,7%	12,2%	-0,6%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	-120	-67	160	18	53	-2
<i>Pico da Tarde</i>						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	-6,6	3,4	-	-8,7	0,1	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	36	18	-	3	-8	-
ΔAT (seg/veic/link)	-1,2	3,1	-0,4	-3,8	5,2	-0,2
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-75	-12	138	16	61	102
ΔPP (%)	-3,8%	5,3%	-0,6%	19,5%	8,4%	-1,0%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	59	95	112	-8	-229	57

Tabela 5.5: Avaliação da prioridade ativa em tempo real

6 x 4 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Controle SCOOT						
Diferenças nas variáveis	Entrepico Manhã			Pico da Tarde		
	OL	LO	Transversais	OL	LO	Transversais
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	4,6	1,5	-	-0,1	-5,2	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	13	-6	-	9	3	-
ΔAT (seg/veic/link)	2,1	8,3	2,5	2,2	4,8	5,2
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-1	265	384	1	36	114
ΔPP (%)	0,7%	8,7%	-1,3%	-1,3%	9,2%	-1,1%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	-26	89	21	-51	-110	-3
7 x 4 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Transversais x Controle SCOOT						
Δt_{po} (seg/ônibus/semáforo)	5,2	5,6	-	0,4	10,4	-
$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ (segundos)	9	7	-	2	-11	-
ΔAT (seg/veic/link)	2,8	11,2	5,7	2,6	8,0	3,3
$\Delta\sigma_{AT}$ (veic.min/h)	-53	147	425	26	-45	179
ΔPP (%)	3,8%	18,7%	-1,5%	0,4%	12,7%	-2,1%
$\Delta\sigma_{NP}$ (veic./h)	25	-34	-13	-114	-231	25

onde: Δt_{po} = diferença de tempos de percurso para ônibus por semáforo em cada sentido;

$\Delta\sigma_{\text{ônibus}}$ = diferença de desvio padrão do tempo de percurso de ônibus;

ΔAT = diferença de atraso por veículo por *link* da rede;

$\Delta\sigma_{AT}$ = diferença de desvio padrão do atraso veicular;

ΔPP = diferença das proporções de paradas entre os cenários.

$\Delta\sigma_{NP}$ = diferença de desvio padrão do número de paradas;

Os resultados da avaliação da prioridade ativa (Tabela 5.5) mostraram que as estratégias de priorização ativa do SCOOT (extensão, antecipação e compensação) não propiciaram melhoras significativas ao desempenho dos ônibus e causaram impactos negativos (acréscimos de atraso e número de paradas) ao tráfego geral no sentido de maior fluxo veicular (LO). Isto mostra que, durante as interrupções devido ao modelo de prioridade, ocorria uma perda da coordenação dos semáforos, resultando em acréscimos no número de paradas e um conseqüente aumento do atraso veicular no sentido LO.

Na operação em tempo real do SCOOT sem prioridade (Cenário 4), as mudanças nos tempos semafóricos beneficiavam as aproximações do corredor de maior demanda veicular e, como as vias transversais já operavam próximas da saturação (com grau de saturação entre 80 e 100%) em ambos os períodos de estudo, os tempos extras do modelo de prioridade ativa prejudicaram a coordenação semafórica.

O principal fator que pode ter contribuído para a ineficiência do modelo de prioridade do SCOOT foi que, conforme o próprio modelo, a prioridade é implementada em cada nó individualmente, podendo, em determinados períodos do ciclo, dois nós adjacentes estarem operando com estratégias diferentes. Por exemplo, é possível ocorrer que, enquanto um semáforo está executando uma extensão de verde, em outro pode estar sendo implementada uma compensação de estágio. Isto pode ocorrer devido a conflitos de prioridade nos dois sentidos do corredor ou com as vias transversais. Vale destacar ainda que o impacto negativo na coordenação semafórica pode ser agravado quanto maior for o número de ativações da prioridade.

No Cenário 7, as detecções adicionais nas vias transversais acarretaram em cada vez mais paradas e atrasos aos veículos no sentido LO do corredor. Neste caso, além da perda da coordenação semafórica no corredor, ocorria uma redução da sua capacidade durante a execução de uma extensão ou antecipação para beneficiar um ônibus trafegando numa via transversal.

5.3.2 Análise do Modelo de Prioridade Ativa do SCOOT

No sistema SCOOT, é possível acompanhar a operação do controle em tempo real com o uso de mensagens transmitidas pelo modelo de tráfego (TRL, 2000f). Este recurso foi usado para analisar a operação do modelo de prioridade ativa do SCOOT

durante os Cenários 6 e 7. Assim, foi possível saber, para cada período de estudo, o número de veículos detectados, os instantes das detecções, o número de ativações da prioridade e os valores de extensão e antecipação implementados. Com estes dados, foi analisado o efeito causado pelo modelo sobre a coordenação semafórica e a funcionalidade do modelo de prioridade ativa do SCOOT.

Resultado das Detecções

A Tabela 5.6 apresenta o número de ativações da prioridade (extensão ou antecipação) durante um dia de operação dos Cenários 6 e 7, nos dois períodos de estudo. O número de extensões e antecipações variou de um cruzamento para o outro, sendo observadas, em geral, bem mais extensões do que antecipações durante o Cenário 6. Já no Cenário 7, as ativações da prioridade nas aproximações transversais resultaram num equilíbrio entre as duas estratégias de prioridade.

Tabela 5.6: Número de ativações da prioridade nos Cenários 6 e 7

Cenário 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor				
Cruzamento	Entrepico manhã		Pico da tarde	
	Extensão	Antecipação	Extensão	Antecipação
<i>Rua Barão do Rio Branco</i>	13	14	16	3
<i>Av. dos Expedicionários</i>	29	14	33	11
<i>Rua Marechal Deodoro</i>	14	10	26	10
<i>Av. da Universidade</i>	11	5	15	1
<i>Av. Carapinima</i>	0	5	6	0
Total	67	48	96	25

Cenário 7 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Transversais				
Cruzamento	Entrepico manhã		Pico da tarde	
	Extensão	Antecipação	Extensão	Antecipação
<i>Rua Barão do Rio Branco</i>	19	9	20	7
<i>Av. dos Expedicionários</i>	17	22	24	9
<i>Rua Marechal Deodoro</i>	14	31	16	21
<i>Av. da Universidade</i>	27	12	10	7
<i>Av. Carapinima</i>	13	13	8	20
Total	90	87	78	64

O número de ativações apresentados é baixo em relação à quantidade de detecções, conforme mostra a Tabela 5.7, que apresenta os números de detecções

por aproximação, obtidos para os cruzamentos com Av. dos Expedicionários e com a Av. da Universidade, nos Cenários 6 e 7, respectivamente. Conforme os resultados da Tabela 5.5, a proporção (percentual de ativações) de ônibus na Tabela 5.7 “beneficiada” com as estratégias de extensão e antecipação não causou redução na média e na variância do tempo de percurso de ônibus ao longo do corredor. O percentual de ativações foi baixo, não por falha no modelo de prioridade, mas devido ao seguinte: dos veículos não beneficiados com a prioridade nas aproximações do cruzamento com a Av. dos Expedicionários, 92% no entropico manhã e 57% no pico da tarde não precisavam de prioridade; já no cruzamento com Av. da Universidade, dos veículos não beneficiados, 60% no entropico manhã e 50% no pico da tarde não precisavam de prioridade. Estes resultados mostram que no entropico manhã uma maior proporção de ônibus sofre poucos atrasos nas aproximações destes cruzamentos, não necessitando de prioridade. No pico da tarde, devido ao aumento da demanda veicular, a proporção de ônibus que necessita de prioridade aumenta; no entanto, devido ao critério de saturação do modelo de prioridade, um baixo percentual dos veículos detectados é “beneficiado”.

Tabela 5.7: Quantidade de detecções nas aproximações dos cruzamentos críticos do Trecho 2

Cenário 6 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor				
Cruzamento – Aproximação	Entropico manhã		Pico da tarde	
	Detecções	Ativações (%)	Detecções	Ativações (%)
<i>Av. dos Expedicionários – OL</i>	42	52%	50	54%
<i>Av. dos Expedicionários – LO</i>	48	44%	54	31%
Total	90	48%	104	42%

Cenário 7 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Transversais				
Cruzamento – Aproximação	Entropico manhã		Pico tarde	
	Detecções	Ativações (%)	Detecções	Ativações (%)
<i>Av. da Universidade – OL</i>	27	2%	27	1%
<i>Av. da Universidade – LO</i>	54	22%	48	10%
<i>Av. da Universidade – SN</i>	99	24%	111	10%
Total	180	22%	186	9%

Efeito sobre a Coordenação Semafórica

A seguir são apresentadas duas situações identificadas de perda da coordenação semafórica, ou da progressão do tráfego, durante a implementação da prioridade ativa (Cenário 6) quando um ou mais ônibus são detectados numa ou mais aproximações do corredor: Situação A – extensão seguida de antecipação e Situação B – antecipação seguida de extensão. Cada situação é ilustrada com exemplos de imagens gravadas da câmera do sistema CFTV localizada no cruzamento com a Av. dos Expedicionários. As imagens mostram a aproximação de sentido LO deste cruzamento, sendo possível também visualizar o cruzamento com a Rua Barão do Rio Branco, distante aproximadamente 110m do cruzamento com a Av. dos Expedicionários.

Situação A – Extensão seguida de antecipação

Uma das situações em que pode ocorrer perda da coordenação entre dois semáforos adjacentes num corredor arterial, devido às interrupções da prioridade, é representada na Figura 5.13, que mostra o diagrama de espaço x tempo com a progressão entre dois semáforos que operam com um mesmo ciclo semafórico. O movimento principal do corredor é servido pelo estágio 1. No semáforo 1 é implementada uma extensão do verde no estágio 1 fazendo com que os últimos veículos do pelotão de tráfego parem no vermelho do semáforo 2. A fila formada, em alguns casos, pode bloquear o cruzamento a montante. Já no semáforo 2 é implementado em seguida uma antecipação para beneficiar o ônibus que recebeu extensão no semáforo 1, o que causa um acréscimo de paradas dos primeiros veículos do pelotão que saem do nó 2 em direção ao nó 1. O efeito representado pode se propagar nos ciclos seguintes durante o período de compensação, até que os dois semáforos retornem à sua operação normal.

As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, que serão descritas nos parágrafos seguintes, ilustram com imagens o efeito descrito acima. Nestas figuras são também mostrados dois ciclos da fase do semáforo do cruzamento com a Av. dos Expedicionários, com os instantes de mudança de estágio (correspondendo ao instante de início do entreverde de um estágio para outro) e os instantes, representados pelo símbolo (▲), em que as imagens foram coletadas. O estágio 1 representa o movimento de veículos do corredor. O símbolo (◄) corresponde ao instante no ciclo em que ocorreu uma detecção no sentido LO, o símbolo (►) corresponde ao instante de uma detecção no

sentido OL, enquanto que os símbolos (\longleftrightarrow) e (\rightleftarrows) correspondem aos instantes nos quais o modelo de prioridade decidiu implementar uma extensão ou antecipação de estágio, respectivamente.

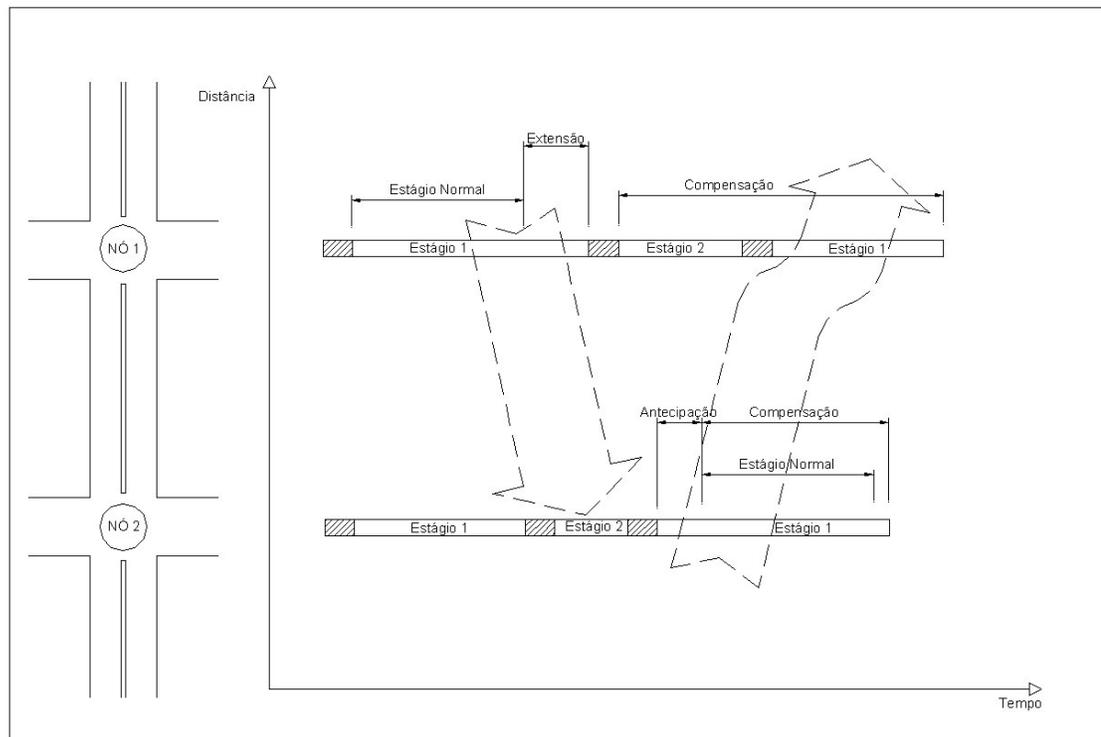


Figura 5.13: Situação A - Perda de coordenação devido a uma extensão seguida de antecipação

Na Figura 5.14, durante o período de entropico manhã, no semáforo com a Av. dos Expedicionários (nó 1) ocorreu uma extensão de estágio seguida por uma antecipação no semáforo com a Rua Barão do Rio Branco (nó 2):

- Imagem 1: A imagem destaca um ônibus que foi detectado no sentido OL e beneficiado com uma extensão no nó 1;
- Imagem 2: Mostra o ônibus beneficiado no nó 1, parado no nó 2, situação que resultou numa antecipação de estágio;
- Imagem 3: A extensão de estágio no nó 1, seguida por uma antecipação no nó 2, causou um acréscimo de paradas e de atraso aos primeiros veículos do sentido LO (que chegaram no nó 1 vindos do nó 2), no início do próximo ciclo.

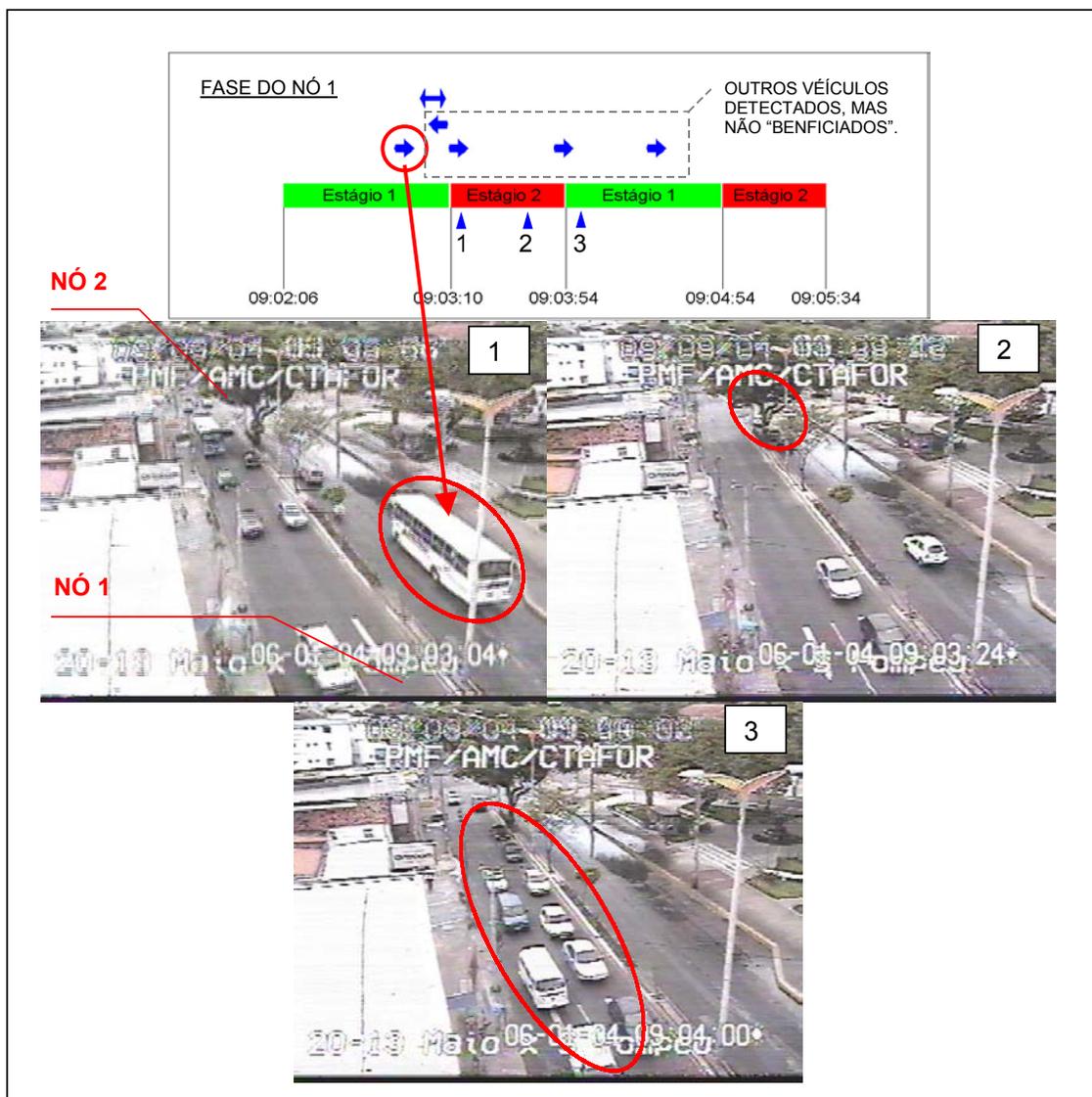


Figura 5.14: Exemplo A.1 – Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a uma detecção no sentido OL durante o período de entropico manhã

Na Figura 5.15, durante o período de entropico manhã, no semáforo com a Rua Barão do Rio Branco (nó 1) ocorreu uma extensão seguida por uma antecipação no semáforo com a Av. dos Expedicionários (nó 2):

- Imagem 1: A imagem destaca um ônibus que foi detectado no sentido LO e beneficiado com uma extensão no nó 1, mas parou em seguida no vermelho do nó 2;
- Imagem 2: A imagem destaca outro ônibus que foi detectado no sentido LO e beneficiado com a mesma extensão no nó 1, mas parou em seguida no vermelho do nó 2;

- Imagem 3: mostra os dois ônibus que foram detectados parados no vermelho do 2, que serão beneficiados com uma antecipação no estágio 1 seguinte;
- Imagem 4: A extensão de estágio no nó 1 seguida por uma antecipação no 2 causou uma perda de coordenação que se propagou no ciclo seguinte, resultando em acréscimo de paradas e de atraso aos últimos veículos que chegaram no nó 2 vindos do nó 1.

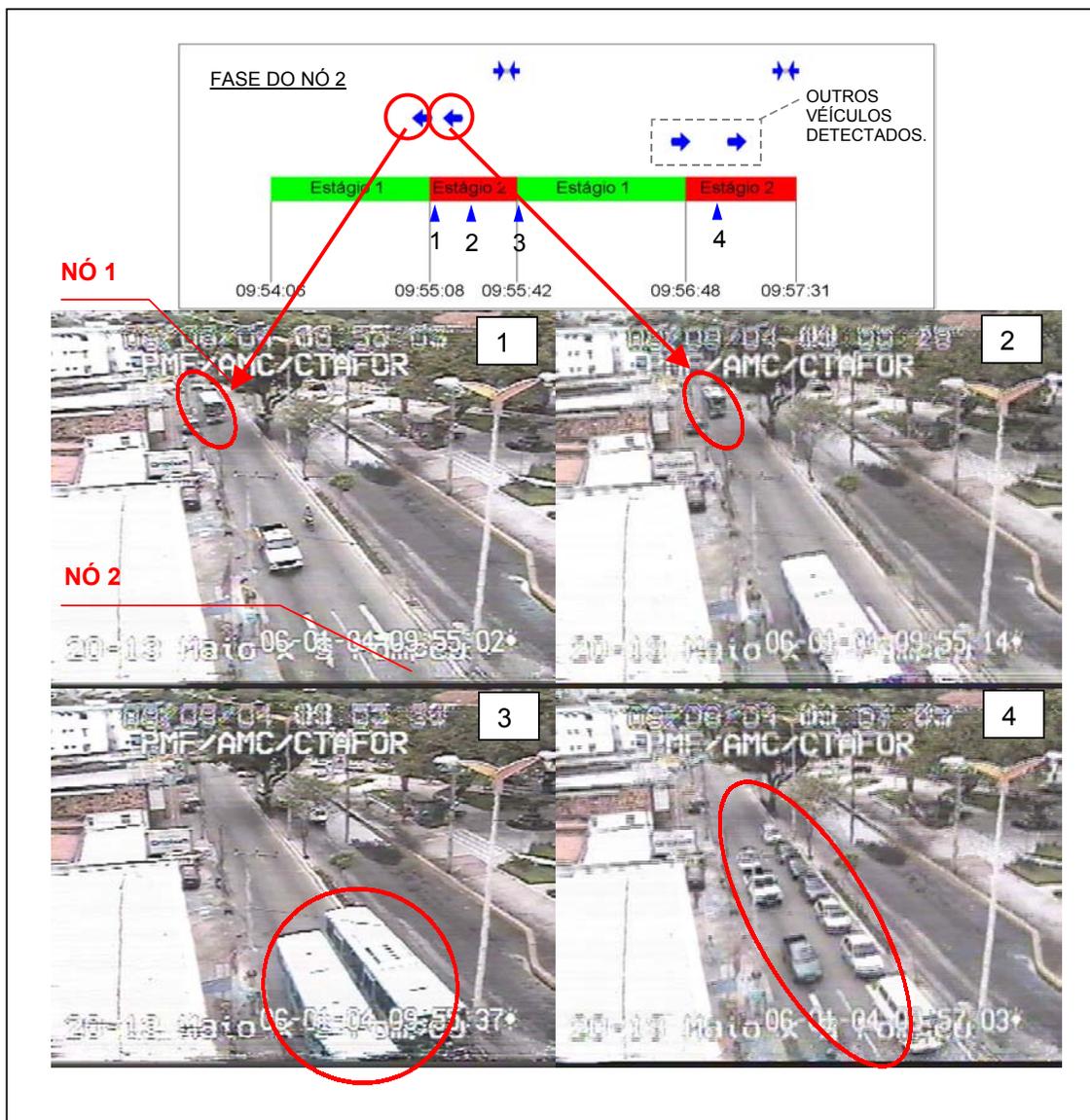


Figura 5.15: Exemplo A.2 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a detecções no sentido LO durante o período de entropico manhã

O efeito das interrupções do modelo de prioridade do SCOOT é mais crítico no período de pico da tarde, conforme mostrado no exemplo a seguir. Na Figura 5.16, durante o período de pico da tarde no semáforo com a Rua Barão do Rio Branco (nó 1) ocorreu uma extensão seguida por uma antecipação no semáforo com a Av. dos Expedicionários (nó 2):

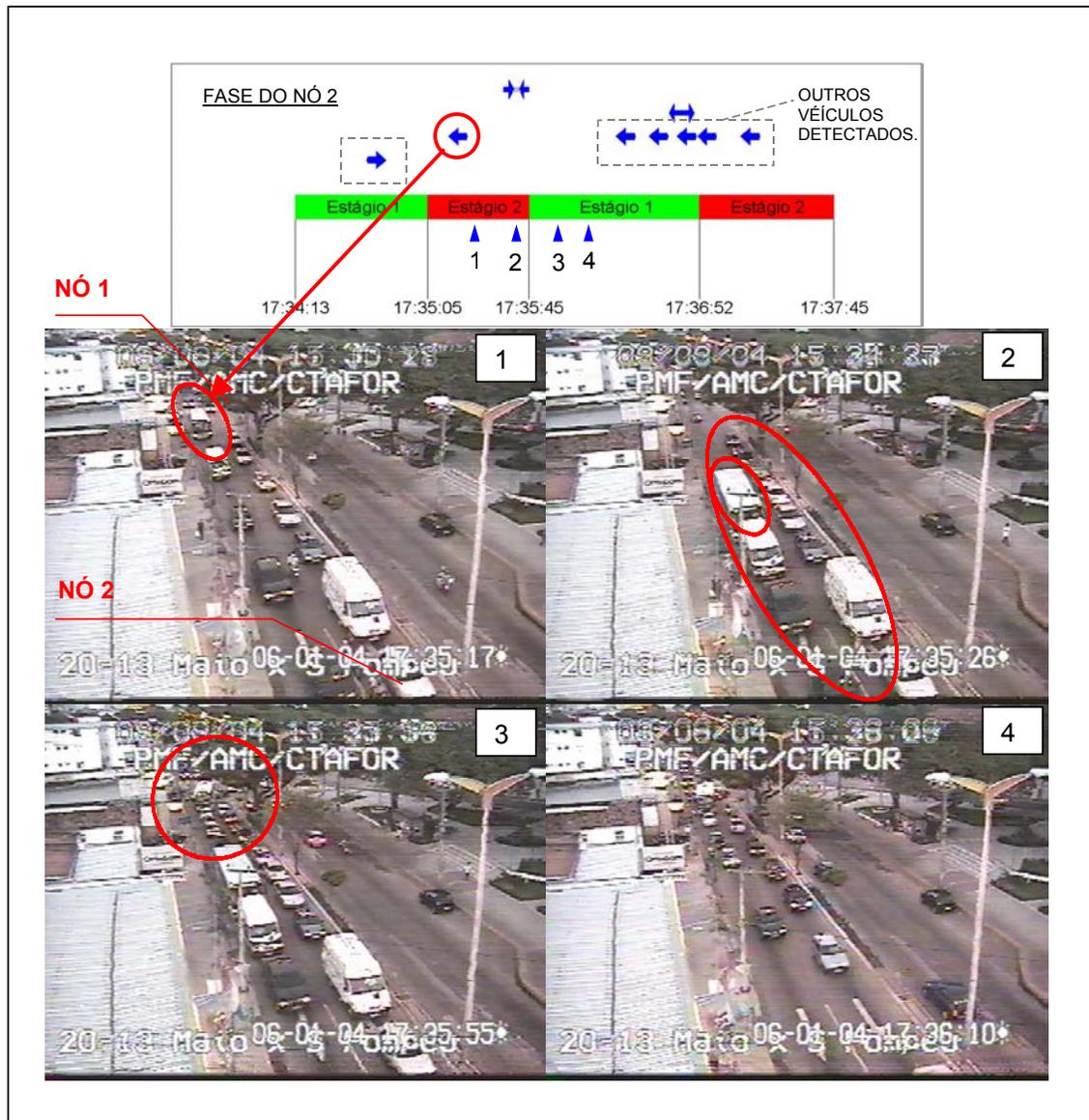


Figura 5.16: Exemplo A.3 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a uma detecção no sentido LO durante o período de pico da tarde

- Imagem 1: A imagem destaca um ônibus que foi detectado no sentido LO e beneficiado com uma extensão no nó 1, mas parou em seguida no vermelho do nó 2;
- Imagem 2: Mostra o ônibus parado na fila formada pelos últimos veículos que passaram durante a extensão no nó 1;
- Imagem 3: A fila formada bloqueou o nó 1, causando a parada dos veículos da via transversal que realizavam conversão à esquerda durante a indicação do estágio 2;
- Imagem 4: Momento em que o ônibus deixa o nó 2, após receber uma antecipação de estágio. O efeito se propagou nos ciclos seguintes.

Situação B – Antecipação seguida de extensão

Outra situação de perda da coordenação entre dois semáforos adjacentes num corredor arterial, devido às interrupções da prioridade, é representada na Figura 5.17. No semáforo 1 é implementada uma antecipação do verde no estágio 1, fazendo com que os primeiros veículos do pelotão de tráfego parem ao final do vermelho do semáforo 2. Já no semáforo 2, é implementada em seguida uma extensão para beneficiar, por exemplo, um ônibus detectado no outro sentido de tráfego, fazendo com que os últimos veículos do pelotão que passam pelo nó 2 parem no vermelho do semáforo 1, o que pode em alguns casos causar o bloqueio do nó anterior. O efeito representado pode se propagar nos ciclos seguintes durante o período de compensação até que os dois semáforos retornem à sua operação normal.

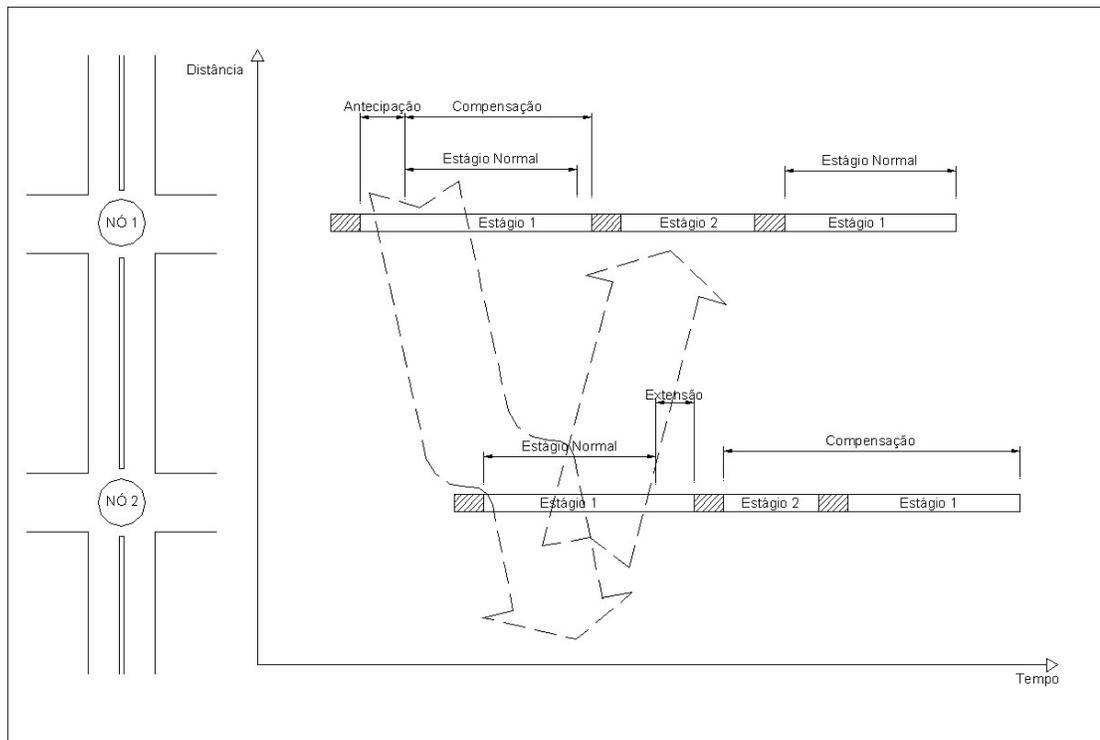


Figura 5.17: Situação B - Perda de coordenação devido a uma antecipação seguida de extensão

As Figuras 5.18 e 5.19 ilustram com imagens o efeito descrito acima. Na Figura 5.18, durante o período de pico da tarde, no semáforo com a Av. dos Expedicionários (nó 1) ocorreu uma antecipação seguida por uma extensão no semáforo com a Rua Barão do Rio Branco (nó 2):

- Imagem 1: A imagem destaca dois ônibus que foram detectados no sentido LO e serão beneficiados com uma antecipação no nó 1;
- Imagem 2: Mostra os dois ônibus parados no vermelho, segundos antes da antecipação de estágio;
- Imagem 3: Os dois ônibus deixam a interseção;
- Imagem 4: Uma extensão no nó 2, para outro ônibus detectado no sentido LO, causou a parada dos últimos veículos no vermelho do nó 1.

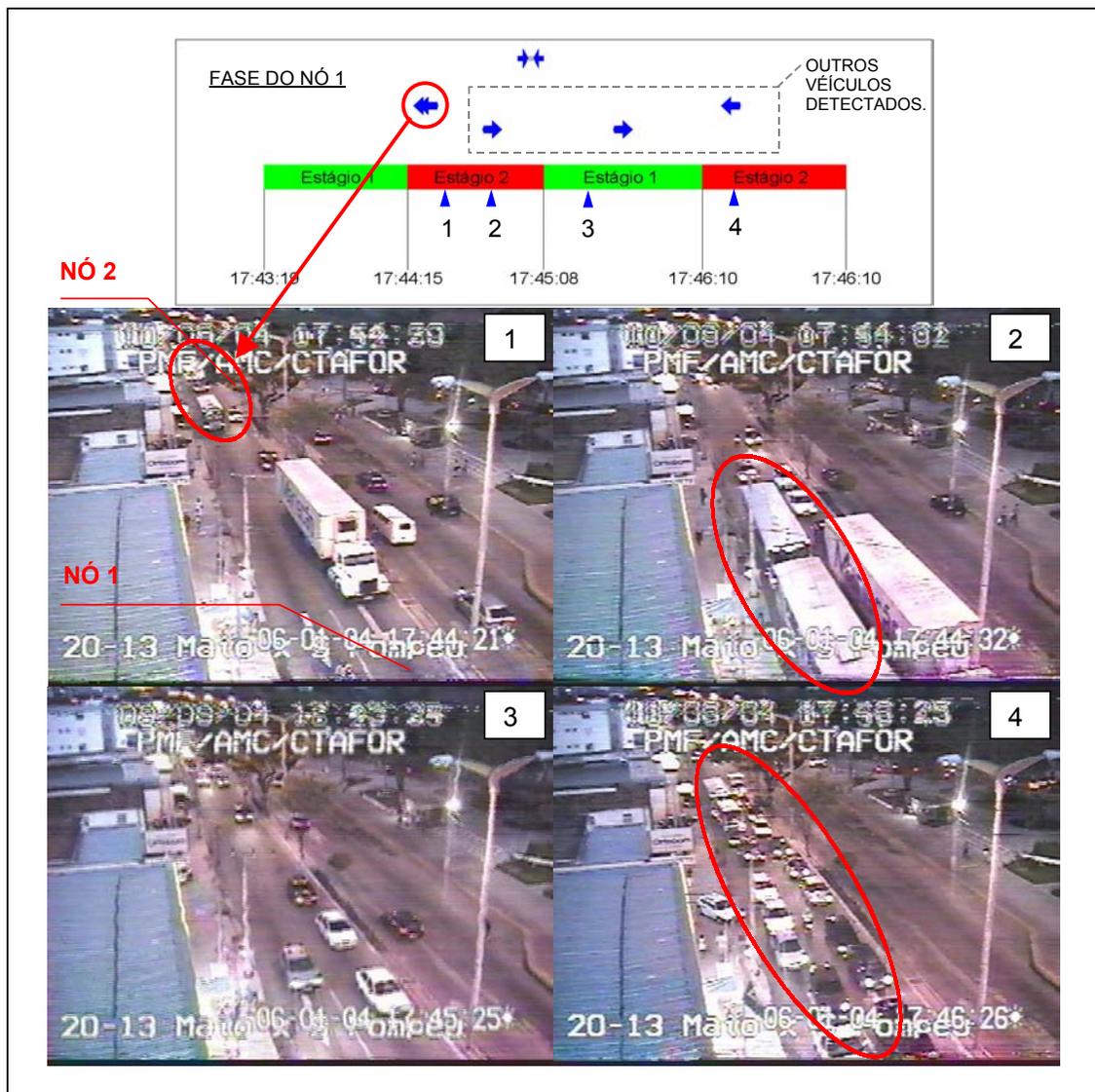


Figura 5.18: Exemplo B.1 - Ilustração com imagens da perda de coordenação devido a detecções no sentido LO durante o período de pico da tarde

Na Figura 5.19, durante o período de pico da tarde, no semáforo com a Av. dos Expedicionários (nó 1) ocorreu uma antecipação seguida por uma extensão no semáforo com a Rua Barão do Rio Branco (nó 2):

- Imagem 1: Mostra a fila formada após a extensão no nó 2;
- Imagem 2: A fila formada bloqueou o nó 2, causando a parada dos veículos da via transversal que realizavam conversão à esquerda durante a indicação do estágio 2.

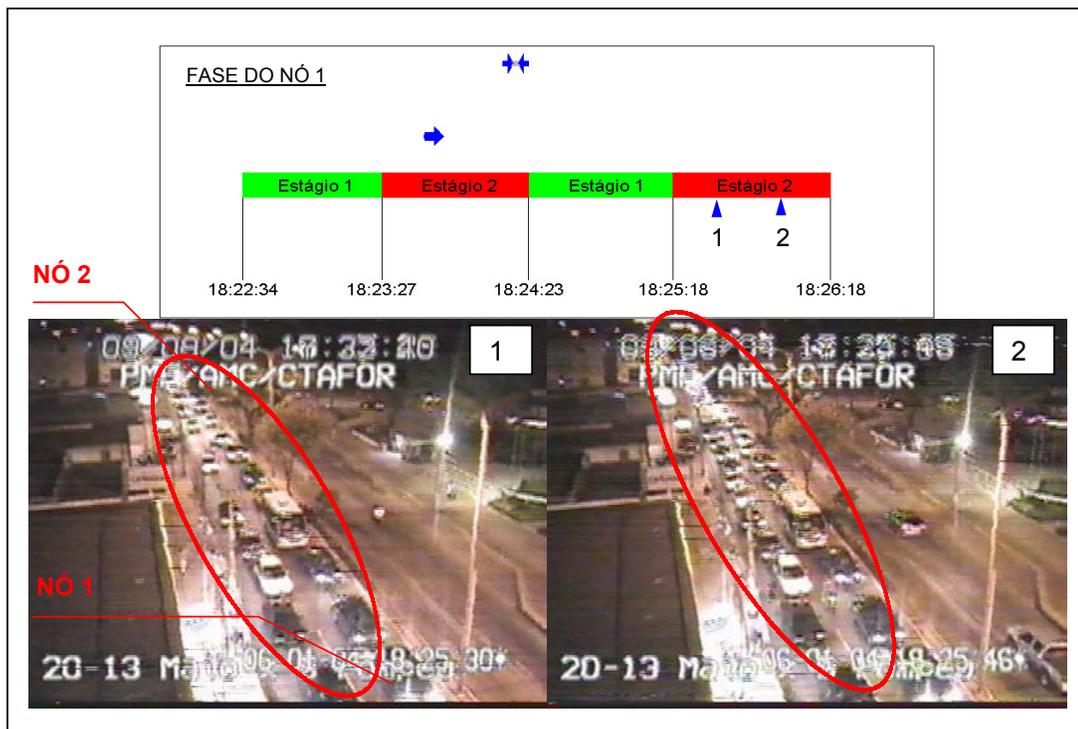


Figura 5.19: Exemplo B.2 - Ilustração com imagens da perda de coordenação durante o período de pico da tarde

Validação do Modelo de Priorização do SCOOT

A seguir são apresentados dois exemplos que demonstram a funcionalidade do modelo de prioridade. As Figuras 5.20 e 5.21, descritas nos parágrafos seguintes, ilustram os exemplos com imagens gravadas da câmara do sistema CFTV localizada no cruzamento com a Av. da Universidade. Nestas figuras é também apresentado um diagrama com dois ciclos da fase do semáforo neste cruzamento, com os instantes de mudança de estágio e os instantes representados pelo símbolo (▲), em que as imagens foram coletadas. O estágio 1 representa o movimento de veículos do corredor e o estágio 3 o movimento de veículos na transversal, enquanto que o estágio 2 é um tempo para travessia de pedestres, que é executado quando há acionamento de uma botoeira nos pontos de travessia. O símbolo (↔) corresponde ao instante no ciclo em que ocorreu uma detecção no sentido LO, o símbolo (→) corresponde ao instante de uma detecção no sentido OL e o símbolo (▲) corresponde a uma detecção na aproximação transversal de sentido SN.

A Figura 5.20 mostra um exemplo da implementação de uma extensão, durante o entropico manhã, para um ônibus detectado na aproximação transversal do cruzamento com a Av. da Universidade. A imagem 1 (da esquerda) mostra o momento em que o ônibus foi detectado e a segunda imagem o momento em que o ônibus deixava o cruzamento. Conforme o modelo:

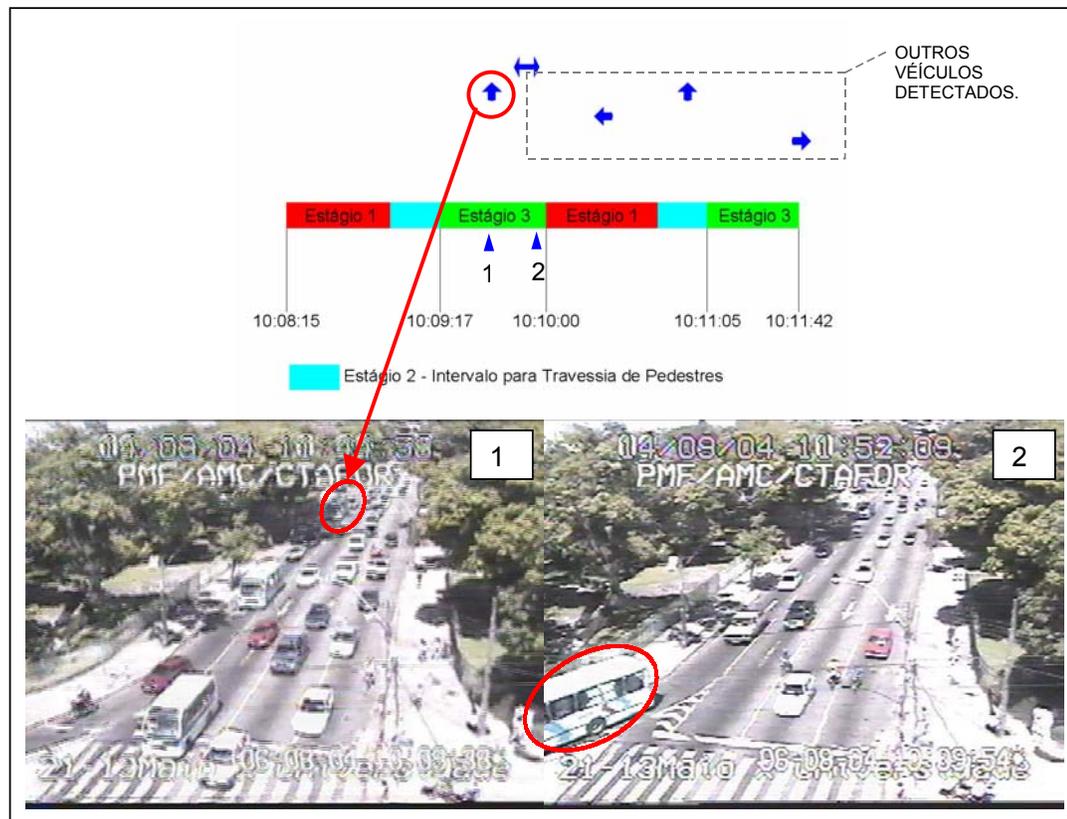


Figura 5.20: Ilustração de uma extensão de estágio implementada pelo modelo – Av. da Universidade

- A previsão de chegada do ônibus na linha de retenção (t), conforme a Equação 2.8, desde o momento da detecção, foi de 22 segundos, estimando-se que a fila à frente do veículo dispersava em 6 segundos;
- Restavam 14 segundos para acabar o estágio atual da via transversal (t_{NS});
- A extensão calculada para o ônibus foi, portanto, de 8 segundos ($t - t_{NS} = 22 - 14$);

- O ciclo requerido (c_{req}) foi estimado em 96 segundos e o ciclo atual do nó (c) era de 104 segundos;
- O valor de extensão atendeu, portanto, as condições de limites de extensão de 20 segundos e de reserva de capacidade ($c - c_{req} = 8$ segundos). Assim, a extensão foi executada.

A Figura 5.21 mostra um exemplo em que não foi implementada uma antecipação durante o pico da tarde. A imagem 1 (da esquerda) mostra o momento em que o ônibus foi detectado e a imagem 2 o momento em que o ônibus deixava o cruzamento. Conforme o modelo:

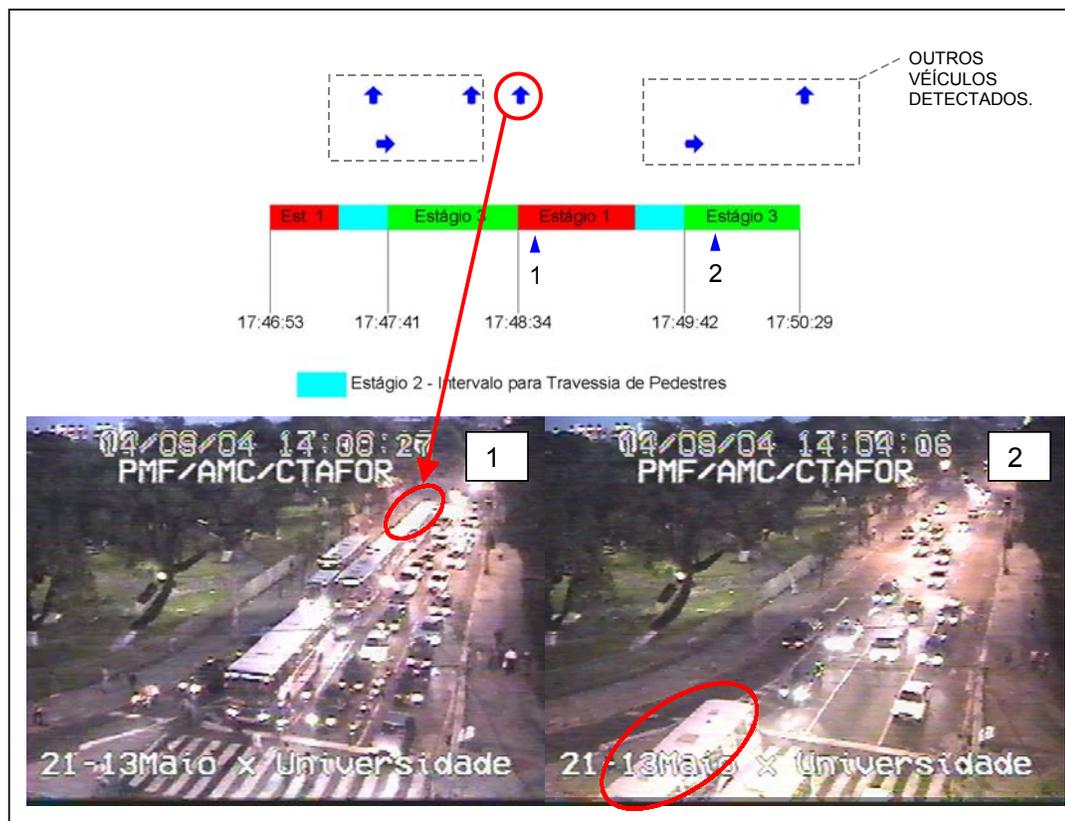


Figura 5.21: Ilustração de uma solicitação de prioridade não atendida pelo modelo devido a restrição de capacidade – Av. da Universidade

- A previsão de chegada do ônibus na linha de retenção (t), conforme a Equação 2.8, desde o momento da detecção foi de 28 segundos, estimando-se que a fila à frente do veículo dispersava em 12 segundos;

- Restavam 67 segundos para iniciar o estágio atual da via transversal (t_{NS});
- A antecipação calculada para o ônibus foi, portanto, de -39 segundos ($t - t_{NS} = 28 - 67$);
- O ciclo requerido (c_{req}) foi estimado em 104 segundos e o ciclo atual do nó (c) era de 112 segundos;
- O valor de antecipação não atendeu, portanto, a condição de reserva de capacidade ($c - c_{req} = 8$ segundos). Assim, não foi implementada a antecipação.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo permitiu uma avaliação de desempenho do controle em tempo real e de estratégias de prioridade semafórica do tipo passiva e ativa num corredor arterial de sentido duplo em Fortaleza. Considerando as possibilidades de operação semafórica, com e sem prioridade no controle em tempo fixo e em tempo real, que podem ser implementadas em sistemas centralizados, como o caso do CTAFOR, o estudo propôs alguns cenários de controle que foram avaliados usando medidas de desempenho coletadas em campo (tempo de percurso de ônibus e de automóveis) e estimadas pelo sistema SCOOT (atrasos e número de paradas veiculares). Foi assumido que os indicadores estimados pelo sistema SCOOT representam a realidade do corredor arterial em estudo e assim podem ser usados na avaliação dos cenários propostos. As avaliações obedeceram a uma seqüência progressiva considerando as alterações no tipo de controle que podem ocorrer num corredor arterial com planos desatualizados: desde a atualização dos tempos semafóricos em tempo fixo até a operação com prioridade ativa em tempo real.

Nos tópicos que seguem são apresentadas as principais conclusões e recomendações desta pesquisa de dissertação.

6.1 CONCLUSÕES

Na concepção dos objetivos específicos deste trabalho, foi necessária, inicialmente, uma análise de desempenho da atualização dos planos semafóricos, comparando o plano de tempo fixo bem ajustado (Cenário 2) com a operação semafórica do Cenário Pré-CTAFOR. Esta análise foi importante porque a maior parte dos semáforos de Fortaleza (conforme descrito no Capítulo 4), que não é controlada pelo sistema SCOOT, opera com controladores monoplanos, possibilitando a implementação de um único plano semafórico ao longo do dia, semelhante ao que ocorria no Cenário Pré-CTAFOR do corredor de estudo. Vale ressaltar ainda que a atualização dos planos de tempo fixo significou uma mudança na tecnologia que

permitiu a coordenação de todos os semáforos do corredor e a programação de vários planos para atender a variação do volume veicular ao longo do dia. Como resultado, esta análise evidenciou a importância de se atualizar os planos semafóricos de um corredor arterial, trabalho que está sendo desenvolvido pelos técnicos do CTAFOR em toda a rede semafórica da malha viária de Fortaleza. Outro fato a ser destacado é que, em corredores arteriais, os semáforos devem operar coordenados numa mesma área de operação para permitir uma boa progressão dos veículos, o que não acontecia antes na Av. 13 de Maio.

Antes de se iniciar a discussão sobre as conclusões relativas aos objetivos específicos deste estudo, a hipótese de pesquisa é repetida aqui: “os ônibus circulam nos principais corredores arteriais em velocidades operacionais bem abaixo da velocidade média dos automóveis, o que acarreta em problemas no nível de serviço ofertado; e como os veículos do transporte coletivo perdem parte do tempo de viagem parados nos cruzamentos semaforizados, a prioridade semafórica torna-se uma alternativa a ser avaliada, uma vez que não há possibilidade de modificar a infraestrutura viária existente”.

O primeiro passo para o estudo foi identificar na literatura as estratégias de prioridade semafórica passiva e ativa que podem ser implementadas no controle em tempo fixo e real, e as experiências com o uso destas estratégias em outras localidades. A prioridade passiva é pouco estudada e as principais estratégias avaliadas de prioridade ativa são a extensão e a antecipação do verde. Os resultados encontrados em outras localidades apontam que existem potenciais benefícios operacionais (redução de tempo de viagem e atraso em semáforos) aos veículos do transporte público, com a implementação das estratégias de prioridade em corredores arteriais. Contudo, estes resultados não podem ser transferidos para o local em que se deseja avaliar, devido às especificidades geométricas e operacionais de cada local.

Com relação aos métodos de avaliação adotados em outros estudos, geralmente são usados modelos de simulação computacional para comparar vários cenários de controle com e sem prioridade. Contudo, os experimentos de campo são de essencial importância devido ao realismo dos resultados encontrados. Para isto, algumas variáveis de controle podem ser coletadas junto com as variáveis de avaliação como: volumes de tráfego, tempos de embarque/desembarque dos ônibus. Os estudos de simulação computacional, na verdade, devem servir como complemento aos experimentos de campo. Além disso, muitas conclusões são obtidas

com base em análises comparando apenas as diferenças percentuais entre valores médios dos indicadores de desempenho (tempo de viagem, atraso em interseções, etc), sem nenhuma análise de inferência estatística. A análise descritiva das variáveis deve ser um passo inicial da análise estatística, em que diferenças observadas devem, entretanto, ser corroboradas por testes de significância.

O passo seguinte para avaliar os cenários de controle semafórico propostos foi um estudo de caracterização do corredor arterial da Av. 13 de Maio. Este corredor é um dos principais eixos de transporte público da cidade de Fortaleza, com cerca de 62% do movimento de pessoas nas suas aproximações e nas aproximações transversais sendo realizado pelos ônibus. As velocidades dos automóveis foram em média superiores às dos ônibus: em 53% (OL) e 45% (LO) para o entropico manhã; e 34% (OL) e 24% (LO) para o pico da tarde. A parcela de tempo parado nos semáforos pelos ônibus foi também considerável, em torno de 26% no entropico manhã e 35% no pico da tarde. Estes resultados, portanto, justificam o estudo proposto e confirmam a hipótese levantada.

Quanto às estratégias de prioridade semafórica do tipo passiva avaliadas neste estudo, não foram obtidos resultados favoráveis à sua adoção. Algumas causas podem ser levantadas para justificar este fato. Primeiramente, em corredores arteriais com elevada proporção de passageiros no transporte público, como é o caso estudado, o modelo de priorização do TRANSYT tende a ajustar os instantes de abertura dos semáforos para a velocidade de percurso dos ônibus, aumentando a sua interação com os outros veículos na via. Assim, os ônibus chegam na interseção a jusante após o pelotão principal, tendo que esperar o desmanche da fila e adentrando no próximo trecho com um acréscimo de atraso, perdendo, em períodos de alta demanda, o tempo de verde. Além disso, a alta variabilidade dos tempos de embarque/desembarque nos pontos de ônibus, com coeficientes de variação em torno de 50% observados nas pesquisas de velocidade, torna inviável uma operação com prioridade semafórica do tipo passiva com base em tempos médios de parada. Esta dispersão, algumas vezes, é causada pela parada de mais de um ônibus num mesmo ponto de parada. *Portanto, a prioridade passiva no controle em tempo fixo e real não propiciou melhora significativa de desempenho dos ônibus.*

O trabalho de SILVA *et al.* (1993), inclusive, já apontava falhas no modelo BUS TRANSYT, afirmando não ser capaz de modelar a interação entre ônibus e automóveis em pontos de paradas típicos de grandes cidades brasileiras, propondo

uma nova forma de modelar no TRANSYT o movimento de ônibus em redes arteriais brasileiras. Vale ainda ressaltar que os modelos de dispersão do TRANSYT não foram calibrados com dados de campo neste estudo, sendo adotados os valores padrões do programa, calibrados para a realidade do país em que foi desenvolvido. Para reparar esta falha, pode ser usado em Fortaleza o método descrito no trabalho de BECK e JACQUES (1999) para calibrar os modelos de dispersão do TRANSYT.

O estudo mostrou principalmente que, das alternativas de controle semafórico avaliadas, em períodos de média e alta demanda, o controle em tempo real do modelo SCOOT com progressão para o tráfego geral é o mais adequado para o corredor arterial em estudo. Em especial, os resultados de melhora de desempenho, em relação aos outros cenários, foram mais evidentes em aproximações e períodos do tráfego com maiores níveis de saturação (com relação v/c acima de 0,8), mostrando que o controle em tempo real opera bem em níveis elevados de saturação. Os resultados da comparação do controle em tempo real com o controle em tempo fixo bem ajustado mostraram que, no entropico manhã, ocorreu melhora de desempenho em todos os indicadores no sentido OL do Trecho 2: redução do tempo médio de percurso de ônibus de 9,3 s/veic./semáforo; redução do tempo médio de percurso de automóvel de 9,6 s/veic./semáforo; redução do atraso veicular de 5,3 s/veic./link; e redução da proporção de paradas de 15,3%. Já no pico da tarde, ocorreu melhora de desempenho no sentido OL do Trecho 1 – redução do tempo médio de percurso de automóvel de 4,6 s/veic./semáforo e redução da proporção de paradas de 4,5% – e no sentido LO do Trecho 2 – redução do tempo médio de percurso de ônibus de 8,2 s/veic./semáforo, redução do tempo médio de percurso de automóvel de 10,9 s/veic./semáforo e redução na proporção de paradas de 7,6%.

Outra conclusão importante do estudo foi que o controle em tempo real reduziu a dispersão do atraso veicular nas vias transversais saturadas com chegada do tráfego aleatória, evidenciando que as alterações dos tempos de verde na operação em tempo real acompanham a aleatoriedade do tráfego em *links* isolados e saturados. Em *links* coordenados, no entanto, isto não foi observado, devido ao tráfego se apresentar menos saturado e ao caráter determinístico da chegada nas interseções dos veículos que trafegam no corredor. *Portanto, o controle em tempo real do modelo SCOOT melhora a progressão do tráfego nas aproximações de corredores arteriais com maiores níveis de demanda veicular e acompanha a aleatoriedade das filas nas vias transversais saturadas.*

Quanto às estratégias de prioridade ativa no SCOOT, o estudo mostrou que os tempos extras de extensão e antecipação prejudicam a progressão do tráfego no corredor, resultando em acréscimos no número de paradas e em um conseqüente aumento do atraso dos veículos. A justificativa para este fato tem origens nas condições operacionais do corredor, nas condições do tráfego e na própria operação em tempo real do SCOOT sem prioridade. O espaçamento entre os semáforos requer uma operação com boa coordenação semafórica, pois, no corredor, existem grupos de interseções muito próximas. Além disso, os níveis elevados de demanda veicular nas vias transversais do trecho avaliado, que operam em tempo real já próximo à saturação, restringem a eficiência do modelo de priorização. A prioridade ativa também foi testada no trecho 2, que apresenta os cruzamentos mais críticos do corredor. Neste trecho, os parâmetros do tempo real já estavam ajustados para priorizar o tráfego do corredor e acompanhar a aleatoriedade das filas nas vias transversais. Assim, qualquer modificação nos tempos de verde acarretava em perda da coordenação semafórica para a corrente de tráfego no corredor.

Outro fato identificado neste estudo foi que, como o corredor apresenta sentido duplo, em cruzamentos adjacentes muito próximos, ocorria muitas vezes perda de progressão semafórica, devido à execução de estratégias opostas de prioridade, tais como: extensão/compensação, antecipação/compensação e extensão/antecipação. Este efeito foi intensificado quando foi testado o conflito de prioridade com a detecção de ônibus nas vias transversais (Cenário 7), aumentando cada vez mais os atrasos veiculares ao longo do corredor. Vale destacar que o modelo de prioridade ativa do SCOOT foi desenvolvido para atender a uma realidade diferente da encontrada em vias arteriais nas grandes cidades brasileiras, que, comparativamente, apresentam maiores volumes de ônibus, acarretando numa maior frequência de ativação do modelo de prioridade e, por conseqüência, numa maior interrupção da progressão do tráfego. *Portanto, em corredores arteriais de sentido duplo, como o caso estudado, com os parâmetros semafóricos no controle em tempo real ajustados tanto para priorizar o tráfego do corredor como para acompanhar a aleatoriedade do tráfego nas aproximações transversais, as estratégias de prioridade ativa, como as avaliadas nesta pesquisa, não são adequadas.*

6.2 RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa, não foram esgotados todos os cenários de controle com prioridade ativa que podem ser implementados num sistema de controle centralizado, como o do CTAFOR. Existem outras alternativas que podem ser avaliadas com os recursos disponíveis, como o uso somente de extensões ou antecipações no corredor. Outras alternativas podem ser avaliadas apenas com o recurso da simulação computacional, ou com o uso de sistemas de informação e localização automática de veículos (AVL), tais como: cenários de controle com prioridade para os veículos que estão atrasados em relação a sua programação, ou para aqueles veículos com maior volume de passageiros. Os dados obtidos neste trabalho de dissertação, portanto, podem servir para calibrar modelos de micro-simulação que podem ser usados para avaliar outras alternativas de prioridade ativa em estudos futuros.

Na literatura, foi visto que a prioridade ativa pode não reduzir o tempo de percurso dos ônibus, mas pode servir como um instrumento de controle da regularidade e da pontualidade do serviço de transporte público. A pontualidade pode ser aferida como uma medida do desvio em relação à programação predefinida (tabela horária dos ônibus) e a regularidade como uma medida da variação do *headway* entre os ônibus, que pode ser avaliada por meio da variância do tempo de percurso ou medindo a variação dos intervalos entre os ônibus em determinados pontos de parada. Portanto, como estudo futuro, podem ser avaliados, por meio de simulação computacional, cenários com prioridade ativa condicional no SCOOT com o critério de que a prioridade seja dada para os veículos que estão atrasados em relação à sua programação, ou com uma restrição no intervalo entre detecções. Estes critérios, combinados ao critério de reserva de capacidade do modelo de priorização do SCOOT, funcionam como uma forma de reduzir a frequência de ativações da prioridade e, conseqüentemente, das interrupções sobre a coordenação semafórica. Contudo, é preciso avaliar qual taxa de ativações de prioridade resulta numa possível melhora na pontualidade e regularidade do serviço, o que pode ser conseguido variando os parâmetros em cada nó que definem as condições para efetuar uma ativação de prioridade (limites de extensão, nível de saturação desejado, limite de atraso relativo à programação e/ou limite de intervalo entre ônibus em que uma prioridade pode ser dada).

O corredor da Av. 13 de Maio não faz parte de uma rede arterial coordenada, ou seja, as aproximações transversais operam como *links* isolados, diferente de outros

corredores arteriais de Fortaleza. Portanto, um estudo mais abrangente que pode ser proposto é uma avaliação do efeito sobre a coordenação semafórica das estratégias de prioridade numa rede arterial fechada, formando uma grande área de controle. Tal estudo pode ser feito usando modelos de alocação de tráfego, como proposto em estudos anteriores (ABDELGHANY *et al.*, 2001; AGRAWAL *et al.*, 2002; CHANG e ZILIASKOPOULOS, 2003), para avaliar, além do efeito sobre a coordenação semafórica, o comportamento dos condutores diante das estratégias de prioridade. No entanto, para o caso específico da malha viária de Fortaleza, na área sob o controle do sistema SCOOT, é possível que a efetividade das estratégias de prioridade semafórica seja comprometida, devido ao próprio formato da rede que é reticulada, sem uma definição adequada de hierarquização das vias e, por consequência, com muitos cruzamentos críticos formados pelo conflito entre corredores arteriais coordenados.

Um outro estudo que pode ser realizado com o uso da simulação computacional é uma análise de sensibilidade dos principais fatores, conforme a literatura, que afetam a prioridade semafórica do tipo ativa: a frequência dos ônibus, o nível de saturação nas vias e a localização dos pontos de ônibus. Isto porque, na malha viária de Fortaleza, existem outros corredores arteriais com características físicas e operacionais diferentes em relação ao corredor analisado, como distribuição espaçada dos semáforos e dos pontos de ônibus, o que pode favorecer uma determinada estratégia de prioridade semafórica do tipo ativa ou até passiva.

Por fim, é importante dizer que todas as recomendações propostas acima devem ser vistas como propostas complementares a um estudo mais abrangente de intervenção na operação do sistema atual de transporte público por ônibus de Fortaleza, que está operando com um nível de serviço indesejado. Neste estudo, por exemplo, poderiam ser identificados atributos da qualidade da circulação percebidos pelos usuários, indicando, conforme uma escala de níveis de serviço, intervenções que propiciem um deslocamento de parte da demanda do automóvel para o transporte público por ônibus. A prioridade semafórica, assim, seria uma das alternativas a serem avaliadas de intervenções propostas para melhorar a eficiência do transporte público.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANY, K.F.; A.F. ABDELGHANY; H.S. MAHMASSANI e A.S. ABDELFATAH (2001) Evaluating Bus Preemption Strategies at Signalized Intersections Using A Multi-Modal Dynamic Network Assignment-Simulation Methodology. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- AGRAWAL, B.B.; S.T. WALLER e A. ZILIASKOPOULOS (2002) A Modeling Approach for Transit Signal Preemption. *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- AL-SAHILI, K.A. e W.C. TAYLOR (1996) Evaluation of Bus Priority Signal Strategies in Ann Arbor, Michigan. *Transportation Research Record N^o 1554*, p. 74-79.
- BALASSIANO, R. (1996) Priorização para Ônibus em Centros Urbanos: Um Instrumento de Planejamento Ainda Viável. *Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica*. Confederação Nacional dos Transportes – CNT, p. 1-25.
- BALKE, K.N.; C.L. DUDEK e T. URBANIK II (2000) Development and Evaluation of An Intelligent Bus Priority Concept. *Transportation Research Board, 79th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- BECK, R.V. e M.A.P. JACQUES (1999) Metodologia para a Análise da Dispersão de Pelotões com o Uso do Software TRANSYT. *Anais do XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Carlos, SP, Artigo Científico, v. 1, p. 558-569.
- CASTRO NETO, M.M. (2003) *Comparação dos Valores Estimados pelo SCOOT com os Valores Observados em Campo para a Variável "Atraso Médio Veicular"*. Projeto de Graduação, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará.
- CHADA, S. (2004) Critical Factors Affecting Transit Signal Priority. *Transportation Research Board, 83th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- CHANG, E. e A. ZILIASKOPOULOS (2003) Data Challenges in the Development of a Regional Assignment-Simulation Model to Evaluate Transit Signal Priority in Chicago. *Transportation Research Board, 82th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- CHANG, G.L.; M. VASUDEVAN e C.C. SU (1995) Bus-Preemption Under Adaptive Signal Control Environments. *Transportation Research Record N^o 1494*, p. 146-154.
- CONRAD, M; F. DION e S. YAGAR (1998) Real-Time Traffic Signal Optimization with Transit Priority: Recent Advances in the SPPORT Model. *Transportation Research Board, 78th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- DALE, J.J.; R.J. ATHERLEY; T. BAUER e L. MADSEN (1999) A Transit Signal Priority Impact Assesment Methodology – Greater Reliance on Simulation. *Transportation Research Board, 78th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.

- DION, F.; H. RAKHA, e Y. ZHANG (2002) Evaluation of Transit Signal Priority Benefits along a Fixed-Time Signalized Arterial. *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- FENG, Y.; J.J. PERRIN e P.T. MARTIN (2003) Bus Priority of SCOOT Evaluated in a VISSIM Simulation Environment. *Transportation Research Board, 82th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- FOX, K.; F. MONTGOMERY; S. SHEPHERD; C. SMITH; S. JONES e F. BIORA (1995) *Bus Priority in SCOOT and SPOT using TIRIS*. Integrated ATT strategies for urban arterials: DRIVE II project PRIMAVERA.
- FOX, K.; H. CHEN; F. MONTGOMERY; M. SMITH e S. JONES (1998) *Selected Vehicle Priority in the UTMC Environment (UTMC01) - Project funded by the Department of the Environment, Transport and Regions*. Institute for Transport Studies, University of Leeds, UK.
- FURTH, P.G. e T.H.J. MULLER (2002) Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption. *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- GARBER N. J. e L. A. HOEL (2001) *Traffic and Highway Engineering – 3rd edition*. PART II: TRAFFIC OPERATIONS, Traffic Engineering Studies, p.117.
- GARROW, M. e R. MACHEMEHL (1998) Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies. *Transportation Research Board, 78th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- GIFFORD, J.; D. PELLETIERE e J. COLLURA (2001) Stakeholder Requirements for Traffic Signal Preemption and Priority in the Washington, D.C. Region. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- HOUNSELL, N. e G. WALL, (2002) Examples of new ITS applications in Europe to Improve Bus Services. *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- ITE (1982) *Transportation and Traffic Engineering Handbook*. Institute of Transportation Engineers. Ed. Prentice-Hall, Inc. USA.
- LEANDRO, C.H.P. (2001) *Procedimento Multicriterial para Estruturação e Caracterização de Sistemas Centralizados de Controle do Tráfego Urbano*. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- LEHTONEN, M. e R. KULMALA (2002) The Benefits of a Pilot Implementation of Public Transport Signal Priorities and Real-Time Passenger Information. *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- LIU H.; M. LI; A. SKABARDONIS; C. TAN; K. ZHOU; W. ZHANG e S. PARK (2004) Development and Application of a Simulation Tool for Transit Signal Priority. *Transportation Research Board, 83th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- LOUREIRO, C.F.G.; C.H.P. LEANDRO e M.V.T. OLIVEIRA (2002a) Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza: ITS Aplicado à Gestão

Dinâmica do Trânsito Urbano. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, RN, Comunicações Técnicas, p. 19-26.

LOUREIRO, C.F.G.; M.J.T.L. GOMES e C.H.P. LEANDRO (2002b) Avaliação do Desempenho nos Períodos de Pico do Tráfego de Interseções Semaforizadas com Controle Centralizado em Tempo Fixo e Real. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, RN, Artigo Científico, v. 1, p. 365-376.

MCSHANE, W.R e R.P. ROESS (1990) *Traffic Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

MEDEIROS, F.C.; M.S. LUNA E C.F.G. LOUREIRO (2001) Controle do Tráfego em Área de Fortaleza: Uma Nova Experiência na Gerência do Trânsito. *Anais do 13º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito*, ANTP (CD-Rom), Porto Alegre, RS.

MENESES, H.B. (2003). *Interface Lógica em Ambiente SIG para Bases de Dados de Sistemas Centralizados de Controle do Tráfego Urbano em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 182 fl.

MING, S.H. (1997) *Nota Técnica nº 203 - Recursos do SCOOT para Congestionamento*. CET/SP.

MIRCHANDANI, P.; A. KNYAZYAN; L. HEAD e W. WU (2001) An Approach Towards the Integration of Bus Priority and Traffic Adaptive Signal Control. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.

NGAN, V.; T. SAYED e A. ABDELFATAH (2004) Evaluation of Transit Signal Priority Strategy using Vissim. *Transportation Research Board, 83th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.

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

PAIVA NETO, P.M.; M.M. CASTRO NETO; E. NASCIMENTO JÚNIOR e C.F.G. LOUREIRO (2004) Validação das Variáveis Número Médio de Paradas e Atraso Médio Veicular Simuladas pelo Software SCOOT. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis, SC, Comunicações Técnicas.

PEREIRA NETO, W.A. (2001). *Modelo Multicritério de Avaliação de Desempenho Operacional do Transporte Coletivo por Ônibus no Município de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 192 fl.

PEREIRA NETO, W.A.; OLIVEIRA NETO, F.M. e C.F.G. LOUREIRO (2003) Avaliação do Desempenho Operacional em Períodos de Pico do Controle Semafórico em Tempo Real nos Corredores Arteriais de Fortaleza. (CD-ROM) do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, RJ, Comunicações Técnicas, v. 1, p. 1-8.

- PMF (1999) *Programa de Transporte Urbano de Fortaleza*. Prefeitura Municipal de Fortaleza. Relatório Técnico RT-6, Fase 1 – Diagnóstico. CSL – Consultora de Engenharia e Economia S/C Ltda.
- RAKHA, H. e Y. ZHANG (2004) Sensitivity Analysis of Transit Signal Priority Impacts on Operation of Isolated Signalized Intersections. *Transportation Research Board, 83th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- RIBEIRO, P.C.M. (1992) Planos Estatisticamente Robustos Calculados pelo Programa TRANSYT. *Anais do VI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, RJ, Artigo Científico, v. 1, p. 159-170.
- ROBERTSON, D. I. (1969) *TRANSYT: a traffic network study tool*. RRL Report LR253, Road Research Laboratory, Ministry of Transport, Crowthorne, Inglaterra.
- SILVA, P.C.M., L.S. PORTUGAL e M.P.S. SANTOS (1993) Modelagem do Comportamento dos Fluxos de Ônibus no TRANSYT/8. *Anais do VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Paulo, SP, Artigo Científico, v. 2, p. 809-820.
- SKABARDONIS, A. (2000) Control Strategies for Transit Priority. *Transportation Research Board, 79th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- SOO, H.; J. COLLURA; A.G. HOBEIKA e D. TEODOROVIC (2004) Evaluating the Impacts of Advanced Traffic Signal Control Systems: The Effect of Transit Signal Priority Strategies on Transit Operating Costs. *Transportation Research Board, 83th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- SUNKARI, S. R. ; P.S. BEASLEY; T. URBANIK II e D.B. FAMBRO (1995) Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections. *Transportation Research Record N° 1494*, p. 117-123.
- TENG, H.; Y. QI; J.C. FAHCOCCHIO; K. KIM; R. PATEL e E. ATHANAIOLOS (2003) Simulation Testing of Adaptative Control, Bus Priority and Emergency Vehicle Preemption in New York City. *Transportation Research Board, 82th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- TRL (2000a) *Executive Summary – Description of SCOOT*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0414. Transportation Research Laboratory.
- TRL (2000b) *Executive Summary – Results of on-streets tests*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0415. Transportation Research Laboratory.
- TRL (2000c) *Operacional Guide Customising*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0474. Transportation Research Laboratory.
- TRL (2000d) *Functional Description – Bus Priority*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0484. Transportation Research Laboratory.
- TRL (2000e) *ASTRID Operator Manual*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 7730. Transportation Research Laboratory.
- TRL (2000f) *Operacional Guide SCOOT Messages*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0479. Transportation Research Laboratory.

- VINCENT, R.A., A.I. MITCHELL e D.I. ROBERTSON (1980) *User guide of TRANSYT version 8 - TRRL Report LR888*. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Inghilterra.
- WEBSTER, F.V. (1958) "Traffic Signalls Settings". *Road Research Technical Paper*. N.º 39. London.
- WOOD, K. (1993) *Urban traffic control, systems review*. Project Report 41, Transport Research Laboratory.
- WOOD, K. e R.T. BAKER (1992) Using SCOOT Weightings to Benefit Strategic Routes. *Traffic Engineering and Control*, p. 226-235.
- ZHANG, Y. (2001) *An Evaluation of Transit Signal Priority and SCOOT Adaptive Signal Control*. Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.

ANEXOS

ANEXO I

RESULTADOS DAS PESQUISAS DE TEMPO DE PERCURSO DE AUTOMÓVEIS E DE ÔNIBUS EM CADA CENÁRIO DE AVALIAÇÃO

Tabela I.1: Trecho 1 – Tempo de Percurso de Automóvel e de Ônibus

Período	Sentido	Cenário	Tempo de Percurso de Automóvel					Tempo de Percurso de Ônibus						
			Extensão (km)	Média (seg.)	Desvio (seg.)	CV (Desvio/Média)	n	Velocidade Média (km/h)	Extensão (km)	Média (seg.)	Desvio (seg.)	CV (Desvio/Média)	n	Velocidade Média (km/h)
Entrepico Manhã	OL	Pré - CTAFOR	1,32	191	33	17%	34	25	1,32	264	41	16%	38	18
		Tempo Fixo Bem Ajustado		141	32	23%	21	34		229	16	7%	18	21
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		232	55	24%	23	21
		Tempo Real		149	31	21%	20	32		239	32	13%	17	20
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		254	49	19%	20	19
	LO	Pré - CTAFOR	1,22	166	21	12%	34	26	1,26	259	33	13%	38	18
		Tempo Fixo Bem Ajustado		139	45	33%	20	32		236	39	16%	19	19
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		225	47	21%	23	20
		Tempo Real		122	25	20%	20	36		245	44	18%	18	18
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		223	44	20%	19	20
Pico da Tarde	OL	Pré - CTAFOR	1,32	226	41	18%	23	21	1,32	303	38	13%	27	16
		Tempo Fixo Bem Ajustado		237	47	20%	18	20		297	55	19%	19	16
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		287	40	14%	15	17
		Tempo Real		209	37	18%	14	23		294	38	13%	17	16
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		254	74	29%	13	19
	LO	Pré - CTAFOR	1,22	258	71	27%	22	17	1,26	348	85	24%	28	13
		Tempo Fixo Bem Ajustado		259	104	40%	18	17		339	90	26%	22	13
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		360	113	31%	18	13
		Tempo Real		239	120	50%	13	18		351	105	30%	17	13
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		368	123	33%	17	12

Tabela I.2: Trecho 2 – Tempo de Percurso de Automóvel e de Ônibus

Período	Sentido	Cenário	Tempo de Percurso de Automóvel					Tempo de Percurso de Ônibus						
			Extensão (km)	Média (seg.)	Desvio (seg.)	CV (Desvio/Média)	n	Velocidade Média (km/h)	Extensão (km)	Média (seg.)	Desvio (seg.)	CV (Desvio/Média)	n	Velocidade Média (km/h)
Entrepico Manhã	OL	Pré - CTAFOR	0,77	111	26	23%	34	25	0,60	161	25	16%	38	13
		Tempo Fixo Bem Ajustado		136	37	27%	21	20		168	42	25%	18	13
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		152	20	13%	23	14
		Tempo Real		107	42	39%	20	26		149	25	17%	17	15
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		152	20	13%	20	14
		Prioridade Ativa no Corredor		-	-	-	-	-		158	39	24%	22	14
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais		-	-	-	-	-		160	34	22%	14	14
	LO	Pré - CTAFOR	0,88	143	35	25%	34	22	0,71	164	50	30%	38	16
		Tempo Fixo Bem Ajustado		144	42	29%	20	22		187	45	24%	19	14
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		182	41	23%	23	14
		Tempo Real		149	25	17%	20	21		168	37	22%	18	15
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		192	41	21%	19	13
		Prioridade Ativa no Corredor		-	-	-	-	-		172	31	18%	21	15
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais		-	-	-	-	-		184	43	24%	14	14
Pico da Tarde	OL	Pré - CTAFOR	0,77	153	36	24%	23	18	0,60	164	33	20%	27	13
		Tempo Fixo Bem Ajustado		147	47	32%	18	19		176	40	23%	19	12
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		169	40	24%	15	13
		Tempo Real		165	45	27%	14	17		171	28	17%	17	13
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		154	31	20%	13	14
		Prioridade Ativa no Corredor		-	-	-	-	-		171	37	22%	23	13
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais		-	-	-	-	-		172	30	18%	17	13
	LO	Pré - CTAFOR	0,88	214	90	42%	22	15	0,71	201	63	31%	28	13
		Tempo Fixo Bem Ajustado		231	62	27%	18	14		252	47	19%	22	10
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo		-	-	-	-	-		204	51	25%	18	13
		Tempo Real		188	48	25%	13	17		227	61	27%	17	11
		Prioridade Passiva em Tempo Real		-	-	-	-	-		227	53	23%	17	11
		Prioridade Ativa no Corredor		-	-	-	-	-		212	63	30%	23	12
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais		-	-	-	-	-		258	50	19%	17	10

ANEXO II

ESTATÍSTICAS DAS VARÁVEIS ESTIMADAS PELO SISTEMA SCOOT

Tabela II.1: Trecho 1 – Variáveis Estimadas pelo Sistema SCOOT

Período	Sentido	Cenário	n	Atraso SCOOT			Número de Paradas SCOOT			Fluxo Médio de Tráfego por Sentido			Atraso (seg/veic/link)	Proporção de Paradas (%)
				Média (veic.min/h)	Desvio	CV	Média (veic./h)	Desvio	CV	Média (veic./h)	Desvio	CV		
Entrepico Manhã	OL	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	655	77	12%	3317	306	9%	952	40	4%	12	58%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	656	103	16%	3303	303	9%	913	56	6%	12	60%
		Tempo Real	24	684	64	9%	3242	336	10%	951	54	6%	13	57%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	16	979	72	7%	3712	216	6%	922	32	4%	16	67%
	LO	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1170	139	12%	3673	358	10%	995	49	5%	19	62%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	1136	153	13%	4074	353	9%	957	56	6%	17	71%
		Tempo Real	24	1045	272	26%	3562	378	11%	968	63	6%	18	61%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	24	1286	371	29%	3988	310	8%	978	59	6%	19	68%
	TRANSVERSAIS	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1605	182	11%	2747	221	8%	622	35	6%	35	88%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	1434	156	11%	2588	211	8%	601	38	6%	33	86%
		Tempo Real	24	1863	118	6%	2950	127	4%	638	27	4%	38	92%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	24	2077	872	42%	2977	287	10%	643	58	9%	42	93%
Pico da Tarde	OL	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1594	248	16%	4774	345	7%	1165	49	4%	20	68%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	1389	246	18%	4030	475	12%	1124	64	6%	21	60%
		Tempo Real	18	1425	206	14%	4524	306	7%	1181	59	5%	19	64%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	12	1190	132	11%	4035	365	9%	1120	49	4%	18	60%
	LO	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1708	214	13%	4908	362	7%	1071	45	4%	21	76%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	2285	88	4%	5184	253	5%	1053	33	3%	26	82%
		Tempo Real	18	1735	240	14%	4754	355	7%	1072	50	5%	22	74%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	18	1990	228	11%	4783	450	9%	1006	79	8%	25	79%
	TRANSVERSAIS	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	3398	473	14%	3947	261	7%	849	42	5%	52	93%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	3007	571	19%	4029	350	9%	860	54	6%	45	94%
		Tempo Real	18	3146	272	9%	4246	270	6%	887	55	6%	44	96%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	12	3082	411	13%	4197	382	9%	883	83	9%	44	95%

Tabela II.2: Trecho 2 – Variáveis Estimadas pelo Sistema SCOOT

Período	Sentido	Cenário	n	Atraso SCOOT			Número de Paradas SCOOT			Fluxo Médio de Tráfego por Sentido			Atraso (seg/veic/link)	Proporção de Paradas (%)
				Média (veic./h)	Desvio	CV	Média (veic./h)	Desvio	CV	Média (veic./h)	Desvio	CV		
Entrepico Manhã	OL	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1073	150	14%	2238	226	10%	944	70	7%	29	59%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	592	286	48%	2074	354	17%	933	71	8%	17	56%
		Tempo Real	24	657	156	24%	1675	260	16%	953	72	8%	24	44%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	24	654	171	26%	1762	279	16%	945	56	6%	22	47%
		Prioridade Ativa no Corredor	16	737	155	21%	1725	235	14%	966	61	6%	26	45%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	8	778	103	13%	1776	285	16%	930	84	9%	26	48%
	LO	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1242	246	20%	2599	250	10%	975	46	5%	29	53%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	2141	414	19%	2843	164	6%	982	48	5%	45	58%
		Tempo Real	24	924	135	15%	2058	256	12%	1005	51	5%	27	41%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	24	1808	421	23%	2725	309	11%	1025	62	6%	40	53%
		Prioridade Ativa no Corredor	16	1492	401	27%	2543	346	14%	1025	71	7%	35	50%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	8	1888	282	15%	2968	223	8%	994	48	5%	38	60%
	TRANSVERSAIS	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	2799	601	21%	4358	221	5%	1162	40	3%	39	94%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	32	2303	511	22%	4109	229	6%	1109	46	4%	34	93%
		Tempo Real	24	3106	191	6%	4405	173	4%	1153	41	4%	42	96%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	24	3378	542	16%	4426	170	4%	1165	44	4%	46	95%
		Prioridade Ativa no Corredor	16	3380	575	17%	4522	193	4%	1200	41	3%	45	94%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	8	3603	616	17%	4506	160	4%	1198	41	3%	48	94%
Pico da Tarde	OL	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1165	105	9%	2792	255	9%	1152	57	5%	25	61%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	1419	108	8%	3216	238	7%	1060	52	5%	26	76%
		Tempo Real	18	1185	160	13%	2639	280	11%	1160	56	5%	27	57%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	12	1278	176	14%	3307	272	8%	1083	46	4%	23	76%
		Prioridade Ativa no Corredor	12	1185	161	14%	2443	229	9%	1099	62	6%	29	56%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	10	1216	185	15%	2472	166	7%	1079	53	5%	30	57%
	LO	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	1433	238	17%	3163	342	11%	1117	38	3%	27	57%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	2031	356	18%	3198	313	10%	1112	38	3%	38	57%
		Tempo Real	18	1285	251	20%	2790	451	16%	1138	45	4%	28	49%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	18	1747	312	18%	3193	222	7%	1112	50	4%	33	57%
		Prioridade Ativa no Corredor	12	1763	287	16%	3264	341	10%	1121	35	3%	32	58%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	10	1983	206	10%	3337	220	7%	1082	38	3%	36	62%
	TRANSVERSAIS	Tempo Fixo Bem Ajustado	24	4129	791	19%	4863	206	4%	1279	42	3%	51	95%
		Prioridade Passiva em Tempo Fixo	18	3603	407	11%	4833	174	4%	1262	35	3%	45	96%
		Tempo Real	18	4319	266	6%	4920	164	3%	1253	40	3%	53	98%
		Prioridade Passiva em Tempo Real	18	4410	368	8%	5043	221	4%	1298	46	4%	52	97%
		Prioridade Ativa no Corredor	12	4808	380	8%	4988	161	3%	1285	27	2%	58	97%
		Prioridade Ativa no Corredor e nas Transversais	10	4658	445	10%	4996	189	4%	1300	41	3%	56	96%