

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NOS PERÍODOS DE PICO DO TRÁFEGO DE INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS COM CONTROLE CENTRALIZADO EM TEMPO FIXO E REAL

Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, PhD, Marcos José Timbó Lima Gomes, MSc e Carlos Henrique Pires Leandro, MSc. \*

## RESUMO

Baseado em estudo de caso de seis interseções semaforizadas integrantes do Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza – CTAFOR, este artigo tem como objetivo comparar o desempenho da operação com planos de tempo fixo dimensionados pelo TRANSYT *versus* o controle adaptativo, em tempo real, do sistema SCOOT, avaliando, especificamente nos períodos de pico do tráfego, a magnitude e o grau de variabilidade dos indicadores atraso médio e volume atendido em cada aproximação destes cruzamentos. As medições em campo das duas variáveis analisadas foram realizadas por meio de gravação em vídeo das imagens veiculadas pelas câmeras do sub-sistema CFTV do CTAFOR. O procedimento de determinação do atraso veicular resultou de uma adaptação da metodologia proposta pelo HCM 2000. De forma geral, os resultados encontrados neste estudo prático vieram confirmar conclusões baseadas em simulações computacionais que sugeriram uma crescente superioridade do controle em tempo real sobre planos fixos à medida em que as demandas de pico aumentam.

## ABSTRACT

Based on a case study of six signalized intersections operated by the Fortaleza's Urban Traffic Control System – CTAFOR, this paper compares the performance of these intersections operating under TRANSYT fixed-time plans *versus* SCOOT adaptive control system, assessing, specifically during peak periods, the magnitude and degree of variation of the average delay and discharged volume at each approach of the intersections. The field measurements of both variables were implemented through video recording of the images captured from CTAFOR's CCTV system. The procedure for determining vehicle delay resulted from an adaptation of the methodology presented in the HCM 2000. In general, the results found in this practical study match the conclusions based on computational simulations which suggested that the benefits of an adaptive control become more pronounced as the level of demand peaking increases.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas centralizados de controle de semáforos (CTA – Controle de Tráfego em Área), incluindo o monitoramento e a operação do tráfego urbano por meio de circuitos fechados de TV (CFTV) e painéis de mensagens variáveis (PMV), vêm sendo implantados em grandes e médias cidades brasileiras nas últimas duas décadas. Acredita-se que tais sistemas sejam capazes de reduzir atrasos e número de paradas em cruzamentos semaforizados, gerenciando de forma mais otimizada a infraestrutura de malhas viárias urbanas próximas da saturação.

A maioria dos sistemas CTA atualmente em operação no Brasil e no exterior representa uma variante dos antigos sistemas centralizados de tempo fixo, desenvolvidos ao longo da década de 60 (Wood, 1993). Em comum, os sistemas atuais apresentam a característica de operarem, de forma isolada ou coordenada, grupos de interseções semaforizadas, denominadas de sub-áreas, buscando determinar seu tempo de ciclo ótimo, assim como as repartições de verdes e as defasagens, conforme um critério específico de minimização de atrasos, número de paradas e comprimentos de fila, ou ainda de obtenção de um grau de saturação desejável nas aproximações de cada cruzamento controlado.

Estes sistemas diferem entre si, entretanto, basicamente em relação ao período de observação do tráfego considerado na definição do plano semaforico mais adequado para cada sub-área.

Os sistemas mais antigos, classificados como de controle em tempo fixo, necessitam de planos pré-programados com base em dados históricos médios para determinados períodos do dia e dias da semana. Já os sistemas adaptativos, denominados também de controle em tempo real, ajustam os parâmetros da programação semafórica em função de dados de volume ou ocupação nas aproximações dos cruzamentos que compõem a sub-área, coletados continuamente por detetores veiculares. Entre estes dois tipos de controle semafórico centralizado, situam-se os sistemas classificados como de “seleção dinâmica”, que selecionam, dentre um conjunto de planos pré-definidos, aquele que melhor se ajusta às condições detectadas em períodos de observação de 15 ou 20 minutos, anteriores ao acionamento do plano escolhido.

Embora se propague a maior eficiência de sistemas em tempo real, sobre os outros dois tipos de controle centralizado, principalmente na redução dos atrasos e tempos de viagem nas sub-áreas controladas, são poucos os estudos recentes de avaliação de ganhos operacionais em sistemas implantados mundo afora, especialmente em grandes cidades de países em desenvolvimento. Com relação ao sistema SCOOT (2002), por exemplo, estudos iniciais foram realizados em cidades inglesas, no início da década de 80, indicando uma redução média no atraso, ao longo do dia, de 12% sobre sistemas com planos atualizados de tempo fixo e 20% sobre sistemas típicos com planos já degradados pela evolução do tráfego no tempo (Robertson, 1986). Em 1993, estes ganhos médios diários também foram encontrados em um projeto de demonstração do SCOOT em Toronto, Canadá (TAU, 1995).

Mais recentemente, estudos de simulação “off-line” do SCOOT vêm sendo desenvolvidos na América do Norte, uma vez que só nos últimos anos este tipo de sistema tem atraído a atenção de americanos e canadenses (Abdel-Rahim e Taylor, 2000; Perrin e Martin, 2002). Estas simulações têm apontado, entretanto, para o fato de que, quando opera-se no pico do tráfego, planos fixos bem atualizados, e otimizados para um período específico, podem produzir resultados tão bons quanto as estratégias de controle adaptativo. Além disso, sistemas de controle em tempo real tendem a produzir menores tempos de viagem quando os níveis de demanda do tráfego evoluem lentamente, conforme concluído por Stewart *et al.* (1998).

Tomando-se como estudo de caso algumas interseções isoladas, ou “predominantes” em pequenas sub-áreas, operadas pelo Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza – CTAFOR, este artigo tem como objetivo comparar o desempenho, especificamente nos períodos de pico do tráfego, da operação em tempo fixo *versus* a estratégia em tempo real, avaliando a magnitude e o grau de variabilidade dos indicadores atraso médio veicular e volume atendido (descarregado) em cada aproximação destes cruzamentos.

## **2. SISTEMA DE CONTROLE SEMAFÓRICO DO CTAFOR**

O sistema CTAFOR (Medeiros *et al.*, 2001), implantado em dezembro de 2001 numa área de 150 km<sup>2</sup> da malha viária do município de Fortaleza, contempla um conjunto de 150 interseções semaforizadas, um sub-sistema de CFTV com 30 câmeras de vídeo, monitorando o tráfego dos cruzamentos mais carregados, além de um sub-sistema de PMV com 20 painéis posicionados nos principais corredores arteriais da cidade. O sub-sistema de controle semafórico do CTAFOR é do tipo adaptativo, em tempo real, baseado no *software* britânico SCOOT, desenvolvido na década de 70 pelo então *Transportation and Road Research*

*Laboratory* (TRRL). O nome SCOOT é um acrônimo para *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique* e resume bem sua função: trata-se de um algoritmo para otimização em tempo real de repartições de verde, ciclo e defasagens.

Além do controle centralizado em tempo real, o sub-sistema semafórico do CTAFOR pode trabalhar ainda sob os níveis de controle isolado e centralizado em tempo fixo. A condição ideal é a operação em tempo real, porém alguns problemas podem levar o operador a optar pelo tempo fixo, uma vez que o sistema em tempo real não responde rápido o suficiente a condições anormais de tráfego. Por outro lado, falhas de comunicação, que devido à complexidade do sistema podem ser frequentes, podem gerar a necessidade de uma operação isolada. Acompanhando o SCOOT, há ainda o *software* ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*) que tem a finalidade de monitorar seu funcionamento, coletando dados para recuperação e posterior análise. Alternativamente, pode servir como fonte de condições históricas do tráfego a serem usadas pelo SCOOT em situações de falha de detectores e como referência para previsão dos períodos de ocorrência de picos (SCOOT, 2002).

### **3. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO SCOOT**

O funcionamento do SCOOT é fundamentado em um modelo de tráfego que tem por fim minimizar atrasos e paradas sob determinada programação semafórica, simulando os efeitos das alterações dessa programação sobre o tráfego dentro da área controlada. Os otimizadores de ciclo, repartição de verde e defasagens do SCOOT atuam testando pequenas alterações na programação semafórica vigente, implementando aquelas que resultarem em benefícios detectados no modelo de tráfego embutido.

O modelo de tráfego requer uma estimativa da demanda, isto é do padrão de chegadas de veículos na aproximação. O SCOOT obtém esse padrão a partir de laços indutivos colocados preferencialmente à cerca de 20 metros da interseção a montante. Dessa distância deve resultar um tempo de percurso mínimo, sob condições de fluxo livre, do detector à linha de retenção, de cerca de 8 a 12 segundos. Essas condições têm duplo objetivo: prover tempo suficiente para o modelo prever as chegadas na faixa de retenção e permitir que se detectem condições de congestionamento tais que afetem a descarga de fluxo da interseção a montante. De um modo geral, é necessário um laço para cada duas faixas de tráfego.

Cada detector é amostrado quatro vezes por segundo, testando-se a presença ou ausência de veículos sobre o mesmo. A partir dessa informação, o SCOOT constrói o padrão de chegadas no *link* da aproximação e modela sua progressão até a faixa de retenção. Os padrões de chegadas são armazenados e atualizados no SCOOT sob a forma de perfis cíclicos de fluxo, que simplificadaamente podem ser representados como histogramas que refletem a variação do fluxo proveniente da interseção a montante ao longo de um tempo de ciclo. Os dados mais recentes obtidos pelos detectores são combinados com os armazenados nos perfis cíclicos permitindo que grandes variações aleatórias que ocorram não perturbem o padrão de tráfego que é normalmente observado (TRL, 2000a).

Neste ponto, o modelo de tráfego do SCOOT começa a atuar sobre os perfis cíclicos. Inicialmente, ele prevê quando o tráfego registrado no perfil chegará na faixa de retenção, utilizando para isso um valor fornecido ao sistema do tempo médio de percurso entre o

detector e a retenção. Como o SCOOT controla os tempos de verde e vermelho, ele modela a chegada do pelotão na retenção coerentemente com o estado dos semáforos. Se o pelotão modelado atinge a retenção durante o verde, ele passa pela retenção sem sofrer atraso, enquanto que se atingir a retenção durante o vermelho, ocorre a formação de fila, com veículos sendo adicionados ao seu final. No instante de mudança para o verde, essa fila acumulada é descarregada pela retenção a uma taxa determinada, equivalente ao fluxo de saturação, que é um parâmetro de entrada do SCOOT. Por meio dessa modelagem, o SCOOT prevê o comprimento de filas, sendo capaz de estimar o atraso experimentado e o número de paradas em cada aproximação. Entretanto, essa estimativa pode não ser acurada se os parâmetros fornecidos ao SCOOT não refletirem os valores que são observados em campo.

### 3.1. Otimizadores do SCOOT

Os otimizadores de ciclo, repartição de verde e defasagem, resumidos na Tabela 1, agem baseados em medidas de desempenho estimadas em cima do modelo de fila descrito. De um modo geral, os otimizadores tendem a levar as interseções a operarem sob 90% de saturação.

**Tabela 1:** Parâmetros dos Otimizadores do SCOOT no CTAFOR

Otimizador	Frequência da Verificação	Decisões de Alteração
Repartição de Verde	a cada mudança de estágio	-8 a 8 segundos
Tempo de Ciclo	a cada 2,5 ou 5 minutos	4, 8 ou 16 segundos
Defasagem	uma vez a cada ciclo	-4, 0, 4 segundos

#### 3.1.1. Otimizador da repartição de verde

Instantes antes da mudança de estágio, o otimizador de repartição de verde entra em ação e verifica se atrasando, adiantando ou mantendo a entrada do estágio seguinte, obtém-se um melhor balanceamento das saturações nas aproximações da interseção. Nesta otimização, cada interseção é tratada independentemente das demais. A decisão de encurtar, manter ou prolongar o estágio tem o propósito de minimizar o quadrado do maior grau de saturação nos *links* do nó. Essa modificação no tempo de verde, apesar de implementada no estágio do ciclo atual, não é levada integralmente ao próximo ciclo. Dessa forma, espera-se que o SCOOT reaja às variações aleatórias que ocorrem de ciclo para ciclo, ao mesmo tempo que acompanha a tendência de variação da demanda ao longo do tempo (Peek-Coasin, 2000).

Esse procedimento adotado no otimizador de repartição de verde é a filosofia que baseia todas as decisões do SCOOT. As grandes flutuações de demanda são acompanhadas pelo acúmulo de pequenas, mas frequentes, modificações na programação semafórica, minimizando distúrbios causados ao tráfego pela mudança na programação. Podendo-se dizer que o SCOOT responde, e não reage, às variações de tráfego (Martin e Hockaday, 1995).

#### 3.1.2. Otimizador do tempo de ciclo

Para se coordenar a operação de interseções em uma sub-área, é preciso que estas estejam operando sob um mesmo tempo de ciclo, ou múltiplo deste, de modo que se garanta a manutenção das defasagens. Embora a análise empreendida neste trabalho não avalie os efeitos específicos da coordenação semafórica em tempo real, faz-se importante entender também o funcionamento do otimizador de ciclo. Este atua sobre as sub-áreas a cada 5

minutos, normalmente. No instante de sua atuação, o otimizador calcula, para cada interseção da sub-área, o tempo de ciclo que resultará num grau de saturação especificado (*default* de 90%). Usando o maior dos ciclos encontrados, o SCOOT verifica se a implementação desse novo tempo de ciclo trará uma redução igual ou maior que 2% nos atrasos experimentados na sub-área controlada. Caso afirmativo, a modificação é implementada; a partir daí, a otimização passa a acontecer a cada 2,5 minutos. Os tempos de ciclos utilizados pelo SCOOT são sempre múltiplos de quatro, porque mudanças inferiores a 4 segundos não produzem melhoras significativas nas medidas de desempenho (Peek-Coasin, 2000).

### 3.1.3. Otimizador de defasagens

Quanto ao otimizador de defasagens, apesar de não estar relacionado à análise empreendida neste trabalho, este atua a cada ciclo, novamente verificando se modificações da ordem de 4 segundos na programação trarão benefícios à progressão dos pelotões modelados pelo SCOOT. Isso é feito comparando-se a soma dos PIs (ver descrição do modelo do TRANSYT no item 4) dos *links* de entrada e saída de cada interseção sob a programação semafórica atual, com aquelas obtidas com defasagens de 4 segundos a mais ou a menos. O SCOOT implementa aquela que fornecer a menor soma de PI (Peek-Coasin, 2000).

## 3.2. Validação dos parâmetros operacionais do SCOOT

Constata-se que a eficiência do sistema SCOOT é dependente de sua correta modelagem do tráfego. Para tanto, faz-se necessário que sejam bem calibrados e validados, em campo, os parâmetros utilizados nesta modelagem. São três os parâmetros básicos que precisam ser fornecidos ao SCOOT para que este consiga capturar as condições específicas de cada *link*: tempo de percurso, tempo de dispersão de fila máxima e *saturation occupancy*. O tempo de percurso é o tempo utilizado por um veículo, inserido em um pelotão sob fluxo desimpedido, para trafegar do ponto de detecção até cruzar a faixa de retenção. Conforme já comentado anteriormente, este parâmetro é utilizado pelo modelo para estimar as chegadas dos veículos na faixa de retenção, a partir dos dados coletados pelos laços e, adicionalmente, para modelar a dispersão dos pelotões. A determinação do valor do parâmetro é feita pela média dos tempos de percurso, cronometrados em campo, de uma amostra considerada representativa do comportamento do tráfego no local.

Já a fila máxima é definida como sendo a fila que, iniciando na faixa de retenção, atinge o laço detetor a montante. O tempo de dispersão de fila máxima é, então, o tempo necessário para a dispersão dessa fila, ou seja, para que os veículos que a compõem passem pela retenção da aproximação. O valor médio desse parâmetro é obtido por repetidas medições em campo, sendo afetado por variações na composição do tráfego e no comportamento dos motoristas. Além disso, mudanças na configuração geométrica do cruzamento ou na posição do laço detetor requerem sua atualização. O último parâmetro, chamado de *saturation occupancy*, representa um valor médio da taxa máxima de descarga da fila de veículos através da retenção. Este conceito equivale, na Engenharia de Tráfego, ao do fluxo de saturação. O modelo do SCOOT utiliza esse parâmetro para estimar a capacidade ociosa de cada aproximação de forma que o otimizador de repartição de verdes possa balancear o grau de saturação entre as aproximações. A calibração do parâmetro baseia-se em corrigir uma estimativa inicial por um fator obtido pela relação entre o tempo de dispersão da fila em campo e o da fila modelada. Há ainda dois outros parâmetros que necessitam ser calibrados

em campo: o *start lag* e o *end lag*, necessários para o modelo do SCOOT estimar o tempo de verde efetivo.

#### 4. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO TRANSYT

De acordo com Robertson (1986), autor dos dois modelos, o SCOOT é, conceitualmente, um TRANSYT em tempo real, com os dois programas compartilhando dos mesmos princípios: utilizam o conceito de perfis cíclicos de fluxo para modelar a demanda e procuram minimizar a soma das filas médias nas interseções da sub-área. O programa TRANSYT é composto de um modelo de simulação de tráfego e de um algoritmo de minimização, cuja função objetivo considera o peso combinado do número de paradas e o atraso sofrido pelos veículos em todas as aproximações da rede semaforizada. Este valor representa o custo do congestionamento, sendo denominado de Índice de Desempenho, ou *Performance Index* (PI), definido por:

$$PI = \sum_{i=1}^n (Ww_i d_i + \frac{K}{100} k_i S_i) q_i \quad (1)$$

onde,

- W = custo médio por unidade de atraso;
- w<sub>i</sub> = coeficiente de ponderação de atraso no *link* i;
- d<sub>i</sub> = atraso médio no link;
- K = custo médio para 100 unidades de parada;
- k<sub>i</sub> = coeficiente de ponderação do número de paradas no *link* i;
- S<sub>i</sub> = número médio de paradas no *link* i;
- q<sub>i</sub> = fluxo médio no *link* i;
- n = número de *links* na rede.

Como no SCOOT, a base do modelo de simulação é a representação dos padrões cíclicos de tráfego (PCT). Estes padrões nada mais são do que as representações das taxas médias de chegada em unidades de carro de passeio (ucp) para pequenos intervalos do ciclo em cada aproximação, denominados de passos. A precisão do modelo está associada a quantidade de passos adotada (Vincent *et al.*, 1980). São três os PCT's definidos pelo TRANSYT: IN, GO e OUT. O primeiro deles representa o fluxo que chegaria a linha de parada caso estes veículos não fossem detidos nesta linha pelo semáforo. O padrão GO representa o fluxo de escoamento do tráfego no arco, sendo o valor máximo que o fluxo pode assumir. O padrão OUT representa o comportamento do tráfego que deixa o link.

O perfil do tráfego que entra em cada link (IN) é dado através da aplicação de um modelo empírico de dispersão de pelotões sobre os padrões de saída dos arcos a montante dele (OUT). O atraso total da rede é calculado pela soma das parcelas de atraso sofridas por cada uma das aproximações desta rede. Ao contrário dos modelos tradicionais que consideram apenas o atraso uniforme e aleatório, o TRANSYT ainda calcula o atraso devido à saturação, correspondente aos casos nos quais a demanda supera a capacidade do link. A quantidade de paradas é dada pela soma das taxas de parada em cada um dos *links* da rede, e é obtida pela soma dos valores das paradas uniformes, aleatórias e de saturação.

O TRANSYT trabalha na busca de um plano semaforico, isolado ou coordenado, que cause menos penalidades ao tráfego nas aproximações modeladas, isto é, menor PI. A solução ótima é obtida por meio de processo *hill climbing*. Neste processo, o TRANSYT calcula o PI para a

rede em um plano semaforico inicial. Posteriormente, o programa altera a defasagem de uma das interseções um certo número de unidades de tempo e recalcula o PI da rede. Se este novo valor for menor, então a defasagem é sucessivamente alterada na mesma direção e no mesmo número de passos até obter um valor mínimo para o PI. Se o valor do PI obtido após a primeira alteração de defasagem for maior, a alteração caminha na direção oposta até que um valor menor seja obtido. Na tentativa de diminuir mais ainda o PI, o TRANSYT também realiza modificações individuais nas repartições de verde de cada uma das interseções.

Apesar do TRANSYT não otimizar o ciclo semaforico, ele possui uma ferramenta que auxilia a determinação deste tempo, denominada de CYOP. Este procedimento consiste em calcular, para um conjunto de tempos de ciclo, o valor do PI em cada uma das interseções, considerando-as em operação isolada. Nesta rotina, o TRANSYT procura escolher tempos de ciclo que resultem em graus de saturação inferiores a 90%.

Como parte integrante dos estudos básicos do CTAFOR (ASTE, 1998), Oliveira (1997) concebeu e operacionalizou uma plataforma computacional para facilitar a elaboração de planos coordenados de tempo fixo utilizando a versão 9 do TRANSYT. Este sistema, denominado de SIGTRAF, capta as informações armazenadas em um banco de dados georeferenciados no *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG) TransCAD for Windows (Caliper, 1996), executa o TRANSYT e retorna seus resultados ao SIG para geração de mapas temáticos e avaliação da qualidade dos planos elaborados. Toda a programação de tempo fixo utilizada no CTAFOR foi produzida, e está sendo atualizada, no sistema SIGTRAF, englobando planos semaforicos nos 150 cruzamentos centralizados, para os picos da manhã, meio-dia e tarde, além do entre-pico e finais de semana e feriados.

## 5. CONCEITO DE ATRASO VEICULAR

O atraso em interseções semaforizadas pode ser definido, de forma genérica, como a demora causada aos veículos, em razão do tempo perdido no período de vermelho, assim como devido aos tempos de aceleração e desaceleração inerentes à formação e destruição da fila no cruzamento. Numa perspectiva mais ampla para o usuário, o atraso é uma medida de desconforto e frustração para motoristas e passageiros, além de estar relacionado com consumo de combustível e tempo de viagem perdido, sendo, portanto, um dos indicadores mais adequados para avaliar o desempenho da programação semaforica. Teply (1989) chama atenção, no entanto, que o atraso só será uma ferramenta útil ao engenheiro de tráfego se calculado, medido e utilizado de maneiras compatíveis e consistentes. Nas conclusões do seu trabalho, o autor destaca ainda que o atraso veicular não pode ser medido em campo de forma 100% precisa, com a realidade sendo normalmente subestimada pelos métodos de levantamento. Também não se deve esperar uma concordância exata dos valores levantados com os simulados por modelos analíticos.

O *Highway Capacity Manual* – HCM (TRB, 2000) define atraso de controle (*control delay*) como a diferença entre o tempo de viagem realmente experimentado na travessia do cruzamento semaforizado e um tempo de referência decorrente de uma situação na qual não existisse controle semaforico e o veículo estivesse se deslocando em velocidade de fluxo livre. Na análise operacional dos cruzamentos semaforizados, esta variável é caracterizada de duas formas distintas: o atraso parado e o atraso total (de controle). O primeiro consiste no

atraso sofrido apenas pelos veículos penalizados com parada na interseção semafórica. O segundo consiste no atraso sofrido tanto pelos veículos parados, como por aqueles veículos em manobras de aceleração/desaceleração, em função do desmanche ou formação da fila.

A metodologia proposta pelo HCM 2000 para a determinação do atraso em campo baseia-se na contagem dos veículos estocados nas filas, em intervalos regulares de 10, 15 ou 20s, durante um período mínimo de 15 minutos; sendo medido, portanto, apenas o atraso parado. Para estimar o atraso total, o HCM 2000 propõe a multiplicação do atraso parado por um fator de correção que representaria o atraso da aceleração/desaceleração. Este fator é função do número médio de veículos na fila em cada ciclo e da velocidade de fluxo livre quando os veículos são desimpedidos pelo semáforo.

## **6. ESTUDO DE CASO – METODOLOGIA**

Como estabelecido anteriormente, este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho operacional das interseções controladas pelo CTAFOR, operando sob as estratégias de controle em tempo fixo e real, comparando os atrasos veiculares medidos em campo e a demanda atendida nos períodos de pico do tráfego, nos seguintes cenários:

- Controle em Tempo Fixo – interseções operadas com planos forçados de tempo fixo, calculados pelo TRANSYT, com base nos volumes atuais armazenados pelo ASTRID;
- Controle em Tempo Real – interseções operadas pelo SCOOT, com parâmetros calibrados e validados em campo e intervalo fixo de ciclo mínimo e máximo.

### **6.1 Amostra analisada**

Para compor a amostra de análise, foram escolhidas seis interseções semaforizadas representativas das situações mais típicas/críticas na área controlada pelo CTAFOR, classificadas de acordo com o tipo de operação (isolada ou coordenada) e o grau de saturação (médio ou alto), totalizando 25 aproximações pesquisadas (Tabela 2). Como neste trabalho as medições de atraso foram feitas a partir da gravação em vídeo das imagens das câmeras do sub-sistema CFTV, a escolha destes cruzamentos baseou-se também na existência de câmeras em locais que permitissem uma boa visualização das aproximações pesquisadas.

Embora o trabalho objetivasse exclusivamente a análise de interseções operando de forma isolada, sem a intenção de avaliar o efeito das duas estratégias de controle em contextos de coordenação em rede, foram selecionados, dadas as limitações impostas pela coleta de dados via CFTV, três cruzamentos operando completamente isolados e três operando em pequenas sub-áreas. Entretanto, estes três últimos são os mais carregados em suas respectivas sub-áreas, sendo predominantes quando da determinação do ciclo ótimo pelo modelo do SCOOT. Quanto ao grau de saturação, buscou-se incluir cruzamentos experimentando níveis de saturação superiores a 90% (classificados como “altos”) na maioria das aproximações, assim como outros em que, mesmo nos períodos de pico, nenhuma das aproximações apresentasse grau de saturação superior a 90% (considerados “médios”).

**Tabela 2:** Interseções escolhidas para a realização da pesquisa de atraso veicular

<b>Interseção</b>	<b>Tipo de Operação</b>	<b>Grau de Saturação</b>
057 – Av. Monsenhor Tabosa x Av. Barão de Studart	Isolada	Médio (75% - 85%)
060 – Av. Eng. Santana Jr. x Av. Pe. Antônio Tomás	Isolada	Alto (75% - 105%)
071 – Av. Abolição x Av. Desembargador Moreira	Coordenada (predominante)	Médio (65% - 85%)
079 – Av. Aguanambi x Av. Domingos Olímpio	Coordenada (predominante)	Alto (50% - 95%)
084 – Av. Santos Dumont x Av. Virgílio Távora	Coordenada (predominante)	Médio (70% - 80%)
250 – Av. Raul Barbosa x Av. Murilo Borges	Isolada	Alto (85% - 110%)

## 6.2 Coleta dos dados

Conforme já mencionado, para a coleta em campo dos dados de atraso, optou-se pela gravação em vídeo das imagens captadas pelas câmeras do sub-sistema de CFTV. A utilização das câmeras dispensou o uso de equipes de pesquisadores em campo, além de garantir maior precisão no processo de coleta, pois o pesquisador podia “congelar” a imagem para efetuar a contagem dos veículos, assim como repetir o procedimento caso houvesse alguma dúvida ou inconsistência nos dados levantados.

Foram feitas gravações para os dois cenários (“Tempo Fixo” e “Tempo Real”), realizadas em períodos de um hora nos picos da manhã (7:30–8:30hs), meio-dia (11:30–12:30hs) e tarde (17:30–18:30hs), com duração de 15 minutos para cada aproximação da interseção. Tanto os períodos de pico, como os dias úteis, selecionados para a realização das gravações foram determinados através da observação dos dados históricos de volume veicular nos cruzamentos, recuperados do sistema ASTRID.

### 6.2.1 Gravação das imagens

Para realizar as gravações, primeiramente era definido um enquadramento da câmera para cada aproximação da interseção pesquisada, de modo que permitisse ao pesquisador a visualização do primeiro e último veículo da fila. Este enquadramento era armazenado pela mesa de controle do sistema CFTV e o operador programava antecipadamente em qual aproximação deveria estar focada a câmara, de acordo com a seqüência e horários previstos no cronograma de gravação. Desta forma, podia-se realizar as gravações exatamente com o mesmo ângulo de visão e seqüência das aproximações para os dois cenários analisados.

Além destes cuidados, eram necessárias informações sobre o início e a duração de cada ciclo, visto que a análise considerou o atraso veicular total, ciclo a ciclo. Como na operação em tempo real o ciclo é modificado de acordo com as flutuações do tráfego, foi solicitado ao SCOOT um relatório que registrasse tais informações durante o período de observação.

## 6.3 Determinação do atraso veicular

O procedimento de determinação do atraso veicular adotado neste trabalho resultou de uma adaptação da metodologia proposta pelo HCM 2000, descrita anteriormente, com o intuito de estimar diretamente, a partir da contagem dos veículos nas aproximações, não só a parcela do atraso parado na fila, como também a parcela decorrente das manobras de aceleração e desaceleração. Esta adaptação foi motivada pelo fato de se acreditar que a utilização dos fatores de correção indicados no HCM 2000, para conversão do atraso parado em atraso total (de controle), poderiam não ser representativos da realidade específica das interseções de Fortaleza. Portanto, além dos veículos estocados na fila, foram incluídos na contagem aqueles

que se encontravam desacelerando para se incorporarem à fila. Com a imagem “congelada”, o pesquisador identificava os veículos nesta condição por meio da comparação de seus espaçamentos.

Com base nestas considerações, cada pesquisador realizava a análise das fitas de vídeo, registrando em formulário específico a quantidade de veículos submetidos a atraso total, em intervalos de observação de 10 segundos, assim como o volume de veículos que passava na faixa de retenção (volume descarregado) durante o ciclo pesquisado. O valor do atraso total (de controle) médio na aproximação, por ciclo, foi calculado pelo somatório do número de veículos que sofreram atraso nos intervalos de observação dentro de um determinado ciclo, multiplicado pela duração do intervalo, e dividido pelo número de veículos que cruzou a aproximação neste ciclo. Como o tempo de gravação para cada aproximação foi de 15 minutos, pode-se calcular valores de atraso veicular em vários ciclos, formando para cada aproximação uma amostra de observações desta variável. Desta maneira, para uma mesma aproximação, tinha-se uma amostra de observações da variável “atraso veicular” correspondente ao cenário “Tempo Fixo” e outra para o cenário “Tempo Real”, podendo-se realizar testes de hipótese paramétricos de igualdade de médias e variâncias entre os dois cenários.

#### **6.4 Análise das médias e variâncias: atrasos e volumes descarregados**

As análises de inferência estatística dos valores amostrais observados para as variáveis “atraso” e “volume atendido” (descarregado), em ambos os cenários, basearam-se nas seguintes hipóteses teóricas, formuladas a partir da revisão bibliográfica sobre os modelos de otimização do SCOOT e do TRANSYT:

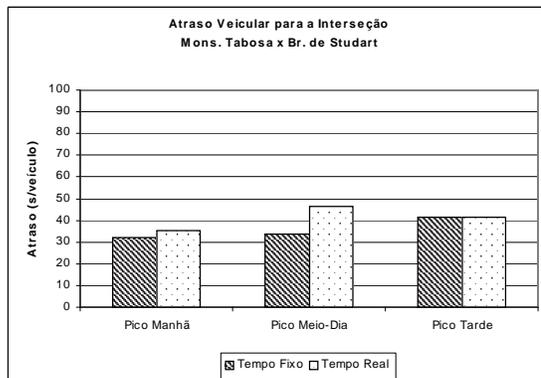
- Quanto maior a capacidade responsiva a flutuações do tráfego do controle em tempo real, menor o **atraso** veicular médio nas aproximações da interseção e menor a variância deste atraso. Sendo assim, foram realizados testes unilaterais para esta variável, com nível de significância de 5%, tendo como hipótese alternativa a afirmação de que a média e a variância populacionais do atraso veicular no controle em “Tempo Real” eram menores que as do controle em “Tempo Fixo”;
- Quanto maior a capacidade responsiva a flutuações do tráfego do controle em tempo real, maior o **volume** veicular médio atendido nas aproximações da interseção e maior a variância deste volume. Sendo assim, foram realizados testes unilaterais para esta variável, com nível de significância de 5%, tendo como hipótese alternativa a afirmação de que a média e a variância populacionais do volume veicular no controle em “Tempo Real” eram maiores que as do controle em “Tempo Fixo”.

### **7. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

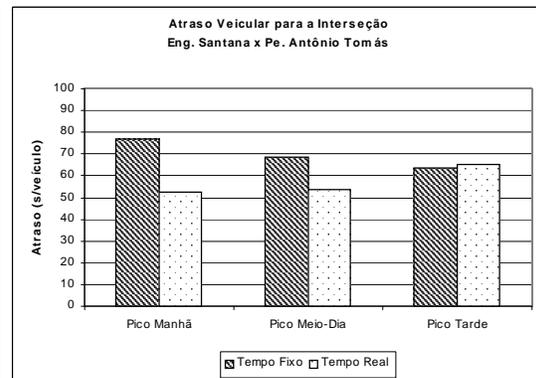
Os níveis de atraso total (de controle), médio por veículo, medidos em campo para as aproximações das interseções classificadas como de grau de saturação “médio”, variaram no intervalo entre 10 e 55 segundos; resultando em níveis de serviço globais em cada interseção, de acordo com a classificação do HCM 2000, entre “B” e “D”. Já para as interseções com “altos” graus de saturação, os atrasos variaram entre 25 e 145 segundos, com níveis de serviço entre “C” e “F”. Os gráficos da Figura 1 apresentam os atrasos globais de cada interseção.

Para analisar os resultados dos testes de hipóteses relativos ao efeito do controle em tempo real *versus* tempo fixo, sobre as variáveis “atraso” e “volume atendido”, as observações representando valores medidos em uma determinada aproximação, para um dado período de pico, foram divididas em dois grupos, de acordo com o nível de serviço observado sob o controle em tempo fixo: o primeiro grupo incluindo aproximações com NS “E” ou “F”; o segundo com NS variando de “A” a “D”. Constatou-se que, para o primeiro grupo, a hipótese nula de médias populacionais do **atraso** no tempo real iguais ou maiores às do tempo fixo foi rejeitada em 11 das 16 aproximações analisadas. Já no segundo grupo,  $H_0$  foi rejeitada em apenas 5 das 46 aproximações. No que se refere às variâncias populacionais do atraso, a hipótese nula de variâncias no tempo real iguais ou maiores às do tempo fixo foi rejeitada em somente 3 das 16 aproximações do primeiro grupo; no segundo grupo, foram 2 em 46.

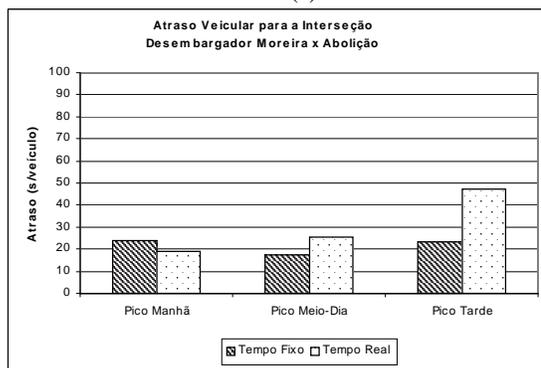
Portanto, estes resultados apontam para uma maior eficácia do tempo real na redução dos **atrasos** médios em aproximações operando próximas ao limiar da capacidade; conclusão esta compatível com os resultados das simulações realizadas por Stewart *et al.* (1998) para um cruzamento-teste modelado no *software* INTEGRATION. Quanto ao efeito sobre a variância do atraso, os resultados deste estudo de caso levam a concluir que o controle em tempo real não altera a magnitude desta variância, qualquer que seja o grau de saturação da aproximação.



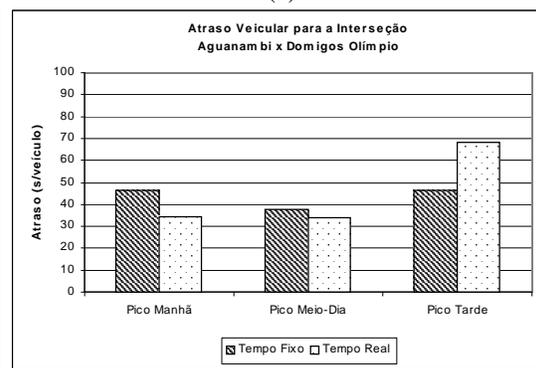
(a)



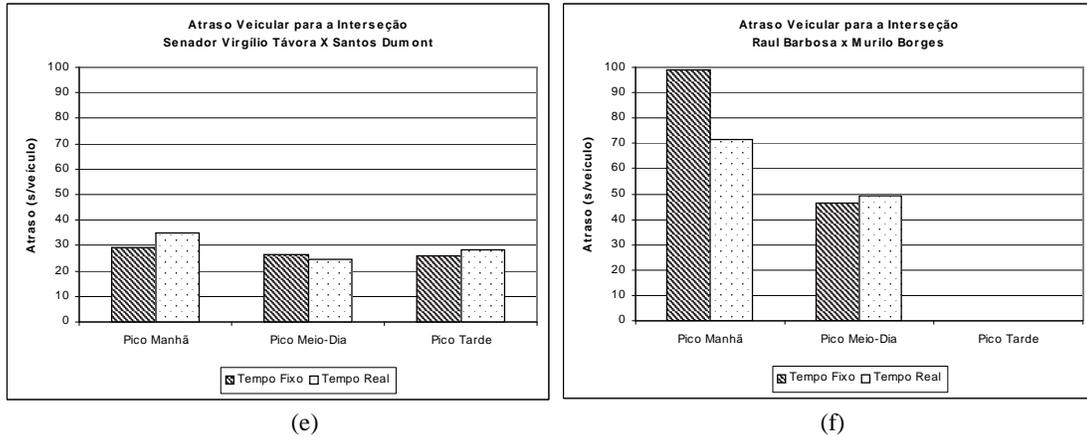
(b)



(c)



(d)



**Figura 1:** Atrasos globais nas interseções sob controles em tempo fixo e real.

No que se refere à análise da variável “volume atendido”, as diferenças constatadas no comportamento observado nas aproximações mais saturadas (NS = “E”/“F”), com relação às demais, foram menos incisivas que às referentes ao atraso. Para o primeiro grupo, a hipótese nula de médias populacionais do **volume** atendido no tempo real iguais ou menores às do tempo fixo foi rejeitada em 5 das 16 aproximações analisadas. Já no segundo grupo,  $H_0$  foi rejeitada em 6 das 46 aproximações. No que se refere às variâncias populacionais do volume, a hipótese nula de variâncias no tempo real iguais ou menores às do tempo fixo foi rejeitada em somente 1 das 16 aproximações do primeiro grupo; no segundo grupo, foram 4 em 46. Conclui-se, portanto, que o controle em tempo real foi mais eficaz em reduzir atrasos do que aumentar volumes atendidos, especialmente para aproximações mais saturadas.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo de caso com algumas interseções controladas pelo CTAFOR possibilitou uma análise preliminar do desempenho do controle semafórico adaptativo, baseado no sistema SCOOT, *versus* a utilização de planos de tempo fixo otimizados para períodos específicos de pico do tráfego. De forma geral, os resultados encontrados neste estudo prático vieram confirmar conclusões baseadas em simulações computacionais (Stewart *et al.*, 1998) que sugeriram uma crescente superioridade do controle em tempo real sobre planos fixos à medida em que as demandas de pico atingem o seu ápice. Estudos adicionais já estão em andamento para também comparar o desempenho das duas estratégias de controle centralizado em períodos fora do pico, assim como em corredores arteriais, permitindo uma avaliação abrangente e sistêmica dos benefícios operacionais do sistema CTAFOR.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTEFL (1998) *Estudos e Projetos para a Implantação do Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza – CTAFOR – Relatório Final*. Associação Técnico-Científica Eng. Paulo de Frontin, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- Abdel-Rahim, A. e W.C. Taylor (2000) Potential Travel Time and Delay Benefits of Using Adaptive Signals. *Pre-prints of 79<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting (CD-ROM)*, Washington, D.C., EUA.
- Caliper (1996) *TransCAD - Transportation Workstation Software, User's Guide, Version 3.0 for Windows*, Caliper Corporation, Newton, EUA.

- Martin, P.T., Hockaday, S. L. M. (1995) SCOOT – An Update. *ITE Journal*, pp. 44-48, Jan 1995.
- Medeiros, F.C.; M.S Luna e C.F.G. Loureiro (2001) Controle de 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.
- Oliveira, M.G.S. (1997) *Produção e Análise de Planos Semafóricos de Tempo Fixo usando Sistemas de Informações Geográficas*. Tese de Mestrado, PET/COPPE/UFRJ.
- Peek-Coasin (2000) *SCOOT - Guia Operacional*. Proposta técnica para a concorrência No. 04/2000. Comissão Permanente de Licitação da Administração Direta. Prefeitura Municipal de Fortaleza.
- Perrin, J. e P.T. Martin (2002) Simulating SCOOT. *Traffic Technology International*, Feb/Mar, pp.81-83.
- Robertson, D.I. (1986) Research on TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, pp. 36-40, Jan 1986.
- SCOOT (2002) SCOOT Urban Traffic Control Website. <http://www.scoot-utc.com>.
- Stewart, J.A.; K. Lepik e M. Van Aerde (1999) Benefit Sensitivity of Adaptive Traffic Control Strategies at Isolated Traffic Signals. *Transportation Research Record 1692*, pp. 173-182, Washington, D.C., EUA.
- Teply, S. (1989) Accuracy of Delay Surveys at Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, n. 1225, pp.24-32.
- TAU (1995) The “SCOOT” Urban Traffic Control System. *Traffic Advisory Leaflet 4/95*, Traffic Advisory Unit, The Department of Transport, Londres, Inglaterra.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Special Report 209. Transportation Research Board. National Research Council. Washington, D.C., EUA.
- TRL (2000a) *SCOOT 0414 – Executive Summary – Description of SCOOT*. *SCOOT Traffic Handbook*. Transportation Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire, Inglaterra.
- TRL (2000b) *SCOOT 0454 - Validation Data Parameters*. *SCOOT Traffic Handbook*. Transportation Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire, Inglaterra.
- Vincent, R.A.; A.I. Mitchell e D.I. Robertson (1980) *User’s Guide to TRANSYT Version 8*, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 888, Crowthorne, Inglaterra.

**\*Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, PhD.**

Eng. Civil, PhD University of Tennessee, EUA  
Professor Adjunto da UFC / Pós-Graduação  
PETRAN - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes

**\*Marcos José Timbó Lima Gomes, MSc.**

Eng. Civil, Mestre em Engenharia de Transportes, UFC  
Engenheiro de Tráfego do DERT/CE

**\*Carlos Henrique Pires Leandro, MSc.**

Eng. Civil, Mestre em Engenharia de Transportes, IME/RJ  
Diretor de Trânsito da AMC, Fortaleza/CE