

AValiação DA EFICIÊNCIA DE DOIS PROGRAMAS DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA PARA VIAS URBANAS

Cristiane Biazzono Dutra

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Sergio Henrique Demarchi

Universidade Estadual de Maringá
Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

As estratégias de coordenação semafórica podem reduzir os tempos de viagem, atrasos e paradas em corredores arteriais ou redes semaforizadas, mas para que isso ocorra é necessário definir quais critérios de coordenação são mais recomendados para um determinado cenário. Este artigo apresenta a avaliação de eficiência de dois programas de coordenação - *SBAND* (baseado na maximização da largura de banda) e *INTEGRATION* (baseado no critério de minimização de atrasos e paradas), através da simulação de cenários reais e avaliando diferentes condições de configuração viária, características de controle e volumes de tráfego. Os valores das medidas de desempenho avaliadas sugerem benefícios com a utilização do programa *INTEGRATION* para situações com volume de tráfego semelhante na via principal e vias secundárias, enquanto que o programa *SBAND* é recomendado para situações em que as interseções são igualmente espaçadas e distantes umas das outras, sendo que o tráfego na via principal é predominantemente de passagem.

ABSTRACT

Traffic signal synchronization can reduce travel time, delays and stops at signalized arterial streets and networks, but results are dependent on the synchronization criteria considered for a specific scenario. This paper presents the evaluation of efficiency of two traffic signal synchronization softwares, in terms of reduction on the measures of effectiveness estimated by means of simulation. The first program, named *SBAND*, defines offsets based on the maximum bandwidth approach, while the second one, named *INTEGRATION*, synchronizes traffic signals by minimizing delays and stops. The results of simulations for different types of arterial streets and flow magnitudes suggest that *INTEGRATION* is more recommended for traffic flows with similar magnitude on principal and secondary streets, while *SBAND* is more recommended for situations where intersections are evenly spaced and relatively distant from other intersections, and there is a predominance of through trips on main street.

1. INTRODUÇÃO

As estratégias de coordenação semafórica são eficientes para promover a fluidez das correntes de tráfego e melhorar a qualidade operacional do sistema viário, reduzindo tempos de percurso, atrasos e paradas. Sendo assim, estabelecer adequadamente as defasagens entre interseções semaforizadas de corredores arteriais ou redes torna-se muitas vezes mais eficiente e menos oneroso do que algumas intervenções físicas. Portanto, os técnicos responsáveis pelo gerenciamento de tráfego dos municípios deveriam, sempre que possível, adotar métodos para a definição das defasagens, utilizando ferramentas que auxiliem na decisão das operações.

Porém, uma pesquisa realizada em cidades brasileiras das regiões Sul e Sudeste sobre as estratégias de coordenação empregadas, descrita por Dutra e Demarchi (2004), demonstrou especialmente para os municípios de porte médio que somente 13% utilizam *software* para definir planos de coordenação nos semáforos monitorados por centrais. Para os demais corredores semaforizados, cerca de 27% utilizam o procedimento manual do Diagrama Espaço-Tempo, 36% realizam repetidos ajustes locais através da observação do tráfego, 14% utilizam veículos-teste e 23% não adotam nenhum esquema de coordenação.

Este panorama alertou sobre o fato de que apesar de vários *softwares* terem sido desenvolvi-

dos nos últimos 40 anos, grande parte das cidades de médio porte não faz uso de programas computacionais para estabelecer formas de coordenação semafórica. Sendo assim, o objetivo deste artigo é investigar a forma de utilização de dois programas de coordenação semafórica - *SBAND* (baseado na maximização da largura de banda verde) e *INTEGRATION* (baseado no critério de minimização de atrasos e paradas), além de avaliar a eficiência e a aplicabilidade dos programas e disseminar para outros técnicos o conhecimento adquirido com o uso destas ferramentas. Para isto, o texto está dividido em 6 itens, contando com esta introdução. O item 2 descreve as características dos programas, avaliados através dos cenários relacionados no item 3. O quarto item apresenta as condições de cada simulação, e o item 5 descreve os resultados das medidas de desempenho obtidas. As recomendações de utilização dos dois programas em diferentes condições de tráfego e geometria viária estão no item 6.

2. MÉTODOS DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

De uma forma geral, os programas de coordenação semafórica existentes podem ser classificados em três categorias distintas, conforme o critério de definição das defasagens: a maximização da largura da banda verde; a minimização dos atrasos e paradas; e a combinação de ambos os critérios. De acordo com a revisão bibliográfica apresentada por Dutra (2005), a base dos métodos de maximização da largura da banda foi proposta por Little, em algoritmos de programação inteira (Morgan e Little, 1964) ou programação inteira mista (Little, 1966), assim como os métodos de minimização de atrasos e paradas tomam como base a minimização de um índice de performance (*PI*).

2.1. Programa *SBAND*

SBAND é uma rotina escrita em *Visual Basic* que funciona em planilhas do Excel, utilizada para definir as defasagens semafóricas de forma a maximizar a largura da banda verde para todo o sistema de semáforos. A estrutura básica do modelo, descrita por Demarchi e Dutra (2004) foi baseada no método de programação inteira proposto por Morgan e Little (1964), como uma opção alternativa à não disponibilidade de um programa similar. O programa *SBAND* não apresenta complexidade de utilização nem requer grande esforço de aprendizado, necessitando da distância entre semáforos, velocidades de progressão, ciclo e proporções dos tempos de verde/vermelho, para gerar através de interações computacionais as defasagens apropriadas para a operação coordenada de corredores com duplo sentido. A velocidade de progressão pode ser diferente em cada sentido, assim como uma porcentagem maior da largura da banda verde pode ser atribuída para privilegiar o sentido com maior tráfego.

2.2. Programa *INTEGRATION*

O programa *INTEGRATION* (Rakha, 2004) é um modelo microscópico de simulação do tráfego, pois representa individualmente a velocidade, a aceleração e os movimentos dos veículos ao longo das rotas a cada décimo de segundo, possibilitando avaliar sistemas complexos e cenários alternativos. Segundo Demarchi (2000), cinco arquivos de entrada são necessários para calibração do *INTEGRATION*, chamados *fundamentais* (nós, tramos, semáforos, matriz O-D e incidentes), além de parâmetros opcionais incluídos em arquivos *avançados* (greides, utilização de faixas, características veiculares). No arquivo de semáforos é feita a definição do intervalo para a coordenação semafórica a ser adotada nas simulações.

3. CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE COORDENAÇÃO

Para testar a eficiência dos programas *SBAND* e *INTEGRATION*, é necessário avaliar quais condições de tráfego podem ser beneficiadas pela solução de coordenação fornecida por cada

programa. A eventual melhoria na qualidade operacional da via pode ser observada através das medidas de desempenho, tais como tempo de viagem, atrasos nas interseções e número de paradas. Como é relativamente difícil coletar estas medidas em campo, além do que não seria recomendado testar estratégias de coordenação diretamente no sistema real, as medidas de desempenho foram obtidas através do uso do simulador *INTEGRATION*, que além de ser avaliado também servirá como ferramenta para análise das medidas geradas pelo *SBAND*.

3.1. Caracterização dos Corredores Arteriais Analisados

Na tentativa de reproduzir e avaliar situações distintas de tráfego e de sistema viário em cidades de médio porte, três avenidas foram selecionadas na cidade de Londrina, e uma rede foi selecionada na cidade de São Carlos, conforme descrições realizadas nos itens 3.1.1 e 3.1.2.

3.1.1. Corredores na Cidade de Londrina

Londrina está situada ao norte do estado do Paraná, com população próxima de 500 mil habitantes e frota superior a 190 mil veículos (*site* da Prefeitura de Londrina, 2005). A região central é altamente adensada e com elevada atividade comercial, sendo constituída de algumas avenidas duplas e ruas de sentido único, sinalizadas com 2 ou 3 faixas de rolamento variando entre 2,5 e 3,5 m e estacionamento de 2 m, quando permitido. As principais características das vias arteriais escolhidas em Londrina estão descritas na Tabela 1 e representadas na Figura 1.

Tabela 1: Resumo de características dos corredores arteriais de Londrina

	Av. Higienópolis	Av. J.K.	Av. Maringá
Extensão (m)	1.097	1.437	1.147
Nós	26	34	24
Tramos	33	49	41
Semáforos	8	10	5
Ciclo (s)	75	74	88
Velocidade Principal (km/h)	50	50	40
Velocidade Secundárias (km/h)	40	40	não regulamentada

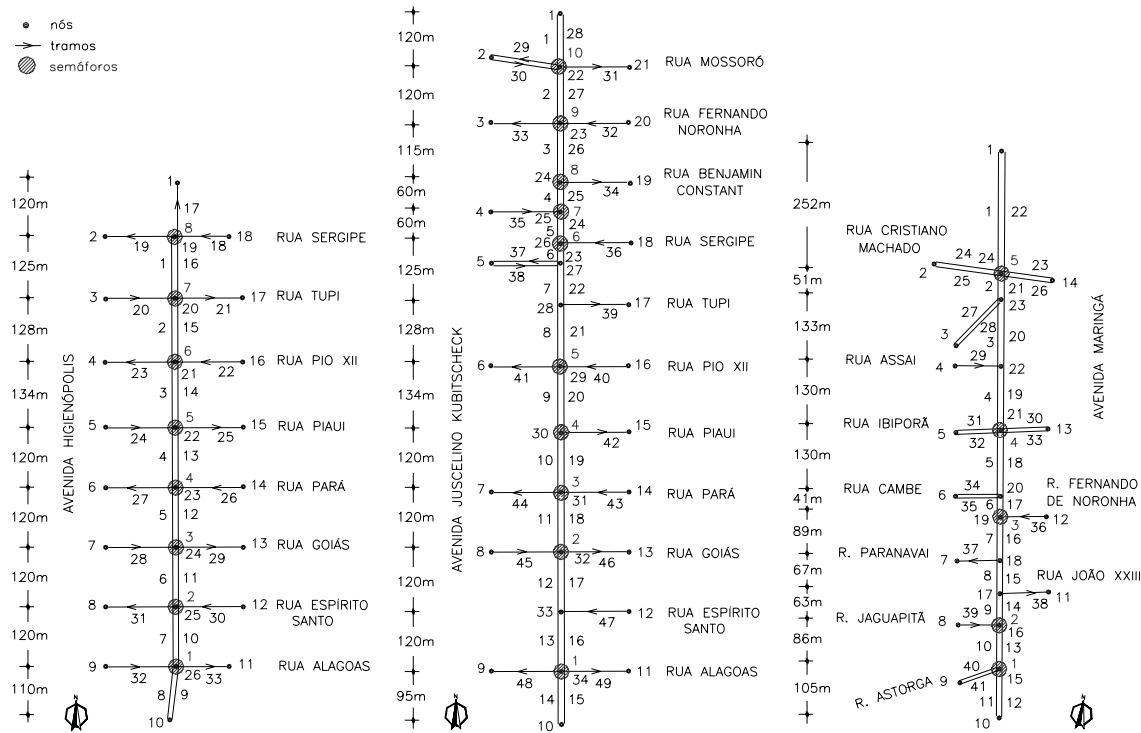


Figura 1: Características dos corredores da cidade de Londrina

Os corredores selecionados em Londrina são trechos de vias que desempenham função arterial no sistema viário da cidade, possibilitando viagens para as diversas regiões do município:

- Avenida Higienópolis: via integrante da área central da cidade, com tráfego elevado tanto na via principal quanto nas vias transversais;
- Avenida Juscelino Kubitschek: compõe o perímetro do quadrilátero central da cidade, constituindo parte de uma das principais ligações Leste-Oeste da circulação londrinense, com elevado tráfego de passagem na via principal e tráfego moderado nas vias secundárias;
- Avenida Maringá: está situada fora do centro expandido de Londrina, apresentando moderado tráfego de passagem na via principal e tráfego baixo nas vias secundárias.

3.1.2 Rede da Cidade de São Carlos

São Carlos está localizada na região central do estado de São Paulo, com população superior a 200 mil habitantes e frota que ultrapassa 80 mil veículos (*site* da Prefeitura de São Carlos, 2005). As características da rede selecionada estão descritas na Tabela 2 e representadas na Figura 2, composta por três corredores de sentido único com aproximadamente 620 m cada, e sinalização que segrega 2 ou 3 faixas variando entre 2,50 e 3,15 m e estacionamento com 2 m.

Tabela 2: Resumo de características da rede de São Carlos

	Rede	Av. São Carlos	R. D. Alexandrina	R. Episcopal
Nós	41	-	-	-
Tramos	51	-	-	-
Semáforos	13	5	4	4
Ciclo (s)	65	-	-	-
Velocidade Principal (km/h)	-	50	40	50
Velocidade Secundárias (km/h)	40	-	-	-

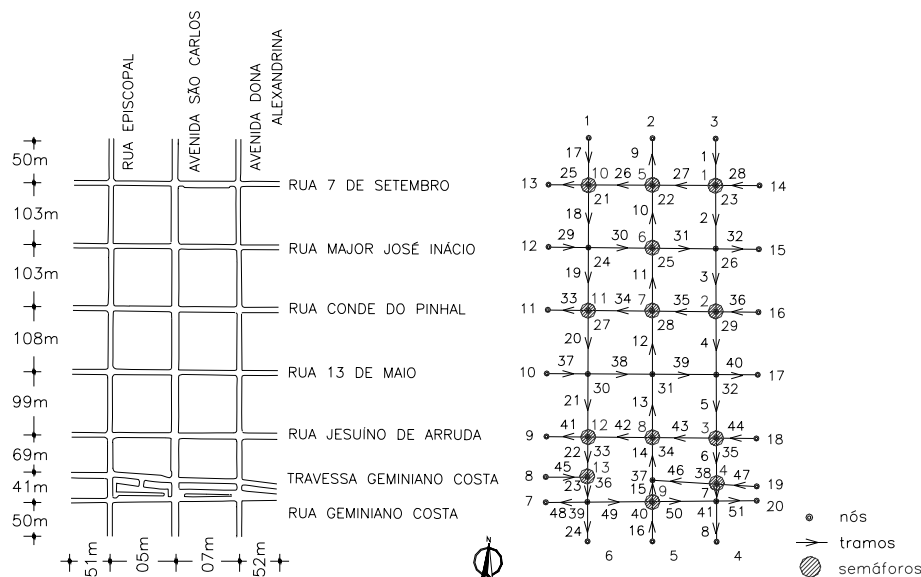


Figura 2: Características da rede da cidade de São Carlos

As vias compõem o sistema de circulação central da cidade, através da Avenida São Carlos com elevado fluxo de tráfego no sentido Sul-Norte e das Ruas Episcopal e Alexandrina com volume moderado no sentido Norte-Sul. A rede contém semáforos que operam com ciclo de 65 s e 2 fases, com exceção dos semáforos 8 e 9 que apresentam a terceira fase para pedestres.

3.2. Codificação dos Corredores no *INTEGRATION*

Várias coletas de dados foram necessárias para codificação dos cenários no *INTEGRATION*, tais como geometria e configuração das vias, características de controle (formas de sinalização, restrições de movimentos) e de tráfego (magnitude e composição). Os dados dos corredores de Londrina foram obtidos em campo ou através de consulta aos registros da prefeitura e da base digitalizada da cidade, enquanto os dados utilizados na rede de São Carlos foram coletados e codificados no projeto desenvolvido pela RedeTráfego (Loureiro *et al.*, 2005).

3.3. Calibração do Simulador *INTEGRATION*

Buscando reproduzir o mais fielmente possível as condições das vias, refletindo também as características dos veículos e o comportamento dos motoristas, faz-se necessário quantificar com dados coletados *in loco* os parâmetros utilizados na lógica do modelo *INTEGRATION*.

3.3.1. Relação Fluxo-Velocidade

Os parâmetros utilizados para modelar o comportamento dos veículos em Londrina foram adaptados de Colella *et al.* (2004), que calibraram e validaram o modelo fluxo-velocidade a partir de espaçamentos e velocidades observados em Maringá, PR. Os valores de capacidade do tramo (2115 cp/h/faixa) e velocidade na capacidade (27 km/h) foram utilizados considerando a similaridade das avenidas de Maringá e de Londrina. Como a capacidade da via é influenciada pela largura das faixas de rolamento, valores distintos de fluxo de saturação foram adotados para faixas com larguras diferentes de 3,5 m (largura observada em Maringá), buscando proporcionalidade nas variações das faixas entre 2,5 e 4,0 metros.

Também a velocidade de fluxo livre encontrada (58 km/h) foi considerada razoável por ser próxima do limite de velocidade estabelecido para as vias analisadas, e a densidade de congestionamento correspondente (165 cp/km/faixa) foi obtida a partir do espaçamento de congestionamento estimado por Demarchi *et al.* (2003) igual a 6,06 metros.

Os valores dos fluxos de saturação utilizados na rede de São Carlos (1721 a 1823 cp/h/faixa) foram medidos *in loco* através da avaliação da variação do número de veículos atendidos durante o tempo de verde dos semáforos, de acordo com o relatório da RedeTráfego (Loureiro *et al.*, 2005). As coletas das velocidades de fluxo livre foram realizadas em horários de baixo fluxo através de um veículo-teste que acompanhava os veículos trafegando em condições de fluxo desimpedido, e as densidades de congestionamento foram determinadas pelo número de veículos parados em fila, relativos a um segmento de 1 km, variando entre 137 e 173 cp/km.

3.3.2 Matriz Origem-Destino

No intuito de replicar o mais fielmente possível os volumes de tráfego observados nos cenários selecionados em Londrina, as matrizes O-D utilizadas na calibração do *INTEGRATION* foram determinadas sinteticamente através do aplicativo *QUEENSOD* (Van Aerde, 1998), utilizando contagens nas interseções das três redes viárias. Os dados das contagens foram obtidos junto ao IPPUL - Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina, utilizando o montante de veículos equivalentes da hora-pico (17:45 - 18:45) como forma de simplificação. A matriz obtida para a Avenida Higienópolis resultou em 37 pares que totalizam 8.366 viagens por hora, 8.825 viagens para os 76 pares da matriz gerada para a Avenida Juscelino Kubitschek, e 50 pares que resultam em 3.459 viagens por hora para a Avenida Maringá.

O programa *QUEENSOD* também foi utilizado na geração da matriz O-D sintética para a rede de São Carlos, através dos dados das contagens de tráfego realizadas no período de pico das

11:30 às 12:30 horas, obtidos no relatório da RedeTráfego (Loureiro *et al.*, 2005), e que resultaram em 96 pares origem-destino que totalizam 4.109 viagens distribuídas por hora.

4. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Quatro condições de operação semaforica foram selecionadas para avaliação, e independente do cenário simulado, a duração do ciclo e a divisão dos tempos de verde e vermelho permaneceram as mesmas daquelas identificadas na condição vigente de cada corredor:

- Cenário 1: semáforos são coordenados através de progressão simultânea, supondo que todos os tempos de verde dos semáforos abrem ao mesmo tempo;
- Cenário 2: situação existente, sem coordenação semaforica ou com coordenação feita por métodos convencionais;
- Cenário 3: semáforos são coordenados através do programa *SBAND*, para bandas com larguras iguais utilizando a velocidade regulamentada na via;
- Cenário 4: semáforos são coordenados através de rotinas existentes no *INTEGRATION*.

A obtenção do melhor plano coordenado pelo *INTEGRATION* requer a repetição da simulação para verificação de cada semáforo “mestre”, observando no resumo de resultados (*arquivo 28*) qual esquema resulta nos menores valores de *atraso total* e *parado*. Após a identificação da melhor opção de semáforo mestre, e para esta simulação, é necessário verificar qual conjunto de defasagens geradas durante a simulação (*arquivo 12*) apresenta a menor média dos *tempos de viagem*, e para o intervalo de tempo com a menor média identificar seu plano referente (*arquivo 14*). Este procedimento é necessário em função do *INTEGRATION* modificar constantemente o conjunto de defasagens ao longo da simulação. Como o objetivo da avaliação é verificar o efeito da coordenação em semáforos de tempo fixo, que são típicos nas operações das cidades de médio porte, somente depois de verificar o melhor semáforo mestre e o melhor conjunto de defasagens é que o plano gerado pelo *INTEGRATION* é simulado.

Para realizar a análise de sensibilidade do desempenho dos programas *INTEGRATION* e *SBAND* em relação às variações de volume de tráfego, todos os pares da matriz O-D dos corredores de Londrina foram alterados proporcionalmente, em reduções de 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75 e 85% da matriz vigente estimada. Utilizando as matrizes reduzidas, os cenários foram simulados novamente, sem mudanças na duração do ciclo ou nas divisões do tempo de verde, para comparação isolada das medidas de eficiência em cada porcentagem de demanda.

Por fim, mais oito simulações foram realizadas para a Avenida Higienópolis, para as situações com progressão simultânea e com coordenação gerada pelo programa *SBAND*, a fim de verificar as alterações nas medidas de desempenho promovidas pela programação do *SBAND*, em função das distâncias entre as interseções semaforizadas. Os supostos espaçamentos de 220, 320, 420 e 520 metros entre os oito semáforos da Avenida Higienópolis foram testados, em comparação à característica real desta via (aproximadamente 120 metros de distância). Para a situação que supõe espaçamentos de 520 metros entre os semáforos (e que requer metade do tempo do ciclo para que os veículos percorram a distância entre as interseções a 50 km/h), o plano de coordenação gerado pelo programa *INTEGRATION* também foi testado.

4.1. Simulações com Coordenação para Volume de Tráfego Atual

O plano vigente na Avenida Higienópolis já havia sido avaliado pelo técnico do poder público municipal, que considerando o tráfego elevado na via principal e nas transversais e a distância

praticamente equidistante entre as interseções, estabeleceu a coordenação alternada de indicações contrárias nos semáforos consecutivos. Posteriormente, através de observações do tráfego local, realizou ajustes nas defasagens e a cada alteração as filas formadas nos semáforos foram observadas, permitindo novas modificações. Para o cenário vigente da Avenida Juscelino Kubitschek, o plano inicial de coordenação semafórica foi estabelecido através do Diagrama Espaço-Tempo e adaptado por repetidos ajustes nas defasagens.

A programação da Avenida Maringá não havia sido previamente ajustada, apresentando no sistema operacional vigente problemas com excesso de paradas e atraso na hora de pico. Assim, de maneira geral, os cenários com coordenações obtidas através dos programas *SBAND* e *INTEGRATION* para a demanda real da Avenida Maringá, resultam em benefícios significativos quando comparados à condição de progressão simultânea e ao cenário vigente.

Três medidas de desempenho foram selecionadas para avaliação dos cenários simulados pelo *INTEGRATION* (Rakha, 2004): *tempo médio de percurso* (comparação entre os momentos de entrada e saída do veículo nos segmentos de via); *atraso médio* (diferença de tempo entre a viagem nas velocidades instantânea e de fluxo livre); *número médio de paradas* (soma das paradas completas e parciais por veículo, em cada segmento de via). A Tabela 3 apresenta as porcentagens de redução ou acréscimo das medidas de desempenho obtidas para Londrina.

Tabela 3: Percentuais de redução ou acréscimo nas medidas de desempenho dos corredores da cidade de Londrina

Cenário *	Tempo de Percurso (s)				Atraso Médio (s)				Nº de Paradas			
	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration
Av. Higienópolis	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
Principal	18.18	-4.4	7.1	-6.0	10.73	-7.5	11.9	-10.3	0.251	-5.8	14.3	-4.1
Secundárias	20.30	0.1	0.3	-0.1	11.03	0.1	0.4	-0.2	0.363	0.2	0.6	-0.4
Rede	19.07	-2.4	4.0	-3.4	10.85	-4.3	7.0	-6.0	0.298	-2.7	7.3	-2.2
Avenida J. K.	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
Principal	22.27	-1.2	-3.0	0.7	16.00	-1.8	-4.1	1.0	0.352	-3.3	2.0	0.3
Secundárias	18.79	11.5	-3.4	1.5	9.38	23.2	-6.8	2.9	0.324	1.4	-2.1	0.1
Rede	21.35	1.7	-3.1	0.9	14.25	2.5	-4.6	1.3	0.345	-2.2	1.0	0.3
Av. Maringá	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
Principal	23.99	-0.4	-13.3	-9.1	16.98	-0.5	-18.9	-12.8	0.294	-0.5	-1.7	4.2
Secundárias	23.56	-0.1	0.0	0.2	16.05	-0.2	0.0	0.3	0.408	0.3	0.2	-0.1
Rede	23.91	-0.3	-10.9	-7.4	16.81	-0.4	-15.5	-10.5	0.315	-0.3	-1.2	3.2

* os percentuais de redução e acréscimo das medidas de desempenho foram calculados em relação ao respectivo cenário simultâneo.

Embora as vias que compõem a rede selecionada na cidade de São Carlos tenham sentido único de circulação, facilitando a definição de programações coordenadas, os planos vigentes nos corredores principais da rede foram estabelecidos praticamente com abertura simultânea dos tempos de verde dos semáforos. A Tabela 4 apresenta o resumo das porcentagens comparativas das medidas de desempenho obtidas para as vias da rede de São Carlos.

Tabela 4: Quadro comparativo entre as medidas de desempenho para a rede de São Carlos

Cenário *	Tempo de Percurso (s)				Atraso Médio (s)				Nº de Paradas			
	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration
	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
Principais	39.49	1.2	-12.4	-6.5	21.85	2.1	-22.6	-11.9	0.679	1.1	-18.1	-4.8
Secundárias	17.98	-0.6	3.7	-5.2	11.20	-1.0	5.8	-8.4	0.449	-0.3	10.9	-3.6
Rede	14.95	0.4	-5.5	-6.3	8.74	0.7	-9.6	-10.9	0.307	0.4	-3.1	-4.5

* os percentuais de redução e acréscimo das medidas de desempenho foram calculados em relação ao cenário simultâneo.

4.2. Simulações com Coordenação para Volumes de Tráfego Reduzidos

Os cenários descritos para análise das medidas de desempenho (abertura simultânea, vigente, coordenados pelos programas *SBAND* e *INTEGRATION*) também foram avaliados para volumes variando entre 15% e 85% dos volumes observados. Sendo assim, 45 cenários foram

avaliados para a Av. Higienópolis, 36 para a Av. Juscelino Kubitschek e 36 para a Av. Maringá, conforme medidas resultantes nas vias principais e na rede, resumidas na Tabela 5.

Tabela 5: Percentuais de redução ou acréscimo nas medidas de desempenho de Londrina

Av. Higienópolis		Tempo de Percurso (s)				Atraso Médio (s)				Nº de Paradas			
Cenários *		Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration
Redução		média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
15%	Principal	17.49	-3.8	6.4	-5.7	10.04	-6.6	11.1	-10.0	0.245	-6.3	14.3	-7.7
	Rede	18.33	-2.4	3.9	-2.9	10.14	-4.4	7.0	-5.3	0.289	-3.4	7.7	-4.3
25%	Principal	16.94	-3.4	7.0	-4.1	9.51	-6.2	12.3	-7.3	0.239	-5.7	15.5	-5.5
	Rede	17.90	-2.1	3.9	-1.8	9.71	-4.0	7.1	-3.3	0.283	-3.0	7.2	-1.8
35%	Principal	16.52	-3.7	5.0	-6.0	9.12	-6.7	8.8	-10.9	0.235	-6.0	14.6	-6.4
	Rede	17.59	-2.3	2.7	-3.6	9.43	-4.4	4.8	-6.8	0.279	-2.8	7.0	-3.5
45%	Principal	16.00	-2.9	6.1	-3.3	8.60	-5.4	11.2	-6.3	0.227	-4.9	16.3	-1.4
	Rede	17.06	-1.6	3.7	-1.6	8.93	-3.0	6.9	-3.2	0.269	-2.3	8.0	-0.1
55%	Principal	15.35	-1.7	4.5	-2.7	8.00	-3.4	8.1	-5.5	0.219	-3.7	14.1	-5.8
	Rede	16.68	-0.9	2.6	-1.7	8.57	-1.9	4.7	-3.4	0.265	-1.7	6.3	-3.1
65%	Principal	15.25	-2.8	0.7	-3.6	7.92	-5.4	0.9	-7.3	0.217	-4.6	11.2	-1.8
	Rede	16.47	-1.4	-0.3	-1.6	8.39	-2.9	-0.9	-3.4	0.260	-1.4	3.9	0.4
75%	Principal	14.70	-2.5	-0.3	0.2	7.42	-5.0	-1.1	0.0	0.211	-4.1	10.6	-0.3
	Rede	16.08	-1.3	0.3	-0.5	8.02	-2.6	0.3	-1.3	0.256	-1.5	5.7	-0.6
85%	Principal	14.25	-3.1	-1.1	8.5	7.04	-7.3	-3.7	15.3	0.206	-5.6	11.4	25.9
	Rede	15.74	-2.0	-0.9	4.2	7.73	-4.6	-2.6	7.5	0.254	-3.6	4.3	12.2
Avenida J. K.		Tempo de Percurso (s)				Atraso Médio (s)				Nº de Paradas			
Cenários *		Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration
Redução		média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
15%	Principal	18.15	-11.2	-2.0	-7.0	11.90	-17.1	-3.1	-10.7	0.323	-9.3	1.5	-5.2
	Rede	18.01	-8.5	-1.6	-5.2	10.94	-13.9	-2.6	-8.6	0.321	-7.1	0.8	-3.8
25%	Principal	17.28	-10.2	-2.5	-8.2	11.04	-16.0	-3.9	-12.9	0.314	-8.9	0.8	-6.4
	Rede	17.29	-7.7	-1.9	-6.1	10.21	-13.0	-3.2	-10.4	0.310	-6.5	0.9	-4.6
35%	Principal	16.27	-9.2	-2.1	-7.9	10.06	-15.0	-3.5	-12.8	0.298	-7.5	2.2	-8.0
	Rede	16.47	-6.8	-1.7	-5.8	9.43	-12.0	-2.9	-10.1	0.297	-5.2	1.7	-5.7
45%	Principal	15.95	-8.3	-3.1	-6.1	9.72	-13.8	-5.1	-10.0	0.294	-7.8	2.0	-2.6
	Rede	16.17	-6.2	-2.3	-4.6	9.12	-11.0	-4.2	-8.3	0.291	-5.7	1.3	-2.4
55%	Principal	15.10	-6.2	-3.0	-4.6	8.91	-10.8	-5.1	-7.9	0.284	-6.2	-1.9	-9.0
	Rede	15.50	-4.5	-2.0	-3.4	8.49	-8.4	-3.8	-6.4	0.284	-4.1	-1.3	-6.4
65%	Principal	14.69	-5.7	-4.7	-7.7	8.51	-10.0	-8.1	-13.2	0.274	-4.1	-2.2	-8.8
	Rede	15.13	-4.1	-3.3	-5.7	8.14	-7.8	-6.0	-10.6	0.275	-2.9	-1.8	-6.7
75%	Principal	14.28	-5.0	-5.5	-8.9	8.14	-9.3	-10.1	-16.0	0.274	-5.9	-7.0	-13.3
	Rede	14.73	-3.7	-3.9	-6.5	7.75	-7.4	-7.7	-12.7	0.271	-3.6	-4.5	-9.5
85%	Principal	13.91	-2.5	-5.9	-9.5	7.76	-4.8	-10.5	-16.8	0.270	-2.2	-7.8	-12.3
	Rede	14.43	-1.3	-4.4	-6.7	7.44	-2.6	-8.5	-12.8	0.271	-0.5	-6.0	-8.4
Av. Maringá		Tempo de Percurso (s)				Atraso Médio (s)				Nº de Paradas			
Cenários *		Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration	Simultâneo	Vigente	Sband	Integration
Redução		média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%	média/veic	%	%	%
15%	Principal	20.49	-3.5	-16.0	-9.6	13.51	-5.3	-24.4	-14.5	0.269	-1.2	-3.6	1.3
	Rede	20.95	-3.1	-12.7	-7.5	13.86	-4.6	-19.2	-11.4	0.295	-1.1	-2.9	1.0
25%	Principal	19.31	-2.4	-17.1	-8.7	12.32	-3.8	-26.8	-13.6	0.254	1.6	-3.2	3.9
	Rede	19.97	-1.9	-13.6	-6.7	12.88	-2.9	-21.1	-10.4	0.284	1.2	-2.8	2.6
35%	Principal	18.56	-1.3	-16.6	-8.8	11.59	-2.1	-26.5	-14.0	0.247	1.7	-2.7	5.3
	Rede	19.16	-0.6	-12.8	-6.8	12.09	-0.9	-20.2	-10.8	0.275	1.5	-1.7	4.0
45%	Principal	18.09	-1.7	-19.2	-14.6	11.11	-2.9	-31.4	-23.8	0.243	1.2	-5.5	-4.7
	Rede	18.85	-1.2	-14.6	-11.7	11.77	-2.0	-23.6	-18.8	0.273	1.4	-3.5	-3.5
55%	Principal	17.58	-2.1	-17.1	-9.1	10.58	-3.6	-28.6	-15.2	0.237	0.4	-2.6	7.1
	Rede	18.25	-1.1	-13.0	-6.8	11.16	-2.1	-21.4	-11.2	0.268	1.0	-1.0	5.7
65%	Principal	16.61	0.2	-17.4	-12.9	9.72	0.2	-30.0	-22.4	0.227	2.8	-4.0	-12.1
	Rede	17.59	0.0	-14.0	-10.7	10.60	-0.2	-23.4	-18.1	0.263	1.9	-2.7	-8.9
75%	Principal	16.21	-1.8	-17.2	-8.4	9.32	-3.4	-30.1	-14.8	0.225	2.6	-4.7	13.2
	Rede	17.01	-1.0	-12.8	-6.0	10.02	-1.9	-21.8	-10.4	0.258	3.1	-2.9	10.0
85%	Principal	15.24	2.2	-13.4	-13.5	8.41	3.6	-24.7	-25.0	0.210	2.9	0.0	-4.3
	Rede	16.22	2.3	-10.3	-9.6	9.29	3.7	-18.3	-17.2	0.251	1.4	-0.5	-3.0

* os percentuais de redução e acréscimo das medidas de desempenho foram calculados em relação ao respectivo cenário simultâneo.

4.3. Simulações com Coordenação para Diferentes Espaçamentos entre Semáforos

Mantendo as mesmas condições de programação (ciclo e divisão dos tempos) e alterando a distância entre semáforos, é possível avaliar a influência desta característica geométrica na eficiência da coordenação. A rede utilizada para esta análise é similar ao trecho selecionado da Avenida Higienópolis, com 8 interseções praticamente equidistantes. As bandas formadas

pelas defasagens geradas através do programa *SBAND* com espaçamentos de 120, 220, 320 e 420 m não foram superiores a 12 s, enquanto a condição que supõe distância de 520 m gera bandas com largura de 40 s, relativa ao menor tempo de verde para os semáforos desta via.

Os resultados obtidos para os supostos cenários com diferentes espaçamentos entre os semáforos estão resumidos na Tabela 6, e confirmam a teoria utilizada no programa *SBAND*, em que a banda máxima para os dois sentidos de tráfego ocorre quando a distância entre as interseções semaforizadas é tal que os veículos a percorram na metade da duração do ciclo.

Tabela 6: Medidas de desempenho para diferentes espaçamentos entre semáforos

Cenário *	Distância 120m		Distância 220m		Distância 320m		Distância 420m		Distância 520m		
	Simultâneo média/veic	Sband %	Simultâneo média/veic	Sband %	Simultâneo média/veic	Sband %	Simultâneo média/veic	Sband %	Simultâneo média/veic	Sband %	Integration %
Tempo de Percurso (s)											
Principal	18.18	7.1	30.02	-3.7	41.88	-7.9	54.58	0.4	61.63	-18.5	-19.4
Secundárias	20.30	0.3	20.23	0.0	20.26	0.0	20.24	0.0	20.30	-0.3	0.0
Rede	19.07	4.0	25.94	-2.5	32.88	-5.9	40.29	0.3	44.42	-15.1	-15.7
Atraso (s)											
Principal	10.73	11.9	16.49	-6.8	22.21	-14.9	28.76	0.8	29.66	-38.5	-40.3
Secundárias	11.03	0.4	10.96	-0.1	10.99	-0.1	10.96	0.0	11.02	-0.4	0.0
Rede	10.85	7.0	14.19	-4.6	17.53	-11.1	21.36	0.6	21.90	-30.5	-31.9
Nº de Paradas											
Principal	0.251	14.3	0.379	6.9	0.467	0.7	0.561	0.3	0.613	-39.8	-37.9
Secundárias	0.363	0.6	0.362	-0.5	0.361	0.4	0.361	0.0	0.360	0.2	-0.1
Rede	0.298	7.3	0.372	3.9	0.423	0.6	0.478	0.2	0.508	-28.0	-26.7

* os percentuais de redução e acréscimo das medidas de desempenho foram calculados em relação ao respectivo cenário simultâneo.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

As situações com progressão simultânea foram escolhidas como referência para a comparação com as demais formas de coordenação, considerando esta condição como a mais simples a ser adotada na operação semaforizada de vias arteriais ou redes. Os cenários foram avaliados para diferentes condições de geometria, sentido de circulação e volume de tráfego, conforme resumo da Tabela 7, caracterizando 4 situações distintas para avaliação. A classificação das vias segue a divisão entre níveis médios de tráfego por sentido da via, sendo considerado baixo para fluxo de até 500 veíc/h, moderado para volumes entre 501 e 900 veíc/h, e fluxo elevado para volumes superiores a 900 veíc/h, relativos a cada aproximação da interseção semaforizada.

Tabela 7: Características das redes simuladas em Londrina e São Carlos

Cenário	Corredores da cidade de Londrina			Rede da cidade de São Carlos		
	Av. Higienópolis	Avenida J.K.	Av. Maringá	Rua Alexandrina	Av. São Carlos	Rua Episcopal
Sentido de circulação	duplo	duplo	duplo	único	único	único
Quantidade semáforos	8	10	5	4	5	4
Distância semáforos	eqüidistante	variável	variável	variável	variável	variável
Tráfego Principal	elevado	elevado	moderado	moderado	elevado	moderado
Tráfego Secundárias	elevado	moderado	baixo	moderado	moderado	moderado
	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Situação 4		

A Tabela 8 apresenta os percentuais aproximados das situações simuladas com demandas reais, em comparação com os respectivos cenários simultâneos. As seguintes conclusões são obtidas para cada uma das situações:

- Situação 1: o plano de coordenação gerado pelo *INTEGRATION* resultou em reduções nas medidas de desempenho da via principal e da rede, enquanto os resultados gerados pelo *SBAND* produziram aumento nas medidas de desempenho avaliadas;
- Situação 2: a coordenação do *SBAND* apresentou pequenas reduções para as medidas de desempenho, enquanto o plano de coordenação gerado pelo programa *INTEGRATION* re-

sultou em pequenos aumentos em todas as medidas de desempenho avaliadas;

- Situação 3: ambos programas resultaram em reduções nas medidas de desempenho da via principal e da rede, com reduções mais significativas na coordenação gerada pelo *SBAND*;
- Situação 4: o programa *SBAND* produziu redução significativa nas medidas de desempenho da via principal e da rede, com acréscimos nos valores das medidas das vias secundárias, enquanto o *INTEGRATION* apresentou menores benefícios para a via principal e rede, mas gerou redução nas medidas de desempenho das vias secundárias.

Tabela 8: Resumo dos percentuais de redução ou acréscimo nas medidas de desempenho para volumes de tráfego observados

		Situação 1		Situação 2		Situação 3		Situação 4		
Medida de Desempenho		SBAND	INTEGRATION	SBAND	INTEGRATION	SBAND	INTEGRATION	SBAND	INTEGRATION	
Demanda Real	Princ.	Tempo de Percurso (s)	7	-6	-3	1	-13	-9	-12	-7
		Atraso (s)	12	-10	-4	1	-19	-13	-23	-12
		Número de Paradas	14	-4	2	0	-2	4	-18	-5
	Secund.	Tempo de Percurso (s)	0	0	-3	2	0	0	4	-5
		Atraso (s)	0	0	-7	3	0	0	6	-8
		Número de Paradas	1	0	-2	0	0	0	11	-4
	Rede	Tempo de Percurso (s)	4	-3	-3	1	-11	-7	-6	-6
		Atraso (s)	7	-6	-5	1	-16	-11	-10	-11
		Número de Paradas	7	-2	1	0	-1	3	-3	-5

Nas condições de volumes de tráfego reduzidos, as alterações nas medidas de desempenho das vias secundárias não são significativas em nenhuma das situações analisadas (inferiores a 5%). A Tabela 9 resume os resultados das simulações com reduções de 15% a 85% nos volumes dos corredores de Londrina, em comparação com os respectivos cenários com abertura simultânea. As conclusões obtidas para cada uma das situações são as seguintes:

- Situação 1a (via principal com duplo sentido e volume de tráfego moderado nas vias principal e secundárias, com vários semáforos equidistantes): a coordenação gerada pelo *INTEGRATION* reduziu as medidas de desempenho da via principal e rede, enquanto os resultados obtidos com *SBAND* geraram aumento nas medidas de desempenho;
- Situação 1b (via principal com duplo sentido e baixo volume de tráfego, assim como nas vias secundárias, contendo vários semáforos equidistantes): as coordenações geradas pelos dois programas resultam em reduções no tempo de percurso e no atraso da via principal e da rede, mas somente o *INTEGRATION* proporciona reduções no número de paradas;

Tabela 9: Resumo dos percentuais de redução ou acréscimo nas medidas de desempenho para volumes de tráfego reduzidos

		Situação 1a		Situação 2a		Situação 3a		
Medida de Desempenho		SBAND	INTEGRATION	SBAND	INTEGRATION	SBAND	INTEGRATION	
Redução 15 a 45%	Principal	Tempo de Percurso (s)	5	-6	-3	-8	-19	-15
		Atraso (s)	9	-11	-5	-13	-31	-24
		Número de Paradas	14	-8	1	-8	-6	-5
	Rede	Tempo de Percurso (s)	3	-4	-2	-6	-15	-12
		Atraso (s)	5	-7	-4	-10	-24	-19
		Número de Paradas	7	-4	1	-6	-4	-4
		Situação 1b		Situação 2b		Situação 3b		
Redução 55 a 85%	Principal	Tempo de Percurso (s)	-1	-4	-6	-10	-17	-14
		Atraso (s)	-4	-7	-11	-17	-30	-25
		Número de Paradas	11	-6	-8	-13	-5	-12
	Rede	Tempo de Percurso (s)	-1	-2	-4	-7	-14	-10
		Atraso (s)	-3	-3	-9	-13	-23	-17
		Número de Paradas	4	-3	-6	-10	-3	-9

- Situação 2a (via principal com duplo sentido e moderado volume de tráfego, contendo vá-

rias interseções semaforizadas, e vias transversais com fluxo baixo): as coordenações geradas pelo *INTEGRATION* apresentaram reduções significativas nas medidas de desempenho da via principal e da rede, enquanto as defasagens do *SBAND* resultaram em reduções no tempo de percurso e no atraso, ocasionando aumento no número de paradas;

- Situação 2b (via principal com duplo sentido e baixo volume de tráfego, contendo várias interseções semaforizadas, e vias transversais com fluxo baixo): as coordenações geradas pelos dois programas apresentaram reduções nas medidas de desempenho da via principal e da rede, sendo mais significativas as reduções obtidas pelos planos do *INTEGRATION*;
- Situações 3a e 3b (via principal com duplo sentido e baixo volume de tráfego, contendo poucas interseções semaforizadas, e vias transversais com fluxo baixo): ambos programas resultaram em porcentagens significativas de redução nas medidas de desempenho da via principal e para toda a rede, com melhores valores gerados pela coordenação do *SBAND*.

Por fim, com base no trecho da Avenida Higienópolis (situação 1) que apresenta 8 interseções praticamente equidistantes com elevado fluxo na via principal e nas transversais, e supondo a situação em que este distanciamento seja tal que os veículos percorram cada quadra na metade do ciclo, as defasagens geradas tanto pelo programa *INTEGRATION* quanto com o programa *SBAND* proporcionam melhorias significativas nas medidas de desempenho avaliadas.

Os resultados das simulações demonstram quantitativamente o potencial dos sistemas baseados na máxima largura da banda, que apropriadamente coordenados reduzem paradas, tempo de percurso e principalmente atraso nas interseções semaforizadas. Conforme já havia sido mencionado por Gartner *et al.* (1990), os maiores benefícios dos métodos de maximização da banda podem ser observados quando a via principal tem tráfego de passagem predominante e o número de veículos entrando nesta via é pequeno, ou nos casos de volumes moderados ou baixos, enquanto a coordenação baseada na minimização dos atrasos e paradas demonstra-se mais apropriada para ser utilizada nas situações com elevados volumes de tráfego.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos resultados sugere as condições para as quais recomenda-se a utilização do programa *SBAND* ou do programa *INTEGRATION* para definição do plano de coordenação a ser adotado, em função das características das vias, conforme esquematizado na Tabela 10.

Tabela 10: Programa de coordenação recomendado de acordo com as características das vias

Condição do Tráfego		Programa sugerido para o Corredor Principal	
Via principal	Vias secundárias	Via de duplo sentido	Via de sentido único*
elevado	elevado	INTEGRATION**	—
elevado	moderado	SBAND	—
moderado	moderado	INTEGRATION**	INTEGRATION
moderado	baixo	SBAND (até 5 semáforos)	SBAND
		INTEGRATION (acima 5 semáforos)	
baixo	baixo	SBAND (até 5 semáforos)	—
		INTEGRATION (acima 5 semáforos)	

* as situações sem sugestão correspondem aos cenários não testados.

** o programa *SBAND* também é recomendado para o caso de distância entre os semáforos percorrida na metade do ciclo.

Os valores das medidas de desempenho avaliadas indicam maiores benefícios com a utilização do programa *SBAND* - baseado na maximização da banda verde - para situações em que o tráfego de passagem da via principal é maior do que nas secundárias, ou para redes com baixo fluxo e até 5 semáforos. O programa *SBAND* pode ser utilizado ainda nas situações com ele-

vado volume de tráfego na via principal e secundárias, onde haja espaçamento praticamente equidistante entre as interseções, especialmente no caso em que a distância entre elas seja percorrida na metade do ciclo. Porém, a dificuldade de coordenação é maior à medida que o espaçamento diminui, afastando da situação ideal de distância percorrida na metade do ciclo.

Os planos de coordenação gerados pelo programa *INTEGRATION* - baseado na minimização de atrasos e paradas - são recomendados para situações em que o volume de tráfego na via principal e nas vias secundárias é semelhante, principalmente para os casos com mais de 5 semáforos ao longo do corredor principal.

Vale salientar que o programa *SBAND* apresenta a vantagem de proporcionar em pouco tempo, especialmente para as situações com tráfego preferencial de passagem nas vias arteriais, propostas de planos similares ou mais eficientes do que aqueles obtidos por tentativa e erro, evitando sucessivos ajustes nas programações semaforicas e interferências diretas no tráfego. Portanto, o programa *SBAND* pode ser considerado como uma maneira alternativa e simplificada para obtenção da estratégia de coordenação semaforica *off-line*, principalmente para municípios de pequeno e médio porte. Devido à sua facilidade de utilização e eficiência de aplicação em algumas condições específicas, os planos de coordenação gerados pelo programa *SBAND* poderão contribuir com o trabalho de analistas e operadores de tráfego envolvidos com a busca da melhoria na qualidade operacional das vias urbanas nas cidades brasileiras.

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 da EESC/USP. O segundo autor deste trabalho agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colella, D.A.T.; Lima, E.P.; Demarchi, S.H. (2004) Calibração e Validação do Modelo Fluxo-Velocidade do *INTEGRATION* para Vias Urbanas Semaforizadas. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, v.1, p.453-464.
- Demarchi, S.H. (2000) *Influência dos Veículos Pesados na Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Dupla*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP, 166 p.
- Demarchi, S.H.; Colella, D.A.T.; Bertoini, B.V. (2003) Determinação da Densidade de Congestionamento em Filas de Interseções Semaforizadas. *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ, v.1, p.476-488.
- Demarchi, S.H.; Dutra, C.B. (2004) Coordenação Semaforica Através do Método de Maximização da Banda Verde. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, v.1, p.503-514.
- Dutra, C.B. (2005) *Avaliação da Eficiência de Métodos de Coordenação Semaforica em Vias Arteriais*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP, 189 p.
- Dutra, C.B.; Demarchi, S. H. (2004) Métodos de Coordenação Semaforica: Estado da Arte versus Estado da Prática em Cidades Brasileiras. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, meio magnético.
- Gartner, N.H.; Assmann, S.F.; Lasaga, F.; Hou, D.L. (1990) MULTIBAND: A Variable - Bandwidth Arterial Progression Scheme. *Transportation Research Record*, 1287, p.212-222.
- Little, J. D. C. (1966) The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming. *Operations Research*, v. 14, n.4, p.568-93.
- Loureiro et al. (2005) *Avaliação da Adequabilidade do HCM2000 na Análise de Capacidade e Nível de Serviço de Vias Arteriais Urbanas Brasileiras*. Relatório final de atividades, RedeTráfego.
- Morgan, J.T.; Little, J.D.C. (1964) Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. *Operations Research*, v.12, n.6, p.896-912.
- Rakha, H. (2004) *INTEGRATION Release 2.30 for Windows: User's Guide*. Vol. I e II. Michel Van Aerde and

Associates, Ltd. Kingston, Ontario, Canada.

Site da Prefeitura de Londrina (2005) Disponível em <http://www.londrina.pr.gov.br>. Acesso em 02/05/2005.

Site da Prefeitura de São Carlos (2005) Disponível em <http://www.saocarlos.sp.gov.br>. Acesso em 02/05/2005.

Van Aerde, M. (1998) *QUEENSOD Release 2.10 - User's Guide*: Estimating Origin Destination Traffic Demands from Link Flow Counts. Michel Van Aerde and Associates, Blacksburg, VA.