

UMA PROPOSTA DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

Cristiane Biazono Dutra

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Sergio Henrique Demarchi

Universidade Estadual de Maringá
Departamento de Engenharia Civil
Grupo de Engenharia de Transportes

RESUMO

As constantes filas, paradas e atrasos a que são submetidos os usuários do sistema viário nas interseções semaforizadas em cidades de médio e grande porte constituem prejuízos à sociedade na forma da perda de tempo e de combustível, aumento da poluição, gerando além disso frustrações e ansiedade. Uma parte deste atraso pode ser reduzida através da coordenação semafórica, reconhecidamente eficiente na promoção da fluidez ao longo de corredores ou redes viárias. No entanto, uma pesquisa realizada em algumas cidades brasileiras com frota superior a 30.000 veículos constatou uma grande lacuna entre a teoria sobre coordenação semafórica e a efetiva aplicação dos métodos existentes, especialmente nas cidades de médio porte. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é apresentar a etapa inicial de uma dissertação de mestrado em desenvolvimento, na qual são descritos aspectos básicos dos métodos de coordenação semafórica existentes, de forma a subsidiar a definição de um método que possa ser empregado de forma simplificada e prática na coordenação semafórica de vias arteriais. A eficiência e os benefícios do método escolhido serão avaliados através da comparação de medidas de desempenho obtidas a partir da simulação de vias arteriais coordenadas ou não.

1. INTRODUÇÃO

Os semáforos são implantados nas interseções entre ruas e avenidas do sistema viário de uma cidade como forma de controle de movimentos conflitantes e definição do direito de passagem para os fluxos concorrentes entre veículos e também pedestres, reduzindo a probabilidade de ocorrência de acidentes e garantindo a fluidez do tráfego nestes pontos críticos e vitais das redes de transporte.

Apesar de promover a segurança e disciplinar o movimento das correntes de tráfego, os semáforos podem gerar desconforto para milhares de motoristas e prejuízos à sociedade, com o aumento no número de paradas dos veículos, a formação de filas, o aumento no tempo de percurso e a redução da velocidade média nas vias, além do aumento no consumo de combustível e das emissões de poluentes. Webster e Cobbe (1966) estimaram que o atraso gerado pelos semáforos da Grã-Bretanha representava mais de um terço do tempo total das viagens. Nas grandes cidades do Brasil, o DENATRAN (1984) estimou que 50% dos tempos de viagem e 30% do consumo de combustível são gastos em paradas nos cruzamentos semaforizados.

Tais fatores podem ser ainda agravados no caso de redes compostas por diversas interseções semaforizadas relativamente próximas umas das outras. As estratégias de coordenação semafórica são, dessa maneira, importantes e reconhecidamente eficientes na promoção de fluidez do tráfego e na qualidade do sistema, reduzindo assim os atrasos e as paradas excessivas. Para isso, é necessário utilizar métodos ou ferramentas apropriadas para a definição das defasagens e tempos de ciclo adequados à operação do sistema.

Apesar de vários métodos e programas computacionais de coordenação semafórica terem sido desenvolvidos nos últimos 40 ou 50 anos, várias cidades brasileiras de médio e pequeno porte não utilizam essas ferramentas, seja porque não possuem os programas específicos para esse fim, seja pela falta de conhecimento mais aprofundado sobre a utilização dessas ferramentas, ou porque a maioria da literatura sobre o assunto está disponível somente em inglês.

Programas computacionais como o TRANSYT são encontrados em prefeituras de grandes cidades, porém com utilização bastante restrita por parte do corpo técnico municipal, que na maioria das vezes não recebe treinamento apropriado para reavaliar os esquemas de coordenação ou até mesmo não dispõe dos dados de campo atualizados para novas simulações. Em alguns casos, uma consultoria contratada provê um plano *off-line* inicial de coordenação para o cenário momentâneo da cidade, que dificilmente será novamente revisto e aplicado com segurança pelos técnicos do local, que desconhecem detalhes do programa utilizado, dificultando também uma avaliação da eficácia do plano estabelecido. Nas cidades de porte médio, o método mais utilizado é o diagrama espaço-tempo que, no entanto, é bastante trabalhoso para redes mais complexas.

Essa lacuna entre a literatura e a efetiva aplicação dos métodos na prática motivou a realização desta dissertação de mestrado, cujo objetivo é a avaliação dos métodos de coordenação semafórica existentes em relação a aspectos como facilidade de aplicação e eficiência dos resultados obtidos, no intuito de propor um modelo de coordenação semafórica que possa ser utilizado em cidades brasileiras de médio porte.

Este trabalho está dividido em 6 itens, contando com esta introdução. No item 2 são apresentadas informações sobre estratégias de coordenação semafórica adotadas em algumas cidades brasileiras de médio e grande porte, mostrando que boa parte delas não adota qualquer tipo de estratégia de coordenação, a não ser a utilização de diagramas espaço-tempo, em alguns casos. No item 3 são apresentados critérios para definição do melhor tipo de estratégia a ser adotado na operação de sistemas de semáforos. No item 4 são apresentados alguns detalhes sobre métodos de coordenação semafórica existentes na literatura, e que servirão de base para definição de um método aplicável à realidade de cidades de porte médio. No item 5, é descrita a metodologia a ser utilizada futuramente no desenvolvimento da pesquisa e, no item 6, são apresentadas as considerações finais.

2. COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA EM CIDADES BRASILEIRAS

Cerca de 85% da população brasileira, de aproximadamente 177 milhões de habitantes, encontra-se atualmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul do país, conforme ilustra o mapa da Figura 1. Somente as regiões Sul e Sudeste englobam quase 60% da população brasileira, e ainda contam com cinco das dez mais populosas cidades do Brasil. A frota registrada no país, que já ultrapassava 35 milhões de veículos em Junho de 2003, concentra 77% deste total nos sete estados das regiões Sul e Sudeste, de acordo com a Tabela 1.

Considerando esta concentração, uma pesquisa foi iniciada a respeito do método mais comuns de coordenação semafórica empregados em municípios dos sete estados das regiões Sul e Sudeste: Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Para escolher as cidades representativas, no contexto de locais que sofrem grande impacto do nível de motorização, a seleção não foi feita em função do tamanho da população, mas sim em função da frota de veículos registrados nos municípios, com dados do mês de Junho de 2003, obti-

dos do *site* oficial do DENATRAN.

Dessa maneira, foram selecionados municípios com frota maior do que 30.000 veículos, dentre os quais a capital do estado e cidades de médio porte. Em algumas destas cidades, foram levantadas informações junto a cada engenheiro de tráfego responsável pelo Setor de Trânsito do município, a respeito do tamanho da população, movimentação de veículos, quantidade e tipos dos equipamentos semafóricos, grau de controle e eventuais estratégias de gerenciamento do tráfego empregadas, tais como a coordenação semafórica.

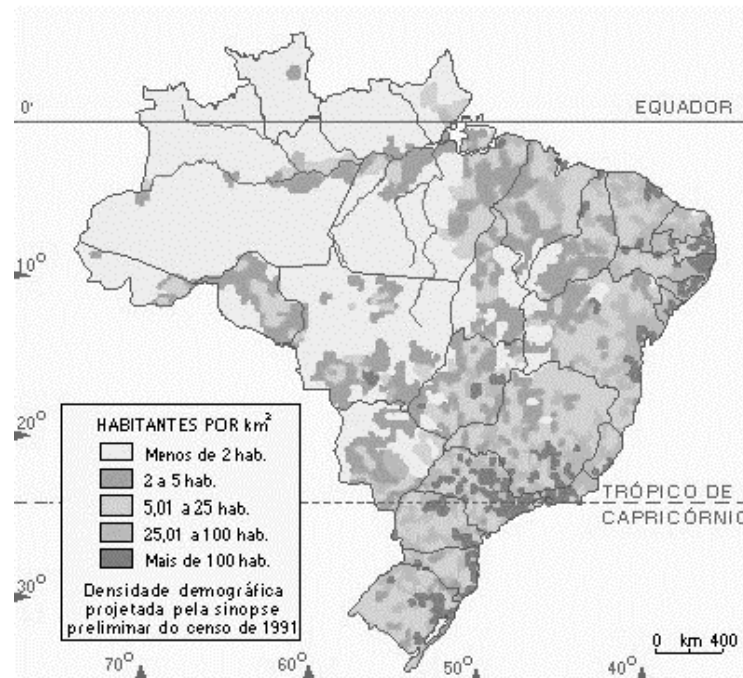


Figura 1: Densidade demográfica em diferentes regiões do Brasil (PlanetaGeo, 2003)

Tabela 1: Frota de veículos por Estado em junho de 2003 (DENATRAN, 2003)

ESTADO	FROTA	ESTADO	FROTA
Acre	55.704	Paraíba	311.484
Alagoas	209.992	Paraná	2.845.984
Amapá	40.673	Pernambuco	892.591
Amazonas	234.851	Piauí	223.862
Bahia	1.025.445	Rio de Janeiro	2.826.045
Brasília - DF	709.056	Rio Grande do Norte	325.628
Ceará	799.381	Rio Grande do Sul	2.968.629
Espírito Santo	615.351	Rondônia	223.047
Goiás	1.174.365	Roraima	51.101
Maranhão	267.546	Santa Catarina	1.800.271
Mato Grosso	503.612	São Paulo	12.322.621
Mato Grosso do Sul	497.821	Sergipe	205.110
Minas Gerais	3.752.433	Tocantins	138.350

Pará	370.286
TOTAL GERAL	35.391.239

Compilando as informações das prefeituras entrevistadas e que efetivamente disponibilizaram seus dados, pudemos constatar que de maneira geral as capitais dispõem de centrais de controle computadorizadas por área - CTA, onde praticamente todas utilizaram o programa TRANSYT pelo menos para a implantação inicial de seus sistemas e realizam sistematicamente ajustes através de novas simulações ou por observação das condições do tráfego. Praticamente 50 a 60% dos cruzamentos semaforizados destas cidades são controlados por uma ou mais centrais, e ainda alguns corredores semaforizados que estão fora das centrais recebem coordenação por progressão através da análise do diagrama espaço-tempo. Na Tabela 2 são apresentados alguns dos dados obtidos para três capitais brasileiras.

Tabela 2: Informações relativas ao sistema de controle semafórico de capitais brasileiras

Cidade	Estado	Frota de veículos	Cruzamentos semaforizados	Centrais de tráfego	Cruzamentos controlados pelas centrais	Método de coordenação utilizado
Curitiba	PR	786.167	885	3	534	TRANSYT
Porto Alegre	RS	508.140	955	1	570	TRANSYT
Rio de Janeiro	RJ	1.492.158	2.000	8	1.000	TRANSYT

Algumas cidades de médio porte que não as capitais trabalham por meio de central de controle, tais como Londrina e Maringá. No entanto, observa-se que a grande maioria dos municípios entrevistados não adota esquemas de coordenação nas principais vias semaforizadas, mesmo aquelas de sentido único, em que o sistema de “onda-verde” seria bastante simples para implementar e representaria uma significativa melhoria ao sistema. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos junto a quatro municípios de médio porte avaliados.

Tabela 3: Informações relativas ao sistema de controle semafórico em cidades de médio porte

Cidade	Estado	Frota de veículos	Cruzamentos semaforizados	Centrais de tráfego	Cruzamentos controlados pelas centrais	Método de coordenação utilizado
Arapongas	PR	32.449	16	0	0	-
Londrina	PR	180.964	192	1	5	Diagrama Espaço-Tempo
Maringá	PR	136.264	121	1	56	TRANSYT
São Carlos	SP	75.875	36	0	0	Progressão Simultânea

Embora a cidade de Arapongas conte com treze de seus dezesseis cruzamentos semaforizados funcionando com equipamentos eletrônicos, o poder público não provê nenhuma forma de coordenação, nem na avenida principal da cidade que reúne seis semáforos equidistantes em sentido único de circulação. Situação semelhante ocorre na principal avenida da cidade de São Carlos, onde a prefeitura adota somente a abertura simultânea de todos os semáforos. Já em Maringá, além da central

que controla quase metade dos cruzamentos, muitos dos semáforos fora da central recebem progressão com defasagens ajustadas por relógio e determinadas *off-line* através do diagrama espaço-tempo.

3. DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS

Uma das primeiras questões que o engenheiro de tráfego ou o responsável pela implantação e gerenciamento do controle de tráfego deve se defrontar refere-se ao tipo de estratégia operacional da rede semaforizada a ser utilizada. Existem pelo menos três formas distintas que podem ser adotadas para a operação de um sistema semaforizado, considerado semáforos isolados ou então operando de forma coordenada entre si:

- *Controle isolado do cruzamento*: restringe a operação somente na interseção em questão, sem prever interferências oriundas de interseções adjacentes, sendo recomendado para interseções afastadas fisicamente do conjunto em aproximadamente 500 metros ou que apresentem características de fluxo muito distintas das demais.
- *Controle arterial de cruzamentos (rede aberta)*: trata corredores semaforizados no intuito de garantir e privilegiar a progressão para o fluxo de passagem ao longo da via arterial, de forma a manter pelotões de veículos com continuidade de movimento entre as interseções adjacentes. As vias de sentido único são especialmente atrativas, pois facilitam a progressão semaforizada ao longo da via.
- *Controle de cruzamentos em área (rede fechada)*: utilizado para operar a região que concentra maior carregamento e até congestionamentos, o controle em rede busca realizar simultaneamente a coordenação de todos os cruzamentos semaforizados da área, quer seja para minimizar atrasos e paradas globais ou para maximizar a progressão.

Alguns esforços foram direcionados no sentido de indicar o tipo de operação mais adequada para cada condição de tráfego. O Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito apresenta um critério para auxiliar na decisão do técnico na adoção da estratégia entre semáforos adjacentes, realizando previamente a análise do Índice de Interdependência conforme a Equação (1) (DENATRAN, 1984):

$$I = \frac{0,5}{1+t} \left(\frac{x \cdot q_{máx}}{q_1 + q_2 + \dots + q_x} - 1 \right) \quad (1)$$

- em que
- I : Índice de interdependência;
 - t : tempo de percurso entre ambos os semáforos, em minutos (comprimento do trecho dividido pela velocidade média dos veículos);
 - x : número de faixas de tráfego que escoam os veículos procedentes do cruzamento anterior;
 - $q_{máx}$: fluxo direto procedente do trecho anterior;
 - $q_1 + q_2 + \dots + q_x$: fluxo total que chega na interseção.

Os intervalos descritos na Tabela 4 sugerem o tipo de operação mais adequada a ser adotada em cada trecho:

Tabela 4: Parâmetros para definição do índice de interdependência

Índice de Interdependência	Estratégia de operação
$0 < I \leq 0,35$	operação isolada
$0,35 < I \leq 0,43$	operação isolada ou coordenada
$0,43 < I \leq 1,00$	operação coordenada

SKABARDONIS *et al.* (1998) também propuseram um critério para seleção do tipo de controle mais apropriado, demonstrando através de vários estudos em campo que a estratégia escolhida pode melhorar o desempenho de uma interseção ou de todo o sistema. Os fatores a serem considerados na seleção são: características do tráfego da interseção (grau de saturação, proporção do fluxo direto conflitante, movimentos de conversão, número e seqüência das fases, atividade de pedestres); características físicas da interseção (geometria e *layout*, distância entre interseções, localização no sistema); e características do sistema (comprimento da arterial, configuração da rede, variação dos volumes da arterial, qualidade da progressão).

Inicialmente a análise é realizada separadamente para arteriais e redes, avaliando a relação entre volume e capacidade nas interseções, associada aos movimentos de conversão e ao número de fases, respectivamente. Desta forma, obtém-se uma indicação para o tipo de controle a ser adotada (fixo, atuado ou semi-atuado). Em seguida, o Índice de União deve ser calculado para cada um dos tramos da via arterial ou da rede, através da Equação (2):

$$I = \frac{V}{L} \quad (2)$$

em que V: volume bidirecional da hora pico (veíc/h);
L: comprimento do tramo (m).

Todo o valor de *I* que seja maior que 0,5 sugere a progressão semafórica, na forma recomendada na Tabela 5 apresentada abaixo:

Tabela 5: Parâmetros para definição do índice de união

Índice de União	Estratégia de Operação
$I \leq 0,5$ para todas as direções	operação isolada
$I > 0,5$ somente na via principal	operação coordenada na arterial
$I > 0,5$ na via principal e pelo menos em uma via secundária	operação coordenada nestas duas vias
$I > 0,5$ em todas as vias	operação coordenada na rede

Após a definição da estratégia de operação dos semáforos, é necessário definir a programação mais adequada da estratégia indicada. No caso da operação ser isolada, aplica-se o método de Webster e Cobbe (1966) para definição do ciclo ótimo e a duração mais adequada para as fases. No caso da operação coordenada, além da definição do ciclo e duração das fases, é necessário definir as defasagens entre semáforos de interseções próximas, ou seja, coordenar os semáforos de forma a garantir a fluidez da corrente de tráfego. Existem diversos métodos de coordenação descritos na

literatura, sendo que uma descrição breve de alguns é feita no próximo item.

4. ASPECTOS SOBRE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

A coordenação de semáforos em uma rede viária consiste, basicamente, em determinar as diferenças entre os instantes de início dos tempos de verde de cada um dos semáforos (defasagens) de tal forma a garantir que o maior número de veículos consiga circular pela rede sem a necessidade de parar nos semáforos fechados. Esta técnica possibilita promover a movimentação suave ao longo da rede, em velocidades eficientes, através da formação de pelotões com menor espaçamento entre os veículos.

O Manual de Semáforos do DENATRAN (1984) atribui ao ajuste adequado das defasagens entre semáforos, a redução de atrasos e paradas na ordem de 10 a 30%, e chegando entre 50% a 80% nos casos de semáforos próximos.

Os sistemas de coordenação semafórica existem na Inglaterra e nos Estados Unidos desde 1926, assim como os esquemas para o cálculo das bandas de progressão são conhecidos desde o início da década de 1930. Assim que os computadores ficaram mais acessíveis, as soluções computacionais aceleraram entre as décadas de 1960 e 1970, e os pesquisadores concentraram-se no desenvolvimento de técnicas que podem ser divididas em duas categorias, ou seja, a maximização da largura da banda e a minimização do atraso e paradas. Esses dois métodos, juntamente com métodos manuais, serão descritos a seguir.

4.1. Diagrama Espaço-Tempo

Nesse caso, utiliza-se a técnica manual para definir as defasagens semafóricas através de um procedimento gráfico de tentativa e erro, que foi desenvolvido entre 1930 e 1940. Este método bastante freqüente de coordenação permite que o engenheiro de tráfego visualize a qualidade dos resultados, que também é facilmente percebida pelos motoristas.

Webster e Cobbe (1966) apresentam no Road Research Technical Paper nº 56 uma descrição do método para elaboração manual do diagrama espaço-tempo, do qual são definidos o tempo de ciclo do sistema, os tempos de verde e as defasagens entre semáforos. No entanto, este método mostra-se bastante trabalhoso para a coordenação de várias interseções, especialmente em vias de duplo sentido ou redes mais complexas.

4.2. Métodos de Maximização da Banda Verde

Morgan e Little (1964) desenvolveram um algoritmo computacional denominado *half-integer synchronization* - um método de coordenação de semáforos na via arterial através de defasagens definidas para produzir bandas verdes nos dois sentidos de tráfego, dados o verde e o vermelho de cada semáforo, velocidades constantes de progressão por direção entre semáforos e distâncias.

Em 1965, o programa *SIGART* – *Signalized Arterial* produzia defasagens que maximizavam as larguras das bandas para a via arterial, podendo favorecer uma direção sobre a outra, dependendo da demanda direcional por hora do dia. Little (1966) formulou o algoritmo *mixed-integer linear programming*, adicionando restrições de conexão das vias ao programa para ruas individuais, para ser estendido às redes. A velocidade entre semáforos e o ciclo podiam variar dentro de certos limites.

Messer (1973) desenvolveu o modelo macroscópico *PASSER - Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine*, baseado nos algoritmos de Brooks e Little, mas que continha também rotinas para otimização dos tempos das fases, determinação da seqüência das fases e a defasagem em cada interseção que maximiza a banda nas duas direções da via arterial.

O método computacional *MITROP - Mixed-Integer Traffic Optimization* apresentado por Gartner *et al.* (1975) utiliza a programação *mixed-integer* para programação em rede, adicionando restrições para otimização simultânea e global das variáveis interdependentes.

O programa *MAXBAND - Maximal Bandwidth* foi criado por Little e Kelson (1981) para coordenar semáforos em arteriais e pequenas redes através da maximização da banda verde, utilizando como base o algoritmo *mixed-integer* para obtenção da solução ótima global.

4.3. Métodos de Minimização de Atrasos e Paradas

Os métodos computacionais de coordenação desenvolveram-se no sentido de considerar o desempenho do tráfego, como tentativa de selecionar defasagens que minimizassem a soma das medidas de atrasos e paradas para toda rede. O programa *SIGRID - Signal Grid Program* (Gartner *et al.*, 1975) foi desenvolvido pela Traffic Research Corporation / Toronto em 1964, para o cálculo das defasagens ótimas.

O otimizador de rede semaforica *SIGOP - Traffic Signal Optimization Program* (Lieberman e Woo, 1976) também foi desenvolvido pela Traffic Research Corporation em 1966, avaliando vários ciclos com suas divisões e defasagens, e considerando a separabilidade do pelotão para prover atraso mínimo aos veículos agrupados.

Também o programa *TRANSYT - Traffic Network Study Tool*, criado por Robertson (1980) em 1967 para coordenação semaforica em arteriais e redes, minimiza atraso e paradas através de um procedimento macroscópico de otimização determinística das fases e defasagens, avaliando o desempenho do sistema através da simulação dos perfis de fluxo cíclico do tráfego na rede, atribuindo pesos aos atrasos e paradas ocorridos nos tramos da rede, como uma medida de ineficiência do fluxo de tráfego (*PI - Performance Index*).

O programa *TRANSYT* é o mais conhecido e utilizado em vários países, servindo até como o padrão de comparação para outros programas de simulação de vias semaforizadas (Green e Robertson, 1974). Até mesmo o Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito reserva um capítulo somente para a apresentação do *TRANSYT*, como indicação do programa para coordenação e sincronismo de semáforos.

Desde sua criação em 1967, o *TRANSYT* já teve onze versões lançadas, cada uma delas introduzindo melhorias na simulação e coordenação de redes semaforicas. A *Federal Highway Administration (FHWA)* adaptou uma versão americana do *TRANSYT/7* no Projeto Nacional de Otimização da Programação Semaforica (*NSTOP*) do Centro de Pesquisa de Transporte da Universidade da Flórida (*TRC*), e já lançou dez versões atualizadas do programa.

4.4. Métodos Combinados

O método da maximização da largura da banda sempre foi bem aceito na aplicação em vias arteri-

ais, mas questionamentos eram feitos se a solução ideal para a arterial causava prejuízos às vias secundárias. Também não se adaptava bem em redes bidirecionais, onde a máxima largura da banda não significava necessariamente o mínimo atraso e paradas para o tráfego principal. Em contrapartida, a estratégia da minimização dos atrasos, paradas e filas adaptava-se bem na otimização em redes, produzindo melhor desempenho geral do sistema, mas não foi bem aceita para aplicações em arteriais, pois não provê um fluxo suave do tráfego ao longo das principais vias.

Duas categorias são possíveis para aliar as vantagens de cada técnica, combinando a minimização do atraso/parada e a maximização da largura da banda, de forma sequencial: modificar o programa baseado no atraso para considerar a largura da banda (progressão) ou ajustar a programação baseada na largura da banda para reduzir o atraso. Vários métodos computacionais combinados foram propostos para unir as vantagens de cada técnica:

- Wallace e Courage (1982) substituíram a minimização do Índice de Performance (PI) no TRANSYT pela maximização da oportunidade de progressão (PROS);
- Rogness e Messer (1983) propuseram um procedimento que utiliza o programa PASSER II para selecionar a seqüência e os valores iniciais a serem utilizados pelo TRANSYT-6;
- Cohen (1983) usou a solução da maximização da largura da banda do MAXBAND como programação inicial para a otimização do programa TRANSYT;
- Chang e Messer (1985) realizaram modificações no programa PASSER II e geraram a versão combinada PASSER II – 84 dos procedimentos de maximização da banda e minimização do atraso para sistemas de vias arteriais;
- Cohen e Liu (1986) propuseram a combinação das técnicas dos programas TRANSYT-7Fc e MAXBAND, possibilitando bandas desiguais nas duas direções;
- Chang *et al.* (1986) utilizaram o programa MAXBAND para desenvolver os parâmetros da programação com proporções direcionais variáveis e o programa de simulação NETSIM para avaliar os fatores que afetam o peso direcional.

O programa *BANDTOP - Bandwidth of Timing Optimization Program* foi desenvolvido por Tsay e Lin (1988) para encontrar a máxima largura da banda em ambas as direções, considerando também as oportunidades de progressão parcial nas seções menores da via arterial.

Gartner *et al.* (1990) estenderam o programa MAXBAND e criaram o método *MULTIBAND - Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme*, realizando a otimização através da programação *mixed-integer* e incorporando no procedimento de cálculo um critério sistemático de dependência do tráfego em cada *link*, para obter progressão proporcional ao volume enquanto reduz o atraso e paradas.

Nakatsuji e Kaku (1991) propuseram uma forma de controle para responder às variações das condições do tráfego, através do *Self-Organizing Traffic Control*, que tem habilidade de resolver de forma iterativa o problema de coordenação semafórica, aprendendo com os resultados da última iteração, sem a necessidade de que sejam parâmetros preliminares de coordenação do sistema. O modelo neural foi aplicado a problemas de controle de tráfego como prognóstico das variáveis e seleção de planos semafóricos. No ano seguinte, Lan *et al.* (1992) criaram o modelo *COMBAND*

usando simultaneamente os critérios de minimização do atraso e maximização da banda, a formulação básica do MAXBAND e conceitos originais do MITROP, para atingir uma solução global de otimização do ciclo, defasagens, divisões e sequência de fases, mantendo a qualidade da progressão.

Sripathi *et al.* (1995) desenvolveram procedimentos especiais específicos para sincronização semafórica, gerando os modelos *U-BAND* e *V-BAND - Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes*, simplificados para otimização das larguras das bandas uniforme e variável. Stamatiadis e Gartner (1966) realizaram modificações no MULTIBAND e produziram o modelo *MULTIBAND-96 - Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks*, para produzir progressões de largura variável ao longo de cada arterial da rede, sensíveis à variação do tráfego, e simultaneamente otimizar as variáveis semafóricas.

Abu-Lebdeh e Benekohal (1997) criaram um procedimento de controle em vias supersaturadas, baseado no gerenciamento da fila e no uso eficiente do tempo verde, considerando os aspectos dinâmicos do fluxo e sua natureza dependente do tempo. Os algoritmos genéticos foram usados para resolver problemas dinâmicos, pois têm habilidade em lidar com vários problemas combinados, baseados no mecanismo de seleção e genética natural.

5. METODOLOGIA

A dissertação de mestrado em desenvolvimento contemplará um panorama geral sobre semáforos, incluindo histórico, estratégias de operação, justificativas e conceitos do dimensionamento semafórico. Posteriormente, uma revisão cronológica apresentará as técnicas manuais e computacionais mais utilizadas para gerar planos de coordenação semafórica. Pretende-se avaliar a estrutura dos algoritmos iniciais que serviram de base para o desenvolvimento dos métodos de coordenação, a fim de identificar as mais adequadas para utilização em cidades de médio porte.

Da revisão bibliográfica realizada até o presente momento observa-se que, em geral, a maioria dos algoritmos implementados em rotinas computacionais de coordenação semafórica baseia-se no algoritmo proposto por Morgan e Little (1964). Portanto, este será o principal algoritmo a ser analisado de forma que ele possa ser implementado na íntegra ou adaptado para aplicação em vias arteriais das cidades de Londrina e Maringá, no estado do Paraná. A idéia inicial é que o algoritmo seja implementado em uma planilha eletrônica ou que seja feito um programa específico para este fim, o que será definido futuramente.

Para testar a eficiência do algoritmo de Little, é necessário avaliar qual é a melhoria no desempenho operacional do sistema viário em decorrência da coordenação adotada. Esta melhoria pode ser avaliada através de medidas de desempenho do sistema, tais como atrasos nas interseções, tempo de viagem, tamanho de filas. Como é relativamente difícil coletar estas medidas de desempenho em campo, além do que não seria recomendado “testar” estratégias de coordenação diretamente no sistema real, as medidas de desempenho serão obtidas através do uso do simulador INTEGRATION (Van Aerde, 1997). Neste simulador, serão representados 3 cenários distintos:

- Cenário 1: situação existente, sem coordenação semafórica ou com coordenação feita por métodos convencionais;
- Cenário 2: situação em que os semáforos são coordenados através do método de Little; e

- Cenário 3: situação em que os semáforos são coordenados através de rotinas internas existentes no simulador INTEGRATION.

A proposta básica é obter as medidas de desempenho para os três cenários, comparar os resultados obtidos e identificar quais foram os melhores resultados. Realizando-se várias simulações para diferentes níveis de demanda, é possível realizar uma análise de sensibilidade da eficiência dos métodos de coordenação em função do aumento do volume de tráfego na rede, indicando assim quando é possível utilizar métodos de coordenação mais simples, como o método de Little, ou quando é necessário utilizar métodos de coordenação mais sofisticados, como o existente no simulador INTEGRATION ou no próprio TRANSYT.

Para calibrar o simulador INTEGRATION, serão inicialmente selecionadas vias arteriais nas cidades de Londrina e Maringá, nas quais serão coletados dados para a calibração, tais como a geometria das vias, características do controle e características do tráfego.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, são apresentados detalhes sobre uma dissertação de mestrado em desenvolvimento, cujo objetivo é avaliar a eficiência de métodos simples de coordenação semafórica e, em seguida, propor uma forma simplificada de aplicação do método que seja compreensível por parte de analistas e operadores responsáveis pela implementação e gerenciamento do sistema de controle de tráfego de cidades de porte médio.

Considerando que a revisão bibliográfica demonstrou a existência de inúmeros procedimentos para coordenação semafórica, mas que na prática a maioria das cidades de médio porte não usufruem de forma eficiente dos benefícios destas ferramentas, é proposta uma análise criteriosa dos algoritmos utilizados nos softwares, na busca da aplicação (e se possível uma simplificação) do método, na tentativa de utilização efetiva em casos reais.

O programa INTEGRATION de simulação de tráfego permitirá avaliar a utilidade do método proposto a ser testado nas cidades de Londrina e Maringá. Espera-se assim que os resultados obtidos possam servir como subsídio para definição de um método de coordenação prático e eficiente que possa ser aplicado, eventualmente, a outras cidades de porte médio do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-LEBDEH, G.; BENEKOHAL, R.F. (1997) Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials. *Transportation Research Record*, 160, p.119-27.
- CHANG, E.C.P.; MESSER, C.J. (1985) Minimum Delay Optimization of a Maximum Bandwidth Solution to Arterial Signal Timing. *Transportation Research Record*, 1005, p.89-95.
- CHANG, E.C.P.; MESSER, C.J.; COHEN, S.L. (1986) Directional Weighting for Maximal Bandwidth Arterial Signal Optimization Programs. *Transportation Research Record*, 1057, p.10-19.
- COHEN, S.L. (1983) Concurrent Use of MAXBAND and TRANSYT Signal Timing Programs for Arterial Signal Optimization. *Transportation Research Record*, 906, p.81-4.
- COHEN, S.L.; LIU, C.C. (1986) The Bandwidth-Constrained TRANSYT Signal - Optimization Program. *Transportation Research Record*, 1057, p.1-9.
- DENATRAN (1984) Manual de Semáforos. *Coleção Serviços de Engenharia*, 2.ed. Brasília.
- DENATRAN (2003) Frota de veículos por estado em junho de 2003. Disponível em <http://www.denatran.gov.br>.

Acessado em 25/08/2003.

GARTNER, N.H.; ASSMANN, S.F.; LASAGA, F.; HOU, D.L. (1990) MULTIBAND: A Variable - Bandwidth Arterial Progression Scheme. *Transportation Research Record*, 1287, p.212-22.

GARTNER, N.H.; LITTLE, J.D.C.; GABBAY, H. (1975) Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Linear Programming. *Transportation Science*, v.9, n.4, parte I, p.321-43 e parte II, p.344-63.

GREEN, F.B.; ROBERTSON, D.I. (1974). Traffic Signal Control Using Cableless Linking – the A4 Experiment. *Traffic Engineering and Control*, v.9, p.547-51.

LAN, C.J.; MESSER, C.J.; CHAUDHARY, N.A.; CHANG, E.C.P. (1992) Compromise Approach to Optimize Traffic Signal Coordination Problems During Unsaturated Conditions. *Transportation Research Record*, 1360, p.112-19.

LIEBERMAN, E.B.; WOO, J.L. (1976) SIGOP II: A New Computer Program for Calculating Optimal Signal Timing Patterns. *Transportation Research Record*, 596, p.16-21.

LITTLE, J.D.C. (1966) The Synchronization of Traffic Signals by Mixed – Integer Linear Programming. *Operations Research*, v.14, n.4, p.568-93.

LITTLE, J.D.C.; KELSON, M.D.; GARTNER, N.H. (1981) MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. *Transportation Research Record*, 795, p.40-6.

MESSER, C.J.; WHITSON, R.H.; DUDEK, C.L.; ROMANO, E.J. (1973). A Variable – Sequence Multiphase Progression Optimization Program. *Highway Research Record*, 445, p.24-33.

MORGAN, J.T.; LITTLE, J.D.C. (1964) Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. *Operations Research*, v.12, n.6, p.896-912.

NAKATSUJI, T.; KAKU, T. (1991) Development of a Self- Organizing Traffic Control System Using Neural Network Models. *Transportation Research Record*, 1324, p.137-45.

PLANETAGEO (2003) Mapa da população do Brasil. Disponível em <http://planetageo.sites.uol.com.br/brpopula.htm>. Acessado em 12/08/2003.

ROBERTSON, D.I.; LUCAS, C.F.; BAKER, R.T. (1980) Coordinating Traffic Signals to Reduce Fuel Consumption. *Transport and Road Research Laboratory*, 934.

ROGNESS, R.O.; MESSER, C.J. (1983) Heuristic Programming Approach to Arterial Signal Timing. *Transportation Research Record*, 906, p.67-75.

SKABARDONIS, A.; BERTINI, R.L.; GALLAGHER, B.R. (1998). Development and Application of Control Strategies for Signalized Intersections in Coordinated Systems. *Transportation Research Record*, 1634, p.110-17.

SRIPATHI, H.K.; GARTNER, N.H.; STAMATIADIS, C. (1995) Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes. *Transportation Research Record*, 1494, p.135-45.

STAMATIADIS, C.; GARTNER, N.H. (1996) MULTIBAND – 96: A Program for Variable – Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1554, p.9-17.

TSAY, H.S.; LIN, L.T. (1988) New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1194, p.15-30.

VAN AERDE, M. (1997) *Integration Release 2: User's Guide*. Vol. I, II e III. Transportation Systems Research Group, Queen's University. Kingston, Ontario, Canadá.

WALLACE, C.E.; COURAGE, K.G. (1982) Arterial Progression – New Design Approach. *Transportation Research Record*, 881, p. 53-9.

WEBSTER, F.V.; COBBE, B.M. (1966) Traffic Signals. Road Research Laboratory – Ministry of Transport, *Road Research Technical Paper n.56*, England / London.

Agradecimentos: A primeira autora agradece a Prefeitura Municipal de Londrina, em especial ao Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina – IPPUL, pelo apoio na realização do programa de mestrado. O segundo

autor deste trabalho agradece ao CNPq, pela concessão de bolsa de produtividade.

Endereço dos autores:

Cristiane Biazzone Dutra (crisbiazzono@sercomtel.com.br)
Aluna do programa de mestrado do
Departamento de Transportes EESC/USP

Universidade de São Paulo – EESC – STT
Av. Trabalhador São-carlense, 400
13566-590 - São Carlos, SP, Brasil
fone: (016) 273-9617
fax: (016) 273-9602

Sergio Henrique Demarchi (shdm@terra.com.br)
Professor Adjunto, Depto. de Engenharia Civil,
Grupo de Engenharia de Transportes

Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5790 - Bloco C67
87020-900 – Maringá, PR, Brasil
fone: (044) 261-4322
fax: (044) 261-4322