

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ESPECIALIZADA DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SEMAFÓRICO CENTRALIZADO

Paulo Marinho de Paiva Neto

Hamifrancy Brito Meneses

Sistema Centralizado de Controle de Tráfego de Fortaleza – CTAFOR
Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e de Cidadania de Fortaleza – AMC

Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN
Universidade Federal do Ceará – UFC

RESUMO

A intensificação do congestionamento dos centros urbanos de países em desenvolvimento e a escassez de recursos públicos têm levado à adoção de novas tecnologias de controle do tráfego urbano, capazes de ampliar a capacidade viária por meio da otimização do controle semafórico. Contudo, a alocação adequada de recursos para o financiamento destas tecnologias é fundamental para a eficácia da gestão do tráfego. Assim, este trabalho propõe uma metodologia para avaliar o desempenho operacional de diferentes estratégias de controle semafórico centralizado, em caráter global e espacial. Este desempenho é calculado por modo de transporte, num dado período do dia, com base nos atrasos causados pelas estratégias avaliadas, assim como no tempo e no número de viagens entre pares de Zonas de Análise de Tráfego da área analisada. Esta metodologia permite uma análise espacial agregada e desagregada do impacto destas tecnologias de controle semafórico para diferentes grupos de usuário, em zonas distintas, considerando toda a extensão de suas viagens.

ABSTRACT

The intensification of the urban traffic jam in developing countries and the shortage of public resources have been taking the adoption of new urban traffic control technologies, capable to increase the network capacity through the signal control optimization. However, the traffic management consumes a lot of resources, so the appropriate allocation of its is necessary. Hence, this paper proposes a methodology to evaluate the performance of different signal control strategies in centralized urban traffic control, in global and space way. This performance is calculated by transport mode, in some period of the day, using the delay caused by the evaluated strategies, as well as the time and the number of trips among pairs of Traffic Analysis Zones, in the analyzed area. This methodology allows aggregate and disaggregated space analysis about the impact of these new signal control technologies for different users, in distinct zones, considering the whole extension of their trips.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os centros urbanos de países em desenvolvimento sofrem diversos tipos de problemas relacionados ao tráfego urbano, que geram aumento de atraso e de tempo de viagem para os usuários. Visando minimizar as externalidades do congestionamento urbano, os gestores públicos têm buscado alternativas mais eficientes e eficazes para a gestão do tráfego, ao invés do simples aumento da oferta viária. Assim, algumas cidades brasileiras têm implantado sistemas centralizados de controle de tráfego em área, sistema CTA, de modo a melhorar a performance de redes urbanas do tráfego (Loureiro *et al.*, 2002a).

A implantação e manutenção de sistemas CTA acarreta custos consideráveis com equipamento e mão-de-obra especializada, mas também viabiliza benefícios operacionais para os usuários do tráfego urbano. Desta forma, a alocação eficaz de recursos para a adoção ou expansão desta tecnologia requer estudos de viabilidade técnica e econômica. Frente a esta necessidade, alguns estudos têm buscado avaliar benefícios técnicos da operação de interseções semaforizadas por sistemas CTA em redes de semáforos (Hansen *et al.*, 2000) e

em corredores de tráfego (Abdel-Rahim e Taylor, 2000). Já na ótica econômica, outras pesquisas têm avaliado a relação benefício/custo da operação de sistemas CTA em interseções isoladas (Meneses, 2000) e em redes semaforicas (BHTRANS, 1996).

Contudo, tanto no aspecto técnico como no econômico, há uma carência de metodologias de avaliação de desempenho de sistemas CTA que considerem os benefícios proporcionados para todos os usuários do sistema viário urbano, e não apenas os benefícios na área de abrangência do CTA. Diante deste contexto, este trabalho propõe uma metodologia de avaliação técnica global do desempenho operacional de diferentes estratégias de controle semaforico centralizado, relativamente ao benefício de redução de tempo de viagem em todos os pares origem/destino da área analisada. A metodologia apresentada neste trabalho permite gerar índices agregados e desagregados de redução de tempo de viagem O/D para todas as Zonas de Análise de Tráfego (ZAT) da cidade em estudo. Com isto, espera-se disponibilizar instrumentos de apoio à tomada de decisão dos gestores públicos, relativamente à alocação adequada de recursos para gestão do tráfego urbano.

2. CONTROLE CENTRALIZADO DO TRÁFEGO URBANO

Conforme Sousa *et al.* (2000), o controle centralizado do tráfego urbano pode adotar três estratégias: operação em tempo fixo, seleção dinâmica de planos e operação em tempo real. A primeira estratégia, operação em tempo fixo, consiste na utilização de planos de controle semaforico determinados previamente por meio de dados históricos do tráfego. A escolha do plano a ser usado é feita por programação horária (um plano para cada período do dia). Os planos de tempo fixo necessitam de constante levantamento de dados em campo para atender às variações na demanda de tráfego (Oliveira, 1997). Estes planos são calculados antecipadamente por programas específicos de dimensionamento de planos semaforicos, como o *software* TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*). Este programa determina planos ótimos variando defasagens e tempos de verde de um plano inicial, buscando minimizar uma medida de custo que reflete as paradas e o atraso de veículos numa rede semaforica (TRL, 1999). A segunda estratégia consiste na seleção de planos semaforicos pré-definidos, com base em dados coletados por detectores veiculares em campo. Da mesma forma, os planos também são calculados previamente por programas específicos de dimensionamento de planos semaforicos.

Na terceira estratégia, operação em tempo real, a programação semaforica é determinada dinamicamente por sistemas dedicados, com base em dados do tráfego coletados por laços detectores em campo (Oliveira, 1997). Esta estratégia apresenta a característica de operar, de forma isolada ou coordenada, grupos de interseções semaforizadas, denominados de sub-áreas, buscando determinar dinamicamente seu tempo de ciclo, repartições de verdes e defasagens ótimas. Dentre os sistemas destinados à otimização semaforica, Wood (1993) apresenta os seguintes: SCATS (Austrália), SCOOT (Inglaterra), UTOPIA (Itália), UTMS (Japão), PRODYN (França) e OPAC (EUA).

Dentre estes sistemas, cabe destacar o sistema SCOOT (*Split Cycle Time and Offset Optimization Technique*), tendo em vista que este é usado no sistema CTA de Fortaleza (CTAFOR), Ceará, objeto de aplicação da metodologia apresentada neste trabalho. O modelo funcional do sistema SCOOT busca minimizar atrasos e paradas de uma programação semaforica, simulando os efeitos de alterações desta programação sobre o tráfego.

No caso do CTAFOR, o SCOOT pode trabalhar em três níveis de controle: isolado em tempo fixo, centralizado em tempo fixo e centralizado em tempo real. No primeiro, os controladores em campo executam planos semafóricos de tempo fixo (previamente estabelecidos) usando programação horária. Este tipo de controle é implementado quando há falha de comunicação com a central ou necessidade de manutenção. No segundo e terceiro níveis, o controle semafórico é feito a partir de uma central de controle, diferindo apenas na estratégia de controle semafórico adotada (Loureiro *et al.*, 2002a). A estratégia de tempo fixo implementa planos de tempo fixo pré-definidos, segundo uma tabela horária, sendo usada em períodos de baixa demanda para promover progressões em corredores (“onda verde”). Já a estratégia de tempo real otimiza, em tempo real, o funcionamento de interseções semaforizadas.

3. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO TRÁFEGO URBANO

Diversas metodologias têm sido propostas para avaliar a viabilidade técnica e econômica de sistemas CTA, usando pesquisas de campo e simulações. No que se refere aos benefícios técnicos, os métodos propostos buscam avaliar o desempenho destes sistemas no controle de interseções, corredores e redes de tráfego. Já no aspecto econômico, as técnicas desenvolvidas avaliam a relação benefício/custo de interseções isoladas e em redes semaforizadas.

No aspecto técnico, é possível destacar os estudos de Stewart *et al.* (1998), Hansen *et al.* (2000), Abdel-Rahim e Taylor (2000) e Loureiro *et al.* (2002b). No primeiro deles, os autores usaram o micro simulador de tráfego INTEGRATION para comparar a eficiência de três estratégias de controle semafórico: tempo fixo não centralizado, tempo fixo centralizado e tempo real centralizado. As simulações foram efetuadas sobre uma interseção semafórica isolada hipotética, submetida a vários níveis de demanda de tráfego. Os resultados indicaram uma leve superioridade da segunda estratégia em períodos de alta demanda de tráfego. Já em períodos de baixa demanda, não houve diferença significativa entre os cenários avaliados.

No segundo estudo, Hansen *et al.* (2000) usaram o simulador de tráfego CORSIM para avaliar a eficiência de duas estratégias de controle semafórico centralizada: tempo fixo coordenado e tempo real, em uma área da cidade de Honolulu, EUA. As simulações destas estratégias foram executadas para as mesmas condições de tráfego na rede viária em estudo, e a eficiência destes cenários foi aferida com base nos valores de atraso e número de paradas de veículos obtidos. Os resultados demonstraram que o controle adaptativo em tempo real apresenta melhores índices de eficiência em comparação ao controle por tempo fixo coordenado.

Já no terceiro trabalho, Abdel-Rahim e Taylor (2000) usaram simulação de tráfego para avaliar três estratégias de controle semafórico centralizados: tempo fixo por tabela horária, tempo fixo por seleção dinâmica e tempo real. Esta análise foi implementada por meio do microssimulador CORSIM, em um corredor de tráfego de Okaland Country, Michigan, EUA. Os resultados desta simulação mostraram que os três cenários avaliados não apresentaram diferenças significativas de atraso e de tempo de viagem nas aproximações, interseções e no corredor de tráfego, em condições de alta e moderada demanda de tráfego.

No quarto estudo, Loureiro *et al.* (2002b) compararam as estratégias de controle semafórico centralizado em tempo fixo e em tempo real de um conjunto de interseções semaforizadas da

cidade de Fortaleza. O parâmetro usado na avaliação foi o atraso veicular por aproximação, medido com base no método proposto pelo *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000). Os valores de atraso obtidos demonstraram que o controle centralizado em tempo real apresenta melhor desempenho que aquele de tempo fixo à medida que a demanda de tráfego aumenta. Quanto à viabilidade econômica de sistemas CTA, as metodologias propostas buscam avaliar a relação benefício/custo de sistemas de controle centralizado do tráfego, abrangendo uma ou mais interseções semaforizadas. Por exemplo, Meneses (2000) realizou uma análise de benefício/custo para uma interseção semaforizada isolada do sistema CTA de Fortaleza, em três horários de pico de demanda de um dia típico. O custo de implantação e manutenção da referida interseção foi rateado a partir dos custos totais deste sistema, considerando uma vida útil de 10 anos. Os benefícios foram obtidos pela monetarização da redução de tempo de viagem dos usuários do transporte individual e coletivo, com a utilização do controle centralizado em tempo real. Os resultados obtidos demonstraram, em caráter preliminar, que o benefício era 3,6 vezes superior ao custo associado à interseção avaliada.

Outro exemplo importante é a análise econômica de implantação de um sistema CTA em uma área da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, realizada pela Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTRANS, 1996). Este estudo apresentou um levantamento de benefícios e custos associados à implantação do referido sistema CTA considerando as estratégias de controle semaforizado centralizado em tempo fixo e em tempo real. Os benefícios foram mensurados pela monetarização da redução de atraso veicular proporcionado por cada uma das estratégias avaliadas, ao longo de um período de 10 anos, tendo sido realizada por grupo de interseções e tipo de usuário. Para tanto, foram utilizadas taxas médias de redução de atraso, obtidas da literatura, quando da utilização das duas estratégias. Os custos foram determinados pelo somatório de custos diretos e indiretos relativos à implantação de equipamentos e a manutenção de sistemas durante 10 anos. Os resultados demonstraram uma razão benefício/custo igual a 6,1 e 12,2 para o tempo fixo e o tempo real, respectivamente.

4. PROPOSTA DE METODOLOGIA ESPECIALIZADA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICA DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SEMAFÓRICO CENTRALIZADO

Não obstante a diversidade de metodologias de avaliação de estratégias de controle de tráfego, é possível identificar uma carência de técnicas aptas a avaliar os benefícios globais destas estratégias, abrangendo diferentes grupos de usuários e toda a extensão de suas viagens. Frente a esta necessidade, este trabalho apresenta uma metodologia especializada de avaliação técnica global dos benefícios gerados por diferentes estratégias de controle semaforizado, implementadas por sistemas CTA, considerando o modo de transporte dos usuários e todo o percurso das viagens. Para tanto, esta técnica requer uma base de dados geográfica elaborada numa plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Em linhas gerais, a metodologia proposta compara o desempenho operacional entre estratégias de controle semaforizado por meio da determinação da diferença percentual entre os atrasos veiculares médios causados pelos cenários avaliados, relativamente ao tempo de viagem entre pares origem/destino, para um dado modo de transporte, num determinado período do dia. A metodologia em questão é composta de sete etapas, descritas a seguir:

- a) Elaborar uma base de dados geográfica para representar as Zonas de Análise de Tráfego (ZAT) e a rede viária da área urbana a ser estudada. Esta última camada geográfica deve conter dados de tempo médio de viagem para cada logradouro (*link*);
- b) Implementar as estratégias de controle semafórico a serem avaliadas e medir os atrasos provocados por cada uma nas aproximações dos cruzamentos avaliados;
- c) Calcular a diferença de atraso veicular entre as estratégias avaliadas para todas as aproximações dos cruzamentos avaliados, referenciando espacialmente os resultados obtidos em ambiente SIG (camada geográfica de linhas);
- d) Em ambiente SIG, gerar matrizes de caminhos mínimos entre os centróides das ZAT, considerando como impedância a variável tempo médio de viagem (matriz de tempo de viagem mínimo – matriz TVM), e agregando a variável diferença de atraso veicular médio em outra matriz (matriz de diferença de atraso veicular médio – matriz DAV);
- e) Ponderar as matrizes TVM e DAV pelo total de viagens realizadas entre cada par O/D, com base a matriz O/D de viagens do modo de transporte e período em análise;
- f) Determinar a matriz de desempenho comparativo desagregado (matriz DCD), em termos percentuais, com base nas matrizes TVM e DAV, devidamente ponderadas;
- g) Determinar o desempenho comparativo agregado no nível de ZAT, em termos percentuais, tanto para viagens originadas como para aquelas destinadas a cada zona, tendo como base as matrizes ponderadas TVM e DAV.

Na segunda etapa, a medição do atraso pode ser feita por três procedimentos básicos: coleta em campo, estimativas por meio de *software* dedicado ou consulta à base de dados de tráfego modelada por sistemas CTA. O primeiro método é o mais oneroso, exigindo dispêndio considerável de recursos (equipamentos e mão-de-obra). O segundo método consiste em estimar o atraso veicular com base em dados de demanda tráfego e capacidade viária, usando modelos específicos, como o proposto pelo *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000). Este método envolve menor coleta de dados que o primeiro. Contudo, ele está limitado ao modelo empregado, podendo gerar resultados não consistentes. O terceiro método consiste na consulta à base de dados de tráfego modelada por sistemas CTA, por meio de interfaces apropriadas. Normalmente o modelo de controle de tráfego usado por estes sistemas efetua a modelagem e armazenagem de múltiplas variáveis de tráfego em diferentes escopos espacial e temporal. Contudo, esta alternativa só é factível quando as estratégias de controle semafórico avaliadas são implementadas por meio da tecnologia CTA de controle de tráfego.

Na terceira etapa, a diferença de atraso é determinada pela subtração entre os atrasos causados pelas estratégias de controle semafórico em análise. Esta diferença deve ser determinada para cada *link* da rede viária em análise, e seus resultados devem ser referenciados espacialmente à camada geográfica que representa os *link* da rede viária em estudo, em ambiente SIG.

Na quarta etapa, são determinadas as matrizes de caminho mínimo básicas para aferir o desempenho das estratégias de controle semafórico avaliadas. O caminho mínimo consiste num conjunto de *links* que proporcionam a menor impedância (ex. tempo, distância) para a realização de uma viagem entre um dado par O/D. Nesta metodologia, o caminho mínimo é determinado em ambiente SIG por meio de rotinas específicas de roteamento, tendo como elemento de impedância o tempo de viagem dos *links*. A execução da rotina de caminho mínimo gera a matriz TVM, relacionada às ZAT da área urbana em estudo. Além disto,

paralelamente à geração desta matriz, é possível gerar uma matriz alternativa com a agregação de outro atributo dos *links* que compõem um dado caminho mínimo. Nesta metodologia, é necessário gerar a matriz alternativa que agrega a diferença de atraso calculada para cada *link* que compõe o caminho mínimo de cada par O/D, resultando na matriz DAV.

Na quinta etapa, é feita uma ponderação do tempo de viagem mínimo e do valor agregado da diferença de atraso para cada par O/D, com base no total de viagens realizadas entre cada O/D. Assim, as matrizes TVM e DAV são ponderadas, separadamente, por uma matriz O/D com o total de viagens num dado modo de transporte, em período específico do dia. Esta ponderação compreende no produto de células correspondentes entre as matrizes envolvidas. Por exemplo, a célula a_{12} da matriz TVM é multiplicada pela célula c_{12} da matriz de viagens O/D, gerando o tempo total de viagem dos usuários de um dado modo de transporte ao se deslocarem da origem “i” para o destino “j”. Embora esta etapa considere invariável o tempo de viagem e a diferença de atraso, a ponderação das matrizes TVM e DAV permite uma análise mais equilibrada do desempenho das estratégias de controle semafórico avaliadas, na medida que totaliza os tempos de viagem e as diferenças de atraso entre cada par O/D.

Na sexta etapa é determinado o índice desagregado que compara o desempenho das estratégias de controle semafórico avaliadas. Este índice é determinado para cada par O/D da área urbana em estudo, com base na divisão percentual entre células correspondentes das matrizes ponderadas DAV e TVM, nesta ordem. Assim, a determinação deste índice resulta numa matriz de Desempenho Comparativo Desagregado (Matriz DCD), cujos valores variam de -100 a + 100%. O valor de desempenho de uma célula da matriz DCD representa a redução percentual média do tempo de viagem para os deslocamentos entre um par O/D. Assim, um valor negativo indica que a primeira estratégia é menos eficiente que a segunda, provocando um aumento do tempo de viagem. Enquanto que um valor positivo representa uma redução do tempo de viagem, indicando que a segunda estratégia é a mais eficaz. A identificação destas estratégias depende da forma como a diferença de atraso foi calculada.

Na sétima etapa é determinado um índice agregado que compara o desempenho das estratégias de controle semafórico avaliadas. Com base nas matrizes ponderadas TVM e DAV, este índice é calculado no nível de zona, tanto para as viagens que se originam como para aquelas que se destinam a uma dada ZAT. Assim, o desempenho comparativo agregado é determinado para cada ZAT e para cada tipo de viagem (originada ou destinada), tendo como base a álgebra matricial apresentada na Figura 1.

5.1. Elaboração da base de dados geográfica

A plataforma SIG usada na elaboração da base de dados geográfica desta aplicação prática foi o *software* TransCAD, versão 3.16. A partir deste sistema foram elaboradas duas bases geográficas: ZAT e rede viária principal de Fortaleza. A primeira divide a cidade de Fortaleza em 132 zonas com centróides definidos. A segunda compõe as principais vias da cidade, considerando apenas trechos de vias locais com interseções semaforizadas controladas pelo CTAFOR, vias expressas, arteriais e coletoras. Do total de aproximações desta rede viária, 40,1% (446 *links*) dos logradouros são controlados pelo CTAFOR.

Cabe destacar que a camada geográfica da rede viária deve ter atributos relativos ao tempo de viagem e ao atraso veicular. O tempo de viagem foi determinado para toda a rede, com base no comprimento dos logradouros e na velocidade média de tráfego, obtidos junto à documentação do projeto CTAFOR, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da Universidade Federal do Ceará (UFC) (ASTEF, 1998). Já o atraso veicular foi determinado para cada uma das estratégias de controle semaforico avaliadas, mediante a implementação destas estratégias pelo sistema CTAFOR. Assim, só foram determinados valores de atraso em 446 aproximações controladas pelo CTAFOR, nos dois cenários.

Além destas duas camadas geográficas, a aplicação piloto necessita de uma matriz O/D com as viagens realizadas entre cada par de zonas. Neste estudo, foi usada uma matriz O/D de viagens realizadas em Fortaleza pelo modo de transporte individual durante o período de pico da manhã (7:00 às 8:00 h) de um dia típico, em 1999. Esta matriz foi obtida junto à documentação do estudo de implantação do metrô de Fortaleza, projeto METROFOR. Embora não seja referente ao ano de 2003, esta é a matriz disponível pelos órgãos do setor de transporte mais atualizada. A seguir, a Figura 2 apresenta parte da referida matriz O/D.

Matrix14 - (Matriz OD - Transp. Individual - Dia Típico - 1999 - Fortaleza)					
	19	20	21	22	23
24	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
25	5.00	4.00	6.00	6.00	0.00
26	474.00	0.00	1.00	1.00	0.00

Figura 2: Matriz de viagens O/D realizadas pelo modo de transporte individual durante o período de pico da manhã de um dia típico na cidade de Fortaleza, em 1999.

5.2. Implementação das estratégias de controle semaforico e cálculo das diferenças de atraso

Foram avaliadas as seguintes estratégias de controle semaforico centralizado: tempo fixo coordenado (cenário 1) e de tempo real (cenário 2). No caso do cenário 1, foram determinados planos semaforicos de tempo fixo coordenado para todos os cruzamentos controlados pelo CTAFOR, por meio do *software* TRANSYT, com base em dados de demanda de tráfego. A estratégia de tempo fixo coordenado foi aplicada durante o horário de 7:00 às 8:00 h da manhã do dia 21 de novembro de 2002, uma quinta-feira. No caso do cenário 2, foram aplicados os modelos de otimização de ciclo, defasagem e de tempo de verde do sistema SCOOT de controle adaptativo do tráfego urbano. A estratégia de tempo real foi aplicada para toda a área controlada pelo CTAFOR, durante o horário de 7:00 às 8:00 h da manhã do dia 07 de novembro de 2002, uma quinta-feira.

Após a implementação destas estratégias de controle semafórico pelo sistema SCOOT, os atrasos causados por cada cenário avaliado foram obtidos por meio de uma interface lógica, denominada TRANSCOOT. Esta interface foi desenvolvida em ambiente SIG para permitir a importação eficiente, a modelagem flexível e o referenciamento espacial de dados dinâmicos de tráfego modelados pelo sistema SCOOT do CTAFOR (Meneses, 2003).

Com base nos valores de atraso georeferenciados a camada geográfica da rede viária principal de Fortaleza, é determinada a diferença de atraso entre a estratégia de tempo fixo coordenado e a estratégia de tempo real para cada logradouro sob controle do CTAFOR, nesta ordem.

5.3. Geração e ponderação de matrizes de caminho mínimos

Nesta etapa é usada a rotina *Multiple Shortest Paths* do software TransCAD para gerar a matriz TVM, tendo como atributo de impedância o tempo de viagem dos logradouros da rede viária principal de Fortaleza. Paralelamente à geração desta matriz, esta rotina também permite agregar um outro atributo dos logradouros que compõem o caminho mínimo da cada par O/D (Caliper, 1996). Nesta aplicação foi agregado o atributo diferença de atraso, obtido com base nos atrasos causados pelas estratégias de controle semafórico avaliadas, resultando na matriz DAV. A seguir, a Figura 3 apresenta parte das matrizes TVM e DAV resultantes.

Matrix1 - - Matrix TVM entre ZAT de Fortaleza						Matrix1 - - Matrix DAV entre ZAT de Fortaleza					
	19	20	21	22	23		19	20	21	22	23
24	12.02	11.20	13.95	11.11	5.08	24	2.72	2.72	2.72	1.27	2.47
25	15.33	14.51	17.26	15.06	8.39	25	1.63	1.63	1.63	1.48	1.38
26	18.17	17.25	20.10	16.79	11.23	26	2.35	-0.03	2.35	-0.03	2.10

Figura 3: Matriz TVM (min) e DAV (min) entre pares O/D da cidade de Fortaleza.

Determinadas as matrizes básicas de caminhos mínimos TVM e DAV, procede-se então à ponderação destas matrizes pelo total de viagens realizadas entre cada par O/D, obtidas pela matriz O/D. A seguir, a Figura 4 apresenta parte das matrizes ponderadas TVM e DAV.

Matrix1 - - (Matriz TVM Ponderada)					Matrix2 - - (Matriz DAV Ponderada)				
	19	20	21	22		19	20	21	22
24	12.02	0.00	13.95	11.11	24	2.72	0.00	2.72	1.27
25	76.65	58.05	103.57	90.38	25	8.17	6.53	9.80	8.90
26	8613.20	0.00	20.10	16.79	26	1113.90	0.00	2.35	-0.03

Figura 4: Matrizes ponderadas TVM (min.) e DAV (min.) entre pares O/D de Fortaleza.

5.4. Determinação da matriz de desempenho comparativo desagregado – Matriz DCD

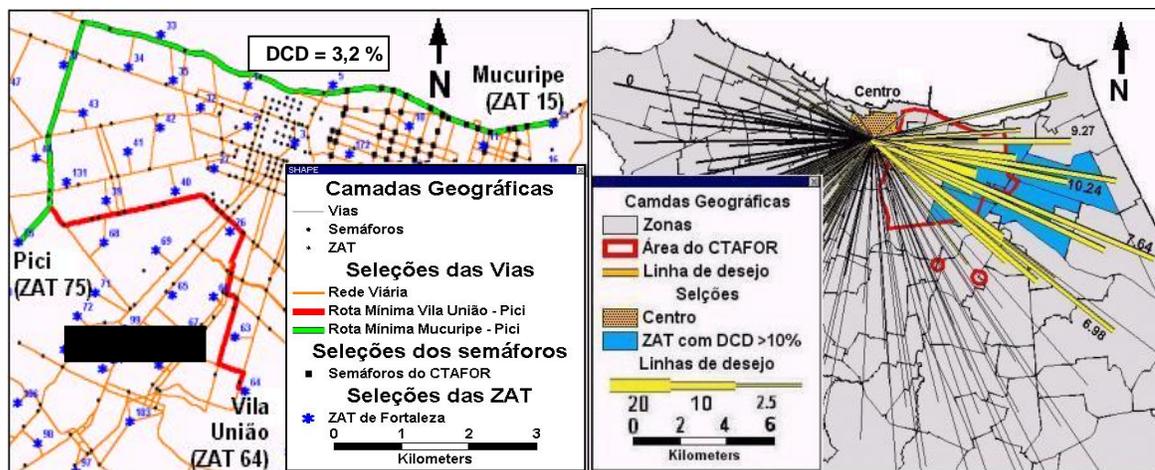
Determinadas as matrizes ponderadas TVM e DAV, procede-se ao cálculo da matriz DCD, conforme descrito na etapa “e”, seção 4. A Figura 5 dispõe parte da matriz DCD obtida.

Matrix7 - Matriz de Desempenho Comparativo Desagregado				
	19	20	21	22
24	22.61	0.00	19.47	11.40
25	10.65	11.25	9.46	9.85
26	12.93	0.00	11.69	-0.20

Figura 5: Matriz de Desempenho Comparativo Desagregado (%) entre os cenários 1 e 2 de controle semafórico centralizado implementado pelo sistema CTA de Fortaleza.

Cada célula da matriz DCD representa o desempenho comparativo entre os cenários 1 e 2 de controle semafórico implementados pelo CTAFOR, relativamente à capacidade de redução de tempo de viagem, em termos percentuais. Um valor negativo indica que a estratégia de tempo fixo coordenado é mais eficiente na redução média de tempo de viagem, do que a estratégia de tempo real. Já um valor positivo, indica a maior eficiência da estratégia de tempo real.

A melhor compreensão dos resultados da matriz DCD pode ser feita com base em duas análises espaciais de seus valores: caminhos mínimos e linhas de desejo, conforme a Figura 6.



(a) Caminhos Mínimos

(b) Linhas de desejo

Figura 6: Análises espaciais da Matriz DCD – Caminho mínimos e Linhas de desejo.

A Figura 6a apresenta dois exemplos de caminho mínimo entre pares O/D distintos, com seus respectivos valores DCD. No caso da rota “Mucuripe-Pici”, ao passarem por treze interseções semaforizadas controladas pelo CTAFOR, os usuários do transporte individual são beneficiados pela estratégia de controle em tempo real com um atraso veicular 3,2% menor que aquele causado pela estratégia de tempo fixo, relativamente ao tempo de viagem total entre o par O/D analisado. Já para a rota “Vila União-Pici”, as duas estratégias de controle semafórico implementadas pelo CTAFOR não apresentam qualquer influência sobre a realização da viagem neste par O/D, tendo em vista que o valor de DCD é igual a zero.

Por sua vez, a Figura 6b apresenta um mapa de linhas de desejo com os valores DCD de viagens que partem da zona central para as demais zonas de Fortaleza. As linhas de desejo são retas traçadas entre os centróides de duas ZAT cuja espessura é proporcional a um dado atributo. No caso da figura 6b, o atributo usado foi o referente aos valores da matriz DCD. A análise da Figura 6b demonstra que a maioria das viagens que passam pela área do CTAFOR, em direção ao lado leste da cidade, são beneficiadas com valores DCD que variam de 5 a 15 %. Já as viagens que partem do centro para as regiões oeste e sul da cidade não sofrem influência das estratégias de controle semafórico implementadas pelo CTAFOR. Isto corrobora a análise de “caminho mínimo” feita para a rota “Vila União-Pici”, a qual apresentou DCD nulo.

5.5. Determinação da matriz de desempenho comparativo desagregado – Matriz DCD

Além das análises desagregadas proporcionadas pela matriz DCD, é possível efetuar análises agregadas no nível de ZAT, relativamente às estratégias de controle semafórico

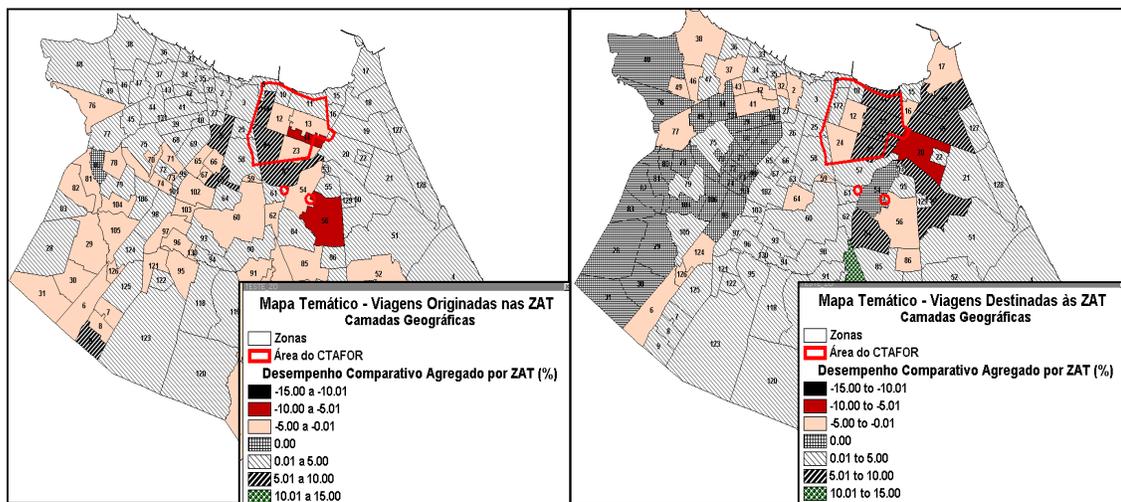
implementadas pelo CTAFOR. Para tanto, é necessário determinar o desempenho comparativo agregado (DCA) por ZAT, tanto para viagens originadas como para aquelas destinadas a cada zona. Os valores de DCA de cada ZAT são obtidos como base as matrizes ponderadas TVM e DAV, mediante a execução da álgebra matricial apresentada na Figura 1. A seguir, a Figura 7 apresenta parte da tabela de valores de desempenho comparativo agregado por ZAT e relativo às estratégias de controle semafórico centralizado executadas pelo CTAFOR. Nesta figura, o valor DCA das viagens originadas e destinadas a cada ZAT são armazenados nos atributos BDF_ORG e BNF_DST, respectivamente.

ID	Area	BNF_ORG	BNF_DST
122	0.87	0.45	0.80
123	13.43	0.55	0.15
124	1.66	2.99	-0.06

Figura 7: Desempenho Comparativo Agregado (%) entre os cenários 1 e 2 de controle semafórico centralizado implementado pelo sistema CTA de Fortaleza.

Exemplificando os valores de desempenho comparativo agregado apresentados na Figura 7, a zona 124 apresenta um valor negativo (-0,06%) e outro positivo (2,99%), respectivamente, para viagens originadas e destinadas à referida zona. Isto significa que viagens originadas na zona 124 sofrem um atraso devido a estratégia de tempo fixo coordenado 0,06% menor que aquele causado pela estratégia de tempo real, relativamente ao tempo total de viagem. No caso de viagens destinadas à zona 124, é evidenciado que a estratégia de tempo real apresenta um benefício maior, na medida que esta proporciona um atraso 2,99% menor que aquele causado pela estratégia de tempo fixo coordenado, relativamente ao tempo total de viagem.

Além desta análise relacional, é possível realizar uma análise espacial exploratória dos valores de desempenho comparativo agregado das estratégias de controle semafórico centralizado implementadas pelo sistema CTAFOR. Para tanto, foram elaborados mapas temáticos de cores dos atributos BNF_ORG e BNF_DST apresentados na Figura 7, conforme ilustra a Figura 8. O mapa temático atribui uma cor para cada ZAT de acordo com a correspondência entre o valor de seu atributo e as classes especificadas.



(a) Viagens originadas de ZAT

(b) Viagens destinadas às ZAT

Figura 8: Mapas Temáticos do Desempenho Comparativo Agregado (%) de estratégias de controle semafórico centralizado implementadas pelo CTAFOR.

A análise da Figura 8a indica que existe considerável dispersão espacial dos valores absolutos de DCA para viagens originadas das ZAT de Fortaleza. Contudo, a maioria das ZAT apresenta um desempenho comparativo agregado positivo, indicando que a estratégia de controle em tempo real implementada pelo CTAFOR foi mais eficiente na redução do atraso veicular do que a estratégia de tempo fixo coordenado.

No que se refere às viagens destinadas às ZAT, a análise da Figura 8b indica que há uma menor dispersão espacial dos valores absolutos de desempenho comparativo agregado das estratégias de controle semafórico centralizado executadas pelo CTAFOR. Além disto, a Figura 8b demonstra que a maioria das viagens destinadas às ZAT na região oeste de Fortaleza não sofre influência das estratégias de controle semafórico avaliadas. Isto decorre do fato de que a maioria das viagens destinadas a estas ZAT, durante o pico da manhã de um dia típico de 1999, não passam pela área controlada pelo CTAFOR. Por outro lado, as viagens destinadas às ZAT localizadas nas regiões central, norte, sul e leste de Fortaleza, no mesmo período, são mais beneficiadas pelo controle semafórico em tempo real, quando comparado ao controle em tempo fixo coordenado, salvo algumas exceções. Esta conclusão é relevante na medida em que a maioria das viagens realizadas no pico da manhã, em 1999, se destinavam à região nordeste da cidade, que vem se consolidando como importante centro econômico.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alocação eficaz de recursos públicos é fundamental para a realização de objetivos de gestão do tráfego urbano, definidos para viabilizar maior segurança e capacidade viária. Contudo, a avaliação do dispêndio de recursos públicos requer indicadores técnicos e econômicos capazes de expressar o desempenho funcional de sistemas de gestão do tráfego urbano, financiados por estes recursos. Diante deste contexto, este trabalho apresentou uma metodologia de avaliação de estratégias de controle semafórico centralizado implantadas por sistemas CTA. Diferentemente de outras técnicas parciais, a metodologia proposta neste trabalho incorpora a dimensão espacial e o caráter global no processo de avaliação do desempenho de diferentes estratégias de controle semafórico centralizado.

O caráter global desta metodologia permite uma análise abrangente do impacto da operação de sistemas CTA, na medida em que considera as viagens como um todo. Além disto, o atributo espacial viabiliza várias análises espaciais, cujos resultados podem ser visualizados de uma forma mais clara. Entretanto, cabe destacar que os resultados desta metodologia proposta dependem da perfeita calibração da Matriz O/D, visto que a comparação é feita com base nas viagens O/D entre ZAT de uma cidade. Além disto, a determinação dos caminhos mínimos é muito influenciada pela alocação dos conectores de centróides, os quais devem buscar representar ao máximo a realidade dos acessos às diferentes zonas da cidade.

Embora esta metodologia tenha sido desenvolvida para avaliar estratégias de controle semafórico centralizado, a mesma pode ser aplicada em cidades que usam outra tecnologia de controle. Contudo, faz-se necessário usar procedimentos alternativos para medir o atraso veicular causado por tal controle. Além disto, devido a seu caráter preliminar, esta metodologia é passível de adaptações para melhor refletir a realidade local. Não obstante estas restrições, o principal objetivo da metodologia é servir de apoio à tomada de decisão de

gestores públicos, relativamente à distribuição equitativa de recursos, garantindo maior mobilidade a diferentes grupos de usuários em diferentes áreas da cidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Rahim, A. e W.C. Taylor (2000) Potential Travel Time and Delay Benefits of Using Adaptive Signals. *Transportation Research Board, The 79 th Annual Meeting, Washington, D.C., USA.*
- ASTEFL (1998) *Sistema Centralizado de Controle de Tráfego de Fortaleza – CTAFOR – Relatório Final.* Associação Técnico-Científico Eng. Paulo de Frotin, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- BHTRANS (1996) Análise Técnico-Econômica do CTA-BH, Belo Horizonte.
- Caliper (1996) TransCAD - Transportation Workstation Software, User's Guide, Version 3.0 for Windows, Caliper Corporation, Newton, EUA.
- Hansen B.G., Martin P.T. e Perrin H.J. (2000) SCOOT Real-time adaptive control in a CORSIM Simulation Environment. *79th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., EUA.*
- Loureiro, C. F. G.; C. H. P. Leandro e M. V. T. de Oliveira (2002a) Sistema Centralizado de Controle do tráfego de Fortaleza: ITS Aplicado à Gestão Dinâmica do Trânsito Urbano. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, RN, Comunicações Técnicas, p. 19-26.
- Loureiro, C.F.G.; Gomes, M.J.T.L. e Leandro, C.H.P. (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 Ensino e Pesquisa em Transportes*, Natal, v. 1, p. 365-376.
- Meneses, H. B. (2000) *Avaliação dos Benefícios Operacionais do Controle Semafórico Centralizado em Tempo Real. Estudo de caso: Cruzamento da Av. Eng. Santana Júnior com a Av. Padre Antônio Tomás.* Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC).
- 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, Universidade Federal do Ceará.
- Oliveira, M. G. S. (1997) Produção e Análise de Planos Semafóricos de Tempo Fixo usando Sistemas de Informações Geográficas. Tese de Mestrado, PET/COPPE/UF RJ.
- Sousa, K. L. de O.; E. P. Monteiro; C. Rambaiolle; E. Factori; A Cremonese Jr. e S. Ejzenberg (2000) Sistema Inteligente de Controle do Tráfego de Santo André. *Revista de Transportes Públicos*, ANTP, Ano 22, 2º semestre, p. 91-100.
- Stewart, J.A.; K. Lepik e M. Van Aerde (1998) Benefit Sensitivity of Adaptive Traffic Control Strategies at Isolated Traffic Signals. *Transportation Research Record 1692*, pp. 173-182, Washington, D.C., EUA.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual.* Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.
- TRL (1999) TRANSYT 11 user guide. Transportation Research Laboratory.
- Wood, K. (1993) *Urban Traffic Control – Systems Review.* Project Report 41- UG26. Transportation Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, Inglaterra.