

# **PRIORIZAÇÃO ATIVA NO CONTROLE SEMAFÓRICO EM TEMPO REAL PARA ÔNIBUS EM CORREDORES ARTERIAIS COM TRÁFEGO MISTO**

**Francisco Moraes de Oliveira Neto**

**Carlos Felipe Grangeiro Loureiro**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN

Universidade Federal do Ceará - UFC

## **RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho operacional da prioridade semafórica do tipo ativa no controle em tempo real do sistema SCOOT de um dos principais corredores arteriais de Fortaleza, em períodos de média e alta demanda. 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 para ônibus coletados em campo durante a operação de cada cenário. Os resultados não foram favoráveis à adoção do modelo de prioridade ativa condicional, levando à conclusão de 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.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work was to assess the operational performance of active bus priority techniques in real time signal systems in one of the main Fortaleza's arterial corridors, in periods of medium and high demand levels. In evaluating scenarios, the following performance measures were considered: vehicle delay and number of stops simulated by SCOOT, as well as bus travel times observed in the field during each scenario's operation. The results did not favor the adoption of active priority schemes in the selected corridor, leading to the conclusion that SCOOT 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.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, a implementação de estratégias de prioridade semafórica para veículos de transporte coletivo vem se tornando uma opção cada vez mais viável para elevar a velocidade operacional dos ônibus em corredores arteriais, especialmente devido à disseminação do controle centralizado de semáforos em grandes e médias cidades brasileiras (NTU, 2002). Em geral, as estratégias de priorização são classificadas em dois níveis (Fox *et al.*, 1995): 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.

Ambas as estratégias são normalmente recomendadas em cruzamentos com vias ou faixas exclusivas para ônibus, mas também são passíveis de utilização em condições de operação compartilhada da malha viária, podendo beneficiar fortemente os usuários do transporte coletivo em detrimento do transporte individual, porém gerando polêmica (Chang *et al.*, 1995). Exemplo disto é o fato do uso da prioridade semafórica para ônibus ser amplamente aceito em interseções isoladas, existindo, no entanto, uma resistência à sua implementação em corredores arteriais urbanos. Neste caso, destaca-se o potencial de impactos negativos ao tráfego geral, como acréscimo no número de paradas e atrasos dos veículos do corredor, decorrentes do comprometimento da coordenação dos semáforos, e dos atrasos excessivos

para os veículos das vias transversais (Dale *et al.*, 1999; Balke *et al.*, 2000; Skabardonis, 2000; Agrawal *et al.*, 2002; Dion *et al.*, 2002). Portanto, avaliações rigorosas da complexa interação entre os ônibus e os automóveis num corredor arterial, sob várias condições de tráfego, são necessárias antes que qualquer estratégia possa ser desenvolvida e aplicada, principalmente considerando-se as especificidades operacionais das vias arteriais urbanas brasileiras.

Em Fortaleza, estudo de caso deste trabalho, não há tratamento preferencial para os ônibus na quase totalidade da sua malha viária, que operam disputando espaço com os automóveis e demais veículos de transporte de passageiros e cargas. Conforme destacado no trabalho de Loureiro *et al.* (2004), a partir da análise de uma amostra representativa de corredores da malha arterial de Fortaleza, constata-se que cerca de 1/3 dessa malha vem operando, nos períodos de pico, em condições indesejáveis (níveis de serviço E/F), resultando em velocidades médias do tráfego geral em torno de 20 km/h, com os ônibus se deslocando a velocidades médias inferiores a 15 km/h. Entretanto, desde 2001, Fortaleza dispõe de um sistema moderno de controle centralizado e adaptativo do tráfego (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. Atualmente, esta central controla, em tempo real, 195 dos 467 semáforos da cidade, possibilitando a implementação de várias estratégias de priorização semafórica nos corredores arteriais. Além disso, seu sistema operacional permite a avaliação de diferentes estratégias de controle semafórico a partir dos vários 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*), em intervalos de agregação de 15 min ao longo do dia. Recentemente, este banco de dados dinâmico foi georeferenciado por meio da interface TRANSCOOT, desenvolvida por Meneses (2003).

Considerando este contexto bastante favorável para observação, em tempo real, das características operacionais dos corredores arteriais de Fortaleza controlados pelo CTAFOR, Oliveira Neto (2004) desenvolveu uma pesquisa de dissertação de mestrado na qual avaliou o desempenho operacional de diferentes cenários com e sem prioridade semafórica para os ônibus, em períodos de pico e entropico do tráfego, num dos principais corredores de transporte urbano da cidade – Av. 13 de Maio. Embora vários estudos anteriores em cidades americanas, européias e asiáticas (Zhang, 2001) tenham avaliado, por meio de simulação computacional, distintas combinações de estratégias de controle e prioridade semafórica, acredita-se que Oliveira Neto (2004) seja pioneiro na avaliação experimental das estratégias de prioridade passiva e ativa, nos controles semafóricos em tempo fixo e real, de um corredor com tráfego misto. Os resultados, obtidos em campo, da avaliação dos cenários de priorização semafórica do tipo passiva, em tempo fixo (modelo do TRANSYT) e em tempo real (modelo do SCOOT), foram apresentados e discutidos por Oliveira Neto e Loureiro (2004). Estes resultados não foram favoráveis à adoção das estratégias testadas de prioridade passiva no corredor em estudo, levando à conclusão que o controle sem prioridade em tempo real do SCOOT, programado para uma boa progressão semafórica do tráfego geral (ônibus e automóveis), seria o mais indicado para um corredor arterial com características semelhantes ao analisado.

O presente artigo tem, portanto, como objetivo principal descrever e avaliar os cenários de priorização semafórica ativa para ônibus, detectados em tempo real no corredor arterial ou nas

vias transversais, permitindo uma análise da eficiência do modelo de prioridade ativa do SCOOT. Para tanto, faz-se inicialmente uma revisão conceitual deste modelo, para, em seguida, caracterizar os cenários observados, apresentar a metodologia de avaliação e, por fim, discutir os resultados do desempenho operacional do corredor e vias transversais, quando operados em tempo real com e sem prioridade semafórica para veículos de transporte coletivo.

## **2. PRIORIZAÇÃO SEMAFÓRICA 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) são:

- Extensão do verde: tempo adicional de verde no final do estágio de passagem do veículo detectado;
- Antecipação do verde: tempo de verde adicional no início do estágio de passagem do veículo detectado, antecipando o início do verde;
- Interrupção do vermelho: curto período de verde 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 na via principal 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 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.

## **3. O SISTEMA SCOOT**

O SCOOT é uma ferramenta de gerenciamento e controle do tráfego em interseções semaforizadas de áreas urbanas, que foi desenvolvida na Inglaterra e já vem sendo utilizada em 170 localidades no mundo (Zhang, 2001). A otimização no SCOOT, semelhante ao que ocorre no TRANSYT (Vincent *et al.*, 1980), se dá através de alterações sistemáticas nos tempos semafóricos e implementação da configuração que, conforme o modelo, resulta em maiores benefícios ou na minimização dos atrasos e paradas (TRL, 2000a). A diferença é que,

no SCOOT, os dados são fornecidos continuamente por detectores veiculares localizados na rua, com o sistema tentando acompanhar as variações do tráfego ao longo do dia.

Conforme descrito por Loureiro *et al.* (2002b), a filosofia do SCOOT é reagir às mudanças no tráfego por meio de frequentes, mas pequenas, mudanças nos tempos de verde, ciclo e defasagens de um determinado plano para um conjunto de semáforos que formam uma área de controle, visando à adequação deste plano à variação do comportamento do tráfego. No seu modelo de otimização, o SCOOT estima em tempo real o tamanho das filas a cada ciclo, em cada aproximação semaforica, e calcula o atraso como a soma destas filas em todas as aproximações (semelhante ao atraso do TRANSYT). O SCOOT estima também o número de paradas, combinando-os com os valores de 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 semaforica, 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 15 min no banco de dados ASTRID (TRL, 2000c).

#### **4. MODELO DE PRIORIDADE ATIVA PARA ÔNIBUS DO SCOOT**

A técnica de prioridade semaforica ativa foi implementada no SCOOT 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 última técnica recebe o nome de Antecipação de Estágio - *Recall*) (TRL, 2000b). 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, 2000b). Isto significa que a prioridade para os ônibus será mais efetiva em redes onde se tem reserva de capacidade (Zhang, 2001).

##### **4.1. 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” instaladas nos ônibus, que enviam mensagens para detectores específicos capazes de ler as mensagens quando os veículos passam por eles; neste caso, tem-se 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 é chamado na literatura de “prioridade semafórica inteligente”.

#### 4.2. Modelo de otimização

Quando um ônibus é detectado, o otimizador de priorização do SCOOT 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 1.

$$t = t_C + t_Q - l + \delta t \quad (1)$$

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];
- $l$  = atraso da transmissão desde a detecção até o recebimento da informação pelo computador central [s], acrescido pelo intervalo de tempo [s] usado pelos condutores dentro do período de amarelo;
- $\delta t = \text{Bus Vary}$  [s] – variação para ônibus (tipicamente em torno de 5 segundos).

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

$$t - t_{NS} \leq a \quad (2)$$

$$t - t_{NS} \leq c - c_{req} \quad (3)$$

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].

O ciclo requerido ( $c_{req}$ ) é o ciclo calculado para uma condição de saturação da interseção definida por um limite de saturação imposto pelo técnico de tráfego. 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, recomenda uma antecipação de estágio. Se  $t - t_{NS} < 0$ , o ônibus deve passar na interseção sem necessidade de extensão. 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.

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, 2000b): DN (*Do Nothing*), MS (*Minimum Stage*), DS (*Degree of Saturation*) e LS (*Long Stage*). Oliveira Neto (2004) faz uma descrição detalhada de cada método de compensação, destacando seu mecanismo de funcionamento, e suas vantagens e desvantagens em relação aos demais métodos.

#### 4.3. Parâmetros de calibração

A implementação da prioridade ativa do SCOOT requer ainda um rigoroso processo de calibração e validação em campo dos seguintes parâmetros básicos:

- Tempo de Percurso dos Ônibus (BJTM – *Bus Journey Time*): tempo de deslocamento dos ônibus, em fluxo livre, do ponto de detecção à linha de retenção;
- Tempo de Dispersão da Fila Máxima para Ônibus (BQUC – *Bus Queue Clear Time*): tempo de dispersão da fila veicular, formada da linha de retenção ao ponto de detecção;
- Extensão Máxima Permitida (BAUT – *Bus Authority*): máximo tempo de verde adicional;
- Limite de Saturação para Extensão (BEXS – *Bus Extension Saturation*): saturação máxima desejada para o nó, quando o sistema executa uma extensão de estágio;
- Limite de Saturação para Antecipação (BRES – *Bus Recall Saturation*): saturação máxima desejada para os *links* não priorizados num nó, quando o sistema executa uma antecipação de estágio;
- Limite de Saturação para Compensação (BRYS – *Bus Recovery Saturation*): saturação máxima desejada para o nó, quando o sistema executa uma compensação do tipo DS.

### 5. CARACTERIZAÇÃO DO CORREDOR EM ESTUDO

Conforme caracterizado por Oliveira Neto (2004), o corredor da Av. 13 de Maio foi escolhido como estudo de caso desta pesquisa, por representar 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. Cerca de 62% do movimento de pessoas nas aproximações do corredor e das vias transversais é realizado pelos ônibus, que representam apenas 6% do tráfego veicular nos *links* do corredor e 14% nas transversais.

O corredor possui uma extensão de 2,1 km, com um alinhamento horizontal praticamente retilíneo, duas faixas de tráfego por sentido, separadas por canteiro central. Suas 10 interseções semaforizadas são pouco espaçadas, com distância média de 230 m. Os pontos de parada de ônibus no corredor não possuem baias, observando-se o bloqueio da faixa direita durante as operações de embarque/desembarque. Desde maio de 2003, todos os semáforos do corredor vem operando em tempo real. Faz-se importante mencionar que o corredor apresenta dois trechos com características diferentes em relação à operação de ônibus nas vias transversais. No trecho 1, entre as ruas Paula Rodrigues e Barão do Rio Branco, o tráfego das vias transversais é menos intenso e composto apenas de automóveis, enquanto que no trecho 2, até a Av. Carapinima, o corredor é cortado por outros corredores importantes de transporte público. Desta forma, diferentemente dos cenários de prioridade passiva, os estudos de avaliação da prioridade ativa foram realizados apenas para o trecho 2.

### 6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A metodologia de avaliação é semelhante à descrita por Oliveira Neto e Loureiro (2004) na

avaliação dos cenários de prioridade passiva. Nesta segunda fase do trabalho, foram avaliados os seguintes cenários:

- *Cenário 1 – Controle SCOOT sem Prioridade*: tempos semafóricos gerados pelo controle adaptativo do sistema SCOOT, sem prioridade para ônibus;
- *Cenário 2 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor (PATR1)*: neste cenário foi simulada a lógica de prioridade semafórica ativa condicional (com o parâmetro de saturação como variável de controle) na programação em tempo real otimizada pelo SCOOT, com prioridade para ônibus nas aproximações do corredor;
- *Cenário 3 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais (PATR2)*: neste cenário foi simulada a lógica de prioridade semafórica ativa condicional na programação em tempo real otimizada pelo SCOOT, com prioridade para ônibus nas aproximações do corredor e das vias transversais.

### 6.1. Definição das Medidas de Desempenho

Na avaliação dos três cenários, foram consideradas as seguintes medidas de desempenho: atraso veicular e número de paradas, estimados pelo sistema SCOOT para o tráfego geral; e tempo de percurso para ônibus, coletado em campo durante a operação de cada cenário. Os valores do atraso veicular e do número de paradas foram coletados no banco de dados do SCOOT para os *links* 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, por sentido de tráfego do corredor e para os *links* das vias transversais, em cada intervalo dentro do período de pesquisa, da seguinte forma:

a) Atraso Veicular:  $AT_{15} = \sum_i At_i \cdot F_i$  [min.veíc/h] (4)

onde:  $At_i$  = Atraso médio no *link*  $i$  [min/veíc.];  $F_i$  = Fluxo no *link*  $i$  [veíc./h].

b) Número de Paradas:  $NP_{15} = \sum_i NP_i$  (5)

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

### 6.2. Coleta dos Dados

Os cenários foram observados nos dias úteis da semana (terças, quartas e quintas), no entropico manhã (8:30/10:30h) e no pico da tarde (17:15/18:45h). Estes períodos do dia foram escolhidos por representarem situações de média e alta demanda no corredor, respectivamente. 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. Dessa forma, no Cenário 2, foram distribuídos um total de 9 pesquisadores nas aproximações do corredor, sendo adicionados no Cenário 3, mais 4 pesquisadores nas aproximações transversais.

As medidas de desempenho para avaliação do tráfego geral em cada cenário foram estimadas pelo sistema SCOOT e extraídas com auxílio da interface TRANSCOOT (Meneses, 2003), sendo armazenadas em arquivos do tipo DBF. Os dados de tempo de percurso para avaliação do desempenho operacional dos ônibus foram coletados em campo de forma embarcada, ou seja, pesquisadores realizavam as medidas dentro dos veículos. A coleta consistia em registrar os instantes de passagem e os atrasos em pontos pré-definidos (pontos de parada e semáforos)

ao longo do corredor. Para facilitar os levantamentos em campo, em vez de cronômetros, foram utilizados *PALMTOPS*. Foi desenvolvido um programa na linguagem *POCKETC* que possibilitou o registro, por um único pesquisador, dos instantes de passagem em cada seção de controle, assim como dos tempos perdidos nos semáforos e em pontos de parada.

### 6.3. Metodologia de Análise

A análise comparativa dos cenários de controle semaforico baseou-se na seguinte hipótese de pesquisa: a priorização ativa em tempo real reduz o valor médio e a dispersão dos tempos de percurso dos ônibus, sem prejuízo para o tráfego geral do corredor e das vias transversais, quando comparada ao controle em tempo real sem prioridade. Na Tabela 1, estão detalhadas as hipóteses alternativas dos testes de significância realizados nesta análise.

**Tabela 1:** Comparação entre Cenários – hipóteses alternativas testadas.

	<i>Corredor</i>	<i>Corredor e Transversais</i>	
<i>Indicadores →</i>	<i>Tempo Médio de Percurso de Ônibus</i>	<i>Atraso Veicular</i>	<i>Número de Paradas</i>
<i>2 x 1 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Controle SCOOT sem Prioridade</i>	$H_1: \mu_{tpo2} < \mu_{tpo1}$ $H_1: \sigma_{tpo2}^2 < \sigma_{tpo1}^2$	$H_1: \mu_{AT2} \neq \mu_{AT1}$ $H_1: \sigma_{AT2}^2 \neq \sigma_{AT1}^2$	$H_1: \mu_{NP2} \neq \mu_{NP1}$ $H_1: \sigma_{NP2}^2 \neq \sigma_{NP1}^2$
<i>3 x 2 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor</i>	$H_1: \mu_{tpo3} < \mu_{tpo2}$ $H_1: \sigma_{tpo3}^2 < \sigma_{tpo2}^2$	$H_1: \mu_{AT3} \neq \mu_{AT2}$ $H_1: \sigma_{AT3}^2 \neq \sigma_{AT2}^2$	$H_1: \mu_{NP3} \neq \mu_{NP2}$ $H_1: \sigma_{NP3}^2 \neq \sigma_{NP2}^2$
<i>3 x 1 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Vias Transversais x Controle SCOOT sem Prioridade</i>	$H_1: \mu_{tpo3} < \mu_{tpo1}$ $H_1: \sigma_{tpo3}^2 < \sigma_{tpo1}^2$	$H_1: \mu_{AT3} \neq \mu_{AT1}$ $H_1: \sigma_{AT3}^2 \neq \sigma_{AT1}^2$	$H_1: \mu_{NP3} \neq \mu_{NP1}$ $H_1: \sigma_{NP3}^2 \neq \sigma_{NP1}^2$

onde: *tpo* = tempo de percurso de ônibus;  
*AT* = atraso veicular por sentido de tráfego;  
*NP* = número de paradas por sentido de tráfego.

Os níveis de significância destes testes foram definidos conforme a ordem de grandeza das variáveis observadas. Para os tempos de percurso de ônibus, foram consideradas como significativas diferenças nos tempos médios que resultassem na rejeição da hipótese nula para um nível de 5%, e em reduções de tempo de percurso maiores que 5 segundos por semáforo do corredor. Já diferenças de atraso veicular médio entre os cenários foram consideradas significativas para níveis de 1%, e que resultassem numa diferença de 5 seg./link por veículo que sofre parada ao longo do corredor ou nas vias transversais, calculado pela Equação 6:

$$AT_L = 60 \times \frac{\overline{AT}}{\overline{NP}} \text{ [seg./veic./link]} \quad (6)$$

onde:  $\overline{AT}$  é o atraso veicular médio e  $\overline{NP}$  é o número médio de paradas por sentido.



Para a variável número de paradas, foram consideradas significativas diferenças médias entre os cenários para níveis de 1%, resultando numa diferença de 5% na proporção média de paradas, calculada pela Equação 7:

$$PP = \frac{\bar{NP}}{n \times \bar{Q}} [\%] \quad (7)$$

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

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

$n$  = número de links por sentido de tráfego.

Com relação às medidas de dispersão, considerou-se significativa uma diferença de variâncias dos tempos de percurso para um nível de significância de 5%. Já para as variâncias do atraso e do número de paradas veiculares, assumiu-se diferenças significativas quando a hipótese nula era rejeitada para um nível de 2,5%.

## 7. ANÁLISE DO MODELO DE PRIORIDADE ATIVA DO SCOOT

### 7.1. Comparação entre Cenários

Os resultados dos testes de médias para as comparações de cenários 2x1 e 3x1 estão apresentados na Tabela 2. Valores com sinal negativo, destacados em negrito, representariam indícios nas amostras, conforme o critério de avaliação, de diferenças significativas entre os dois cenários analisados, corroborando a hipótese de pesquisa em questão. Entretanto, nenhum resultado deste tipo foi encontrado. Já diferenças positivas em negrito significam resultados contrários à hipótese levantada. Portanto, os resultados deste estudo de caso mostraram que as estratégias de priorização ativa do SCOOT (extensão, antecipação e compensação) não propiciaram melhoras significativas ao desempenho dos ônibus, além de causarem 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 num conseqüente aumento do atraso veicular no sentido LO.

**Tabela 2:** Resultados da comparação entre os cenários.

Diferenças nas variáveis	Entre Pico da Manhã			Pico Tarde		
	OL	LO	Transversais	OL	LO	Transversais
<b>2 x 1 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor x Controle SCOOT</b>						
$\Delta tpo$ (seg/ônibus/semáforo)	4,6	1,5	-	-0,1	-5,2	-
$\Delta AT$ (seg/veic/link)	2,1	<b>8,3</b>	2,5	2,2	<b>4,8</b>	<b>5,2</b>
$\Delta PP$ (%)	0,7%	<b>8,7%</b>	-1,3%	-1,3%	<b>9,2%</b>	-1,1%
<b>3 x 1 – Priorização Ativa em Tempo Real no Corredor e nas Transversais x Controle SCOOT</b>						
$\Delta tpo$ (seg/ônibus/semáforo)	5,2	5,6	-	0,4	<b>10,4</b>	-
$\Delta AT$ (seg/veic/link)	2,8	<b>11,2</b>	5,7	2,6	<b>8,0</b>	3,3
$\Delta PP$ (%)	3,8%	<b>18,7%</b>	-1,5%	0,4%	<b>12,7%</b>	-2,1%

onde:  $\Delta tpo$  = diferença de tempos de percurso para ônibus por semáforo em cada sentido;

$\Delta AT$  = diferença de atraso por veículo por link da rede;

$\Delta PP$  = diferença das proporções de paradas entre os cenários.

Pode-se observar também que, na operação sem prioridade do SCOOT (Cenário 1), as mudanças nos tempos semafóricos beneficiavam as aproximações do corredor de maior demanda veicular. Porém, como as vias transversais já operavam próximas da saturação, em ambos os períodos de estudo, os tempos extras do modelo de prioridade ativa prejudicaram a coordenação semafórica. Além disso, o principal fator que pode ter contribuído para a ineficiência do modelo de prioridade ativa do SCOOT está relacionado ao fato da prioridade ser implementada em cada nó individualmente, podendo, em determinados períodos do ciclo, dois nós adjacentes estarem operando com estratégias diferentes. Por exemplo, é possível situações nas quais, enquanto um semáforo está executando uma extensão de verde, num outro adjacente 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 agrava-se com um número maior de ativações. No Cenário 3, 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.

## **7.2. Efeito Negativo sobre a Coordenação Semafórica**

A seguir são analisadas duas situações identificadas de perda da coordenação semafórica, ou da progressão do tráfego, durante a implementação da prioridade ativa condicional, quando um ou mais ônibus são detectados numa ou mais aproximações do corredor (Cenário 2):

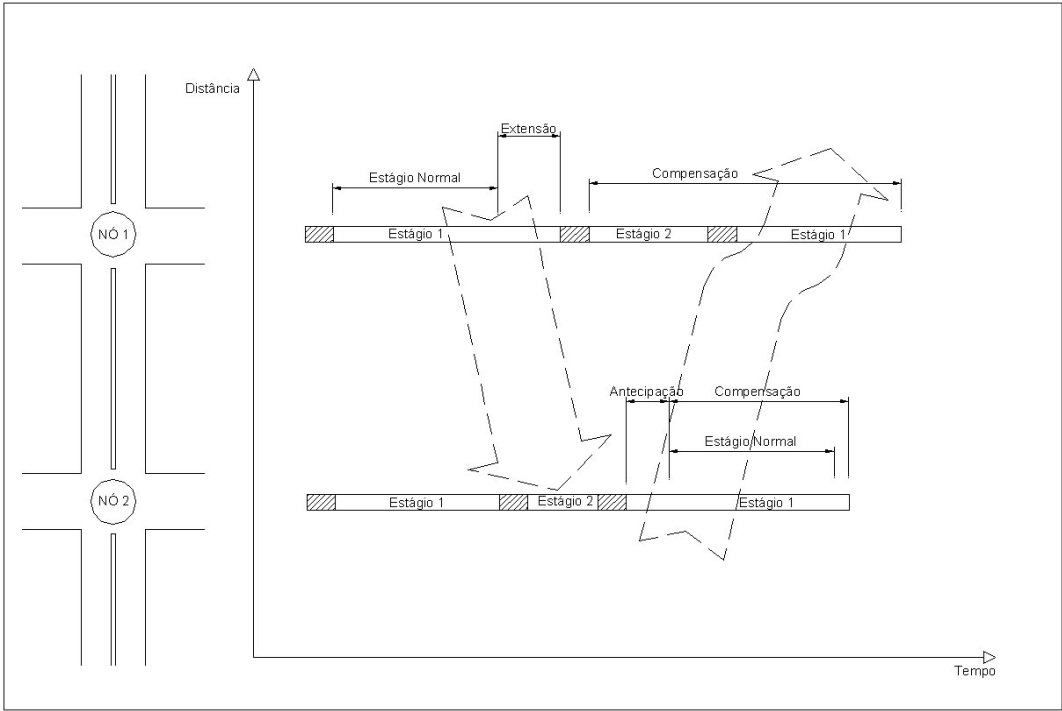
### **a) Situação A – Extensão seguida de antecipação**

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 1, que mostra o diagrama 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 implementada 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.

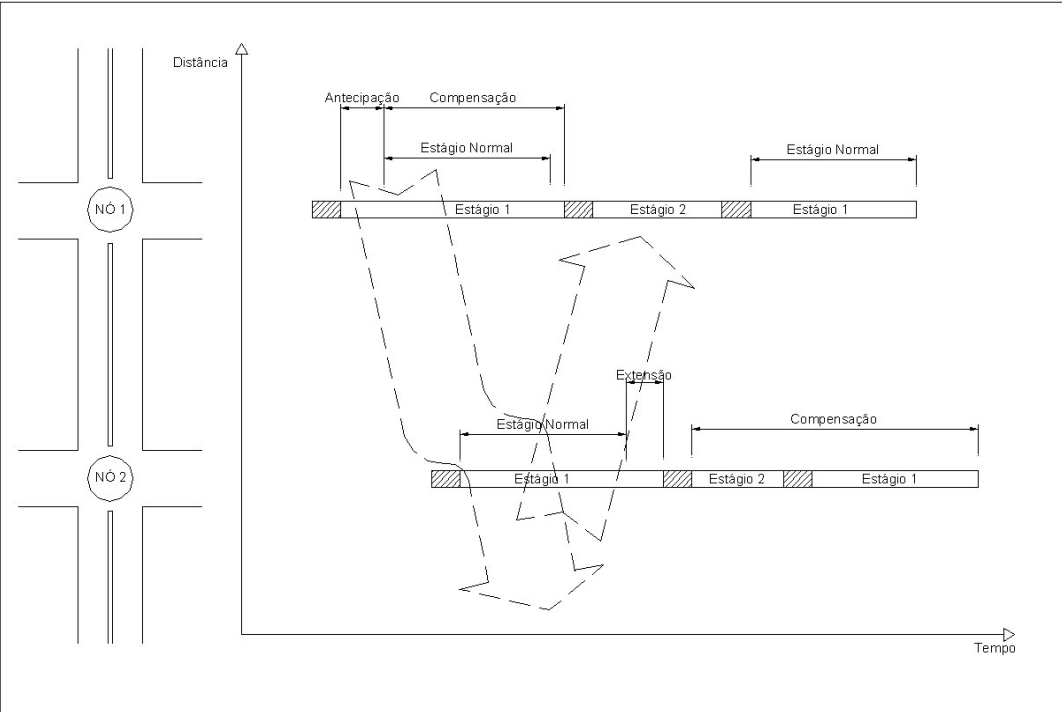
### **b) Situação B – Antecipação seguida de extensão**

Outra situação de perda da coordenação entre dois semáforos adjacentes num corredor arterial, devido às interrupções da prioridade, é representada na Figura 2. 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

cruzamento à montante. O efeito representado também pode se propagar nos ciclos seguintes durante o período de compensação até que os dois semáforos retornem à sua operação normal.



**Figura 1:** Situação A - Perda de coordenação devido a uma extensão seguida de antecipação.



**Figura 2:** Situação B - Perda de coordenação devido a uma antecipação seguida de extensão.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo permitiu uma avaliação de desempenho de estratégias de prioridade semafórica do tipo ativa num corredor arterial de Fortaleza, com sentido duplo e tráfego misto. Considerando as possibilidades de operação semafórica, com e sem prioridade ativa condicional no controle em tempo real, o estudo propôs alguns cenários de controle que foram avaliados usando medidas de desempenho coletadas em campo (tempo de percurso de ônibus) e estimadas pelo sistema SCOOT (atrasos e número de paradas veiculares).

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 em si e no próprio modelo de controle em tempo real do SCOOT. O espaçamento entre os semáforos requer uma operação com boa coordenação semafórica, pois existem grupos de interseções muito próximas no corredor analisado. Além disso, os níveis elevados de demanda veicular nas vias transversais do trecho avaliado, que operam em tempo real já próximas da saturação, restringem a eficiência do modelo de priorização. 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 principal.

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 3), 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 e tráfego misto, 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 condicional, como as avaliadas nesta pesquisa, não são adequadas.

#### **Agradecimentos**

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro do CT-Transporte (Projeto RedeTRAFEGO) e do CNPq. Os autores também agradecem à Autarquia Municipal de Trânsito, Cidadania e Serviços Públicos de Fortaleza (AMC) pela cooperação em todas as etapas da pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Agrawal, B.B.; S.T. Waller e A. Ziliaskopoulos (2002) A Modeling Approach for Transit Signal Preemption. *Transportation Research Board, 81<sup>th</sup> Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.
- Balke, K.N.; C.L. Dudek e T. Urbanik II (2000) Development and Evaluation of An Intelligent Bus Priority Concept. *Transportation Research Board, 79<sup>th</sup> 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° 1494*, p. 146-154.
- Dale, J.J.; R.J. Atherley; T. Bauer e L. Madsen (1999) A Transit Signal Priority Impact Assessment Methodology – Greater Reliance on Simulation. *Transportation Research Board, 78<sup>th</sup> 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, 81<sup>th</sup> 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.
- 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, 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, Artigos Científicos, p. 365-376.
- Loureiro, C.F.G.; F.S.M. Paula; D.D.M.R. Sousa e F.V.B. Maia (2004) Avaliação da Qualidade do Tráfego nas Vias Arteriais de Fortaleza utilizando o *Highway Capacity Manual 2000*. Comunicações Técnicas (CD-ROM) do *XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Florianópolis, SC.
- 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.
- NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos; SEDU/PR – Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (2002) *Prioridade para o Transporte Coletivo Urbano*. Relatório Técnico. Brasília, DF.
- 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.
- Oliveira Neto, F.M. e C.F.G. Loureiro (2004) Priorização Passiva do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis, v. 1, p. 537-548.
- Skabardonis, A. (2000) Control Strategies for Transit Priority. *Transportation Research Board, 79<sup>th</sup> 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 1494*, p. 117-123.
- TRL (2000a) *Executive Summary – Description of SCOOT*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0414. Transportation Research Laboratory, Crowthorne, England.
- TRL (2000b) *Functional Description – Bus Priority*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0484. Transportation Research Laboratory, Crowthorne, England.
- TRL (2000c) *ASTRID Operator Manual*. SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 7730. Transportation Research Laboratory, Crowthorne, England.
- 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, England.
- Wood, K. (1993) *Urban traffic control, systems review*. Project Report 41. Transportation Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Zhang, Y. (2001) *An Evaluation of Transit Signal Priority and SCOOT Adaptive Signal Control*. M.Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA.

---

Universidade Federal do Ceará  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 703  
60.455-760 – Fortaleza, CE

Fone/Fax: (0xx85) 4008-9488  
E-mail: [moraes@det.ufc.br](mailto:moraes@det.ufc.br)  
[felipe@det.ufc.br](mailto:felipe@det.ufc.br)