

ESTUDO PARA APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Michelle Andrade

Maria Alice Prudêncio Jacques

Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO

Os controladores semafóricos vêm sendo continuamente aperfeiçoados, de modo a permitir que respondam cada vez melhor às solicitações dos fluxos de tráfego nas interseções. Hoje, diferentes técnicas de otimização e de inteligência artificial, como é o caso da lógica *fuzzy*, têm sido empregadas com esse propósito. Neste contexto, os controladores semafóricos *fuzzy*, operando sob o princípio da extensão, têm se revelado uma alternativa promissora para o controle do tráfego em interseções isoladas. Visando aprimorar a operação desses controladores, o presente trabalho apresenta e avalia o impacto de uma estratégia que permite o ajuste das extensões em tempo real, refletindo modificações nos conjuntos *fuzzy* das variáveis lingüísticas de entrada. Essa avaliação foi realizada por meio da simulação da resposta do controlador e da operação do tráfego sob duas condições de ajuste diferentes. O estudo revelou que esse ajuste, especialmente quando realizado após cada extensão, aumenta a eficácia do controlador semafórico *fuzzy*.

ABSTRACT

Traffic signal controllers have been continuously improved to better their performance in response to traffic flow needs at signalized intersections. Thus, different optimization and artificial intelligence techniques, as is the case with fuzzy logic, have been added to the controllers. Fuzzy signal controllers, operating according to the extension principle, have been regarded as a promising control strategy for isolated intersections. With a view to further improving these types of controllers, this study aims to present and evaluate the impact of fuzzy extensions' on-line adjustments. These adjustments reflect modifications to the fuzzy sets linked to the input variables. The evaluation has been performed by simulating control response and traffic operation according to two different adjustment conditions. Results show that extension adjustments, especially when promoted after each extension given, improve fuzzy signal controller performance.

1. INTRODUÇÃO

Como forma de gerenciar os conflitos do tráfego em interseções, o semáforo é um dos dispositivos mais empregados em áreas urbanas. Ele pode atuar de modo isolado ou de forma coordenada, e ter sua programação definida a partir de dados históricos do tráfego ou responder, em diferentes níveis, às solicitações do tráfego nas aproximações das interseções.

No caso da operação isolada atuada pelo tráfego, diferentes técnicas têm sido empregadas para a definição do direito de passagem dos fluxos conflitantes, isto é, para o cálculo dos tempos dos semáforos. Dentre elas uma das mais recentes é o emprego da lógica *fuzzy*. Essa técnica tem a característica de emular a percepção humana, e a sua utilização no projeto de controladores tem a vantagem de eliminar a necessidade da representação de relações complexas através de modelos matemáticos sofisticados.

No caso de controladores semafóricos, o uso da Lógica *Fuzzy* foi iniciado com o trabalho de Pappis e Mamdani (1977). Desde então, diferentes controladores têm sido desenvolvidos e, recentemente, estudos apontam para a vantagem da integração da Lógica *Fuzzy* com outras técnicas de Inteligência Artificial. Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada do controlador semafórico sobre a resposta do controlador e a operação do tráfego. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia para o ajuste dos conjuntos *fuzzy on-line*, intitulada Seleção

Dinâmica de Planos *Fuzzy*, baseada na análise de uma variável relacionada à operação do tráfego: fila final em cada aproximação ao final do tempo vermelho.

A metodologia foi elaborada de modo a permitir a avaliação do impacto do ajuste realizado em dois momentos distintos: ao final de cada extensão e ao final de cada fase. Um programa computacional foi desenvolvido para permitir a simulação da resposta do controlador e da operação do tráfego sob as duas condições de ajuste. Foram realizados vários testes através dos quais foi verificado que o ajuste *on-line* (nas duas formas consideradas) representa um ganho para a operação do tráfego em comparação à operação do controlador *fuzzy* sem ajuste dos conjuntos *fuzzy*. Além disso, o ajuste ao final de cada extensão proporcionou melhores resultados que o ajuste ao final da fase.

2. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O controlador semafórico *fuzzy* é um controlador automático atuado pelo tráfego com algumas características específicas, ou seja, em sua estrutura há elementos componentes de um sistema *fuzzy*: interface de fuzificação, base de conhecimento, lógica de tomada de decisão, interface de defuzificação (Nittymäki, 1998).

2.1 Lógica Fuzzy

O termo *fuzzy* foi introduzido pelo professor Lofti A. Zadeh no início da década de 60, em Berkeley, Califórnia, como uma forma de modelar a incerteza da linguagem natural observada no pensamento e julgamento humano. Ela fornece meios de representação e de manipulação de conhecimentos imperfeitamente descritos, vagos ou imprecisos; tais como os conceitos de “um pouco mais” ou mesmo de “grande” e “pequeno”, estabelecendo uma interface entre os dados descritos simbolicamente (variáveis lingüísticas) e numericamente (Galvão e Valença, 1999).

Os conjuntos *fuzzy* são definidos como conjuntos de objetos que podem ser representados tanto por números reais (p.ex: fila de 4, 10 ou 28 veículos) quanto por variáveis lingüísticas (p.ex: fila pequena, fila média ou fila grande) e que não apresentam contornos bem definidos. Os conjuntos *fuzzy* são formados pelos elementos propriamente ditos associados ao grau de pertinência de cada elemento no respectivo conjunto (Zadeh, 1965).

2.2 Controladores Semafóricos Fuzzy Estudados

O desenvolvimento de diferentes “tipos” de controladores semafóricos *fuzzy* justifica-se devido à flexibilidade dos controladores *fuzzy* e pelas diversas situações possíveis em controle semafórico.

Assim como o controle semafórico por tempo fixo, atuado e semi-atuado convencionais, os controladores semafóricos *fuzzy* podem atuar sob diferentes estratégias de controle, ou seja, tanto em interseções isoladas, em rede aberta ou rede fechada (Niittymäki, 1998). Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos modelos de controladores semafóricos *fuzzy* para interseção isolada presentes na literatura revisada, juntamente com as variáveis de entrada e saída. As funções de pertinência utilizadas em todos os controladores apresentados são do tipo triangular, trapezoidal e/ou *singleton*.

Tabela 1: Variáveis lingüísticas empregadas nos controladores semafóricos *fuzzy* estudados

MODELO	VARIÁVEIS	
	ENTRADA	SAÍDA
Pappis e Mamdani (1977)	<p>A – No. de chegadas na aproximação aproximação que está recebendo verde, estimada para cada 10 segundos.</p> <p>Q – No. de veículos parados na fila formada na aproximação que está recebendo vermelho, estimado para cada 10 segundos.</p> <p>T – Tempo decorrido desde o final do período de verde.</p>	<p>E – Extensão dada para o período corrente de verde</p>
Kim (1994, <i>apud</i> Niittymäki, 1998)	<p>S.LEFT – No. de veículos que vão converter à esquerda presentes na região até 61 metros da faixa de retenção da aproximação que está recebendo verde.</p> <p>S.THURU – No. de veículos que vão seguir reto presentes na região até 61 metros da faixa de retenção da aproximação que está recebendo verde.</p> <p>C.LEFT – No. de veículos que vão converter à esquerda presentes na região até 61 metros da faixa de retenção da aproximação que está recebendo vermelho.</p> <p>C.THURU – No. de veículos que vão seguir reto presentes na região até 61 metros da faixa de retenção da aproximação que está recebendo vermelho.</p>	<p>E – Extensão dada para o verde corrente.</p>
Fávilla <i>et al.</i> (1993)	<p>A – No. de chegadas na aproximação que está recebendo verde.</p> <p>Q – No. de veículos em fila na aproximação que está recebendo vermelho.</p> <p>RQ – Fila residual ao final da fase de verde.</p> <p>QV – Variação da fila durante a fase de verde.</p> <p>ULV – limite máximo de variação para as funções de pertinência de E.</p>	<p>E – Extensão a ser dada para o verde corrente.</p>
Trabia <i>et al.</i> (1999, <i>apud</i> Jacques <i>et al.</i> , 2002a)	<p>Omax – Fluxo máximo de aproximação durante o intervalo Δ_t, expresso em veículos/s/faixa.</p> <p>Qmax – comprimento máximo de fila observado em Δ_t, em veículos/s/faixa.</p> <p>Trgreen – Intensidade de tráfego durante o verde de Δ_t, em veículos/s/faixa.</p> <p>Trred – Intensidade de tráfego durante o vermelho de Δ_t, em veículos/s/faixa.</p>	<p>E – Extensão, que não é propriamente uma variável lingüística.</p>
Niittymäki e Pursula (2000)	<p>A – No. de veículos na zona de aproximação (100 m) durante o verde.</p> <p>Q – No. de veículos com velocidade abaixo de 5 km/h na zona de aproximação durante o vermelho.</p>	<p>EXT – Extensão a ser dada para o tempo de verde corrente.</p>

Fonte: adaptado de Jacques, Niittymäki e Pursula, (2002^a).

O controlador utilizado como base para os estudos desenvolvidos neste trabalho foi o controlador de Niittymäki e Pursula, diferenciando apenas na forma das funções de pertinência da variável Extensão e tendo uma regra a mais na base de regras do controlador (Andrade, 2004). Este controlador, desenvolvido e amplamente estudado na Finlândia, tem apresentado bons resultados de controle (Niittymäki e Pursula, 2000; Jacques *et al.*, 2002^a; Jacques *et al.*, 2002b, 2002c; Jacques *et al.*, 2003), o que justifica o aprofundamento aqui proposto.

2.3 Detalhamento do Controlador de Niittymäki e Pursula

No modelo proposto por Niittymäki e Pursula (2000), a lógica *fuzzy* atua em dois sentidos. Primeiramente, é empregada para selecionar a seqüência de fases (seletor *fuzzy*); depois, para determinar o valor das extensões de verde (extensor *fuzzy*). Isto é feito com o uso de um fator específico *fuzzy* que indica a necessidade de verde para cada fase.

Neste controlador, as condições de tráfego são avaliadas ao longo de 100 m antes da linha de retenção, sendo esta região chamada de zona de aproximação. O tempo mínimo de verde do grupo focal é de 5 s, e o sistema permite até 5 intervenções. A primeira intervenção ocorre logo após o mínimo de verde, e as demais intervenções ocorrem ao final de cada extensão dada, definindo uma nova extensão até que o sistema solicite mudança de fase (extensão igual a zero, ou fila muito longa na aproximação que está recebendo vermelho) ou até que seja atingido o número máximo de intervenções permitidas para cada fase.

Na primeira versão, os valores das extensões podiam variar no intervalo [0.0 9.0] e, então, o máximo de verde para cada fase seria 50 s. Nas recentes atualizações do projeto FUSICO (Niittymäki e Pursula, 2000) o peso das extensões pode ser definido pelo usuário de acordo com as características globais da interseção. No caso de uma interseção com duas aproximações (onde pelo menos uma delas seja arterial), com faixas separadas para movimentos de conversão, por exemplo, o extensor *fuzzy* permite mais de seis (06) extensões, sendo que cada uma delas pode ter seus valores iguais a 5, 10 ou 15 s. Neste caso, o valor máximo de verde permitido para uma fase é de 95 s.

O conjunto *fuzzy* relativo à Extensão é do tipo Singleton, ou seja, conjuntos *fuzzy* para os quais apenas um valor do universo de discurso tem grau de pertinência igual a 1, e para os demais valores, o grau de pertinência é igual a zero.

2.4 Operação dos Controladores Semafóricos *Fuzzy*

Como já mencionado, um controlador *fuzzy* é composto, basicamente, pelos módulos de fuzificação, inferência e defuzificação. Esta estrutura está representada na Figura 01.

A interface de fuzificação pode ser definida como o processo que faz a associação dos valores observados das variáveis de entrada nos universos de discurso correspondentes. Nela são realizadas as avaliações do grau de pertinência do valor medido com relação aos diferentes conjuntos *fuzzy* da variável lingüística considerada. No caso do controlador semafórico estudado as variáveis de entrada são duas, a fila parada na aproximação que recebe vermelho, e o número de veículos que estão sendo atendidos pela aproximação que recebe o verde.

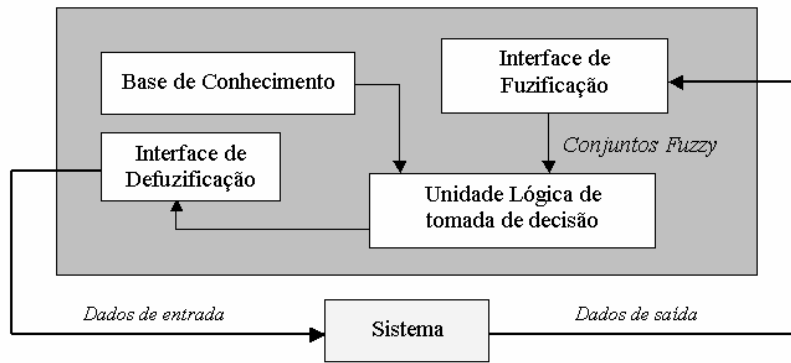


Figura 1: Diagrama de um controlador *fuzzy* (Fonte: Niittymäki,1998)

A base de conhecimento, que é um conjunto de regras *fuzzy* do tipo “Se-Então”, tem como objetivo obter uma solução aproximada para um dado problema. Na lógica de tomada de decisão os valores de entrada são avaliados sob as regras da base de conhecimento e é definida uma solução para o problema tratado. No caso estudado a solução é a extensão do tempo de verde.

A interface de defuzificação é onde ocorre o processo de defuzificação, que consiste na seleção de um valor numérico (crisp) que represente o resultado da variável de saída *fuzzy*, obtido da inferência *fuzzy*. A variável extensão de tempo de verde deve ter o valor *fuzzy* obtido convertido para tempo em segundos, por exemplo.

O processo de entrada dos dados do sistema (interseção semaforizada) para o controlador semafórico *fuzzy* é feito através de sensores localizados nas aproximações, em pontos pré-especificados, de acordo com a metodologia definida para o controle. A saída dos dados para o sistema é exatamente a extensão dada no tempo de verde corrente.

3. CONTROLADOR FUZZY AJUSTÁVEL

Nesta seção são apresentadas duas propostas de ajuste *on-line* dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* de entrada utilizados em controladores semafóricos *fuzzy*. A partir de um controlador *fuzzy* básico, as propostas de ajuste foram implementadas e analisadas através de simulação da operação do tráfego em uma interseção isolada. Para isto, foi necessário determinar as variáveis de controle do controlador proposto, bem como um esquema de operação básico.

3.1 Caracterização do sistema de controle

O sistema em estudo é uma interseção semaforizada com as seguintes características:

- Interseção isolada;
- 2 faixas de trânsito em 2 vias perpendiculares, de sentido único;
- a interseção é composta de uma aproximação principal e uma secundária;
- não são permitidos movimentos de conversão;
- não há controle para pedestres, ou para transporte público;
- controle bifásico;
- Localização dos detectores de tráfego: 0 e 100 m;
- Headway de descarga = 2 seg/veículo;
- Tempo mínimo de verde = 10 s;

- Relação de volume/capacidade obedecendo, para a aproximação secundária, aos critérios apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Relação V/C para limitação da Condição de Tráfego

Condição de Tráfego	Relação Volume/Capacidade
Volume Baixo	$V/C < 0,5$
Volume Médio	$0,5 < V/C < 0,8$
Volume Alto	$V/C > 0,8$

São analisados três diferentes níveis de volume de tráfego (baixo, médio e alto), sendo que o volume da aproximação principal é três vezes o volume da aproximação secundária, como mostrado na Tabela 3. Esta relação entre os volumes das duas aproximações é um dos critérios adotados pelo DENATRAN (1984) para a recomendação de controle atuado pelo tráfego.

Tabela 3: Volumes e Taxas de Chegada das aproximações da interseção estudada

Aproximações	Volumes e Taxas					
	Baixo		Médio		Alto	
	(v/h)	(v/s)	(v/h)	(v/s)	(v/h)	(v/s)
App Secundária	200	0,0556	300	0,0833	400	0,1111
App Principal	600	0,1667	900	0,2500	1200	0,3333

Onde: v/h – veículos por hora;
v/s – veículos por segundo.

3.2 Caracterização do controlador

O controlador *fuzzy* base utiliza o método de defuzificação centro de gravidade (COG), e os conectivos “E” e “TAMBÉM” são implementados por meio dos operadores mínimo e máximo, respectivamente. Esses elementos foram utilizados na implementação deste controlador no MATLAB[®]. A função de implicação adotada é a regra de operação mínima de Mamdani.

As variáveis lingüísticas deste controlador são representadas por:

a) *Variáveis de entrada*

Fila: número de veículos da aproximação que está recebendo a indicação de vermelho;

Chegada: número de veículos na aproximação que está recebendo a indicação de verde.

b) *Variável de saída*

Extensão: extensão dada ao tempo de verde corrente, ou seja, extensão do tempo de verde que é fornecida à aproximação que está sendo servida.

São apresentados na Tabela 4 os possíveis valores assumidos pelas variáveis lingüísticas definidas, ou seja, os conjuntos *fuzzy*; bem como os limites de cada conjunto e a forma da função de pertinência definida.

Tabela 4: Intervalo e forma das funções de pertinência das variáveis linguísticas do controlador base

Fila					
Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Pequena	Média	Longa	Qualquer	-
Limites	[0 0 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]	-
Forma Funç.Pert.	Triangular		Trapezoidal		-
Chegada					
Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Zero	Pouca	Média	Muita	Qualquer
Limites	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Forma Funç.Pert.	Triangular			Trapezoidal	
Extensão					
Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Zero	Curta	Média	Longa	-
Limites	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	-
Forma Funç.Pert.	Triangular			Trapezoidal	-

A base de regras do controlador é composta de 14 regras, sendo que a regra 14 foi adicionada para melhorar a sensibilidade do controlador diante de diferentes situações de fila e chegada “Muita” (Andrade, 2004).

3.3 Determinação das variáveis de controle

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação de viabilidade de ajuste *on-line* dos conjuntos *fuzzy* de um controlador para uma interseção isolada. Essa avaliação deve ser realizada a partir da verificação da operação do tráfego submetido ao controle proposto. Para isso, faz-se necessária a determinação das variáveis de controle para a avaliação do desempenho do tráfego sob a ação do controlador. Em interseções isoladas, alguns dos indicadores de desempenho mais utilizados, quanto à fluidez, são:

- Atraso*: corresponde à diferença entre o tempo de percurso sob condições de fluxo livre e o tempo efetivamente gasto no percurso sob as condições existentes.
- Fila*: corresponde a uma seqüência de veículos solicitantes do direito de passagem na interseção. As principais medidas referentes à fila são: o tempo médio de permanência dos veículos na fila, o que corresponde a um atraso; os comprimentos médio e máximo da fila; e a porcentagem dos veículos que param na fila.

Visto que a avaliação proposta pode ser alcançada satisfatoriamente mediante um estudo simplificado, e ainda, à não disponibilidade de um simulador de tráfego apto a simular o processo de controle proposto, foi utilizada como medida de desempenho apenas a variável fila. Esta variável foi empregada nas avaliações de comprimento da fila máxima ao final do vermelho. Foi também considerada a diferença entre a fila inicial no verde e o número de veículos que partiram durante esse verde, ou seja, a verificação da presença veículos em espera por mais de um ciclo.

3.4 Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*

O processo de seleção dinâmica de planos *fuzzy* surgiu, inicialmente, da idéia da seleção de planos semaforicos pré-determinados e selecionados de acordo com a hora do dia, ou dia da semana (para controladores de tempo fixo), ou selecionados diante de diferentes condições de tráfego (para o controle atuado), e foi amadurecido quando analisado como sendo um instrumento de investigação preliminar dos potenciais benefícios do controle *neurofuzzy*.

3.4.1 Definição de Planos Fuzzy

Para estruturar o processo de Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, partiu-se de um estudo do controlador base, descrito no item 3.2. Foram realizadas análises sobre a resposta deste controlador em comparação com a resposta de controladores dele derivados por pequenos ajustes nos seus conjuntos *fuzzy* de entrada. Ou seja, foram feitos ajustes nos valores extremos dos conjuntos *fuzzy* inicialmente definidos (controlador base, ou situação 1), totalizando sete situações. Na realização destes ajustes a variável extensão foi mantida constante, assim como a forma das funções de pertinência (triangular, trapezoidal), para facilitar as análises propostas. A análise das diferentes situações mostrou que as mudanças na resposta do controlador, em decorrência das alterações dos conjuntos *fuzzy*, provocaram impactos significativos no seu desempenho (Santos, 2003).

Das situações estudadas por Santos (2003) para o desenvolvimento dos controladores a partir do controlador base, foram selecionadas três, sendo elas:

- *Situação 1*: situação inicial, correspondente ao controlador base;
- *Situação 4*: redução de 20% nos valores limite dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada;
- *Situação 7*: acréscimo de 20% nos valores limite dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada.

Como o ajuste dos conjuntos *fuzzy* deve atuar sobre o sistema de tráfego em forma de extensão de tempo de verde, foram extraídas dos controladores derivados das situações 1, 4 e 7 as respectivas matrizes de extensão de tempo de verde. Essas matrizes foram obtidas através do software MATLAB[®], e a sua utilização será referida no decorrer deste trabalho como Caso 1, Caso 4 e Caso 7, referentes à numeração das situações que lhes deram origem.

Sobre as tabelas de extensão *fuzzy* obtidas foi realizada uma análise a fim de identificar o caso que, dentre os três, apresenta predominantemente situações de menores extensões, e maiores extensões. A classificação dos casos em ordem crescente dos valores que a variável extensão pode assumir é dada por: Caso 7, Caso 1 (base) e Caso 4.

3.4.2 Metodologias de controle

Foram propostos dois métodos de ajuste, sendo um realizado ao final da fase e o outro realizado ao final de cada extensão dada ao tempo de verde. O 'Ajuste' é representado neste procedimento pela seleção da tabela de extensões *fuzzy* mais adequada à situação de tráfego e ao processo de controle que está proposto.

a) Ajuste ao Final da Fase

O ajuste realizado ao final da fase tem a proposta de corrigir, na próxima fase, as falhas detectadas na fase analisada a fim de manter o equilíbrio da interseção controlada. Sendo assim, se é detectado que o tempo de verde não está sendo suficiente para atender aquela aproximação, ou seja, se a fila inicial do verde não for totalmente dissipada, o controlador irá ajustar os conjuntos de forma a diminuir as extensões de verde que serão dadas na próxima fase (outra aproximação), para que a indicação verde volte mais rápido para a aproximação que não foi bem atendida.

b) Ajuste ao Final da Extensão

Os ajustes realizados ao final de cada extensão resultam em uma ação mais imediatista que o ajuste ao final da fase. Sendo assim, a partir da análise do processo de construção da fila na aproximação que está recebendo o vermelho, o ajuste age no sentido de corrigir as extensões de verde que ainda serão dadas nesta fase. A tendência é beneficiar a aproximação que está recebendo o verde quando o processo de construção da fila na outra aproximação é mais lento.

3.4.3 Simulações

Foram desenvolvidos dois programas intitulados SIMULA_FF e SIMULA_FV, os quais representam estruturas de simulação de tráfego. A sigla FF identifica a versão que trabalha sob condições de “fluxo fixo na fase”, e FV, a versão que trabalha sob condições de “fluxo variável na fase”. As estruturas são aptas a atuar de duas formas:

- controle com apenas uma tabela de extensão *fuzzy*;
- controle com seleção dinâmica de tabelas de extensão *fuzzy*.

Foram, portanto, elaboradas seis versões a partir dos modelos básicos SIMULA_FF e SIMULA_FV (Tabela 5).

Tabela 5: Versões desenvolvidas para simulações

Condições de Fluxo		Fluxo Fixo	Fluxo Variável
Controle <i>fuzzy</i> convencional		SIMULA_FFtab	SIMULA_Fvtab
Seleção	ao final da fase	SIMULA_Ffffase	SIMULA_Fvffase
Dinâmica	ao final da Extensão	SIMULA_Fffextensao	SIMULA_Fvfextensao

Foram realizadas simulações para as três situações definidas (1, 4 e 7) com os programas para o controle *fuzzy* convencional, ou seja, utilizando apenas uma tabela de extensões *fuzzy*. Para a Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, ou seja, utilizando as três tabelas simultaneamente, as simulações consideraram o ajuste feito ao final da fase e o ajuste ao final de cada extensão.

As simulações foram realizadas considerando três tamanhos de fila inicial na aproximação que está recebendo o primeiro tempo de verde. Foram elas: $Q_i=0$; $Q_i=10$ e $Q_i=15$. Cada situação inicial de fila foi testada para as três taxas de chegadas definidas na Tabela 3. Todos os testes foram realizados considerando o limite de quinze (15) ciclos. O total de simulações realizadas foi 90.

3.4.4 Resultados e Análises

São apresentados na Tabela 6 os resultados gerais obtidos das simulações das diferentes condições de volume e fila inicial, sob as duas formas propostas para a seleção dinâmica de planos. As análises foram realizadas sobre os valores de fila e de tempo de verde estabilizados e lidos ao final do 15º ciclo para o controle sob as condições de fluxo fixo. Para as condições de fluxo variável as análises foram realizadas sobre a média dos valores dos 15 ciclos corridos.

Os resultados mostram que a forma de seleção ao final de cada extensão produz resultados melhores ou iguais aos da seleção ao final da fase, em termos da variável de desempenho considerada (fila). Na aproximação principal, as duas formas têm igual desempenho para os

níveis de volume baixo e médio, e, para o volume alto, o desempenho da seleção ao final de cada extensão é melhor. Na aproximação secundária, as duas formas de ajuste mostraram desempenho praticamente idêntico. Com relação aos tempos de verde, a tendência do ajuste ao final de cada extensão é de produzir valores inferiores aos do ajuste ao final da fase. Na situação de fluxo variável, embora a mesma tendência seja observada, verifica-se que as diferenças obtidas são menores.

De qualquer modo, é possível concluir que a seleção de planos *fuzzy* ao final de cada extensão tende a produzir ciclos menores. Embora não se tenha nesse tipo de controle um ciclo fixo (o ciclo que aparece no final do período de simulação de FF só é mantido se não houver mudança no volume de tráfego a ser atendido), pode-se ter uma idéia do impacto do ciclo estabilizado sobre o atraso veicular tomando como base o cálculo do ciclo ótimo para as condições de fluxo fixo estudadas.

Tabela 6: Resultados estabilizados (para FF) e médios (para FV) de fila e tempo de verde para seleção dinâmica de planos *fuzzy*

			Fluxo Fixo			Fluxo Variável		
			vol baixo	vol médio	vol alto	vol baixo	vol médio	vol alto
Aproximação Principal								
Fila	Qi=0	ffase	4	5	7	4	5	9
		fextensão	4	5	6	4	5	7
	Qi=10	ffase	4	5	12	4	6	12
		fextensão	4	5	9	4	6	11
	Qi=15	ffase	4	5	12	4	6	15
		fextensão	4	5	9	4	6	15
Aproximação Secundária								
Fila	Qi=0	ffase	1	2	4	1	2	4
		fextensão	1	2	4	1	2	4
	Qi=10	ffase	1	2	6	2	3	6
		fextensão	1	2	5	2	3	6
	Qi=15	ffase	1	2	6	2	4	8
		fextensão	1	2	5	2	4	8
Aproximação Principal								
Tempo de Verde	Qi=0	ffase	15,0	23,2	33,5	14,3	21,6	37,5
		fextensão	15,5	21,2	33,4	14,4	22,2	34,2
	Qi=10	ffase	15,0	23,2	52,8	16,6	25,1	48,8
		fextensão	15,5	21,2	42,3	16,2	25,2	47,5
	Qi=15	ffase	15,0	23,2	52,8	18,0	28,1	62,9
		fextensão	15,5	21,2	42,3	17,9	27,9	60,3
Aproximação Secundária								
Tempo de Verde	Qi=0	ffase	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	14,2
		fextensão	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,9
	Qi=10	ffase	12,0	12,0	19,3	13,3	13,9	18,8
		fextensão	12,0	12,0	15,2	13,2	13,6	17,7
	Qi=15	ffase	12,0	12,0	19,3	14,1	15,0	23,9
		fextensão	12,0	12,0	15,2	13,9	14,7	22,7

Pode-se calcular os ciclos ótimos e as faixas de ciclos que proporcionam atrasos mínimos (Tabela 7) a fim de ter um parâmetro de análise dos ciclos encontrados nas simulações realizadas (Tabela 8).

Tabela 7: Intervalos calculados de minimização de atrasos

	Co	Intervalo		
Volume Baixo	27,89	20,92	-	41,84
Volume Médio	46,50	34,88	-	69,75
Volume Alto	139,50	104,63	-	209,25

Tabela 8: Ciclos para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy* ao final do 15° ciclo

			Fluxo Fixo		
			vol baixo	vol médio	vol alto
Ciclo (segundos)	Qi=0	ffase	34,0	42,2	52,5
		fextensão	34,5	40,2	52,4
	Qi=10	ffase	34,0	42,2	79,1
		fextensão	34,5	40,2	64,5
	Qi=15	ffase	34,0	42,2	79,1
		fextensão	34,5	40,2	64,5

Ainda que o critério de análise de desempenho adotado para o controlador apresentado neste trabalho seja a fila máxima no vermelho, observa-se pelas Tabelas 7 e 8 que os valores de ciclo referentes aos volumes baixo e médio estão dentro da faixa de minimização de atraso definida para ciclo constante. Os comprimentos de ciclo do volume alto não ficaram dentro da faixa determinada pelo cálculo do ciclo ótimo, mas estão dentro dos limites recomendados pelo DENATRAN (1984) de 30 a 120 segundos. Vale ainda considerar que controladores *fuzzy* estão sujeitos a variações em resposta a novas condições de tráfego.

Avaliando as simulações realizadas com o controlador convencional observou-se que o Caso 7 é o que apresenta as menores filas ao final do 15° ciclo. Este caso é ainda o que tem a tendência de disponibilizar os menores tempos de verde. Avaliando comparativamente os controladores *fuzzy* convencional e o controlador ajustável (seleção dinâmica de planos), sob a variável de desempenho fila ao final do vermelho, observou-se que a simulação de Fffext para volume alto apresentou resultados de fila estabilizada pela seleção dinâmica de planos *fuzzy* de 14% a 25% menores que as do Caso 7 individualmente. Para os volumes baixo e médio, o controlador convencional (sob a operação de qualquer uma das tabelas) apresentou os mesmos resultados que os controladores com seleção de planos.

O controlador *fuzzy* com seleção dinâmica de planos tem sua resposta definida em função da demanda. Sendo assim, dependendo da fila inicial, o controlador pode optar por uma situação (caso 1, 4 ou 7), e nele permanecer por um longo período atuando como um controlador *fuzzy* convencional, como normalmente ocorre em situações de volumes mais baixos. No entanto, existem situações em que ocorre a troca de tabelas de forma contínua e aleatória, como numa mudança brusca de condição de tráfego. Sendo assim, observa-se que este controle é vantajoso, visto que amplia a condição de controle do controlador *fuzzy* convencional, e não causa prejuízos em situações particulares de volume ou comportamento do tráfego. Dentre as duas formas propostas para a seleção dos planos *fuzzy*, os resultados mostraram que, em geral, a seleção ao final de cada extensão é mais vantajosa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados e análises apresentados, observa-se a importância deste estudo no sentido de incentivar futuras investigações em busca de uma forma mais abrangente de ajuste dos parâmetros dos controladores *fuzzy*, uma vez que este estudo exploratório apresentou resultados claros de melhora no desempenho do tráfego com o ajuste do controlador *fuzzy* de forma *on-line*. Tendo sido observado ainda que a forma de ajuste ao final de cada extensão mostrou ser mais efetiva do que a de ajuste ao final da fase. Isso permite inferir que uma forma de ajuste mais “contínua” é mais eficiente, o que sugere vantagens na adoção de outras técnicas de inteligência artificial associadas à lógica *fuzzy* para o projeto de controladores semafóricos.

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.
- DENATRAN (1984) *Manual de Semáforos*. Brasília: DENATRAN.
- Favilla, J., A. Machion e F. Gomide (1993) Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol 1, San Francisco.
- Galvão, C. O. e M. J. S. Valença (1999) *Sistemas Inteligentes: Aplicações em Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.
- Jacques, M. A. P.; J. Nittymäki e M. Pursula (2002a) Analyzing Different Fuzzy Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections. In: *TRB 81 ST ANNUAL MEETING*. CD Rom. Washington, DC.
- Jacques, M. A. P.; J. Nittymäki; M. Pursula, e I. Kosonen (2002b) The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers. *Anais do 13th Mini-Euroconference, 10 a 13 de Junho de 2002, Bari – Itália*, p.184 – 192.
- Jacques, M. A. P.; J. Nittymäki; M. Pursula, e I. Kosonen (2002c) 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 2003*, Maryland, USA, p. 64 – 69.
- Kim, S. (1994) *Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems*. Ph.D Thesis, Polytechnic University, USA, 139 p.
- Niittymäki, J. (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control*. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of Technology.
- Niittymäki, J. e M. Pursula (2000) Signal Control Using Fuzzy Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 116, p.11-22.
- Pappis, C. P.; H. Mamdani (1977) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, Nº 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.
- Trabia, M.B.; M. S. Kaseko e M. Ande (1999) A Two-stage Fuzzy Logic Controller for Traffic Signals. *Transportation Research Part C*, Vol. 7, p.353-367.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, v.8, p.338-353.

Michele Andrade (michelleandrade@unb.br)

Maria Alice Prudêncio Jacques (mapj@unb.br)

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