

AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS ALTERNATIVAS PARA A BASE DE REGRAS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Michelle Andrade

Maria Alice Prudêncio Jacques

Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO

O componente principal de um controlador semafórico *fuzzy* é sua base de regras, núcleo do processo de tomada de decisão. Os controladores semafóricos *fuzzy*, em geral, possuem bases de regras formadas por subconjuntos de instruções *fuzzy*, implementadas em momentos específicos da atividade de controle. Esta estrutura, apesar de mais difícil de construir junto aos especialistas, não tem sido avaliada no sentido de verificar a possibilidade de sua substituição por um conjunto único de regras, sem prejuízos para a eficácia do controle. O objetivo do presente trabalho é fazer essa avaliação. Para tanto, um controlador de base de regras particionada foi comparado a controladores de base única, criados a partir do controlador original. Os resultados da simulação da operação do tráfego sob a atuação de cada controlador mostraram que é viável promover o controle desejado com o uso dos controladores semafóricos *fuzzy* de base única.

ABSTRACT

The main component in a fuzzy traffic controller is its rule base, the core of its decision-making process. Fuzzy traffic controllers in general have rule bases made up of subsets of fuzzy instructions, implemented at specific moments in control activity. This structure, although it is one of the most difficult to construct according to specialists, has not been evaluated so as to verify the possibility of it being substituted by a single set of rules, without jeopardizing control effectiveness. This study carries out this evaluation. Thus, one controller with a partitioned rule base was compared to controllers with a sole base, created from the original controller. The results from the simulation of the traffic operation under each controller's operation showed that it is possible to promote the control desired through fuzzy traffic controllers with a sole base.

1. INTRODUÇÃO

O conceito da caracterização de relações simples entre variáveis *fuzzy* por meio de regras condicionais (Zadeh, 1973) foi pioneiramente empregado para a definição de ações de controle por Mamdani (1973, *apud* Sugeno, 1985). Em 1975, Mamdani e Assilian descreveram a implementação bem sucedida de um controlador *fuzzy* voltado ao controle de uma máquina a vapor, que foi desenvolvido com base no conceito das regras condicionais de Zadeh. A partir dessa primeira aplicação, os conjuntos de regras *fuzzy* (algoritmos *fuzzy*) têm sido empregados para a solução aproximada de problemas na presença de incerteza, em diversas áreas do conhecimento. Nos trabalhos de Sugeno (1985) e Lee (1990) são citados diferentes exemplos dessas aplicações, enquanto que no trabalho de Teodorović (1999) é mostrada uma ampla revisão da utilização dos algoritmos *fuzzy* na área de Transporte.

Existem diferentes formas para se determinar o conjunto de regras, usualmente referido como base de regras, a ser utilizado em um controlador *fuzzy*. Sugeno e Nishida (1985) indicam que a definição da base de regras pode ser baseada em: (i) experiência do operador, (ii) conhecimento do engenheiro de controle, (iii) modelagem *fuzzy* das ações de controle do operador, e (iv) modelagem *fuzzy* do processo a ser controlado. Os autores relatam que a maioria dos controladores tem sido desenvolvida com base nas abordagens (i) e (ii), e descrevem uma aplicação onde (iii) foi empregada com sucesso, permitindo a geração de um conjunto de 20 regras para o controle da direção de um veículo. Alguns casos de aplicações da abordagem (iv) também são descritas na literatura para o tratamento de problemas específicos (por exemplo: Liu e Hu, 1992).

Para que o algoritmo *fuzzy* se torne operacional, além da base de regras, é necessária a definição de outras características importantes do controlador (como é o caso das funções de implicação e dos métodos de defuzificação), o que também depende da experiência do projetista. Por isso, uma das principais críticas aos controladores *fuzzy* reside na subjetividade da definição dos seus principais componentes (Sayers *et al.*, 1998).

Os controladores semafóricos *fuzzy* começaram a ser desenvolvidos e testados a partir do controlador desenvolvido por Pappis e Mamdani (1977). Este controlador é baseado no princípio clássico da extensão, adotado em controladores atuados pelo tráfego. Na determinação da extensão *fuzzy*, o controlador aciona um conjunto de regras, as quais relacionam as variáveis de entrada “Fila” (número de veículos na aproximação que está recebendo o sinal vermelho) e “Chegada” (número de veículos a serem servidos se o tempo de verde for estendido por 10 segundos), com a variável de saída “Extensão”. O controlador permite que, após os 7 segundos iniciais do tempo de verde de cada estágio, sejam concedidas no máximo cinco extensões. Se no cálculo da duração de uma extensão o valor encontrado for inferior a 10 segundos, ao final da extensão ocorre a troca de estágios. Um detalhe importante do algoritmo *fuzzy* desse controlador é que a determinação de cada extensão é feita a partir de um conjunto diferente de regras. Isto é, a base de regras é particionada em subconjuntos que são acessados em momentos diferentes da ação de controle.

Vários dos controladores semafóricos *fuzzy* que sucederam ao controlador de Mamdani adotaram a mesma estrutura de base de regras, embora com algumas diferenças nas regras propriamente ditas. Dentre os controladores revisados por Jacques *et al.*, (2002), que são baseados no princípio da extensão *fuzzy*, somente no de Favilla *et al.*, (1993) é adotada uma estrutura de base de regras única. Os controladores *fuzzy* desenvolvidos no âmbito da Universidade de Tecnologia de Helsinque (HUT), que têm sido testados com sucesso tanto em estudos de simulação quanto em testes de campo, são estruturados de maneira análoga ao controlador de Mamdani (Niittymäki, 1998; Niittymäki e Pursula, 2000; Niittymäki e Nevala, 2000). Nos documentos que descrevem esses controladores não é apresentada nenhuma justificativa para o uso da base de regras particionada, em oposição à possibilidade da adoção de um conjunto único de regras.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo analisar o impacto da mudança na estrutura de regras de um dos controladores semafóricos *fuzzy* desenvolvidos na HUT, tanto sobre a resposta do controlador quanto sobre o desempenho do tráfego. Através da simulação do tráfego em uma interseção isolada, formada por duas vias de sentido único de circulação, o resultado da ação do controlador selecionado de base de regras particionada é comparado ao resultado de controladores de base de regras única. Considerando que a definição do conjunto de regras dos controladores semafóricos *fuzzy* é feita, em geral, a partir da abordagem do conhecimento do engenheiro de controle, a estrutura de regras particionada em diferentes subconjuntos impõe uma dificuldade adicional ao desenvolvimento do controlador. Assim, a possibilidade de se direcionar o desenvolvimento futuro de controladores semafóricos *fuzzy* para a utilização de base de regras única justifica a realização da pesquisa.

Inicialmente o presente trabalho apresenta a descrição dos controladores *fuzzy* considerados na pesquisa, mostrando os seus principais elementos constituintes. Na seqüência é detalhado o estudo de caso e são apresentados e analisados os resultados obtidos.

2. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Os controladores utilizados na investigação proposta são apresentados nesta seção. O controlador desenvolvido por Niittymäki (1998) possui base de regras particionada, formada por cinco grupos de regras, e será referido ao longo desse texto como Controlador HUT. A partir desses conjuntos de regras foram desenvolvidos e testados controladores de base única. Além destes, foi incluído na análise o controlador utilizado em estudo anterior realizado por Andrade e Jacques (2005), que possui base de regras única, constituída por 14 regras, e será denominado no presente trabalho como Controlador AJ-14R.

Nesses controladores, os conjuntos da variável de saída das regras *fuzzy* são do tipo *singleton* (um valor possui pertinência 1 e os demais tem pertinência zero). Constituem-se, portanto, em controladores do tipo Sugeno, cujas principais características são (Zimmermann, 1996):

- do mesmo modo que no controlador de Mamdani, os antecedentes das regras são conjuntos *fuzzy*;
- a consequência das regras gera valores numéricos, definidos como função das variáveis de entrada, ou expressos como valores constantes, equivalendo a conjuntos *fuzzy* do tipo *singleton*;
- os resultados das regras são agregados como médias ponderadas das ações de controle definidas por cada regra;
- o peso de cada regra é o grau de pertinência definido pelo antecedente da regra, calculado do mesmo modo que no controlador de Mamdani;
- não requer procedimento de defuzificação.

Para a implementação do conectivo “e” do antecedente de cada regra é empregado o operador “mínimo”.

As variáveis lingüísticas de entrada são:

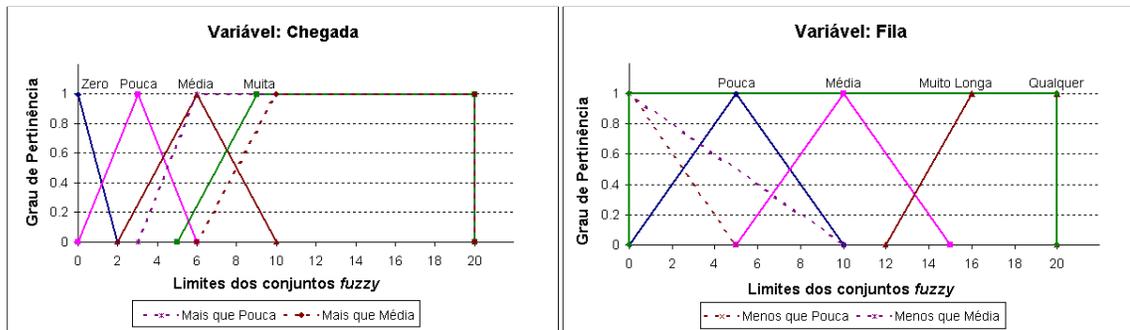
Fila: caracterizada pelo número de veículos aguardando na aproximação que está recebendo indicação vermelha, cujos valores são definidos por meio de conjuntos *fuzzy*;

Chegada: indica o número de veículos presentes nos 100m à montante da linha de retenção da aproximação que está recebendo a indicação verde, e seus valores são definidos como conjuntos *fuzzy*.

A variável de saída do controlador é “**Extensão**”, que pode assumir os valores “zero”, “curta”, “média” e “longa”, definidos como conjuntos *fuzzy singleton*.

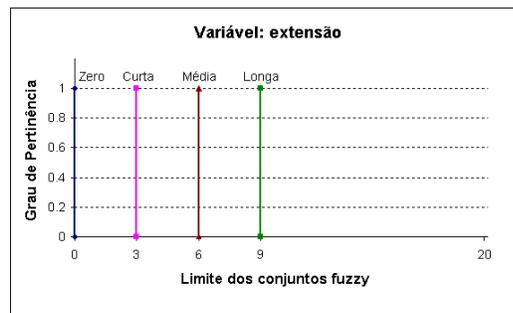
2.1 Controlador HUT

O Controlador HUT possui uma base de regras com estrutura semelhante à proposta no trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani (1977). Essa base de regras é apresentada na Tabela 1, e os conjuntos que definem as variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador são mostrados na Figura 1. Essas características do controlador foram extraídas da descrição do controlador de Niittymäki (1998) contida no trabalho de Bingham (1998).



(a) Conjuntos *fuzzy* da variável “Chegada”

(b) Conjuntos *fuzzy* da variável “Fila”



(c) Conjuntos *fuzzy singleton* da variável “Extensão”

Figura 1: Variáveis de entrada e saída do Controlador HUT

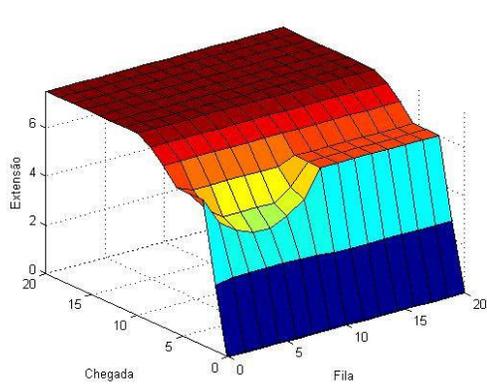
Na Figura 2 são mostradas as superfícies de controle correspondentes a cada um dos cinco grupos de regras. Essas superfícies permitem verificar as diferenças entre as respostas do controlador na definição de cada uma das extensões, concedidas de forma sucessiva. Observe-se, por exemplo, que à medida que o número de extensões dadas aumenta, existe uma redução na sensibilidade do controlador para a variável chegada.

De forma geral, os grupos de regras 1 e 2 apresentam superfícies de resposta pouco sensíveis às filas formadas no vermelho, enquanto que a partir do grupo de regras 3 essa situação vai se invertendo até que, no grupo de regras 5, as extensões só são concedidas para o caso do número de veículos na fila ser inferior a 12. Para filas superiores, o controlador é totalmente insensível ao número de chegadas, não concedendo extensão do tempo verde.

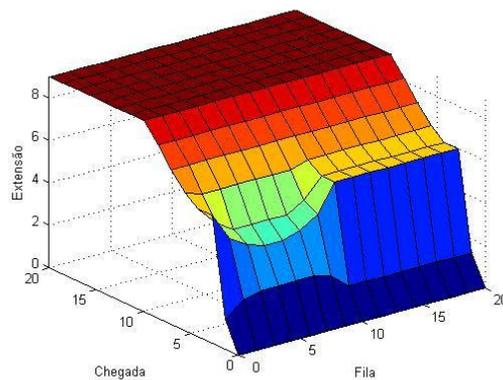
Um aspecto importante a considerar é que mudanças bruscas na resposta do controlador, como as verificadas nas superfícies das Figuras 2(c), 2(d) e 2(e), e inconsistência lógica nessa resposta, como a caracterizada pelas depressões observadas nas superfícies das Figuras 2(a) e 2(b), são indesejáveis em controladores que atuam em sistemas reais. Mesmo quando o controlador produz resultados gerais satisfatórios, usualmente verificados através de simulação da operação do tráfego, essas características da superfície de resposta podem afetar a percepção do usuário com relação ao funcionamento adequado do controlador, trazendo insegurança e podendo, inclusive, levar ao desrespeito da sinalização proposta.

Tabela 1: Base de regras do Controlador HUT

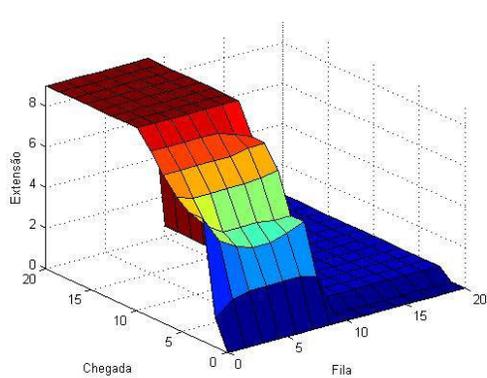
Regra	<i>Se a “fila” é ...</i>	<i>E a “chegada” é ...</i>	<i>Então a “extensão” é ...</i>
Grupo de regra 1: após o mínimo de verde, 5º segundo			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Qualquer	Mais que Pouca	Média
4	Qualquer	Mais que Média	Longa
Grupo de regras 2: após a primeira extensão de verde, 5ºseg + E1			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Qualquer	Média	Média
4	Qualquer	Muita	Longa
Grupo de regras 3: após a segunda extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Menos que Média	Média	Média
4	Menos que Média	Muita	Longa
Grupo de regras 4: após a terceira extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2 + E3			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Mais que Pouca	Curta
3	Menos que Média	Média	Média
4	Menos que Pouca	Muita	Longa
5	Muito Longa	<i>none</i>	Zero
Grupo de regras 5: após a quarta extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2 + E3 + E4			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Mais que Pouca	Curta
3	Menos que Pouca	Média	Média
4	Menos que Pouca	Muita	Longa
5	Muito Longa	<i>none</i>	Zero



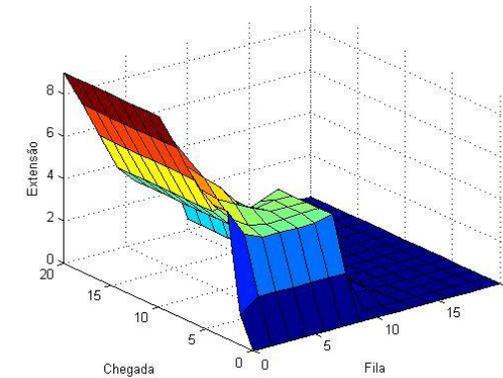
(a) Grupo de regras 1



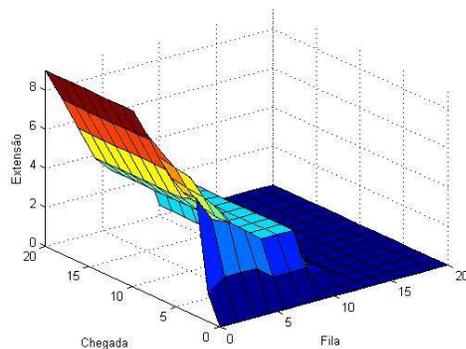
(b) Grupo de regras 2



(c) Grupo de regras 3



(d) Grupo de regras 4



(e) Grupo de regras 5

Figura 2: Superfícies de resposta para cada grupo de regras independentes do Controlador HUT

2.2 Controladores derivados do Controlador HUT

Para efeito do presente estudo foram desenvolvidos, a partir do Controlador HUT, três controladores de base de regras única. Isto é, alguns grupos de regras do controlador original foram adotados como a base de regra única dos novos controladores. Os critérios de escolha dos grupos originais de regras a serem testados foram a suavidade da superfície de resposta e

a variabilidade das extensões às mudanças nos valores das variáveis de entrada. Estes critérios levaram à seleção dos grupos de regras 1, 2 e 3. Foram, portanto, derivados três controladores, HUT-RS1, HUT-RS2 e HUT-RS3, cujas bases de regras são, respectivamente, os grupos 1, 2 e 3 do controlador original.

2.3 Controlador de base única – Controlador AJ-14R

Os conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada (fila e chegada) mostrados na Figura 3 são os mesmos definidos no Caso 4 do estudo de Santos (2003). Dentre os casos estudados por Santos (2003), o Caso 4 apresentou os melhores resultados nas simulações realizadas em termos de atrasos e paradas veiculares. A variável que descreve a saída do controlador é denominada “Extensão”, e pode assumir os valores “zero”, “curta”, “média” e “longa”, representados pelos mesmos conjuntos *fuzzy* do Controlador HUT, mostrados na Figura 1(c).

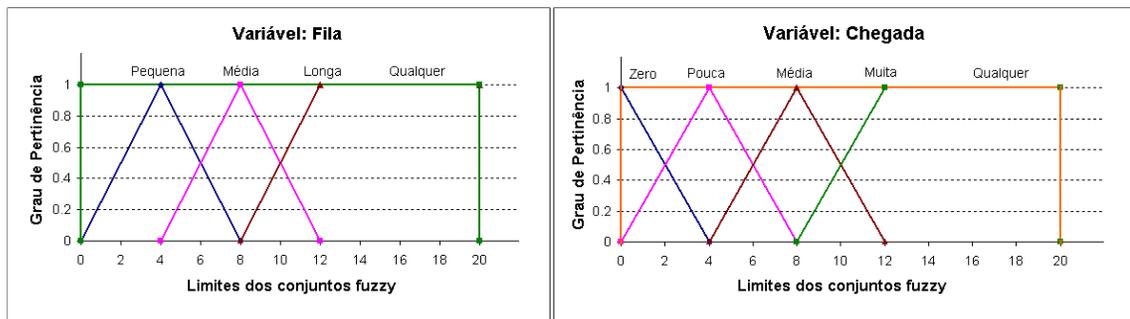


Figura 3: Variáveis de entrada do controlador AJ-14R

O conjunto de regras deste controlador é apresentado na Tabela 2 e a superfície de resposta correspondente é mostrada na Figura 4.

Tabela 2: Base de regras do Controlador AJ-14R

Regra	Se a “Fila” é ...	e a “Chegada” é ...	Então a “Extensão” é...
1	Quaquer	Zero	Zero
2	Pequena	Pouca	Curta
3	Média	Pouca	Zero
4	Longa	Pouca	Zero
5	Pequena	Média	Média
6	Média	Média	Curta
7	Longa	Média	Curta
8	Pequena	Muita	Longa
9	Média	Muita	Média
10	Longa	Muita	Média
11	-	Pouca	Curta
12	-	Média	Média
13	-	Muita	Longa
14	Longa	Qualquer	Zero

Como pode ser observado na Figura 4, o controlador de base única apresenta uma superfície de resposta suave, onde o valor da extensão é consistentemente afetado pelas duas variáveis de entrada. Para valores de chegadas maiores que 12 veículos, entretanto, há tendência de redução da sensibilidade do controlador para essa variável. Ainda assim, o controlador é mais

sensível às mudanças no número de chegadas veiculares durante o verde do que às variações no número de veículos na fila formada no vermelho.

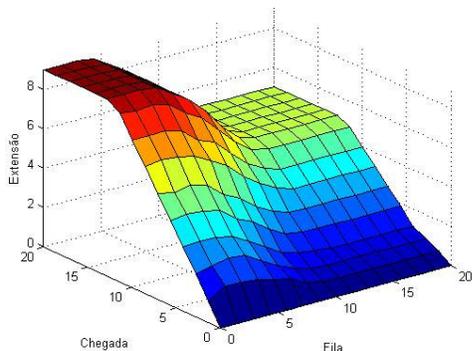


Figura 4: Superfície de resposta do controlador AJ-14R

3. ESTUDO DE CASO

O desempenho do Controlador HUT, frente aos controladores com base de regras única, foi analisado a partir dos resultados das respostas do controlador e do desempenho do tráfego sob operação de cada controlador, obtidos com o auxílio do programa HUTSIM (Kosonen, 1999). Para essa investigação foram selecionados os controladores de base única descritos na seção 2, que são: HUT-RS1, HUT-RS2, HUT-RS3 e AJ-14R.

O controle semafórico estabelecido no estudo é aplicado a uma interseção isolada, com duas vias de aproximação perpendiculares, compostas de duas faixas de trânsito de sentido único. Isto é, o controle é feito a partir das condições observadas em duas aproximações. A velocidade operacional da via é de 60 km/h e o tráfego é composto unicamente por carros de passeio. Foram realizadas 10 simulações independentes de 1 hora para cada um dos controladores testados e para cada nível de volume estudado (Tabela 3), totalizando 150 horas de simulação. Em todas as situações simuladas foi considerado para cada faixa um *headway* médio de descarga de 2 segundos. A geração dos veículos pelo HUTSIM considera uma distribuição exponencial negativa deslocada.

Tabela 3: Volumes de tráfego simulados (dados em veículos/hora)

Volume	Via principal	Via secundária	Volume total
Baixo	600	200	800
Médio	1200	400	1600
Alto	1800	600	2400

4. RESULTADOS OBTIDOS

Apesar de a investigação ter sido realizada com todos os controladores anteriormente descritos, nessa seção são apresentados os resultados e as análises referentes apenas a dois dos quatro estudos comparativos realizados, que são: (i) Controlador HUT *versus* Controlador HUT-RS3, que foi o controlador derivado do controlador original que apresentou os melhores resultados; e Controlador HUT *versus* Controlador AJ-14R.

Os resultados dos estudos comparativos mencionados são apresentados nas Tabelas 4 e 5. Nessas tabelas são mostradas as diferenças percentuais entre os valores médios dos resultados das 10 horas de simulação realizadas para cada controlador, para cada nível de volume estudado. Para facilitar a análise, o Controlador HUT foi utilizado como referência e, assim, a diferença percentual foi calculada a partir da Equação 1.

$$DP = \frac{(VBUi - VBPI)}{VBPI} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

DP – Diferença Percentual

VBPI – Valor médio da variável *i* fornecido pelo Controlador HUT;

VBUi – Valor médio da variável *i* fornecido pelo controlador de base de regras única.

Foram realizados, também, testes de hipóteses para verificação da igualdade entre as médias das medidas de desempenho do tráfego (atraso médio e número de paradas veiculares) e resposta dos controladores (tempo médio de verde e comprimento médio de ciclo). Isto é, buscou-se verificar se as diferenças nos resultados obtidos são significativas (para $\alpha = 5\%$). Para a realização dos testes, os resultados de simulação (10 horas para cada caso) foram considerados conjuntos de dados emparelhados para cada hora de simulação independente, uma vez que o simulador utilizado permite gravar um padrão de chegadas veiculares e reutilizá-lo para diferentes testes. Nas Tabelas 4 e 5 os resultados dos testes realizados são apresentados em termos de “S”, para indicar diferenças significativas, e “NS”, caso contrário.

4.1. Análise comparativa dos Controladores HUT e HUT-RS3

As diferenças percentuais do Controlador HUT-RS3 em relação ao Controlador HUT (Tabela 4) variaram de 1,0% a 19,6% para as medidas de desempenho do tráfego. As menores diferenças foram observadas sob o volume médio para a interseção e para a via principal, que apresentou variação de 1,0% a 8,3%. Para os volumes alto e médio o Controlador HUT apresentou melhores resultados de desempenho do tráfego para todas as análises. Já na operação com volume baixo, este controlador tende a beneficiar a via secundária, trazendo prejuízo para a fluidez da via principal e para a interseção como um todo. Essa observação remete à hipótese de interação entre os fatores “volume” e “controlador”, a qual foi confirmada através da realização de uma Análise de Variância, onde também foi considerado o nível de significância de 5%.

Para as medidas relacionadas à resposta do controlador (verde médio e comprimento de ciclo) as diferenças foram mais expressivas, chegando a 43,7%. O Controlador HUT com base de regras particionada apresentou valores menores para verde médio e comprimento de ciclo.

Conforme as análises realizadas das superfícies de resposta para cada grupo de regras do controlador HUT (seção 2.1), observa-se que cada grupo apresenta uma estratégia pontual com vistas ao benefício com sua operação conjunta. Nesse sentido, os resultados obtidos mostram que a utilização de fragmentos de um controlador de base particionada para aplicação como controlador único não é adequada. É importante lembrar que o Controlador HUT-RB3, dentre os três controladores derivados testados, foi o que apresentou os melhores resultados na comparação com o Controlador HUT.

Tabela 4: Diferença percentual entre os resultados dos controladores HUT e HUT-RS3, e significância segundo o teste de Hipótese

Controladores HUT e HUT-RS3		Diferença Percentual (DP)		
Variável	Aproximação	V. Alto	V. Médio	V. Baixo
ATRASO MÉDIO (s)	Interseção	13.2	6.3	-7.7
		S	S	S
	Via Principal	13.6	1.2	-16.0
		S	NS	S
Via Secundária	12.0	16.3	19.4	
	S	S	S	
PARADAS VEICULARES (%)	Interseção	10.0	3.7	-10.6
		S	S	S
	Via Principal	14.9	1.0	-19.6
		S	NS	S
Via Secundária	2.6	8.3	15.2	
	NS	S	S	
VERDE MÉDIO (s)	Via Principal	20.1	43.7	37.9
		S	S	S
	Via Secundária	28.8	27.7	4.0
		S	S	S
COMPRIMENTO DE CICLO (s)	Interseção	18.1	26.9	13.0
		S	S	S

S: diferença significativa; NS: diferença não-significativa

4.2. Análise comparativa dos controladores HUT e AJ-14R

A comparação realizada entre os Controladores HUT e AJ-14R (Tabela 5) revela que para o volume alto, os controladores não apresentam diferenças significativas para as medidas de desempenho do tráfego, salvo para o atraso médio na via secundária, em que o controlador AJ-14R mostrou-se superior em 4%. Para os demais volumes (baixo e médio) ocorreram três situações com diferenças não significativas. Para o volume baixo o controlador AJ-14R apresentou melhores resultados em 100% dos casos, e para o volume médio este controlador privilegiou a via secundária. Diante destes resultados fica clara a possibilidade de interação entre “volume” e “controlador”, a qual foi investigada e comprovada através de uma Análise de Variância, para $\alpha = 5\%$.

Para as medidas relativas à resposta dos controladores observou-se que para os volumes alto e médio, tanto o verde médio, como o comprimento de ciclo, foram menores para o controlador AJ-14R. Para o volume alto as diferenças variaram de 10% a 13%, sendo todas significativas. Para o volume médio a maior variação ficou em 7,2% com um dos resultados não significativo. Finalmente, para o volume baixo, os valores de verde médio e comprimento de ciclo foram menores para o controlador HUT, no entanto as diferenças percentuais obtidas foram baixas (0,4% a 5%), sendo ainda uma delas não significativa.

Dos 27 testes realizados, 37% apresentaram diferenças não significativas. Dos 17 resultados com diferenças significativas, 71% foram indicativas da superioridade do controlador AJ-14R sobre o controlador HUT.

Tabela 5: Diferença percentual entre os resultados dos Controladores HUT e AJ-14R, e significância segundo o teste de Hipótese

Controladores HUT e AJ-14R		Diferença Percentual (DP)		
Variável	Aproximação	V. Alto	V. Médio	V. Baixo
ATRASSO MÉDIO (s)	Interseção	0.1	0.7	-4.0
		NS	NS	S
	Via Principal	2.4	5.9	-4.8
		NS	S	S
Via Secundária	-4.0	-8.7	-1.3	
	S	S	NS	
PARADAS VEICULARES (%)	Interseção	2.0	3.0	-5.3
		NS	S	S
	Via Principal	2.9	7.3	-6.9
		NS	S	S
Via Secundária	0.7	-3.4	-0.9	
	NS	S	NS	
VERDE MÉDIO (s)	Via Principal	-13.4	-7.2	5.0
		S	S	S
	Via Secundária	-10.8	-1.0	0.4
COMPRIMENTO DE CICLO (s)	Interseção	S	NS	NS
		-10.2	-3.6	1.6
		S	S	S

S: diferença significativa; NS: diferença não-significativa

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos é possível observar que a estrutura do conjunto de regras do controlador *fuzzy* impacta de modo significativo tanto na resposta do controlador quanto no desempenho do tráfego. O estudo mostra também que a escolha da melhor estrutura a ser utilizada em um dado projeto deve passar, especialmente, pela investigação dos volumes a serem controlados, uma vez que foi comprovada a interação entre “volume” e “controlador”.

Através da investigação realizada, acrescida dos estudos disponíveis na literatura acerca da concepção de controladores semafóricos *fuzzy*, verifica-se que, de modo geral, a utilização de controladores *fuzzy* estruturados com bases de regras únicas é mais adequada para aplicação no controle semafórico devido à simplicidade de concepção dessa estrutura quando comparada à necessidade da definição de grupos distintos de regras para cada atuação do controlador no atendimento a uma mesma aproximação, como é requerido no caso dos controladores de base particionada. O estudo mostrou que, para as condições de tráfego investigadas, é possível obter para esse tipo de controlador desempenho comparável, em alguns casos até superior, ao propiciado pelo controlador de base particionada. Entretanto, a definição das regras que irão formar a base de regras única é um elemento crítico no projeto do controlador. Conforme mostrado na presente pesquisa, a adoção de uma base de regras inadequada impacta negativa e severamente o desempenho do tráfego controlado.

Recomenda-se a realização de testes adicionais com outras situações de tráfego, incluindo volumes médios variáveis ao longo da hora de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M. and Jacques, M. A. P. (2005) Estudo para aprimoramento da operação de controladores semafóricos fuzzy. In: *XIX ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2005, Recife. Rio de Janeiro: ANPET, 2005. v. 1. p. 817-828.
- Bingham, E. (1998) *Neurofuzzy Traffic Signal Control*. Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Technology.
- Favilla Jr., J., A. Machion, and F. Gomide (1993) Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, San Francisco, USA, March 1993, pp.506-511.
- Jacques, M.A.P., J. Niittymäki, and M. Pursula (2002) Analysing Different Fuzzy Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections. In: *TRB 81st Annual Meeting*. January 13-17, 2002, Washington, DC.
- Kosonen, I. (1999) *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications. Publication 100*, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Espoo, Finland, 1999, 248 p.
- Lee, C. C. (1990) Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, March/April 1990, pp. 404 – 418.
- Liu, S. –M. and S.-H. Hu (1992) A method of generating control rule model and its application. *Fuzzy Sets and Systems* 52, N1. November 1992.
- Mamdani, E. H. (1973) Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEEE* 121, vol. 12, p. 1585-1588.
- Mamdani, E. H. and Assilian S. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man-Machine Studies*, vol. 7, p. 1-13.
- Niittymäki, J. (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control*. Tese de Licenciatura, Helsinki University of Technology, Civil and Environmental Engineering, Espoo. Signal
- Niittymäki, J. and M. Pursula (2000) Signal Control Using Fuzzy Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 116, pp.11-22.
- Niittymäki, J. and R. Nevala (2000) Multi-level and Multi-objective Signal Control Using Fuzzy Methods. In: *6th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, Singapore, June 2000, 11 p.
- Pappis, C. P. and H. Mamdani (1977) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, N° 10.
- 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.
- Sayers, T., J. Anderson, and M. Bell (1998). Traffic Control System Optimization: a Multi-objective Approach. In: *3rd IMA International Conference on Mathematics in Transport Planning and Control*, Cardiff, April 1998, pp. 37-46.
- Sugeno, M. (1985) An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences* 36, p. 59-83.
- Sugeno, M. and Nishida, M. (1985) Fuzzy control of model car. *Fuzzy Sets and Systems* 16, p. 103-113.
- Teodorović, D. (1999) Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A*, vol. 33, p. 337-364.
- Zadeh, L. A. (1973) Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, p. 28-44.
- Zimmermann, H.-J. (1996) *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 3rd Edition. Kluwer Academic Publishers.

Michelle Andrade (maccivil@gmail.com)

Maria Alice Prudêncio Jacques (mapj@unb.br)

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Bloco SG-12, 70.910-900, Brasília, DF.