

Operação em rede arterial sob controle semafórico do tipo *fuzzy*

Michelle Andrade¹, Maria Alice P. Jacques² e Marcelo Ladeira³

Resumo: Diferentes estudos tem considerado o uso da lógica *fuzzy* no controle semafórico atuado pelo tráfego. Verificado o potencial destes controladores para o controle do tráfego em interseções isoladas, os estudos estão agora evoluindo para seu emprego em rede. A característica robusta dos controladores semafóricos *fuzzy* foi recentemente verificada através de simulações realizadas com uma estrutura de controlador amplamente utilizada em estudos anteriores, visando a avaliação do seu desempenho adaptativo quando disposto em rede aberta. Diante destes resultados foi possível considerar possibilidades de melhorias do desempenho deste controlador para a operação em rede arterial a partir de medidas simplificadas voltadas à promoção de uma cooperação implícita entre os controladores isolados. Assim, este artigo apresenta duas alternativas para o aprimoramento da operação em rede arterial com o uso de controladores semafóricos *fuzzy*. Os testes dessas alternativas em simulador apresentaram resultados bastante positivos indicando direções para a continuidade da pesquisa.

Palavras-chave: controlador semafórico *fuzzy*, controle em rede, operação em rede.

Abstract: Different studies consider the use of fuzzy logic in actuated signal control of traffic. Verified the controllers' potential in traffic control at isolated intersections, studies are now being developed concerning controllers' use in networks. Fuzzy signal controllers' robustness was recently verified by simulations conducted through a controller structure widely used in previous studies so as to assess their adaptive performance in an open network. In light of the results, it was possible to consider the chances of improving performance of these controllers in operating an arterial network based upon simplified measures geared towards fostering implicit cooperation among isolated controllers. Thus, this article presents two alternatives for improving arterial network operation through the use of fuzzy signal controllers. The tests for these alternatives in a simulator indicate greatly positive results and provide directions for continued research.

Keywords: fuzzy signal controller, network control, network operation.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da lógica *fuzzy* para o controle semafórico isolado tem apresentado resultados promissores desde os trabalhos iniciais propostos por Pappis e Mamdani (1977) até os testes em campo realizados por Niittymäki (2001). É relevante destacar que a estrutura dos controladores semafóricos *fuzzy* (CSF) desenvolvidos para a operação de interseções isoladas é, em sua maioria, muito similar. Ou seja, os antecedentes e os consequentes das regras *fuzzy*, bem como outros elementos do controlador (por exemplo, tipo de controlador *fuzzy*, tipo de base de regra, tipo de função de pertinência, métodos de defuzzificação) são similares para a maioria dos estudos apresentados (Pappis e Mamdani, 1977; Favilla *et al.*, 1993; Chiu e Chand, 1993; Kim, 1997; Niittymäki, 1998; Murat e Gedizlioglu, 2002).

Estudos recentes realizados com essa estrutura de CSF buscaram avaliar os elementos que os compõem e seus impactos no desempenho do tráfego (Jacques *et al.*, 2002a; Jacques *et al.*, 2002b; Jacques *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2005; Andrade e Jacques, 2008a; Andrade e Jacques, 2008b). Esses resultados viabilizaram a maior compreensão destes

controladores motivando pesquisas voltadas à ampliação de suas aplicações, por exemplo, para redes semafóricas.

Ao analisar o escopo do controle semafórico *fuzzy* em rede é possível verificar que os trabalhos disponíveis na literatura apresentam estruturas de controle bastante diferenciadas, ao contrário do que é observado no controle isolado. Embora essas investigações tragam vantagens relativas à diversidade dos elementos explorados, por outro lado não conseguem se beneficiar dos resultados obtidos em outros estudos realizados através do emprego da lógica *fuzzy* em casos mais simplificados. Já a abordagem adotada por Niittymäki (1999) e Andrade *et al.* (2010), que realizaram estudos preliminares da operação em rede utilizando CSF projetados originalmente para a operação isolada, obtiveram resultados motivadores relacionados à essa operação. Assim, o objetivo do presente trabalho é investigar alternativas de cooperação entre CSF projetados para operação isolada, visando o controle do tráfego em redes abertas, que não impliquem na mudança da estrutura lógica básica desses controladores.

Este artigo apresenta a proposta e a avaliação de duas alternativas para favorecer a operação de CSF isolados distribuídos em redes arteriais. Para tanto, o texto está estruturado em cinco seções, sendo esta Seção 1 introdutória, seguida da segunda seção que traz uma breve revisão de literatura relacionada à operação semafórica em rede utilizando lógica *fuzzy*. A Seção 3 apresenta a concepção das propostas para a operação em rede de controladores semafóricos *fuzzy* e a metodologia utilizada para a realização dos testes e avaliações das propostas apresentadas. A quarta seção traz a análise dos resultados obtidos, os quais são apresen-

¹ Michelle Andrade, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil. (e-mail: maccivil@gmail.com).

² Maria Alice P. Jacques, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. (e-mail: mapj@unb.br).

³ Marcelo Ladeira, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. (e-mail: mladeira@unb.br).

Manuscrito recebido em 26/4/2011 e aprovado para publicação em 26/7/2011. Este artigo é parte de TRANSPORTES v.19, n.2, 2011. ISSN: 2237-1346 (online).

tados sob dois aspectos: (a) análise global e (b) análise por tipo de via. A última seção do artigo traz as conclusões relativas aos estudos realizados.

2. CONTROLE SEMAFÓRICO FUZZY EM REDE

Diversos estudos voltados ao controle semafórico em rede já foram desenvolvidos utilizando a lógica *fuzzy*, tais como os estudos de Nakatsuyama *et al.* (1984), Chiu e Chand (1993), Kim (1994) e Lee e Kwang (1999). Em geral, estes estudos contemplam o desenvolvimento de um sistema específico para a operação da rede testada. Dessa forma, cada trabalho traz um novo método de controle não testado anteriormente em uma estrutura mais simplificada.

Nakatsuyama *et al.* (1984) propuseram a coordenação de duas interseções ao longo de uma via arterial, utilizando uma estrutura cooperada de controladores composta de um controlador baseado na proposta de Pappis e Mamdani e de outro controlador denominado controlador de fase *fuzzy*. Os resultados de simulação apresentados comprovaram as vantagens em termos de atrasos veiculares para a operação cooperada quando comparada à operação utilizando apenas um dos dois tipos de controladores *fuzzy* apresentados. O controlador traz resultados mais satisfatórios para condições de grande variação nos volumes veiculares (horários entre pico).

O sistema proposto por Chiu e Chand (1993) prevê o controle em uma pequena rede fechada através do ajuste de três parâmetros de programação semafórica (ciclo, fase e defasagem) em função das condições de tráfego e dos tempos semafóricos das interseções adjacentes. Para o ajuste de cada parâmetro há um conjunto de regras específico, que compõe um sistema de controle do tipo distribuído. Os resultados dos testes realizados por meio de simulação comprovaram os benefícios da utilização do controle adaptativo em toda a rede e, ainda, mostraram que a utilização deste sistema em estruturas de redes muito pequenas não é adequada para condições de tráfego muito diferenciadas, que resultem em tempos de ciclo muito diferentes ao longo da rede.

S. Kim (1994) traz uma abordagem de operação em rede realizada através da adição de regras a serem aplicadas em situações de bloqueio iminente de interseção. As regras visam impedir a entrada de veículos nos *links* que estão próximos de uma situação de saturação. Nos casos em que não é detectada nenhuma condição iminente de bloqueio o controlador atua com as regras definidas para a operação isolada.

O sistema proposto por Lee e Kwang (1999) é composto de três módulos gerenciados por algoritmos *fuzzy* que operam de modo cooperativo. A avaliação do sistema proposto foi feita por meio de simulação para 18 condições de tráfego e duas formas de volume veicular (fixo e variável ao longo da hora de simulação). Os resultados do sistema proposto foram comparados a resultados obtidos pelo controle do tipo veículo-atuado, através do atraso médio, em que a superioridade do novo modelo foi comprovada. Os autores afirmam que cada controlador do sistema é definido como um componente ativo (autônomo) e, assim, o modelo proposto pode ser aplicado para qualquer configuração de re-

de, independentemente do número de interseções ou de posicionamento relativo das interseções.

Niittymäki (1999) trouxe uma abordagem diferenciada, com características de avaliação preliminar dos controladores semafóricos *fuzzy* isolados (controlador do projeto FUSICO) dispostos em rede. Os resultados desta investigação motivaram estudos mais abrangentes como os apresentados em Andrade *et al.* (2010), que avaliaram a capacidade adaptativa de controladores *fuzzy* projetados para a operação isolada quando dispostos em diferentes configurações de rede. Os resultados destes estudos revelam uma nova possibilidade para as pesquisas relacionadas à operação em rede de CSF, em que o conhecimento desenvolvido para esses controladores para a operação isolada pode ser utilizado visando a operação em rede.

3. ALTERNATIVAS PARA COOPERAÇÃO IMPLÍCITA DE CFS EM REDE

O estudo exploratório desenvolvido por Andrade *et al.* (2010) mostrou a robustez do controlador semafórico *fuzzy* (CSF) considerado. Sem qualquer ajuste para priorizar o movimento da via arterial e mantendo a estrutura original do controlador definido para a operação isolada, os testes realizados resultaram em medidas de desempenho similares ou melhores que as obtidas pela operação em tempo fixo, com programação voltada para a operação coordenada. Esse resultado foi um grande motivador para a busca de alternativas que melhorassem o desempenho deste controlador na operação em rede aberta.

Os controladores semafóricos *fuzzy*, sendo do tipo totalmente atuado pelo tráfego, apresentam tempos de ciclo variáveis em função do fluxo veicular. Assim, não é possível utilizar mecanismos formais de coordenação semafórica e, ao mesmo tempo, manter as características adaptativas intrínsecas do CSF para o controle de cada interseção da rede. Porém, uma cooperação entre os controladores distribuídos na rede pode ser utilizada no sentido de privilegiar o movimento em uma dada direção, como no caso de redes arteriais.

A cooperação semafórica pode ser feita de duas formas: (a) cooperação explícita, em que cada controlador da rede tem informações do tráfego nas suas aproximações, nas interseções adjacentes e, se desejável, informações de área, para a utilização desse conjunto na tomada de decisão dos tempos semafóricos dos controladores da rede; ou (b) cooperação implícita através de ações de priorização restritas a cada controlador, sem alterar sua forma original de tomada de decisão (quantidade e tipo variáveis de entrada e de saída), mas que afetem os resultados da inferência dos controladores da rede no sentido de priorizar a fluidez e viabilizar a continuidade de movimento para pelotões na direção desejada. Essa alternativa de cooperação é de interesse primário desta linha de pesquisa devido à sua simplicidade lógica, coerência com procedimentos já testados para controle por tempo fixo e coordenado, e especialmente por manter a estrutura original do CSF já testado em interseções isoladas.

As alternativas propostas e testadas nesse estudo prevêem a cooperação implícita de CSF para o controle de uma

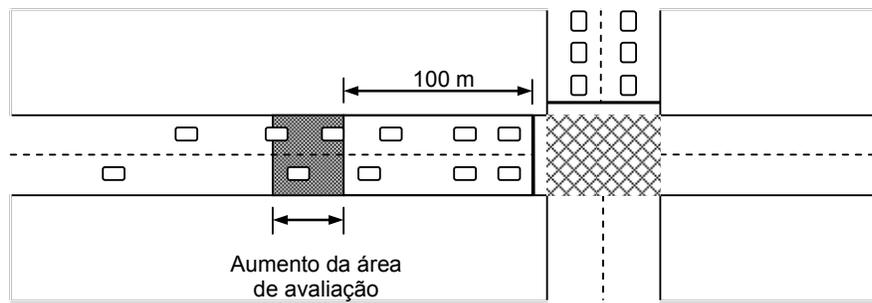


Figura 1. Representação do aumento da área de avaliação do controlador semafórico fuzzy

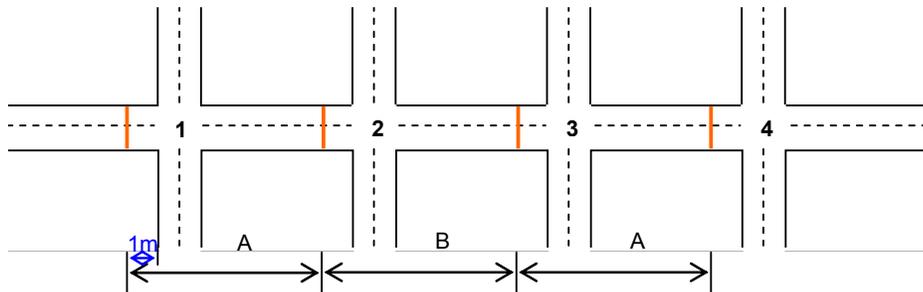


Figura 2. Representação geral do trecho viário estudado

rede arterial. Assim, os controladores *fuzzy* permanecem com sua estrutura inalterada, inclusive quanto à base de regras e aos conjuntos *fuzzy*, sendo que a diferença entre as duas alternativas propostas está na “leitura do ambiente controlado” que resulta nos dados de entrada do controlador.

3.1. Alternativa A1: Atribuição de pesos à via arterial

A Alternativa A1 para a cooperação implícita dos CSF consiste na atribuição de pesos associados ao número de veículos presentes nas aproximações relativas à via principal. Os pesos atribuídos afetam o controlador *fuzzy* na tomada de decisão uma vez que o número real de veículos nas aproximações da via arterial é acrescido de um percentual deste valor, fazendo com que o controlador “enxergue” mais veículos do que realmente existe na aproximação. A proposta consiste, portanto, na indução da priorização do movimento da via arterial através da majoração das informações de tráfego para essa via.

Para avaliar a metodologia proposta foram testados dez pesos de majoração do número de veículos nas aproximações arteriais, variados a cada 20%: 1,2, 1,4, 1,6, até 3,0. Assim, ao atribuir o peso 1,2, o número de veículos informado ao controlador será o número de veículos contados na área de avaliação da via arterial aumentado em 20%.

3.2. Alternativa A2: Aumento da área de avaliação do controlador fuzzy

Essa alternativa prevê o aumento da área de avaliação do controlador *fuzzy* junto às aproximações da via arterial (ver Figura 1). O referido aumento impacta na tomada de decisão da extensão do tempo de verde, uma vez que o controlador tem acesso a uma área maior de avaliação.

Nessa alternativa, portanto, o controlador está sujeito a computar um número superior de veículos para uma dada situação de tráfego quando comparado à avaliação realizada na área originalmente concebida para o controlador, corres-

pondente à extensão de 100 m a partir da linha de retenção. Para avaliar a proposta foram previstas cinco ampliações da área de avaliação original, com intervalos de 25 metros. Assim, foram testados os casos com início da área de avaliação localizados a 125, 150, 175, 200 e 225m da linha de retenção.

3.3. Procedimentos de testes e metodologia de análise das alternativas propostas

Como o objetivo deste estudo passa pela análise do efeito da forma de disposição do CSF isolado em redes arteriais, é desejável um cenário simplificado para minimizar os efeitos de complicadores operacionais nas medidas de desempenho. Assim, a estrutura viária testada é composta de duas faixas por aproximação, sentido único de tráfego, em que não são permitidos movimentos de conversão. As redes arteriais são compostas de quatro interseções sequenciais distanciadas entre si de “A” e “B” metros (Figura 2). Os espaçamentos para os testes realizados foram definidos a partir do estudo exploratório disponível em Andrade (2009): (1) rede 111 (100m-100m-100m), (2) rede 333 (300m-300m-300m), (3) rede 313 (300m-100m-300m) e (4) rede 131 (150m-350m-150m).

Em função da estrutura da rede 100-100-100 não permitir as variações propostas pela Alternativa A2, esta configuração de rede não foi utilizada para este caso. A velocidade operacional na rede é de 50km/h, e o fluxo veicular (formado somente por carros de passeio) foi definido em função do grau de saturação (GS) por aproximação sob o controle por tempo fixo admitindo o tempo perdido de cada fase igual ao tempo de entre-verdes (5segundos). Foram considerados três níveis de carregamento definidos pelo grau de saturação (GS): Alto ($Vol_A=2200 \times 660vph$ e $GS_A=0.89 \times 0.87$); Médio ($Vol_M=1600 \times 500vph$ e $GS_M=0.72 \times 0.72$) e Baixo ($Vol_B=1200 \times 400vph$ e $GS_B=0.50 \times 0.50$). As características do controlador semafórico *fuzzy* testado são as mesmas do controlador utilizado no estudo de An-

drade *et al.* (2010).

O microssimulador de tráfego UnB-Sitracs foi selecionado para este estudo em função das formas de controle disponíveis (controle por tempo fixo e atuado, que inclui o controle *fuzzy*) e, especialmente, devido à flexibilidade de realizar as modificações necessárias para testar as alternativas de controle arterial propostas (UnB-Sitracs, 2009).

As análises foram realizadas sobre os resultados de simulação obtidos para cada uma das alternativas propostas e, por fim, comparadas entre si para verificar a melhor opção de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* para o controle das redes abertas testadas. Com o intuito de verificar, tanto o desempenho da rede de modo global, como da fluidez na via arterial, as análises foram realizadas nesses dois níveis.

Para cada caso foram contempladas análises descritivas realizadas a partir dos valores médios das medidas de desempenho do tráfego e de testes de significância estatística. A análise descritiva é baseada em análises gráficas de cunho comparativo através de diagramas de barras verticais construídos a partir de valores médios obtidos para as trinta horas de simulação consideradas.

Os testes de significância definidos inicialmente para o estudo foram a Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey. Porém, a aplicação destes testes prevê a normalidade dos grupos (amostras) e a homogeneidade das variâncias dos grupos comparados. Em caso de não atendimento das premissas de utilização destes testes, que são paramétricos, foram aplicados os testes não-paramétricos correspondentes, ou seja, Wilcoxon, para análise de 2 grupos e Kruskal-Wallis, para análise de 2 ou mais grupos.

A verificação da normalidade dos grupos de dados foi feita mediante a aplicação de quatro testes: Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises e Anderson-Darling. Para este estudo um grupo não é considerado “normal” se dois testes, ou mais, apontarem diferenças significativas. Nesse caso os testes subsequentes são do tipo não-paramétrico. Os grupos que atenderam ao teste de normalidade foram submetidos à verificação da homogeneidade das suas variâncias através do teste de Levene. Em caso afirmativo os testes seguintes são paramétricos (ANOVA e Tukey), caso contrário, os testes não-paramétricos completam o estudo (Wilcoxon e/ou Kruskal-Wallis). Todos os testes estatísticos foram realizados por meio da utilização do software SAS® (*Statistical Analysis System*).

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta as análises relativas às duas alternativas de cooperação semafórica propostas. São apresentadas para cada alternativa as análises (i) globais, ou seja, para a toda a rede, e (ii) por tipo de via. As análises globais tem o propósito de avaliar o impacto da priorização da via arterial em toda a rede, sendo que os dados obtidos permitem verificar, ainda, como as configurações de rede testadas influenciam no desempenho do tráfego sob as condições de tráfego e de priorização testadas. É importante destacar que a análise global da rede nada pode dizer acerca da progressão ao longo da rede, mas sim sobre o desempenho global do sistema sob controle. A avaliação da progressão só pode ser

realizada numa análise feita por tipo de via.

4.1. Alternativa A1: Peso para a via arterial

São apresentadas a seguir as análises, global e por tipo de via, relativas à alternativa de cooperação semafórica para redes arteriais que prevê a atribuição de pesos para o número de veículos presentes nas aproximações da via arterial.

4.1.1. Análise global

Em termos de volume veicular alto é possível concluir que, se o objetivo do controle semafórico para as arquiteturas de rede estudadas for reduzir os valores das medidas de desempenho para a rede como um todo, a proposta de cooperação não traz benefícios significativos em comparação ao controle *fuzzy* convencional aplicado às interseções ao longo da rede arterial. Para esse volume veicular verifica-se que apenas na rede 111 ocorreram casos com diferenças estatisticamente significativas para o atraso médio e o número de paradas por veículo. Neste caso, a operação da rede com os pesos 1,6 e 1,8 apresentaram os melhores resultados, com uma redução de aproximadamente 6% do atraso médio por veículo em relação à operação sem priorização do fluxo na via arterial. A rede 313 sob volume alto também apresentou diferenças estatisticamente significativas, porém apenas para o número de paradas por veículo. Para esse caso os pesos que resultaram nos melhores resultados para essa medida de desempenho foram 1,8, 1,6, 1,4, 2,2 e 2,0, respectivamente. Assim, para as quatro estruturas de rede em operação sob volume alto, os pesos 1,6 ou 1,8 poderiam ser utilizados sem causar prejuízos, sob a análise global da rede, trazendo ainda benefícios em relação à operação sem priorização da via arterial para as redes 111 e 313.

A Tabela 1 apresenta as melhores alternativas de peso em função dos volumes veiculares médio e baixo, da arquitetura da rede e do objetivo do controle. Nesta análise é possível verificar que na avaliação da rede como um todo a Alternativa A1 mostrou-se eficiente em alguns casos isolados. Embora se tenha verificado para os volumes médio e baixo diferenças estatisticamente significativas para todas as estruturas de rede e medidas de desempenho analisadas, a maioria dos casos apresentou os melhores resultados com os pesos que foram estatisticamente iguais aos obtidos com o peso 1,0, ou seja, sem priorização da via arterial. Dos 24 cenários testados considerando volumes médio e baixo, somente 8 apresentaram resultados estatisticamente melhores e que justificam a aplicação da proposta de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* (ver Tabela 1).

De modo geral, todas as redes apresentam o mesmo padrão de comportamento em função da variação dos pesos (salvo para número de paradas por veículo sob volume baixo), porém, com valores absolutos diferentes. Essas diferenças observadas nos valores absolutos das medidas de desempenho comprovam que a arquitetura de rede impacta no desempenho global do tráfego.

4.1.2. Análise por tipo de via

Ao analisar os resultados por tipo de via (Figuras 3) destaca-se inicialmente que o volume alto (Figura 3a) apresentou atraso veicular médio sempre pior para a via arterial em relação à secundária, exatamente o contrário do que é observado para os volumes médio (Figura 3b) e baixo. Esse fato

Tabela 1. Melhores alternativas de pesos para as aproximações da via arterial

<i>Objetivo</i>	<i>Arquitetura da Rede Arterial</i>	<i>Volume Veicular</i>	<i>Peso atribuído às aproximações da via arterial</i>
Reduzir o atraso global da rede	111	Médio*	1.4
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
	131	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
	313	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		Baixo*	1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
Reduzir o percentual de paradas veiculares global da rede	111	Médio*	1.2
		Baixo	1.0 ou 1.2
	131	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6 ou 1.8
		Baixo	1.0, 1.2 ou 1.4
	313	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
		Baixo	1.0 ou 1.2
Reduzir as paradas por veículos na rede	111	Médio*	1.4
		Baixo	1.0 ou 1.2
	131	Médio	1.0, 2.6, 2.8 ou 3.0
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 ou 2.4
	313	Médio*	2.0
		Baixo*	1.4
333	Médio*	2.0 ou 2.2	
	Baixo*	1.8 ou 2.0	

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com o peso 1.0.

é decorrente do alto volume veicular que resulta em filas residuais na operação da via arterial. Ainda assim, para todos os volumes estudados, foi possível verificar melhora nas medidas de desempenho da via arterial com o aumento dos pesos dados aos veículos presentes nesta via. Os valores dessas medidas nas vias secundárias, via de regra, pioraram. Esse efeito já era esperado em função da prioridade dada à via arterial, comprovando que a atribuição de pesos ao número de veículos nas aproximações arteriais impactou na priorização da corrente de tráfego nessa direção.

Em termos de atraso veicular, os prejuízos observados para as vias secundárias foram mais representativos para os volumes médio e baixo. No caso do volume alto, foi possível obter um desempenho mais equilibrado entre os dois tipos de via com o incremento dos pesos. Por exemplo, para a rede 111, os atrasos obtidos para a via secundária foram 45% menores que os obtidos para a via principal, para o caso padrão (peso 1,0) e para o peso 3,0 essa diferença caiu para 34%. Para o volume médio, na mesma arquitetura de rede, o atraso da via secundária foi 87% maior que da via arterial para o caso padrão (peso 1,0) e aumentou para 342% quando o peso associado para a via arterial foi 3,0. Ou seja, ao aumentar o peso da via arterial é possível visualizar os benefícios obtidos para esta via, porém os prejuízos resultantes nas vias secundárias, especialmente para os volumes médio e baixo, exigem uma análise mais criteriosa que leve em conta o desempenho desejado para a operação da interseção.

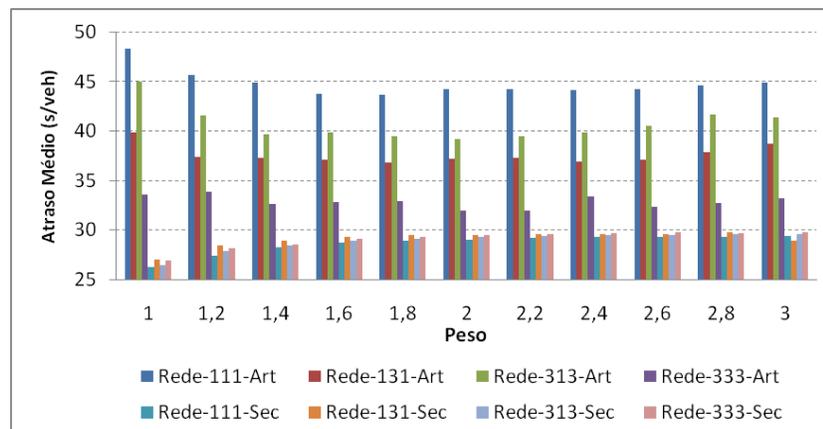
Os testes estatísticos realizados revelaram que para o volume alto as mudanças observadas no desempenho do tráfego foram, em geral, significativas em relação à operação do controlador *fuzzy* na rede sem a atribuição de pesos ($p=1,0$). Em termos percentuais é possível exemplificar os

impactos, tais como os obtidos para a rede 111, em que o melhor resultado foi observado para o uso do peso 1,8 com melhora de 10% para a via arterial, e piora em 10% nas vias secundárias, em relação à operação *fuzzy* sem priorização (peso = 1,0).

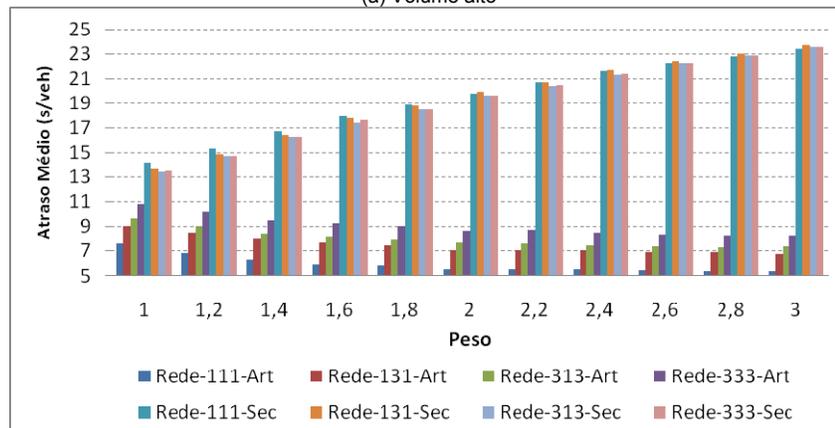
Para os volumes médio e baixo foram também observados casos de priorização estatisticamente significativa, tais como para o atraso médio por veículo, com os pesos 2,8 e 3,0, com ganhos de aproximadamente 30% em relação à operação padrão ($p=1,0$). Para esses casos, no entanto o aumento do atraso médio nas vias secundárias com a priorização implementada na via arterial chegou à aproximadamente 80% em relação à operação padrão do controlador *fuzzy* em rede ($p=1,0$).

O percentual de paradas veiculares e número de paradas por veículo para o volume alto apresentou resultados diferenciados dos obtidos para o atraso médio, uma vez que os ganhos obtidos para a via arterial com a priorização em relação ao resultado padrão foram aproximadamente iguais aos medidos em termos de atraso veicular (aproximadamente 10%), porém com menores prejuízos para as vias secundárias (em média, 5%).

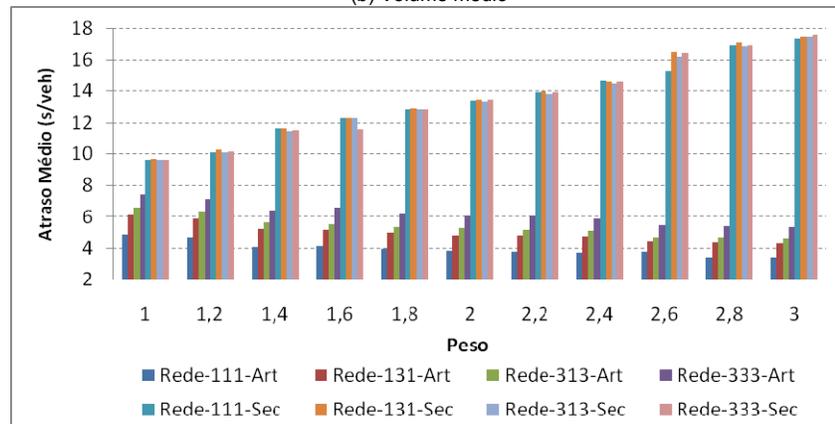
Para o volume médio, o percentual de paradas veiculares seguiu o mesmo padrão observado no atraso médio, porém os ganhos obtidos para a via arterial foram mais expressivos que os prejuízos observados para as vias secundárias, sendo que no nível máximo de priorização arterial avaliado ($p=3,0$) a redução do percentual de paradas veiculares na via principal foi na ordem de 40% enquanto que na via secundária os aumentos desta medida de desempenho ficaram na ordem de 30%. O número de paradas por veículo apresentou resultados similares aos obtidos para o percentual de paradas veiculares, sendo que, em geral, os ganhos relati-



(a) Volume alto



(b) Volume médio



(c) Volume baixo

Figura 3. Atraso Médio por tipo de via e por configuração de rede

vos obtidos para a via arterial são da mesma proporção das perdas observadas nas secundárias. Esses valores variam de 20% a 40% para os casos testados neste estudo.

Na análise específica para via arterial não foi realizada uma identificação dos melhores pesos para sua operação como feito na análise global, pois, assim como ocorreu em muitos casos da análise global, a maioria dos pesos testados resultou em diferenças não estatisticamente diferentes entre si. Porém, diferentemente do observado na análise global, a maioria dos resultados apresentados para a via arterial foi estatisticamente diferente do peso básico ($p=1,0$).

4.2. Alternativa A2: Ampliação da Área de avaliação do CSF

São apresentadas neste tópico as análises, global e por tipo de via, relativas à alternativa de cooperação semafórica para redes arteriais que prevê a ampliação da área de avaliação do controlador relativa às aproximações da via arterial.

4.2.1. Análise global

As medidas de desempenho mostram que, para o volume alto, o desempenho do tráfego foi pouco sensível às variações da área de avaliação do CSF, resultando em diferenças não estatisticamente significativas para os casos testados, especialmente para atraso médio. Assim, para o volume al-

Tabela 2. Melhores alternativas para DLR em termos globais

<i>Objetivo</i>	<i>Arquitetura da Rede Arterial</i>	<i>Volume Veicular</i>	<i>DLR = distância do detector de tráfego até a linha de retenção</i>
Reduzir o atraso global da rede	131	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100, 125 ou 150 m
		Médio	100 ou 125 m
	313	Baixo	100, 125 ou 150 m
		Médio*	125, 150 ou 175 m
	333	Baixo*	150 ou 175 m
Reduzir o percentual de paradas veiculares global da rede	131	Médio	100 m
		Baixo	100 m
		Médio	100 ou 125 m
	313	Baixo	100 m
		Médio	100 m
	333	Baixo	100 ou 125 m
Reduzir as paradas por veículos na rede	131	Médio	100 m
		Baixo	100 m
		Médio	100 ou 125 m
	313	Baixo	100 ou 125 m
		Médio*	175 m
	333	Baixo*	125 m

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com DLR=100m.

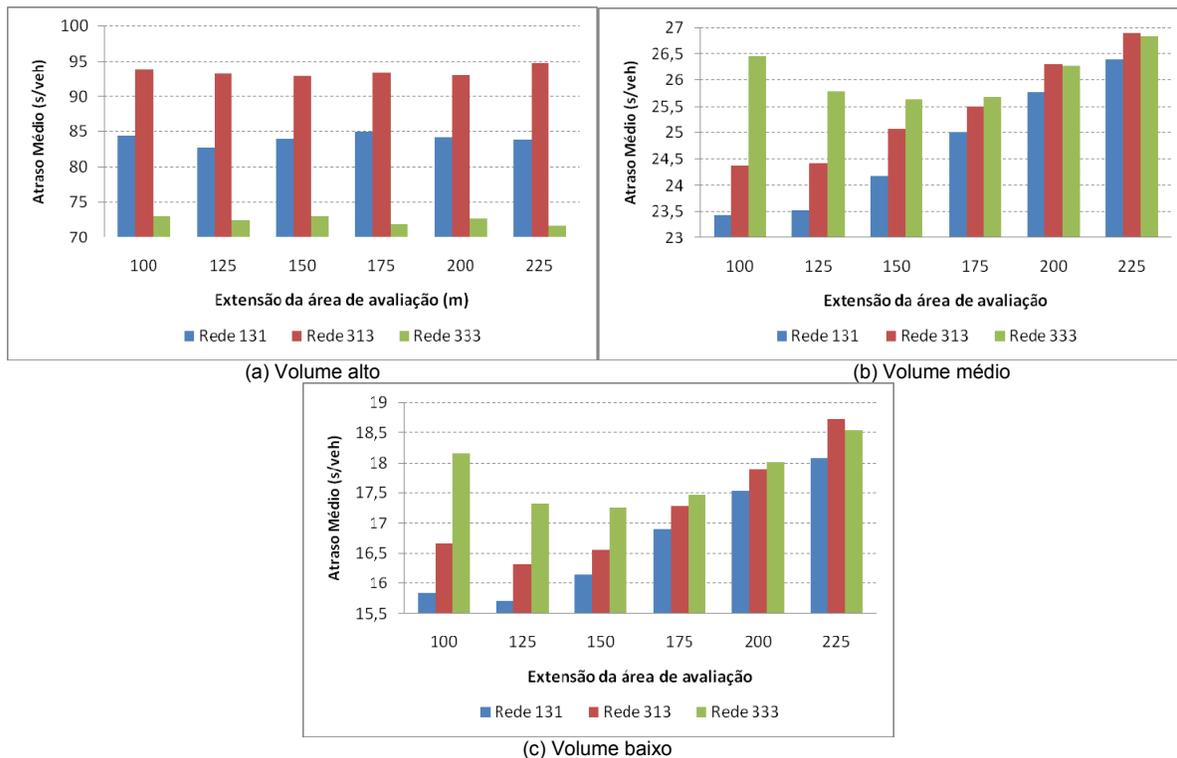


Figura 4. Atraso Médio Global por configuração de rede para a Alternativa A2

to, verifica-se que de modo geral a Alternativa A2 não traz ganhos em termos globais do sistema.

Para os volumes médio e baixo os resultados apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Vale observar, entretanto, que dos 18 casos testados, apenas 4 apresentaram resultados vantajosos e estatisticamente diferentes em relação ao caso básico (DLR-100), como mostra a Tabela 2. Para esses níveis de volume o desempenho do tráfego na rede variou de modo significativo frente aos cinco níveis de priorização propostos na Alternativa A2, tanto melhorando quanto piorando o desempenho na rede. Este desempenho refere-se tanto ao atraso médio quanto ao nú-

mero de paradas por veículo. A Figura 4 ilustra os resultados globais obtidos para os volumes alto e médio, em que é possível verificar também que quando o objetivo do controle for priorizar a via arterial, a Alternativa A2 apresentou vantagens de aplicação apenas para a arquitetura de rede 333 (Tabela 2).

4.2.2. Análise por tipo de via

A operação sob o volume alto (Figura 5a) trouxe resultados, em sua maioria, não estatisticamente diferentes para as medidas de desempenho obtidas para a via arterial. Apenas a rede 333 apresentou diferenças estatisticamente significa-

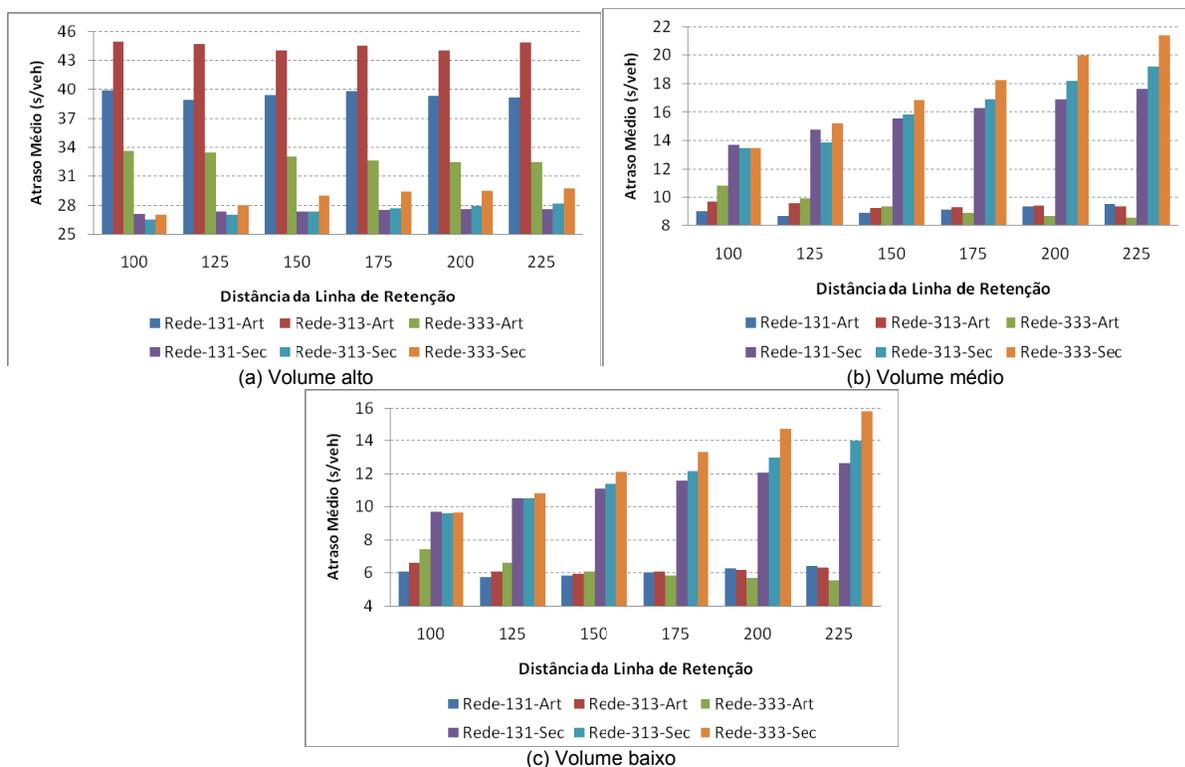


Figura 5. Atraso médio para por tipo de via e por configuração de rede

Tabela 3. Melhores alternativas para DLR para a via arterial

Objetivo	Arquitetura da Rede Arterial	Volume Veicular	DLR = distância do início da área de avaliação até a linha de retenção
Reduzir atrasos da via arterial	131	Médio*	125 m
		Baixo*	125 m
	313	Médio*	150, 175 ou 200 m
		Baixo*	150 m
	333	Médio*	200 ou 225 m
		Baixo*	175, 200 ou 225 m
Reduzir o percentual de paradas veiculares ou paradas por veículos na via arterial	131	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100 ou 125 m
	313	Médio	100 ou 125 m
		Baixo*	125 ou 150 m
	333	Médio*	175 ou 200 m
		Baixo*	150, 175, 200 ou 225 m

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com DLR=100m.

tivas para o percentual de paradas veiculares, sendo que a alternativa mais vantajosa para a via arterial com esta arquitetura de rede submetida ao volume alto foi a DLR-225, ou seja, o início da área de avaliação localizado a uma distância da linha de retenção (DLR) igual a 225m. A melhoria observada para esse caso foi de 5% para a via principal, associada ao aumento de 9% nos atrasos para as vias secundárias.

Para os volumes médio (Figura 5b) e baixo ocorreram, em todas as medidas de desempenho, casos com diferenças estatisticamente diferentes. Isto é, para esses volumes a variação da área de avaliação do controlador *fuzzy* trouxe impactos significativos no desempenho do tráfego. No entanto, é importante destacar que nesses volumes observou-se casos de variação de DLR que resultaram em medidas de desempenho para a via arterial piores que as observadas sem intervenção de priorização. Nos dados dispostos na

Tabela 3 nota-se, entretanto, que podem ocorrer diferentes alternativas de extensão da área de avaliação que melhoram o desempenho do tráfego na via arterial, considerando simultaneamente as duas medidas de desempenho analisadas, e que sejam estatisticamente diferentes da operação *fuzzy* convencional.

Na realização das análises é recomendável, ainda, verificar os impactos causados nas aproximações secundárias, pois, assim como observado para a Alternativa A1, essa abordagem também resultou em prejuízos superiores aos observados para o controle por tempo fixo e coordenado (Andrade, 2009). Por exemplo, destaca-se a grande diferença entre o atraso médio por veículo nas vias secundárias e arterial. Para os volumes médio e baixo os atrasos obtidos para as vias secundárias são sempre superiores em relação à via arterial e essa diferença entre eles é crescente à medida que a DLR aumenta.

Para a rede 333 e volume baixo, por exemplo, sem priorização da via arterial, a diferença entre o atraso obtido para a via arterial e a as vias secundárias foi de 30% (maior para a via secundária); para DLR-225 esta diferença aumentou para 186%. Esse resultado é expressivo quando comparado aos valores obtidos para o volume alto e alerta para que a adoção do procedimento apresentado nesta Alternativa A2 deve ser considerada mediante análises cuidadosas relativas aos possíveis impactos negativos que podem decorrer da priorização da via arterial, especialmente para os padrões de volume veicular médio e baixo testados.

5. CONCLUSÕES

Diante das análises realizadas verificou-se que é possível melhorar a fluidez em vias arteriais por meio da atribuição de pesos ao número de veículos detectados na área de controle do controlador semafórico *fuzzy* ou da variação da extensão da área de avaliação do CSF. Destas duas alternativas testadas, a atribuição de pesos mostrou ser mais promissora, uma vez que todos os pesos testados resultaram em redução das medidas de desempenho do tráfego para a via arterial. A variação da área de controle do CSF apresentou casos com clara priorização do movimento arterial, porém ocorreram também situações em que foram observados apenas prejuízos. Nesta análise é importante destacar que esses resultados desfavoráveis ocorreram apenas para as arquiteturas de rede irregulares (rede 131 e rede 313) em que algum trecho permaneceu com a área de controle originalmente definida para o controlador por impossibilidade física de ampliação, o que pode ter prejudicado a operação. Para a rede 333 os resultados obtidos para a Alternativa A2 foram, para a maioria das vezes, similares aos obtidos com a atribuição de pesos (Alternativa A1).

Mesmo diante da robustez comprovada dos controladores semafóricos *fuzzy*, é recomendável que a utilização dos métodos propostos para priorização de movimento em redes arteriais seja precedida de avaliação acerca dos objetivos do controle. Isso porque alguns casos com bons resultados para atraso médio apresentaram soluções intermediárias em termos de percentual de paradas veiculares, por exemplo. É, também, imprescindível verificar o nível máximo de prejuízo admissível às vias secundárias que compõem a rede, pois alguns casos de priorização de movimento arterial por cooperação de controladores *fuzzy* podem resultar em prejuízos nas vias secundárias muito superiores aos observados no controle fixo coordenado.

Deve ser ressaltado que a aplicação destas alternativas de priorização de movimento arterial deve contemplar estudos de simulação para o adequado estabelecimento dos valores dos pesos ou da área de controle adotados para as aproximações da via arterial. Além disso, como é possível definir pesos diferentes para cada aproximação da via principal (resultando em um grande número de combinações possíveis em função do número de interseções da rede) a utilização de técnicas de Inteligência Artificial, tais como algoritmos genéticos, para a definição do melhor conjunto de pesos é uma estratégia possível e recomendável. Futuros estudos também devem contemplar o efeito das alternativas de cooperação sob condições mais realistas da operação do

tráfego em rede aberta, como por exemplo, a presença de movimentos de conversão e a operação de vias com sentido duplo de circulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M.; M. A. P. Jacques e M. Ladeira (2010) Exploratory Studies on Network Operation of Fuzzy Signal Controllers. *Proceedings of the World Conference on Transport Research Society*, WCTR, Lisboa, v. unico, p. 1–21.
- Andrade, M. e M. A. P. Jacques (2008a) Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle do tráfego em interseções isoladas. *Transportes*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 24–31.
- Andrade, M. e M. A. P. Jacques (2008b) Avaliação de Estruturas Alternativas para a Base de Regras de Controladores Semafóricos *Fuzzy*. *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, v. único, p. 24–31.
- Andrade, M. (2009) *Estudo de elementos de controladores semafóricos fuzzy com aplicação para operação em rede aberta*. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Transportes, Universidade de Brasília. Brasília.
- Chiu, S. e S. Chand. (1993) Self-organizing traffic control via fuzzy logic. *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, San Antonio, v. 2, p. 1897–1902.
- Favilla, J.; A. Machion e F. Gomide (1993) Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies. *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, San Francisco, v. 1, p. 506–511.
- Jacques, M. A. P.; J. Niittymäki; M. Pursula e I. Kosonen (2002a) Analysis of Different Defuzzification Methods Applied to Fuzzy Signal Controller. *Proceedings of the XII Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transport*, Quito, Equador, p. 1–12.
- Jacques, M. A. P.; M. Pursula, J. Niittymäki e I. Kosonen (2002b) The Impact of Different Approximate Reasoning Methods on Fuzzy Signal Controllers. *Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference*, Bari, v. único, p. 184–192.
- Jacques, M. A. P., D. B. L. M. Santos, M. Pursula e I. Kosonen (2005) Importance of Fuzzy Sets Definitions for Fuzzy Signal Controllers. *Applied Research in Uncertainty Modeling and Analysis*, v. 20, p. 399–416.
- Kim, S. (1994) *Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems*. Thesis (Ph D). Polytechnic University. New York.
- Kim, J. (1997) A fuzzy logic control simulator for adaptive traffic management. *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, v. 3, p. 1519–1524.
- Lee, J. H. e H. L. Kwang (1999) Distributed and Cooperative Fuzzy Controllers for Traffic Intersections Group. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, v. 29, n. 2, p. 263–271.
- Murat, Y. S. e E. Gedizlioglu (2002) A New Approach for Fuzzy Traffic Signal Control. *Proceedings of the XIII Mini-EURO conference on Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems*, Bari, p. 174–180.
- Nakatsuyama, M.; H. Nakahashi e N. Nishizuka (1984) Fuzzy Logic phase controller for traffic junction in the one-way arterial road. *Proceedings of the IFAC 9th Triennial World Congress*, Budapest, p. 2865–2870.
- Niittymäki, J. (2001) Installation and Experiences of Field Tests of a Fuzzy Signal Controller. *European Journal of Operational Research*, v. 131, n. 2, p. 273–281.
- Niittymäki, J. (1999) Fuzzy Logic Two-Phase Traffic Signal Control for Coordinated One-Way Streets. *IEEE Midnight-Sun Workshop on Soft Computing Methods in Industrial Applications*. Kuusamo, Finland, p. 69–74.
- Niittymäki, J. (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control*. Thesis (Ph.D). Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of Technology. Helsinki.
- Pappis, C. P. e E. H. Mamdani. (1977) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 7, n. 10, p. 707–717.
- UnB-Sitracs (2009) *Manual do usuário*. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/unb-sitracs/files/>>. (Acesso em: 12/04/2009).
- Vaz, A. M.; E. R. de Oliveira e M. A. P. Jacques (2005) Impacto das funções de pertinência na operação de controladores semafóricos *fuzzy*: estudo exploratório. *Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v. 1, p. 853–862.