

IMPACTO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA NA OPERAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*: ESTUDO EXPLORATÓRIO

Alessandro Márcio Vaz

Erica Ramalho de Oliveira

Maria Alice Prudêncio Jacques

Programa de Pós-Graduação em Transportes

Universidade de Brasília

RESUMO

O objetivo deste estudo é verificar os impactos de modificações na forma das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho de controladores semafóricos *fuzzy*. Na maioria dos controladores semafóricos *fuzzy* baseados no princípio da extensão *fuzzy*, que foram desenvolvidos a partir do trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani, as funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e saída do controlador possuem as formas triangular ou trapezoidal. Neste contexto, o presente trabalho faz uma análise comparativa do desempenho de três controladores semafóricos *fuzzy*, que diferem entre si somente no que diz respeito às formas das funções de pertinência dos respectivos conjuntos *fuzzy*. Em um deles foram mantidas as formas triangular e trapezoidal usualmente adotadas. A análise comparativa mostrou que, para um nível de significância igual a 5%, as diferenças entre a resposta dos três controladores e a operação do tráfego controlado foram estatisticamente significativas.

ABSTRACT

This study aims to assess the implications of modifications to the shape of fuzzy sets' membership functions on fuzzy signal controllers. The triangular and trapezoidal membership function shapes related to the fuzzy sets of the input and output variables have been used in almost every study on fuzzy signal controllers, since the first controller based on fuzzy extension principle was developed by Pappis and Mamdani. In light of this, this paper presents a comparison of the performance of three different fuzzy signal controllers. These controllers only differ from each other in relation to the membership function shape of their related fuzzy sets. In one of them, the usual triangular and trapezoidal membership functions have been kept. The comparative analysis shows that the differences among controller response and traffic operation characteristics are statistically significant at the risk level of 5%.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do tráfego nas grandes cidades tem se constituído num dos grandes problemas para a sociedade moderna. Principalmente nas grandes metrópoles, onde a circulação de veículos automotores é intensa, os índices de acidentes, poluição, consumo de combustível e atrasos do tráfego são consideravelmente elevados.

As vias são os locais destinados à circulação de veículos em uma cidade. Assim sendo, as interseções destes entes físicos constituem pontos onde surge a necessidade de disciplinar, guiar e estabelecer a prioridade de passagem. Segundo o DENATRAN (1984), as normas de controle do direito de passagem podem ser aplicadas através de diferentes formas de intervenção no tráfego e, dentre estas, se destaca o controle semafórico.

Como uma alternativa aos controladores semafóricos atuados pelo tráfego, que usam métodos convencionais para a otimização dos tempos semafóricos, Pappis e Mamdani (1977) apresentaram o conceito de controlador semafórico que aplica a lógica *fuzzy* para definir a extensão dos tempos de verde. Estudos presentes na literatura revelam que os componentes dos controladores semafóricos *fuzzy* para interseções isoladas, derivados desse trabalho pioneiro, são

praticamente os mesmos. Nesses controladores, as funções de pertinência utilizadas são, quase sempre, as de forma trapezoidal ou triangular. As razões que mais justificam a utilização destas funções são a sua simplicidade matemática e a representação satisfatória que permitem da informação abstraída dos termos lingüísticos, além do fato de terem sido utilizadas no trabalho pioneiro citado.

Ao continuar projetando controladores semafóricos *fuzzy* com as mesmas formas de funções de pertinência empregadas no trabalho de 1977, sem uma investigação mais aprofundada das mesmas, pode-se estar incorrendo em um sub-aproveitamento das diferentes possibilidades oferecidas pela lógica *fuzzy* na implementação dos principais componentes dos controladores semafóricos.

Este estudo exploratório visa, portanto, verificar se a utilização de outras formas para as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada e saída dos controladores semafóricos *fuzzy* acarretam impactos significativos na resposta do controlador e na operação do tráfego. Essa verificação se constitui em importante subsídio para futuras investigações relacionadas ao aperfeiçoamento desse tipo de controlador.

2. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

Com o advento da concepção da lógica *fuzzy*, pode-se desenvolver uma estrutura geral para os controladores *fuzzy*. Segundo Pedrycz (1994), esta é composta por três componentes básicos: interface de entrada, módulo de processamento e interface de saída. A transformação que retorna, como resultado para os dados inseridos, a pertinência associada a cada elemento do conjunto *fuzzy*, é denominada fase de fuzificação e é executada na interface de entrada. O módulo de processamento contém a base de regras e determina a relação entre as variáveis de entrada e saída do sistema, ou, mais especificamente, entre suas representações lingüísticas internas. A interface de saída translada o vetor de pertinência em um número real, processo esse comumente denominado fase de defuzificação.

A literatura indica que a idéia básica da utilização da lógica *fuzzy* para controle semafórico em interseções isoladas está em modelar o controle baseado no conhecimento humano especializado, ao invés de modelar o processo propriamente dito. A lógica *fuzzy* tem a habilidade de entender instruções lingüísticas e de gerar estratégias de controle baseadas em comunicação verbal (Jacques *et al.*, 2002a).

O controlador semafórico *fuzzy* usa um tipo de estratégia de controle atuado pelo tráfego, baseado no princípio da extensão. Esta estratégia apresenta algumas diferenças em relação à aplicação tradicional desse princípio. Dentre elas pode-se destacar:

- menor número de parâmetros em relação ao modelo tradicional de controle atuado;
- consideração das condições do tráfego em todas as aproximações do cruzamento para efeito da determinação da extensão a ser dada ao tempo de verde.

A partir da publicação e divulgação do trabalho de Pappis e Mamdani (1977), surgiram diversos estudos relacionados ao desenvolvimento de controladores semafóricos *fuzzy* para o controle de interseções isoladas. A Tabela 1 mostra um resumo das características de alguns desses

controladores, com foco nas funções de pertinência adotadas para a implementação dos conjuntos *fuzzy*. Destaca-se que a função denominada “*singleton*” é aquela em que o conjunto *fuzzy* inclui somente um elemento do universo de discurso e a esse elemento é atribuído grau de pertinência igual a 1 (um).

Tabela 1: Características dos controladores semafóricos *fuzzy* estudados

Controlador <i>Fuzzy</i>	Variáveis Linguísticas	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Formato das funções de pertinência
(Pappis e Mamdani, 1977)	<ul style="list-style-type: none"> • nº de veículos que chegam na aproximação que está sendo servida. • nº de veículos na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. • tempo decorrido após o final do período de verde. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • seis conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável tempo. • cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão. 	Triangular
(Niittymäki, 1998)	<ul style="list-style-type: none"> • nº de veículos que chegam na aproximação que está sendo servida. • nº de veículos na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • três conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão 	Triangular Trapezoidal <i>Singleton</i>
(Fávilla <i>et al.</i> , 1993)	<ul style="list-style-type: none"> • nº de veículos que chegam na aproximação que está sendo servida. • nº de veículos na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • três conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão 	Triangular

Fonte: Adaptado de Santos (2003) e Andrade (2004)

3. VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Há situações em que se lida com características, como intensidade da temperatura, tonalidades de vermelho, etc., que não se apresentam como estritamente dicotômicas, ou seja, com dois estados

excludentes bem definidos. A dificuldade, ou a impossibilidade, de se obter todas as informações e de equacionar a realidade imprecisa levou alguns cientistas a propor lógicas alternativas que seriam mais propícias à representação dessa realidade. Uma destas proposições é a lógica “fuzzy”, apresentada por Zadeh (1965), que se constitui em uma alternativa para a manipulação de dados imprecisos.

Grande parte da problemática do conhecimento está em representar matematicamente idéias sobre pensamento, sensações ou percepções do mundo físico que nos rodeia, sem perder a precisão. A lógica *fuzzy* permite expressar de forma matemática as enunciações do pensamento, ou seja, as manifestações da linguagem natural, sem diminuir a potência expressiva das mesmas. Através da lógica *fuzzy* é possível realizar operações com palavras, onde aos conjuntos *fuzzy* compete expressar os valores das mesmas. Desta forma, a precisão ou imprecisão, dependendo do que o pesquisador anseia, será expressa através de um número, que indicará a possibilidade, não a probabilidade, de tal afirmação estar correta.

Em uma linguagem natural L , cada termo X pode ser visto como uma descrição resumida de um conjunto *fuzzy* $M(x)$ de um universo de discurso U , com $M(x)$ representando o significado de X . Neste sentido, a linguagem como um todo pode ser vista como um sistema que determina palavras, frases e sentenças para conjuntos *fuzzy* do universo de discurso U . Por exemplo, se o significado do nome “flor” é um conjunto *fuzzy* $M(\text{flor})$ e o significado do adjetivo “vermelho” é um conjunto *fuzzy* $M(\text{vermelho})$, então o significado do nome “flor vermelha” é dado pela interseção de $M(\text{vermelho})$ e $M(\text{flor})$ (Zadeh, 1973).

Se for considerada a cor de um objeto como a variável, então os valores vermelho, azul, amarelo, verde, etc., podem ser interpretados como rótulos de conjuntos *fuzzy* de um universo de objetos. Neste sentido, o atributo “cor” é uma variável lingüística cujos valores são rótulos de conjuntos *fuzzy*.

A principal função da variável lingüística é providenciar um meio sistemático para a caracterização aproximada de um fenômeno complexo. Em essência, afastando-se do uso de variáveis quantificadas e, assim, empregando o tipo de descrição lingüística utilizada pelas pessoas em geral, adquire-se uma capacidade de tratar com sistemas que são mais complexos e cuja representação na forma matemática convencional pode comprometer a devida análise (Zadeh, 1973).

A intensidade com que determinado elemento pertence a um conjunto *fuzzy* denomina-se grau de pertinência. A variação dos graus de pertinência dos diferentes elementos de um universo de discurso a um conjunto *fuzzy* em particular é definida através de uma função, denominada função de pertinência.

O software MATLAB fornece aos projetistas uma caixa de ferramentas específica para a representação de sistemas que operam de acordo com a lógica *fuzzy*. Nessa caixa de ferramentas encontram-se as seguintes onze funções de pertinência: triangular, trapezoidal, forma de Z, forma de S, forma de π , gaussiana, forma de sino, sigmoidal, diferença entre duas sigmoidais,

combinação de duas gaussianas e a função produto de duas sigmoidais. Essas funções são construídas a partir das seguintes funções básicas:

- Função Linear;
- Distribuição Gaussiana;
- Curva Sigmoidal;
- Curva Polinomial: quadrática e cúbica.

4. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY* ESTUDADOS

A interface de entrada dos controladores semafóricos *fuzzy* considerados neste estudo exploratório é formada por duas variáveis lingüísticas: “fila” e “chegada”. Já a saída de cada controlador é representada pela variável lingüística “extensão”. A cada variável lingüística estão agregados diferentes conjuntos *fuzzy*, definidos por funções de pertinência específicas. Na Tabela 2 são apresentados os três controladores estudados, que diferem entre si apenas com relação à alternativa definida para as funções de pertinência dos seus conjuntos.

A Alternativa 1, relativa ao primeiro controlador estudado, reproduz a definição das funções de pertinência usualmente adotada nos atuais controladores semafóricos *fuzzy*: triangular e trapezoidal. Para compor as Alternativas 2 e 3 foram selecionadas diferentes funções da caixa de ferramentas do MATLAB, como pode ser verificado na Tabela 2. Destaca-se que na definição dos mesmos conjuntos *fuzzy* para as diferentes alternativas, buscou-se partições similares para os respectivos universos de discurso. Essa medida é justificada por estudos precedentes, que revelaram que variações em torno de 20% no tamanho das partições dos universos de discurso associados às variáveis de entrada do controlador afetam significativamente a sua resposta às solicitações do tráfego (Jacques *et al.*, 2003). Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentados, a título de ilustração, os conjuntos *fuzzy* empregados nas três alternativas para a variável “fila”. Por meio dessas figuras é possível verificar as diferenças entre os formatos das funções de pertinência correspondentes.

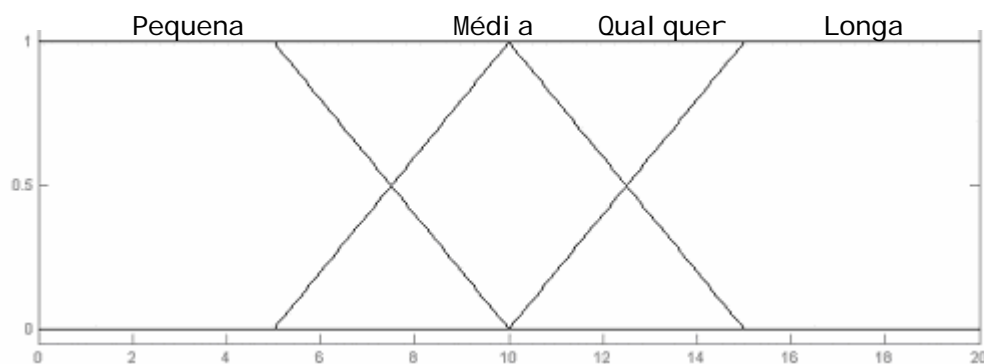


Figura 1: Conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “fila” na Alternativa 1

Tabela 2: Variáveis lingüísticas e conjuntos *fuzzy* das alternativas estudadas

Variáveis lingüísticas	Alternativas	Conjuntos <i>fuzzy</i>				
		Zero	Pequena	Média	Longa	Qualquer
Fila	1	_____	Trapezoidal	Triangular	Trapezoidal	Constante com pertinência 1
	2	_____	função forma de Z	Gaussiana	Sigmoidal	Constante com pertinência 1
	3	_____	função forma de Z	Comb. da Gaussiana	Sigmoidal	Constante com pertinência 1
Chegada	1	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	Constante com pertinência 1
	2	função forma de Z	Gaussiana	Gaussiana	Sigmoidal	Constante com pertinência 1
	3	função forma de Z	Comb. da Gaussiana	Comb. da Gaussiana	Sigmoidal	Constante com pertinência 1
Extensão	1	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	_____
	2	função forma de Z	Gaussiana	Gaussiana	Sigmoidal	_____
	3	função forma de Z	Comb. da Gaussiana	Comb. da Gaussiana	Sigmoidal	_____

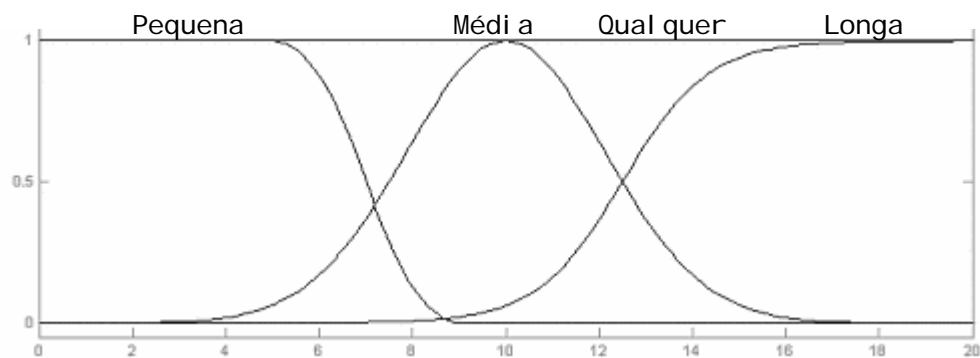


Figura 2: Conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “fila” na Alternativa 2

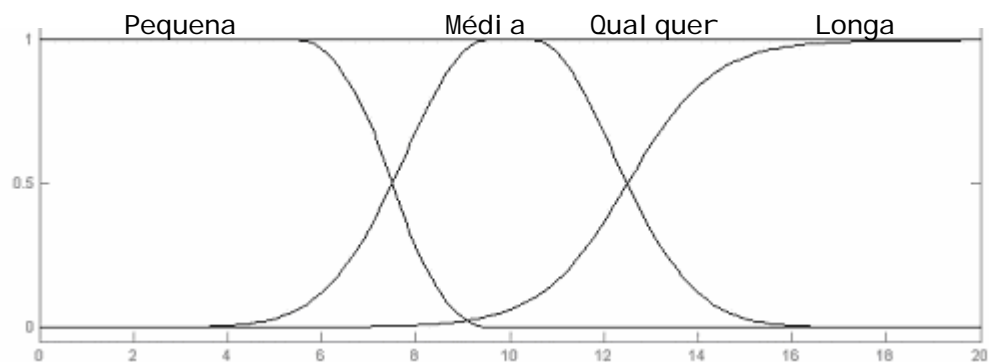


Figura 3: Conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “fila” na Alternativa 3

O impacto das diferentes funções de pertinência usadas nas três alternativas pode ser melhor visualizado através das Figuras 4, 5 e 6. Nessa figura são apresentadas as superfícies de controle relacionadas aos três controladores estudados onde, para cada par de valores associados a “fila” e “chegada”, é possível verificar o valor da extensão do verde a ser atribuída pelo controlador à aproximação que está tendo o direito de passagem. Os resultados dessas superfícies são, posteriormente, convertidos em tabelas apropriadas para permitir a sua utilização na simulação do tráfego com o uso do programa HUTSIM (Kosonen, 1999).

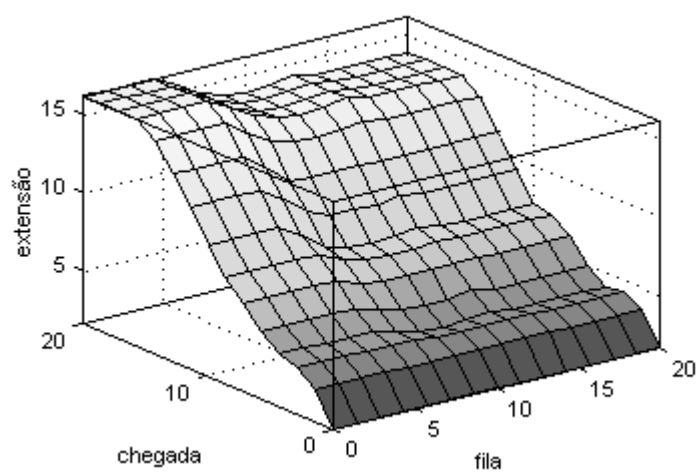


Figura 4: Superfície de controle associada à Alternativa 1

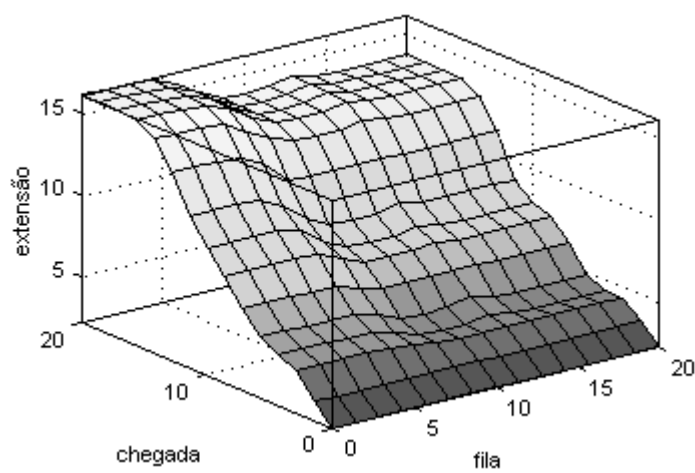


Figura 5: Superfície de controle associada à Alternativa 2

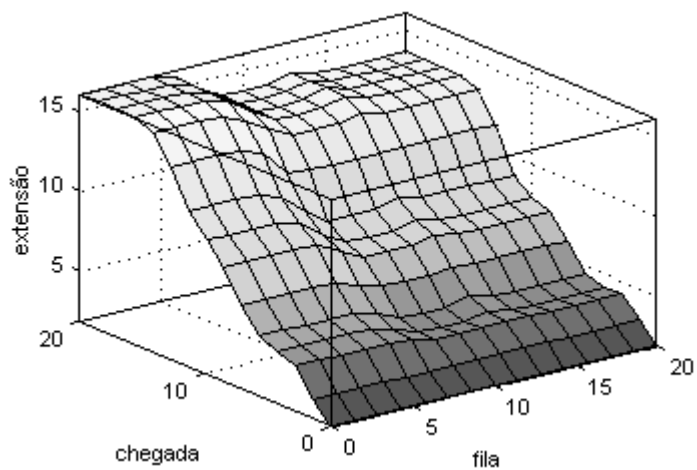


Figura 6: Superfície de controle associada à Alternativa 3

Para todos os controladores estudados foi mantida a mesma base de regras, que faz o relacionamento entre as variáveis de entrada e a variável de saída, e o mesmo processo de defuzificação. Maiores detalhes sobre esses elementos podem ser encontrados no trabalho de Andrade (2004). Além disso, os operadores utilizados na implementação dos conectivos “e” e “ou”, e da função de implicação de cada regra também foram os mesmos para todos os controladores. Estudos anteriores revelaram que mudanças nesses operadores e no método de defuzificação alteram significativamente a resposta do controlador (Jacques et al., 2002a e 2002b).

5. ESTUDO DE CASO

Para cada uma das alternativas referidas na Seção 4 deste artigo, foi gerada, com o uso do programa MATLAB, uma tabela contendo os valores da extensão de verde associados a cada par de valores observados nos universos de discurso das variáveis “fila” e “chegada”.

Para a realização do estudo de caso foram simuladas 10 horas independentes da operação do tráfego sob a tabela correspondente a cada um dos controladores estudados. A aproximação principal foi projetada com um volume de 1200 veículos/hora em duas faixas de trânsito, enquanto a aproximação secundária, também contendo duas faixas, teve volume de 400 veículos/hora. Esse volume pode ser classificado como médio para o caso da interseção simulada, uma vez que gera relações entre volume e capacidade superiores a 0,6 para a aproximação principal. Essas simulações foram realizadas com o programa de simulação HUTSIM, desenvolvido na *Helsinki University of Technology* (Kosonen, 1999).

Destas simulações foram extraídos dois tipos de resultados. O primeiro engloba medidas de desempenho da operação do tráfego e o segundo medidas associadas diretamente à resposta do controlador. Como medidas de desempenho foram selecionados o atraso médio e a porcentagem de veículos parados; a resposta do controlador foi verificada através do tempo médio de verde e do tempo médio de ciclo. Para cada medida considerada foram obtidos valores relativos às aproximações principal e secundária, além de valores para a interseção como um todo.

Os resultados obtidos para cada controlador, correspondentes às três alternativas consideradas para as funções de pertinência (ver Tabela 3), foram então comparados para efeito da verificação da significância estatística das suas diferenças. Para tanto, foram realizadas Análises de Variância (ANOVA) para cada uma das medidas consideradas: atraso médio; porcentagem de veículos parados; tempo médio de verde; e tempo médio de ciclo. Estas ANOVA's, levando em conta os resultados das 10 horas independentes de simulação para cada uma das aproximações e para a interseção como um todo, mostram que as diferenças observadas nas médias das medidas são estatisticamente significativas para o nível de significância (α) de 5%. Os resultados das ANOVA's, em termos da probabilidade da estatística F ser maior do que $F_{\text{calculado}}$, (indicada por “p”) são apresentados na Tabela 4. Valores de “p” inferiores ao nível de significância α implicam em $F_{\text{calculado}}$ maior do que $F_{\text{crítico}}$ e, portanto, que existe diferença significativa entre as médias produzidas pelas alternativas estudadas.

Outro ponto a destacar nos resultados apresentados na Tabela 3 é que o atraso médio sofrido pelos veículos e a porcentagem de veículos parados nas duas aproximações foi menor sob a

operação do controlador correspondente à Alternativa 3. Isto é, a alternativa clássica (Alternativa 1) não foi a que apresentou os melhores resultados para a operação da interseção considerada.

Tabela 3: Valores médios obtidos com o HUTSIM para cada uma das alternativas

Medidas	Esta- tísticas	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
		T	1	2	T	1	2	T	1	2
Atraso Médio (s/veíc.)	\bar{x}	15.05	20.54	13.16	16.64	19.21	15.76	14.41	18.99	12.87
	S	0.49	1.46	0.39	0.49	0.96	0.42	0.44	0.89	0.50
	CV(%)	3.23	7.12	2.99	2.93	5.01	2.66	3.03	4.67	3.85
% Veíc. Parados	\bar{x}	46.36	62.96	40.72	50.20	57.00	47.92	45.44	60.27	40.41
	S	1.31	3.46	1.36	1.44	3.16	1.23	1.36	2.99	1.54
	CV(%)	2.83	5.50	3.34	2.86	5.55	2.57	2.99	4.97	3.80
Verde Médio (s)	\bar{x}	24.68	17.10	32.32	28.58	23.05	34.08	22.98	15.87	30.12
	S	0.38	0.64	0.42	0.31	0.17	0.59	0.36	0.46	0.49
	CV(%)	1.52	3.74	1.30	1.08	0.76	1.72	1.58	2.93	1.61
Ciclo Médio (s)	\bar{x}	61.39	61.39	61.39	69.12	69.12	69.13	57.94	57.94	57.97
	S	0.75	0.75	0.72	0.63	0.63	0.64	0.72	0.72	0.75
	CV(%)	1.22	1.22	1.17	0.91	0.91	0.92	1.24	1.24	1.30

Legenda: T = interseção; 1 = Aproximação secundária; 2 = Aproximação principal

Tabela 4: Valores de “p” obtidos nas Análises de Variância

Medida	Aprox. Secundária	Aprox. Principal	Interseção
Atraso Médio (s/veíc.)	0,015	0,000	0,000
% Veículos Parados	0,002	0,000	0,000
Verde Médio (s)	0,000	0,000	0,000
Ciclo Médio (s)	0,000	0,000	0,000

Para verificar de forma mais específica entre quais alternativas os resultados são significativamente diferentes, foi utilizado o teste de Tukey (Costa Neto, 1977). A Tabela 5 resume, para as aproximações secundária e primária e para a interseção como um todo, quais os pares de alternativas que apresentam diferenças significativas entre as médias dos resultados considerados (para $\alpha = 5\%$).

Tabela 5: Pares de alternativas com resultados significativamente diferentes

	Atraso Médio	% Veíc. Parados	Verde Médio	Ciclo Médio
Aproximação 1	(1,2);(1,3)	(1,2)	(1,2);(1,3);(2,3)	(1,2);(1,3);(2,3)
Aproximação 2	(1,2);(2,3)	(1,2);(2,3)	(1,2);(1,3);(2,3)	(1,2);(1,3);(2,3)
Interseção	(1,2);(1,3);(2,3)	(1,2);(2,3)	(1,2);(1,3);(2,3)	(1,2);(1,3);(2,3)

Os resultados da Tabela 5 permitem verificar que a resposta do controlador (verde médio e ciclo médio) varia entre todas as alternativas consideradas. Para a aproximação secundária, o atraso médio é diferente entre as Alternativas 1 e 2 e entre as Alternativas 1 e 3. Para essa aproximação,

a percentagem de veículos parados varia significativamente somente entre as alternativas 1 e 2. No caso da aproximação principal, as diferenças entre as duas medidas de desempenho são estatisticamente significativas entre as Alternativas 1 e 2 e entre as Alternativas 2 e 3. Considerando os resultados globais da interseção, o atraso médio varia entre todas as alternativas e a percentagem de veículos parados somente não é significativa entre as Alternativas 1 e 3.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo exploratório, pode-se observar que formas diferentes de funções de pertinência aplicadas a controladores semafóricos *fuzzy* produzem controles de tráfego diferenciados para interseções isoladas. Ou seja, os resultados sugerem que é possível definir um controlador semafórico mais ajustado às necessidades do controle de tráfego em cada interseção a partir da seleção de determinadas formas para as funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e saída do controlador. Para tanto, é necessário o futuro desenvolvimento de um método que, de forma sistemática e ágil, possa selecionar a forma mais adequada das funções de pertinência para cada situação de controle. Entende-se que o uso de outras técnicas de inteligência artificial associadas à lógica *fuzzy*, como as redes neurais artificiais e os algoritmos genéticos, podem ser considerados para esse propósito.

Outrossim, futuras investigações são também necessárias no sentido de aprofundar as análises do impacto das funções de pertinência para situações de controle de tráfego diferentes da considerada no presente estudo. Como exemplo, pode-se citar o controle de volumes de tráfego diferentes dos considerados neste trabalho, ou ainda o controle do tráfego para interseções de duas vias principais.

Destaca-se, finalmente, que é necessário aperfeiçoar o procedimento existente para a coleta e tratamento dos dados relacionados às pertinências de elementos dos universos de discurso a cada conjunto *fuzzy*, de modo a torná-lo mais adequado à calibração de funções de pertinência não lineares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M. (2004) *Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado, Publicação T.DM-012 A/2004, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 137p.
- Costa Neto, P. L. O. (1977) *Estatística*. Edgard Blucher. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.
- DENATRAN (1984) *Manual de Semáforos*. Brasília: DENATRAN.
- Favilla, J., A. Machion, e F. Gomide (1993). Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies. In: Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Francisco, California, v.1, p. 506-511.
- Jacques, M. A. P., J. Nittymäki, M. Pursula, e I. Kosonen (2002a) The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers. *Anais do 13th Mini-Euroconference*, Bari, Itália, p.184 – 192.
- Jacques, M. A. P., J. Nittymäki, M. Pursula, e I. Kosonen (2002b) Analysis of Different Defuzzification Methods Applied to Fuzzy Signal Controller. In: *XII Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transport*, Quito, Equador.
- Jacques, M. A. P., D. B. L. M. Santos, M. Pursula e I. Kosonen (2003) Studying the Importance of Fuzzy Sets Definitions for Fuzzy Signal Controllers. In: *Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis – INSUMA*, Maryland, USA.
- Niittymäki, J. (1998). Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control. Doctoral Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Finland.

- Pappis, C. P., Mamdani, H. (1977) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, Nº 10, p. 707-717.
- Pedrycz, W. (1994) Why Triangular Membership functions? *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 64, No.1, p.21-30.
- Santos, D. B. L. M. (2003) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy utilizados em Controladores Semafóricos*. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM 006A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*. v.8, p.338-353.
- Zadeh, L. A. (1973) Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-3, Nº 1, p.28-44.
- Kosonen, I. (1999). *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications*. Publication 100, University of Technology, Transportation Engineering, Espoo, Finland, 248p.

Endereço dos autores:

Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro
Programa de Pós-Graduação em Transportes – Prédio SG 12
CEP 70910-900 – Brasília, DF, Brasil

Fone: (61) 3307-2857/2714

Fax: (61) 3307-3065

E-mail: alessandrovoz@unb.br; erica_ramalho@yahoo.com; mapj@unb.br