

AVALIAÇÃO DA PROGRESSÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL NOS PERÍODOS DE MÉDIA E ALTA DEMANDA DE TRÁFEGO: ESTUDO DE CASO

Antonia Fabiana Marques Almeida¹, Hamifrancy Brito Meneses²

1) Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania de Fortaleza, 2) Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará

1) fabiana.marques@amc.fortaleza.ce.gov.br; 2) brito@det.ufc.br

Este trabalho trata de um estudo de caso que avalia duas modalidades distintas de controle semafórico na cidade de Fortaleza. O objetivo é analisar a eficácia obtida pela implantação de progressão semafórica em tempo real em um corredor arterial nos períodos de média e alta demanda de tráfego.

AVALIAÇÃO DA PROGRESSÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL NOS PERÍODOS DE MÉDIA E ALTA DEMANDA DE TRÁFEGO: ESTUDO DE CASO

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento das cidades brasileiras e a falta de adequação do sistema viário às grandes modificações ocorridas no uso/ ocupação do espaço urbano, juntamente com o aumento da frota de veículos particulares, tem gerado congestionamentos cada vez mais extensos, acarretando maiores tempos de viagens, consumo de combustível, emissão de poluentes, acidentes e demais impactos negativos do trânsito.

Devido às dificuldades em se racionalizar a demanda do tráfego urbano, somadas à escassez de recursos para o incremento da oferta viária, tem-se obrigado os órgãos gestores do tráfego a um constante monitoramento do trânsito da cidade, priorizando a utilização de técnicas de gerenciamento da oferta, voltadas principalmente para o controle e operação de interseções semaforizadas (LEANDRO, *et al.*, 1999).

Seguindo essa tendência, em março de 2000, a Prefeitura Municipal de Fortaleza decidiu implantar o CTAFOR (Controle de Trafego em Área de Fortaleza) na área mais adensada de Fortaleza, com o objetivo de controlar e otimizar a operação da rede semafórica da cidade a partir de um sistema centralizado.

O controle semafórico do CTAFOR é do tipo adaptativo, em tempo real, baseado no software britânico SCOOT. O nome SCOOT é um acrônimo para *Split, Cycle and Offset Optimization Technique* e resume bem sua função: trata-se de um algoritmo para otimização em tempo real de repartições de verde, ciclo e defasagens (LOUREIRO *et al.* 2002). Seu objetivo básico consiste em obter os valores ótimos das temporizações semafóricas e que qualquer mudança nestes tempos seja implementada de modo a causar o mínimo de distúrbio nos movimentos de tráfego (PEREIRA NETO, 2003).

Assim, apesar do SCOOT oferecer baixos níveis de atraso e número de paradas para toda a rede, segundo PAIVA NETO *et al.* (2003), não pode garantir uma boa progressão nos corredores arteriais da cidade de Fortaleza, em períodos de baixa demanda de tráfego (à noite e fins de semana), pois os otimizadores do software buscam minimizar as paradas e atrasos em um grupo de semáforos. Devido a isto foi necessária a implantação de progressão de tempo fixo por banda de passagem nesses horários, que se apresentou mais eficaz do que a progressão em tempo real proporcionada pelo SCOOT.

Sabendo que a cidade de Fortaleza possui uma malha viária reticulada com uma grande quantidade de semáforos, faz-se necessário um estudo para avaliar nos demais horários, a melhor forma de operação semafórica de um corredor.

Tomando-se como estudo de caso um trecho de uma via existente em uma zona adensada da cidade de Fortaleza, operada pelo CTAFOR, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da implantação de progressão semafórica em tempo real nos períodos de média e alta demanda veicular em um corredor arterial sentido duplo. Espera-se, com esta comunicação técnica, fornecer subsídios aos gestores na definição da melhor estratégia de controle em tempo real de modo a minimizar a sensação de desconforto por parte dos usuários.

2. PROGRESSÃO SEMAFÓRICA

A progressão semafórica é um tipo de controle coordenado com a finalidade de reduzir o número de paradas e atrasos ao longo de uma via com interseções semaforizadas. Para tal, basta determinar alguns parâmetros, como ciclo, tempo de verde de cada aproximação e, principalmente defasagem (diferença, em segundos entre os instantes de acionamento da indicação verde do semáforo de dois cruzamentos consecutivos). Obviamente, para

se ter uma boa coordenação entre semáforos de uma via é estritamente necessário que estes estejam operando com o mesmo tempo de ciclo semafórico ou em ciclos múltiplos (LEANDRO, 2001).

Uma progressão semafórica é comumente chamada de ‘onda verde’, onde há a maximização da banda de passagem. Esta maximização se caracteriza pelo ajuste dos instantes de abertura de cada semáforo, de forma a proporcionar a passagem de um pelotão por toda a via, mantendo-se certa velocidade de progressão adequada. (DUTRA e DEMARCHI, 2004). Porém, de acordo com DENATRAN (1984), sob baixas condições de tráfego, o sistema progressivo provavelmente acarretará maiores atrasos do que os produzidos por sistemas não coordenados, porque ele determinará uma regra de prioridade para a via principal, em detrimento da via secundária.

Um dos métodos mais conhecidos para coordenar semáforos é a elaboração manual de um diagrama espaço-tempo, em que as defasagens são definidas graficamente através de tentativa e erro. A vantagem deste método é a possibilidade de visualizar graficamente o esquema de coordenação, mas para vias de duplo sentido de tráfego e redes maiores, a aplicação desse método é complexa e tediosa (DUTRA e DEMARCHI, 2004).

No caso específico da cidade de Fortaleza, devido à geometria reticulada do sistema viário, somente a existência de uma boa progressão semafórica pode não ser a melhor solução, uma vez que existem vários cruzamentos entre vias de grandes fluxos veiculares. Neste caso, investe-se na coordenação por área, ou seja, em uma rede viária fechada particionada ao longo do corredor afetado.

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, sendo o TRANSYT a ferramenta computacional mais amplamente utilizada. Esse *software* é composto de um modelo de simulação de tráfego e de um algoritmo que minimiza uma medida de desempenho. Esta medida de desempenho é em função do número de paradas e o atraso sofrido pelos veículos em todas as aproximações da rede semaforizada.

DUTRA e DEMARCHI (2004) ainda destacam que existem vários outros métodos que foram propostos para fazer uso das vantagens da priorização de vias arteriais utilizando os valores gerados pela técnica da maximização da banda como dado de entrada em programas de minimização dos atrasos, tais como: PASSER II e MAXBAND.

3. ESTUDO DE CASO

Como é interessante que se encontre a melhor forma de controlar corredores sob o controle semafórico nos períodos de média (entrepico) e alta (pico) demanda veicular na cidade de Fortaleza, foi concebido um estudo de caso que permitisse uma análise comparativa com a situação de controle em tempo real sem progressão e a situação de controle em tempo real com progressão semafórica. Para tanto, foi selecionado um corredor representativo com um considerável número de semáforos e que fosse interceptado por outras vias importantes da cidade.

O corredor arterial objeto de estudo consiste da Avenida Barão de Studart contemplando 16 interseções semaforizadas, com extensão de 3,13 km, e representa uma das ligações mais utilizadas nos deslocamentos Norte-Sul e Sul-Norte na área mais adensada do município. O trecho do corredor (com 1,38 km de extensão) que foi estudado corresponde a 08 cruzamentos semaforizados desde o cruzamento com a Avenida Heráclito Graça até o cruzamento com a Rua Deputado Moreira da Rocha.

O mesmo apresenta duas faixas de rolamento por sentido de tráfego, divididas por um canteiro central. Além disto, ao longo do corredor predomina a existência de guias rebaixadas devido principalmente à grande concentração de pontos comerciais no solo lindeiro. Este uso indiscriminado do solo gera uma grande demanda por estacionamentos ao longo de todo o corredor, criando um atrito entre o tráfego local e o tráfego de passagem.

Para a realização do estudo, foram utilizados dois cenários:

- Cenário A, chamado operação em tempo real sem progressão semafórica. Neste, as interseções foram operadas pelo sistema SCOOT, em tempo real, sem a preocupação de fazer ajustes nos parâmetros que controlam a defasagem entre as interseções semaforizadas, portanto, sem priorização das aproximações do corredor em estudo.
- Cenário B, chamado de operação em tempo real com progressão semafórica. Aqui elaborou-se um diagrama Espaço x Tempo, utilizando-se repartições de tempos semafóricos médios do corredor, obtidos a partir de dados modelados pelo sistema SCOOT para os períodos de média e alta demanda veicular. Em seguida ajustaram-se parâmetros operacionais do sistema SCOOT que controlam as defasagens de modo a “fixar” os instantes de entrada de verde da progressão. Neste cenário, mesmo com a priorização das aproximações, há uma “quebra” da progressão em alguns trechos do corredor, devido às mudanças de sub-áreas de controle agregado de semáforos no corredor. Como consequência, os usuários sofrem paradas e atrasos no deslocamento ao longo desta via.

Uma vez que o estudo buscou avaliar a eficácia da progressão em tempo real, entendeu-se que as medidas de desempenho mais adequadas para análise seriam o atraso veicular, representando a demora total causada ao veículo devido ao tempo perdido nos semáforos, o tempo de percurso e o número de paradas veiculares ao longo do corredor, que representam a fluidez, ou qualidade de progressão. Além disto, o tempo de percurso e o número de paradas estão intimamente ligados, pois, um é consequência do outro.

4. METODOLOGIA

Etapa 1: Coleta de indicadores de desempenho em campo (Tempo de Percurso)

A realização deste tipo de pesquisa em campo deve-se a necessidade de determinar o impacto sofrido pelo tráfego de passagem devido ao tipo de controle semafórico no corredor. As pesquisas de campo permitem uma complementação dos indicadores de desempenho operacional dos cenários de controle em tempo real avaliados, os quais são elaborados com base nos dados modelados pelo sistema SCOOT. Assim, a pesquisa de campo avalia o desempenho por meio do tempo de viagem, indicador mais perceptível pelo usuário, o que proporciona uma avaliação sob a ótica deste.

Etapa 2: Coleta de indicadores de desempenho do tráfego modelados pelo sistema SCOOT (atraso e parada veicular)

A coleta de dados modelados pelo sistema é importante para medir o efeito causado ao tráfego geral de acordo com o tipo de controle semafórico do corredor. Os dados coletados (atraso veicular e volume) junto ao SCOOT permitem uma análise mais técnica sobre o desempenho operacional das modalidades de controle semafórico em tempo real avaliados.

Etapa 3: Análise estatística

O objetivo desta análise consiste em testar hipóteses comparativas de eficácia das diferentes modalidades de operação semafórica implementadas, tendo como base os indicadores de desempenho aferidos em campo e aqueles modelados pelo sistema SCOOT. Além disto, previamente, é efetuada uma análise estatística descritiva da equidade dos fluxos de tráfego no corredor viário em estudo, considerando ambos os cenários de controle semafórico implementados.

Esta metodologia está dividida em três sub-etapas:

- a) Análise da equidade dos fluxos de tráfego no corredor viário em ambos os cenários avaliados.
- b) Análise descritiva dos indicadores de desempenho dos modos de controle semafórico implementados no corredor viário.
- c) Análise inferencial do desempenho operacional dos modos de controle semafórico implementados no corredor, com base nos indicadores de desempenho modelados pelo SCOOT e coletados em campo.

As análises de inferência objetivaram comparar o desempenho dos dois cenários, tendo como base os indicadores de tempo de percurso, atraso veicular e número de paradas. Para tanto foram realizados testes de comparação entre as médias das medidas de desempenho, para ambos os sentidos de tráfego do corredor estudado, considerando os horários onde foram coletados os dados.

Na Tabela 4.1 estão detalhadas as hipóteses nulas e alternativas dos testes de significância realizados na análise inferencial. O que se buscou com estes testes foi avaliar, para cada indicador de desempenho, se houve melhoria significativa no seu valor com a mudança do modo de operação semafórica. As diferenças nas medidas de desempenho entre os dois cenários foram consideradas significativas para um nível de 5% de significância.

Indicadores	H ₀ (Hipótese Nula)	H ₁ (Hipótese Alternativa)
Tempo de Percurso e Retardamento	$\mu_{cenA} \leq \mu_{cenB}$	$\mu_{cenA} > \mu_{cenB}$
Atraso Veicular	$\mu_{cenA} \leq \mu_{cenB}$	$\mu_{cenA} > \mu_{cenB}$
Número de Paradas Veiculares	$\mu_{cenA} \leq \mu_{cenB}$	$\mu_{cenA} > \mu_{cenB}$

Tabela 4.1: Hipóteses para os testes de significância.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Antes de começar a análise das variáveis de desempenho, é necessário a verificação da variação dos volumes de tráfego no corredor e nas vias transversais, para verificar se houve diferenças significativas entre os dois cenários analisados. Os gráficos a seguir mostram que não houve alterações significativas dos fluxos veiculares modelados pelo sistema SCOOT no entropico da manhã (08:30 – 10:30 hs) e no pico da tarde (17:00 – 19:00 hs), nas aproximações do corredor. Atribui-se à aleatoriedade do tráfego, as diferenças existentes nos volumes.

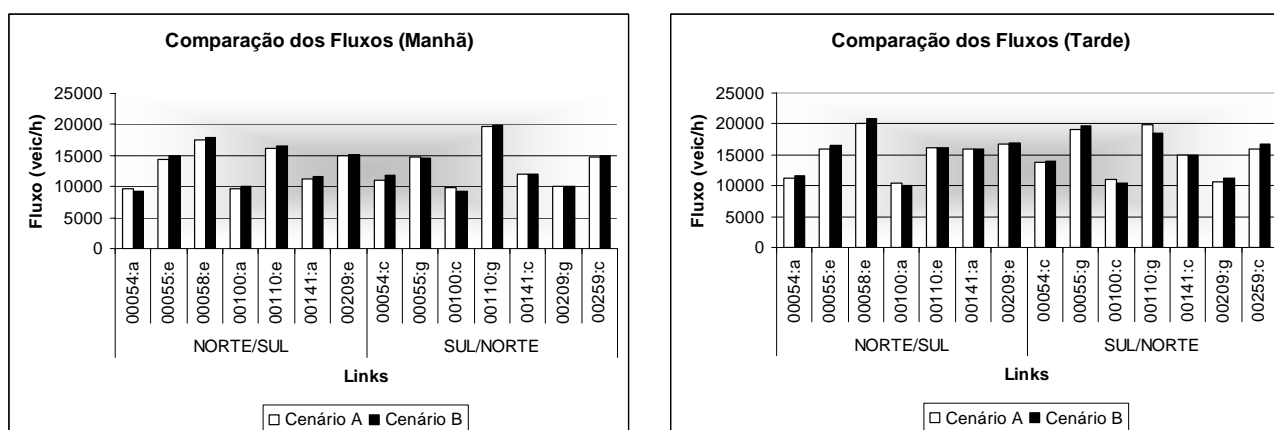


Figura 5.1: Gráficos que mostram a variação do fluxo veicular nos dois cenários sob análise.

5.1 Análise descritiva dos indicadores de desempenho

Inicialmente, efetuou-se uma análise exploratória das variáveis em cada um dos cenários analisados. Em suma, os resultados obtidos foram os seguintes:

- Tempo de percurso: A análise descritiva dos dados de tempo de percurso mostrou que as velocidades médias de tráfego se mantiveram similares nos dois cenários, enquanto que os tempos perdidos em semáforos foram um pouco menores no Cenário B. Este resultado indica que a progressão semafórica em tempo real implicou numa melhoria de redução de atraso, embora não passe a ser perceptível pelo usuário na medida em que a velocidade média no corredor não sofreu alterações significativas.
- Atraso veicular: Verificou-se uma variação visível das médias e desvios padrão referentes ao atraso veicular para mais, sofridos no Cenário B com relação ao Cenário A, no pico da tarde, em ambos os sentidos do corredor. Contudo, tanto a média como o desvio padrão do atraso veicular aferido no pico da tarde para ambos os sentidos, apresentam-se significativamente maiores no Cenário B que os demais valores obtidos no Cenário A. Estes resultados indicam um possível erro na modelagem dos mesmos, por parte do SCOOT nos horários e dias em que estes dados foram coletados. Esta hipótese é considerada em parte pelo fato dos demais indicadores de desempenho demonstrarem um melhor desempenho da progressão em tempo real (Cenário B), relativamente ao cenário sem progressão em tempo real (Cenário A).
- Número de paradas veiculares: Esta variável representa o volume veicular que sofreu paradas ao longo do corredor. Foi observada uma similaridade entre o número de paradas médio para ambos os cenários, em ambos os sentidos do corredor e horários de estudo.

5.2 Análise inferencial

Os resultados obtidos evidenciam uma pequena melhora com relação à redução de atraso veicular em períodos de entropico e uma baixa eficiência da operação com progressão em tempo real nos períodos de pico do tráfego. Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que o corredor é cortado por outros corredores arteriais também importantes, os quais apresentam maiores fluxos veiculares cruzando ou alimentando o corredor de estudo. Isto acarreta na formação de pequenos pelotões ao longo do corredor oriundo de vias transversais, assim como num menor tempo de verde alocado para os veículos que trafegam na via. A consequência disso é que em períodos de entropico, os quais apresentam média demanda veicular, é possível ocorrer pequenas reduções de atraso devido a operação com progressão em tempo real. Mas nos períodos de pico, devido à formação de filas oriundas do tráfego de vias transversais e a redução da banda de passagem no corredor, ocorre um acréscimo nos atrasos dos veículos com a operação com progressão semafórica em tempo real.

Variáveis	Entropico Manhã		Pico Tarde	
	N/S	S/N	N/S	S/N
Atraso Veicular	Aceita H0 p = 0,449	Rejeita H0, $\mu_A > \mu_B$ p = 0,001	Aceita H0 p = 0,999	Aceita H0 p = 0,998
Número de Paradas	Aceita H0 p = 0,991	Aceita H0 p = 0,498	Aceita H0 p = 0,446	Aceita H0 p = 0,487
Tempo de Percurso	Aceita H0 p = 0,889	Aceita H0 p = 0,248	Aceita H0 p = 0,320	Aceita H0 p = 0,476

Tabela 5.1: Resultados dos testes de significância.



No caso do indicador número de paradas, os resultados dos testes de hipóteses indicaram que a hipótese nula não pôde ser rejeitada em todos os casos. Assim, o número médio de paradas ao longo do corredor aumentou com a progressão em tempo real (Cenário B) em ambos os sentidos do corredor de tráfego e horários pesquisados. Cabe destacar a não rejeição da hipótese nula no sentido N/S no entropico manhã, onde o valor p obtido foi elevado, acarretando em uma quantidade de paradas significativamente maiores com a progressão em tempo real. Contudo, estas paradas têm menor duração, resultando num atraso total semelhante em ambos os cenários, conforme destacam os resultados do teste de hipótese para o indicador atraso veicular, no sentido N/S e para o período do entropico manhã.

Para o tempo de percurso total do trecho em estudo, observou-se que não houve mudanças significativas de melhoria, tampouco de piora, trazidas pela implantação da progressão semafórica em tempo real no corredor. Em nenhum sentido de quaisquer horários a hipótese nula foi rejeitada o que denota o fato de a progressão não causar alterações nos tempos de viagem ao longo do trecho estudado. Estes resultados corroboram o que já foi observado na análise descritiva desta variável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho permitiu uma avaliação do desempenho operacional de controle semafórico em tempo real num corredor arterial de sentido duplo da cidade de Fortaleza. Considerando as possibilidades de operação semafórica em corredores arteriais, com e sem progressão semafórica, que podem ser implementadas em sistemas centralizados, como o caso do CTAFOR, o estudo propôs dois cenários (cenário A sem progressão semafórica e cenário B com progressão semafórica ambos sob controle do tempo real) de controle os quais se podem submeter corredores de tráfego. Estes cenários foram avaliados usando medidas de desempenho coletadas em campo (tempo de percurso 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.

Para a presente avaliação foram utilizados dois cenários para comparação: controle em tempo real sem progressão semafórica (Cenário A) e controle em tempo real com progressão semafórica (Cenário B).

Na análise da equidade dos fluxos ao longo do corredor, nota-se que não houve variações significativas dos valores dos fluxos do corredor, bem como das vias transversais. Isto significa que os testes estatísticos realizados com os dados das demais variáveis são consistentes, ou seja, os resultados não foram afetados por não ter havido variações dos fluxos.

Para as variáveis “atraso veicular” e “número de paradas”, os resultados esperados com a implantação da progressão semafórica em tempo real cometiam numa maior redução do atraso e do número de paradas, comparativamente ao controle em tempo real sem progressão previamente programada. No caso do número de paradas, em somente um sentido de tráfego durante o período do entropico manhã constatou-se esse aumento. No mesmo horário no sentido inverso, bem como no pico tarde, os valores permaneceram iguais, não ocasionando, portanto, numa diferença significativa.

Já no caso da variável “atraso veicular”, houve um sentido do entropico manhã que apresentou o resultado esperado (H_0 rejeitada com $\mu_A > \mu_B$), contudo, para o mesmo período de entropico manhã no sentido contrário, a hipótese nula não pôde ser rejeitada, o que significa dizer que não houve mudanças significativas nos valores das médias de atraso do cenário com progressão semafórica em tempo real.

No caso do volume de veículos que sofreram paradas, houve somente uma rejeição da hipótese nula, porém com aumentos do número de veículos que sofreram paradas. Apesar deste aumento, o tempo de espera foi mais curto,

pois, com a existência da progressão semafórica em tempo real é tolerável que os veículos parem mais, porém, que estas paradas sejam mais curtas.

Vale salientar que a via não é um corredor onde os pelotões de veículos são contínuos ao longo de toda a avenida. Os pelotões que existem são dispersos tendo em vista que esta avenida é interceptada por outros corredores arteriais com grande fluxo de tráfego. Desta forma, há uma alimentação do corredor em estudo por suas vias transversais carregadas. Neste caso, a progressão semafórica não se apresenta eficaz operacionalmente, caso se leve em consideração as variáveis estudadas, nos períodos de pico.

Nos períodos de entropico, os benefícios são mais bem visualizados devido ao menor fluxo veicular, onde a existência da progressão é mais bem aplicada. Já para os períodos de pico, no caso do corredor estudado, não há proveito em utilizar a progressão em tempo real para este tipo de controle devido ao alto número de corredores arteriais que interceptam esta via.

A implantação da progressão semafórica em tempo real é eficaz somente no período de entropico (média demanda de tráfego) e não traz melhorias operacionais significativas nos períodos de pico (alta demanda de tráfego).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DENATRAN (1984) Manual de Semáforos. Coleção Serviços de Engenharia, Departamento Nacional de Tráfego, Brasília.

DUTRA, C. B e S. H. DEMARCHI (2004) Métodos de Coordenação Semafórica: Estado da Arte Versus Estado da Prática em Cidades Brasileiras. Anais XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, ANPET, Florianópolis, SC, Comunicações Técnicas.

LEANDRO, C. H. P. (2001) Metodologia Multicriterial para Caracterização Física de Sistemas de Controle de Tráfego urbano. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

LEANDRO, C. H. P.; F. F. DA COSTA e C. F. G. LOUREIRO (1999) Atraso Veicular em Interseções Semaforizadas Segundo as Estimativas do HCM e do Transyt. Anais XIII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, ANPET, São Carlos, SP, v1.

LOUREIRO, C. F. G.; M. J. T. L. GOMES; C. H. P. LEANDRO (2002) Avaliação do Desempenho nos Períodos de Pico de Tráfego de Interseções Semaforizadas com Controle Centralizado em Tempo Fixo e Real. Anais XVI Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, ANPET, Natal, RN, v1.

PAIVA NETO, P. M; M. M. CASTRO NETO e C. F. G. LOUREIRO (2003) Progressão em Tempo Real Versus Tempo Fixo por Banda de Passagem em Períodos de Baixa Demanda – Estudo de Caso. Anais XVII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, RJ, Comunicações Técnicas.

PEREIRA NETO, W. A.; F. M. OLIVEIRA NETO; C. F. GRANGEIRO LOUREIRO (2003) Avaliação do Desempenho Operacional em Períodos de Pico do Controle Semafórico em Tempo Real nos Corredores Arteriais de Fortaleza. Anais XVII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, RJ, v1.