

SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM CONTROLADOR SEMAFÓRICO FUZZY COM O SOFTWARE “VISSIM”

HENRIQUE ANTÔNIO OLIVEIRA ARAÚJO

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, henrique.zamoura@gmail.com;

ALEXANDRE DE SOUZA JÚNIOR

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, alexandrejr5@hotmail.com;

JUCIMARA CARDOSO DA SILVA

Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, jucimara.cardoso@estudante.ufcg.edu.br;

CARINA SILVANI

Professora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, carinasilvani@hotmail.com;

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido por meio da utilização de um software de simulação de tráfego (PTV VISSIM) que oferece as ferramentas necessárias para gerar modelos de movimento de veículos cientificamente sólidos, permitindo uma modelagem realista do tráfego em estudo. Realizou-se uma simulação contendo uma interseção isolada entre duas vias de mão única em que os controladores semafóricos utilizam a lógica fuzzy para atuar no controle do tráfego produzindo como resultado um mínimo tempo de atraso e a máxima capacidade para o fluxo de veículos. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com aqueles alcançados pelas simulações realizadas com o software HUTSIM, que também utiliza a lógica fuzzy, em pesquisa desenvolvida no ano de 2004 pela professora do departamento de engenharia civil e ambiental da Universidade de Brasília, Dra. Michelle Andrade. Vale ressaltar, que nos dois casos as condições de contorno do problema eram semelhantes. Os resultados obtidos com o software VISSIM indicaram melhores condições de tráfego para diferentes volumes de veículos.

Palavras-chave: Simulação de Tráfego, Controladores Semafóricos, Lógica Fuzzy, Vissim, Interseção Isolada.

INTRODUÇÃO

O controle de fluxo de veículos em interseções urbanas, quando necessário, é realizado com a adoção de semáforos. Kulkarni e Waingankar (2007) definem os semáforos de trânsito como recursos comuns das áreas urbanas em todo o mundo que controlam o número de veículos que transitam em suas vias. Os principais objetivos de um semáforo são melhorar a segurança do trânsito na interseção, maximizar a capacidade de fluxo no cruzamento e minimizar os

atrasos. Além disto, deve-se levar em conta também questões ambientais, financeiras e sociais envolvidas em todo o complexo processo de deslocamento urbano.

Os princípios da lógica fuzzy foram desenvolvidos primeiramente por Jan Lukasiewicz (1878-1956), que em 1920 desenvolveu e introduziu conjuntos com grau de pertinência que combinados aos conceitos da lógica clássica, desenvolvida por Aristóteles, deu embasamento suficiente para que na década de 60, Lofti Asker Zadeh, professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, chegasse a ser o primeiro autor de uma publicação sobre lógica fuzzy.

Como seu nome implica, a teoria dos conjuntos fuzzy é, basicamente, uma teoria de conceitos graduados - uma teoria na qual tudo é objeto de gradação ou, para apresentar isso de modo figurativo, tudo tem elasticidade. Há um pouco mais de três décadas, desde sua iniciação, a teoria tem amadurecido, dentro de uma vasta cadeia de conceitos inter-relacionados e técnicas.

De forma simplificada, um determinado conjunto fuzzy A definido no universo de discurso X é caracterizado por uma função de pertinência μ_A , a qual mapeia os elementos de X para o intervalo $[0,1]$, conforme mostra a Equação 1.

$$\mu_{A,x} \rightarrow [0, 1] \quad \text{Eq. 1}$$

Dessa forma, a função de pertinência associa a cada elemento x pertencente a X um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$, que representa o grau de pertinência do elemento x ao conjunto A , isto é, o quanto é possível para o elemento x pertencer ao conjunto A .

Com relação as interseções, de acordo com DETRAN-MG (2012), uma interseção consiste em todo cruzamento em nível, entroncamento ou bifurcação, incluindo as áreas formadas por tais cruzamentos, entroncamentos

ou bifurcações. Estruturas rodoviárias apresentam-se cada vez mais complexas e, dependendo do fluxo médio diário de veículos, interseções de quatro tempos são necessárias para permitir a maior fluidez do trânsito sem realocar vias alternativas como alternativa de direção. A proposta desenvolvida visa a minimização do tempo de permanência de veículos em uma única interseção.

O semáforo é um dos dispositivos mais utilizados para controlar o tráfego em interseções urbanas. Quando programado para atuar como mecanismo de controle, pode ser utilizada a lógica fuzzy para criar planos de tráfego específicos para determinados fluxos de veículos nas vias. Dentre os diversos estudos de controladores semafóricos fuzzy, destaca-se o estudo de Pappis e Mamdani (1977), responsável por introduzir a lógica fuzzy no controle semafórico.

Segundo Vaz (2006), o mecanismo de Pappis e Mamdani (1977), Tabela 1, foi projetado para controlar uma interseção de duas vias de sentido único, sem permitir conversões. Este dispositivo considera que as chegadas dos veículos na interseção ocorrem de maneira aleatória. Este controlador é ativado a cada 10 segundos durante cada fase de verde, sendo que a primeira intervenção ocorre aos 7 segundos (tempo mínimo de verde), com sistema executando 5 intervenções no máximo. Cada intervenção varia de 1 a 10 segundos. No entanto, se uma intervenção é calculada para ser menor que 10 segundos, não será possível realizar outra interferência, ou seja, a fase será finalizada ao final deste tempo.

Tabela 1 - Conjuntos Fuzzy de Pappis e Mamdani (1977)

Variáveis de Entrada	Significado	Conjuntos Fuzzy
Chegada	Número de veículos que chegam na aproximação da via	5 conjuntos, variando de “nenhum veículo” até “quantidade excessiva”
Fila	Número de veículos na via de sinal vermelho	6 conjuntos, variando de “muito pequena” até “muito longa”
Variáveis de Saída	Significado	Conjuntos Fuzzy
Tempo de Verde	Duração efetiva do tempo de verde	5 conjuntos, variando de “muito curto” até “muito longo”
Extensão do tempo de verde	Prolongamento do tempo de verde	5 conjuntos, variando de “muito curto” até “muito longo”

Fonte: JACQUES; NITTYMAKI; PURSULA (2002)

No sistema de tráfego, são várias as situações que exigem a presença de algum dispositivo de controle para o gerenciamento dos conflitos entre veículos e/ou veículos e pedestres. Os semáforos podem atuar dependendo das características do tráfego, ou seja, podem operar de forma isolada ou em rede com os semáforos das interseções adjacentes. Quanto ao controle, este pode ser de forma a responder às condições reais de tráfego (operação atuada) ou ser programado a partir de dados históricos das condições de tráfego no local (operação em tempo fixo).

Estudos tem mostrado que o uso da lógica fuzzy para o controle semaforico atuado pelo tráfego é vantajoso em diversas situações. Em geral, os controladores fuzzy apresentados na literatura mantêm as suas condições de controle inalteradas, especificamente no que diz respeito às definições dos conjuntos fuzzy da base de regras empregados na definição da duração das extensões do tempo de verde. Estas extensões a serem concedidas pelo controlador à corrente de tráfego que está sendo servida são definidas a partir das variáveis linguísticas de entrada e saída e das regras que definem as relações entre as mesmas (ANDRADE, 2004).

Em relação aos controladores semaforicos, o DENATRAN afirma que se trata de um equipamento que “comanda o semáforo através do envio de pulsos elétricos para comutação das luzes dos focos. Para esse estudo, o controlador é classificado com atuado, ou seja, os intervalos de fase dependem do volume de tráfego veicular. Um controlador fuzzy consiste dos módulos de fuzificação, inferência e defuzificação, conforma mostra a Figura 1. Os componentes detalhados de um controlador fuzzy são:

- a. Interface de fuzificação: A interface de fuzificação pode ser definida como o processo que faz 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 linguística considerada.
- b. Base de conhecimento: De acordo com Zadeh (1965), a base de conhecimento é o algoritmo fuzzy que é “um conjunto ordenado de instruções fuzzy sobre cuja execução reside uma solução aproximada para um problema específico”. As instruções fuzzy são expressas pelas regras fuzzy “Se-Então”.
- c. Lógica para tomada de decisão: O comportamento do controlador fuzzy pode ser caracterizado pela agregação de diferentes regras

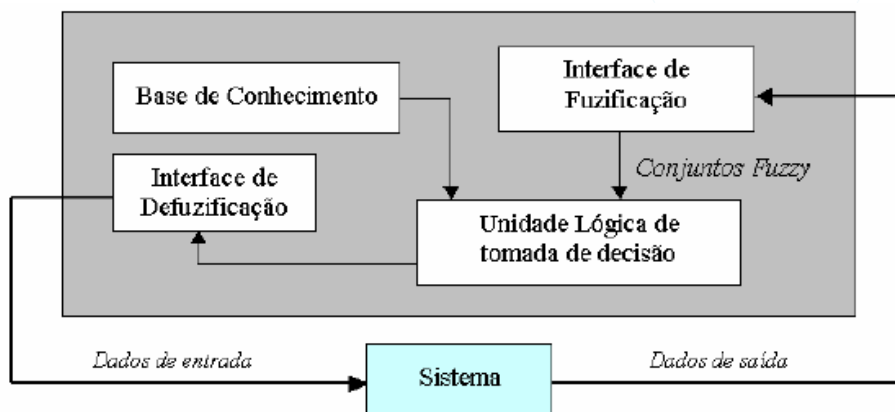
fuzzy. Para se obter a função resultante, é necessária a utilização de operadores lógicos.

d. Interface de defuzzificação: Após o processamento da variável de entrada do controlador fuzzy realizado pelo algoritmo de controle, o resultado (variável de saída) é dado no 'formato fuzzy'. Sendo assim, o processo de defuzzificação consiste na seleção de um valor numérico específico que represente o resultado da variável de saída fuzzy, produzido pelo conjunto de regras fuzzy. São apresentados na literatura diferentes métodos de defuzzificação:

- COA – Método do centro de área;
- MC – Critério do máximo;
- MOM – Média dos máximos;
- SOM – Mínimo do máximo;

São apresentados na seqüência alguns exemplos de produtos comerciais que empregam a tecnologia da lógica fuzzy. São eles: Ar condicionado, controle de aeronaves, misturadores químicos, transmissão automática de veículos, controle de forno de cimento, máquina copiadora, lavadora de louça, secador, controle de elevador, controle de fábrica, reconhecimento de letra, sistema de administração de saúde, umidificador, aquecedor de querosene, forno de microonda, refrigerador, máquina de cozinhar arroz, máquina fotográfica, comércio de ação, sistema de controle de metrô, televisão, tradutor, torradeira, sistema de controle de tráfego, aspirador de pó, filmadora, lavadora de roupa.

Figura 1 – Diagrama de um controlador fuzzy (NIITTYMAKI, 1998)



A lógica fuzzy é uma técnica de inteligência artificial em expansão em diversas áreas. Suas características, tais como, a sua capacidade de emular a percepção humana e ser tratada em termos de variáveis linguísticas, vêm ao encontro de diversas modalidades de controle em que a percepção humana se faz presente, dentre elas, o controle semafórico. Assim, o controlador de tráfego desenvolvido com a utilização da lógica fuzzy tem seus procedimentos de cálculo relativamente simples, visto que utiliza um pequeno número de parâmetros, número este bem menor que os utilizados em controles convencionais.

A lógica fuzzy mostra-se adequada para aplicação em controle de tráfego, pois o conhecimento especialista acerca do sistema de tráfego pode ser extraído e organizado em conceitos e regras linguísticas para a estruturação do banco de regras. Sendo assim, os controladores baseados em lógica fuzzy são projetados com o propósito de capturar os fatores chave para promover o controle do processo, sem a necessidade de conhecimento de funções matemáticas relativas a este processo. Esses fatores contribuem para o sucesso de controles fuzzy em aplicações em tempo real (JACQUES et al., 2002a).

O controlador semafórico fuzzy é um equipamento que estabelece o controle semafórico do tipo atuado pelo tráfego, baseado no princípio da extensão e adaptativo em relação a flutuações das condições de tráfego (GADÊLHA et al., 1999). As principais características dos controladores semafóricos fuzzy, que os diferem dos demais controladores atuados, estão associados à sua estrutura básica, constituída pelos seguintes elementos: base de conhecimento, unidade lógica de tomada de decisão e interfaces de fuzificação e defuzificação. Estas características atribuem ao sistema o conceito de inteligência abordado no âmbito da inteligência artificial.

Desde o estudo de Pappis e Mamdani (1977) introduzindo a lógica fuzzy no controle semafórico, diversos estudos foram realizados, tais como, Nakatsuyama et al. (1984), Chiu (1992), Kim (1994), Czogalla (1997), Favilla et al.(1993), Gadêlha et al. (1999), Trabia et al. (1999), Niittymäki e Pursula (2000), Jacques et al. (2002a, b e c) e Santos (2003).

A primeira tentativa conhecida de utilização de controle fuzzy em semáforos foi desenvolvida por Pappis e Mamdani (1977), a qual foi realizada sob simulação teórica de um controlador fuzzy em uma interseção isolada semaforizada. Neste estudo foi realizada uma comparação do método fuzzy desenvolvido com um controlador adaptativo ideal com tempo de ciclo ótimo. De acordo com os resultados, o controlador fuzzy teve o desempenho igual ou ligeiramente melhor que o método utilizado para comparação.

Outro exemplo de controle semafórico fuzzy é o modelo proposto por Chiu (1992), em que a lógica fuzzy é aplicada no controle de pequenas redes semafóricas, ou seja, no controle de múltiplas interseções alocadas em rede.

Na arquitetura proposta nesse trabalho, cada interseção age de forma independente das demais, realizando o ajuste do comprimento de ciclo, da fase e do offset, com base nos dados referentes à interseção, ou seja, os parâmetros de tempo de cada interseção são ajustados com base nas informações locais e são coordenados apenas com as interseções adjacentes a elas. As interseções controladas utilizam o mesmo conjunto de regras fuzzy para ajustar os parâmetros de tempo.

O controlador foi estruturado com 7 variáveis e 19 conjuntos fuzzy, os quais estão representados na Tabela 2. Para realizar o ajuste dos parâmetros de tempos semafóricos, foi utilizado um conjunto de 40 regras de decisão. As regras para ajustar o tempo de ciclo, as fases e os offsets são alocados separadamente e, sendo assim, os parâmetros são ajustados independentemente. Este processo causa uma notável simplificação na base de regras.

Tabela 2 - Conjuntos fuzzy definidos para o controlador de Chiu

Variáveis	Universo de Discurso	Conjuntos Fuzzy
Highest_sat	[0.0 1.0]	nenhum, baixo, ligeiramente baixo, bom, não alto, alto, saturado
Crosso_sat		
Cycle_change	[-0.2 0.2]	não grande, não médio, não pequeno, zero, pouco pequeno, pouco médio, pouco grande
Green_change	[-0.5 0.5]	
Vol-diff	[0.0 1.0]	nenhum, baixo, médio, alto, muito alto
Req_adjust		
Allow_adjust		

Vale ressaltar que, ao mesmo tempo que esses trabalhos revelam o grande potencial da lógica fuzzy para o desenvolvimento de controladores semafóricos eficientes e eficazes, eles também apontam para a necessidade de novos estudos nessa área.

Estudos realizados (JACQUES et al. 2002b) revelaram que os controladores semafóricos fuzzy produzem operações de tráfego, em geral, melhores do que o controlador de tempo fixo tradicional ou do que alguns modelos de controle atuados pelo tráfego. Na construção da base de regras da maioria dos controladores semafóricos fuzzy existentes, o operador união é usado para implementar os conectivos “também” e “ou”, e o operador interseção para o conectivo “e”. Também, a função de implicação regra de operação

mínima fuzzy (Regra de Mamdani) é freqüentemente utilizada. Porém, as razões para estas escolhas não se encontram indicadas nos trabalhos onde esses controladores são apresentados.

Sendo assim, o trabalho desenvolvido por Jacques et al. (2002b) avalia o impacto na resposta do controlador e no desempenho do tráfego mediante o uso de diferentes alternativas para a implementação da lógica de tomada de decisão, com base em uma determinada interface de fuzificação, base de conhecimento e interface de defuzificação. A resposta do controlador e o respectivo desempenho do tráfego foram avaliados com a ajuda do programa de simulação HUTSIM (KOSONEN, 1999). Os resultados do estudo mostram que a escolha entre as diferentes alternativas para a implementação da base de regras de um modelo de controlador semafórico fuzzy deve ser precedida de uma avaliação do impacto dessas alternativas disponíveis, ou seja, esta escolha não deve ser feita a priori, e deve considerar os objetivos desejados para o controle de tráfego.

Os controladores semafóricos fuzzy funcionam sobre uma base de regras e limites de conjuntos fuzzy (variáveis lingüísticas) pré-determinados de acordo com as condições e características do ambiente que deve ser controlado. Uma vez que ocorrem situações em que a variável lingüística assume grandezas diferentes, ou seja, as variáveis lingüísticas devem ter seus limites dos conjuntos fuzzy redefinidos, devido a uma brusca mudança de comportamento do ambiente, este controlador fuzzy não está mais “calibrado” para realizar o controle desta nova situação.

Como os conjuntos fuzzy são a estrutura de comparação do controlador da situação real com o objetivo do controle, é preciso dotar os limites dos conjuntos fuzzy de uma dada mobilidade, ou flexibilidade frente a situações que podem alterar o seu sentido, ou ainda ajustá-los para que produzam o resultado efetivamente desejado pelo especialista. Nesse contexto, o próximo capítulo apresenta e testa duas estratégias para o ajuste on-line dos conjuntos fuzzy.

METODOLOGIA

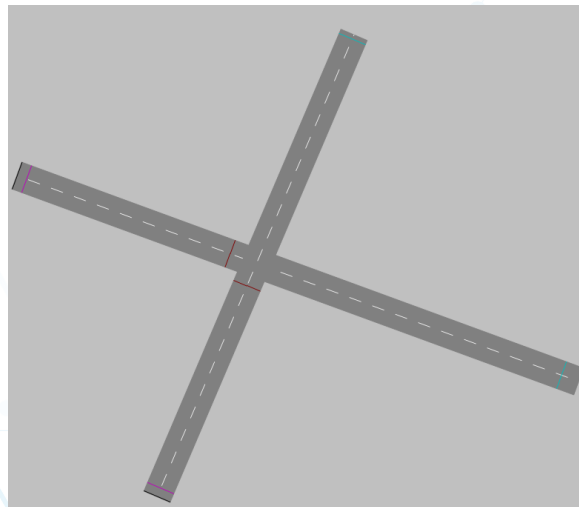
Com o objetivo de realizar este estudo, a metodologia foi elaborada de modo a permitir a avaliação do impacto do ajuste dos conjuntos fuzzy em apenas um momento: ao final de cada extensão, já que o mesmo apresentou melhores resultados do que no ajuste ao final da fase.

Além disso, o controle empregado deverá produzir o mínimo de atraso dos veículos e a máxima capacidade para o fluxo. Para isso, utilizou-se da linguagem computacional presente no software VISSIM de forma que seja possível permitir a simulação da resposta do controlador e da operação do tráfego sob as duas condições de ajuste. Com os testes realizados, fica bastante evidente que o ajuste online representa um ganho na operação do tráfego em comparação com a operação do controlador fuzzy sem ajuste dos conjuntos fuzzy.

Na Figura 2 tem-se a interseção desenhada no software de simulação. Para efeitos de simplificação, as seguintes características para a interseção em estudo foram adotadas:

- Interseção isolada;
- Duas faixas de trânsito em duas vias perpendiculares, de sentido único;
- Interseção composta de uma aproximação principal e uma secundária;
- Não são permitidos movimentos de conversão;
- Não há controle para pedestres, ou para transporte público;
- Localização dos detectores de tráfego: 0 e 100 m;
- Headway de descarga = 2 seg/veículo;
- Tempo mínimo de verde = 10 s
- Relação volume/capacidade, para a aproximação secundária, segundo a Tabela 1.

Figura 2 – Interseção de estudo (VISSIM)



Assim, seguindo as diretrizes da Tabela 1, foram analisados três diferentes níveis de tráfego (baixo, médio e alto), com a relação volume/capacidade de tráfego indicada na Tabela 2, sendo que o volume da aproximação principal é três vezes o volume da aproximação secundária, conforme mostram a Tabela 4 e a Figura 3.

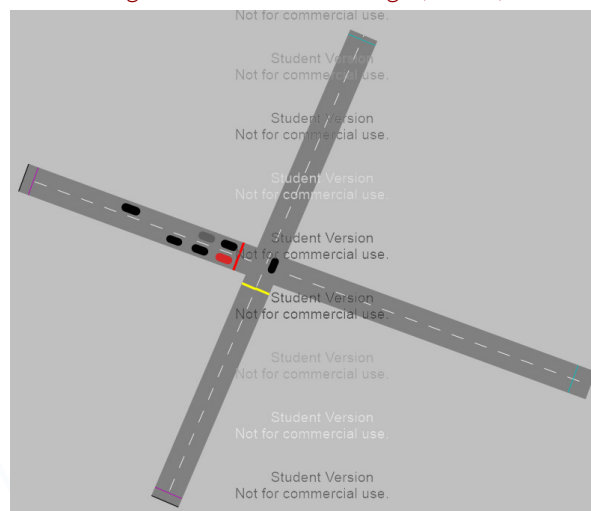
Tabela 3 – Relação V/C para limitação da condição de tráfego

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

Tabela 4 - Volumes e Taxas de Chegada das aproximações da interseção estudada

Aproximações	Relação Volume/Capacidade					
	Baixo		Médio		Alto	
	(v/h)	(v/s)	(v/h)	(v/s)	(v/h)	(v/s)
Ap. Secundária	200	0,0556	300	0,0833	400	0,1111
Ap. Principal	600	0,1667	900	0,2500	1200	0,3333

Figura 3 – Volume de tráfego (VISSIM)



Por se tratar de um estudo simplificado, foi utilizada como medida de desempenho apenas a variável fila, sendo empregada nas avaliações de comprimento da fila máxima ao final do vermelho. Com esta variável, foi possível

definir as condições em que o desempenho avaliado solicita o ajuste dos conjuntos fuzzy. Com isso, tem-se que:

- Da = número de veículos que partiu da linha de retenção na aproximação que está recebendo a indicação de verde;
- Qia = a fila inicial na aproximação que está recebendo a indicação verde e;
- Qfb = a fila formada na aproximação que recebe a indicação vermelha

Como neste estudo o ajuste será realizado ao final de cada extensão, tem-se as seguintes relações básicas:

Figura 4 – Condições para o ajuste dos conjuntos fuzzy

$$\text{Se } \begin{cases} Qfb \leq 4 & \longrightarrow \text{Aumentar as extensões na próxima extensão} \\ 4 < Qfb \leq 8 & \longrightarrow \text{Manter a próxima extensão em níveis médios} \\ Qfb > 8 & \longrightarrow \text{Diminuir a próxima extensão} \end{cases}$$

Devido à idéia de realizar um estudo simplificado acerca da viabilidade de ajuste on-line dos parâmetros dos conjuntos fuzzy, e à não disponibilidade de um simulador de tráfego para 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.

Uma vez definida a variável de controle a ser utilizada como medida de desempenho da operação do tráfego sob a atuação do controlador fuzzy proposto, são definidas as condições em que o desempenho avaliado solicita o ajuste dos conjuntos fuzzy. Assim, sendo Da o número de veículos que partiu da linha de retenção na aproximação que está recebendo a indicação de verde, Qia , a fila inicial na aproximação que está recebendo a indicação verde; e Qfb , a fila formada na aproximação que recebe a indicação vermelha, têm-se as relações básicas definidas como:

Figura 5 – Ajuste realizado no final de cada fase

$$\text{Se } \begin{cases} Da \geq Qia, & \text{se } \begin{cases} Qfb \leq 4 & \longrightarrow \text{Diminuir as extensões na próxima fase} \\ 4 < Qfb \leq 8 & \longrightarrow \text{Manter as extensões na próxima fase em níveis} \\ Qfb > 8 & \longrightarrow \text{Aumentar as extensões na próxima fase} \end{cases} \\ Da < Qia & \longrightarrow \text{Diminuir as extensões na próxima fase} \end{cases}$$

Através dessas relações verifica-se que, no caso da fila inicial (Qia) ter sido dissipada, o controlador deve selecionar as extensões para a próxima fase em função do número de veículos retidos durante o vermelho na outra aproximação. Quanto maior esse número, maiores as extensões a serem determinadas. No caso da fila inicial não ter sido dissipada, o controlador é ajustado de forma a tornar o futuro tempo de vermelho dessa aproximação o menor possível, respeitadas as condições prevaletentes da aproximação que passará a ser servida.

Os resultados obtidos com o software VISSIM foram comparados com os obtidos pelo software HUTSIM em pesquisa desenvolvida por Andrade (2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas para cada volume de tráfego descrito na Tabela 4, ou seja, volumes baixo, médio e alto. Além disso, para inserir os veículos nas simulações, utilizou-se de composições de veículos já predefinidas pelo software VISSIM que, para este estudo, trata-

se de composições referentes a apenas veículos comerciais, já que não foi considerado o transporte público na análise.

Com relação as rotas dos veículos, o VISSIM possibilita a utilização de 5 (cinco) tipos diferentes, porém, para o objetivo que se alcançar com esse estudo, considerou-se a rota do tipo “static”, ou seja, rota que inicia de um ponto de saída e termina em pontos de chegada, utilizando porcentagem estatística para cada destino. As rotas estáticas não aplicadas para veículos de transporte pública. Como o foco principal do estudo é a interseção em si, a utilização da rota estática é aceitável, não promovendo interferências nos resultados.

As Figuras 6, 7 e 8 indicam uma pequena diferença na variável Fila entre os softwares VISSIM e o HUTSIM, ou seja, apesar de programas diferentes e, como as premissas adotadas para as simulações foram as mesmas nos dois casos, conclui-se que os resultados são aceitáveis. No entanto, a existência dessas diferenças abre margem para a realização de simulações mais detalhadas (microscópicas) e sofisticadas do que às realizadas por esse estudo. Além disso, como já dito anteriormente, várias foram as simplificações adotadas, sendo válidas também simulações que incluam o movimento de pedestres e também o transporte público.

Figura 6 – Resultados para Volume Baixo de Tráfego

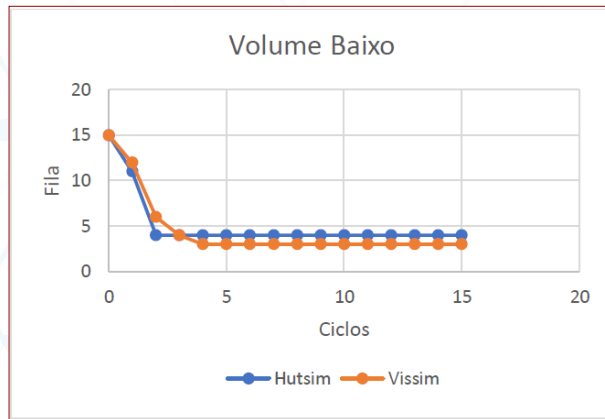


Figura 7 - Resultados para Volume Médio de Tráfego

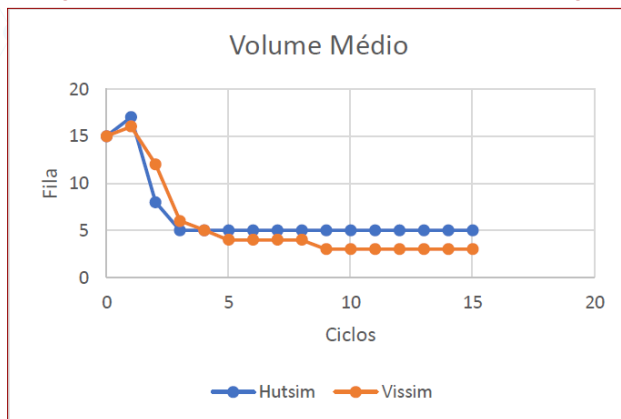
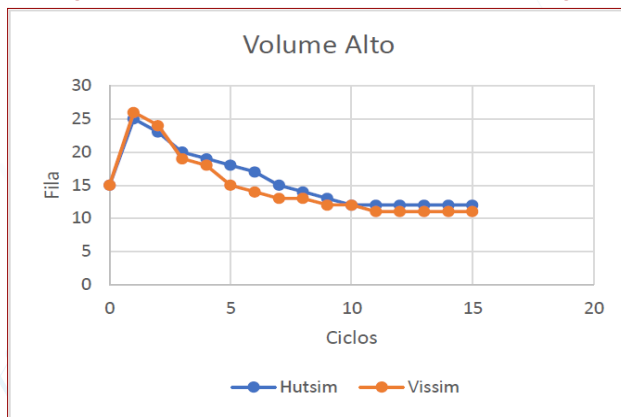


Figura 8 - Resultados para Volume Alto de Tráfego



Como nas simulações realizadas por Andrade (2004), a forma de ajuste ao final de cada extensão mostrou-se mais efetiva do que a de ajuste ao final da fase, foi adotado para o presente estudo apenas os resultados fornecidos pelo ajuste ao final de cada extensão, sendo possível, assim, as comparações dos resultados. Portanto, é importante destacar que simulações também devem ser realizadas para ajustes ao final de cada fase, até mesmo para saber se as diferenças entre os resultados tendem a seguir a lógica dos resultados apresentados neste trabalho. Devido às dificuldades encontradas com a linguagem computacional do software VISSIM não foi possível realizar esta última análise.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É evidente que a utilização de controlador semafórico fuzzy é responsável por uma melhora significativa no desempenho do tráfego com a forma de ajuste online, assim, é imprescindível que novos estudos sejam realizados seguindo essa linha de pesquisa, permitindo análises mais profundas e avaliação de novas possibilidades de ajuste.

A metodologia proposta apresentou resultados de melhora no desempenho do controlador fuzzy testado, o qual foi avaliado mediante análise da variável 'fila' em resultados de simulação sobre dados de volume de tráfego hipotéticos. Os resultados do ajuste dos parâmetros dos conjuntos fuzzy de entrada do controlador, gerados pela Seleção Dinâmica de Planos Fuzzy, mostraram-se satisfatórios comprovando a hipótese proposta. Sendo assim, justifica-se uma investigação mais detalhada no sentido de avaliar, através de recursos de simulação adequados, a magnitude dos benefícios advindos do seu uso em diferentes condições de tráfego.

O ajuste dos parâmetros de entrada dos conjuntos fuzzy pode ser realizado em diferentes momentos do controle, por exemplo, ao final de cada ciclo, ao final de cada fase, ou ainda ao final de cada extensão dada. O ajuste dos parâmetros quando realizado após cada extensão mostra-se mais efetivo que nos casos analisados com o ajuste dado ao final de cada fase, produzindo benefícios maiores sob a perspectiva da medida de desempenho considerada, que foi a fila em cada aproximação ao final do respectivo tempo de vermelho.

A partir dessa avaliação pode-se concluir que a associação da lógica fuzzy com outra técnica de Inteligência Artificial, com vistas a permitir o ajuste

dos parâmetros dos conjuntos fuzzy em resposta a medidas de desempenho da operação do tráfego previamente definidas, merece ser devidamente estudada.

A título de recomendação, indica-se a necessidade de avaliar a metodologia apresentada de Seleção Dinâmica de Planos Fuzzy em um simulador de controle atuado, que possa representá-la devidamente, a fim de avaliar o atraso veicular e o número de paradas, dentre outras medidas de desempenho consideradas pertinentes para cada situação.

Como sugestões, indica-se:

- Investigar a possibilidade de associação de técnicas de inteligência artificial (algoritmos genéticos e redes neurais, principalmente) à lógica fuzzy para a constituição de um controlador semafórico fuzzy com parâmetros ajustáveis automaticamente;
- Avaliar, comparativamente, as vantagens da seleção dinâmica de planos fuzzy frente às produzidas pelos sistemas associados desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

ALBERTOS, P. (1992). *Fuzzy Controllers - AI Techniques in Control - Pergamon Press*.

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.

CHIU, S. (1992) Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic. Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium. Detroit. p. 98-107. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isNumber=6442>, acessado em: 15.jul.2004.

CONTRAN. (2014). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito.

CZOGALLA, O. (1997) A Fuzzy Logic Application for Traffic Actuated Signal Control. IFAC Algorithms and Architectures in Real Time Control. Vilamoura. Portugal.

FAVILLA, J., A. MACHION, R. GUDWIN (1992) Adaptive Fuzzy Controllers for Traffic Control. Third Annual IAKE Symposium, November 16-19, Washington.

GADÊLHA, J. C., C. F. G. LOUREIRO e H. C. JÚNIOR (1999) Aplicação de Lógica Fuzzy no Controle Semafórico de Interseções Isoladas. XIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Anais – Artigos Científicos – Vol 1. p. 641-652. São Carlos, SP.

GOMIDE, F. A. C; GUDWIN, R. R; TANSCHIT, R. Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações.

JACQUES, M. A. P.; NITTYMÄKI, J.; PURSULA, M. (2002). *Analyzing different fuzzy traffic signal controllers for isolated intersections*. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 81, 2002, Washington. Proceedings... Washington, DC. p. 18.

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.

KIM, S. (1994) Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems. Ph.D Thesis, Polytechnic University, USA, 139 p.

KULKARNI, Girija H.; WAINGANKAR, Poorva G. (2007). *Fuzzy Logic based traffic light controller*. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND INFORMATION SYSTEMS, 2, 2007, Sri Lanka. Proceedings... Washington, DC: IEEE*.

LEAL, S.S; TORRES, V. H. X; ALMEIDA, P. E. M. (2014) Modelagem Fuzzy para o problema de temporização semafórica em interseções de quatro tempos.

NAKATSUYAMA, M., H. NAKAHASHI, e N. NISHIZUKA (1984) Fuzzy Logic phase controller for traffic junction in the one-way arterial road. Proceedings of the IFAC 9th Triennial World Congress, Pergamon Press, Oxford, UK, p. 2865-2870.

NIITTYMÄKI, J. (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of*

Technology. NIITTYMÄKI, J. and M. PURSULA (2000) Signal Control Using Fuzzy Logic. Fuzzy Sets and Systems, 116, p.11-22.

PAPPIS, C. P., MAMDANI, H. (1977). *A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, N° 10.

PTV VISSIM (2010). *User Manual*.

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.