



Modelagem *Fuzzy* para o Problema de Temporização Semafórica em Interseções de Quatro Tempos*

Samara Soares Leal¹
Victor Hugo Xavier Torres²
Paulo Eduardo Maciel de Almeida³

Resumo

Com o advento da classe média e a evolução da indústria automobilística, os grandes centros urbanos sofrem cada vez mais com a sobrecarga rodoviária em sua compacta estrutura. A necessidade do controle semafórico surge a medida que é necessário otimizar o tempo médio em que cada veículo se locomove dentro de determinada interseção em uma área com alta densidade populacional. Definindo a modelagem do problema, uma breve revisão sobre controladores semafóricos é feita, seguida da teoria de lógica *fuzzy* proposta. Em seguida, a base de conhecimento e o modelo de inferência indicados são apresentados e a máquina *fuzzy* utilizada é descrita. Duas configurações são relatadas para execução dos experimentos e, por fim, a análise de diferença entre elas é discutida para dois momentos determinados em um fluxo de dia útil, provando a eficácia na redução do tempo médio dos veículos dentro da interseção.

Palavras-chave: Controladores Semafóricos. Lógica *fuzzy*. Fluxo de veículos. Temporização.

*Submetido em 05/10/2014 – Aceito em 20/10/2014

¹Bacharel em Ciência da Computação, E-mail:samara@lsi.cefetmg.br
Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Brasil.

²Bacharel em Ciência da Computação, E-mail:victorhugo@lsi.cefetmg.br
Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Brasil.

³Doutor em Engenharia, E-mail:pema@lsi.cefetmg.br
Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Brasil.

Abstract

With the advent of the middle class and automobile industry evolution, the major urban centers increasingly suffer with road overhead in its compact structure. The need for traffic signal control arises as it is necessary to optimize the average time that each vehicle moves around within a certain intersection in an high population density area. Defining the problem modeling, a brief review of traffic signal controllers is made, and then the fuzzy logic proposed theory is detailed. The knowledge base and inference model are presented and fuzzy machine used is described below. Two configurations are reported to experiments execution and, finally, the analysis of difference between them is discussed for two certain moments in a business day flow, proving the effectiveness in reducing the average time of vehicles within the intersection.

Keywords: Traffic signal controllers. Fuzzy logic. Vehicles flow. Timing.

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas de centros urbanos surgido a partir do século XX é a elevada taxa de veículos automotivos na compacta estrutura rodoviária de metrópoles regionais a qual foram projetadas. Para Slinn, Matthews e Guest (2005), não só mais pessoas possuem carros, mas cada veículo é usado mais. Além disso, o padrão de movimentação de carga mudou drasticamente com a mudança de trilho para estrada e mudanças radicais nos procedimentos de distribuição, o que significa que os bens agora tendem a ser distribuídos a partir de poucos depósitos, maiores, com o conseqüente aumento das viagens de veículos de mercadorias. Com avanços na indústria automobilística e facilidade de compra de veículos motorizados, conseqüências como gargalos em localidades com alta densidade populacional são observados cotidianamente.

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.

Este trabalho dedica-se a aplicação de lógica *fuzzy* no estudo semafórico de uma única interseção com quatro tempos de controle. 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 com fluxo rodoviário definido mediante intervalos de tempo em dias úteis.

Hoyer e Jumar (1994) abordam a aproximação de um controle *fuzzy* para semáforos de vias urbanas. O problema consiste em uma única interseção com doze direções de fluxo possíveis e, dependendo das simulações de tráfego, as regras *fuzzy* decidem ativações de dois, três ou quatro estados para os semáforos. Schutter e Moor (1997) consideram no seu trabalho uma interseção de duas vias, cada qual com duas pistas com o fluxo de veículos controlado por semáforos de quatro tempos e, a partir de equações diferenciais, os autores procuram estabelecer planos de tempo de verde ótimo para cinco objetivos simultâneos no mesmo ambiente. No trabalho de Kulkarni e Waingankar (2007) é proposta a utilização de semáforos baseados em lógica *fuzzy* para controle ótimo de oscilação do volume de tráfego, tal como tráfego saturado e condições incomuns de fluxo. Com o objetivo de melhorar o rendimento e minimizar atrasos, as regras do controlador lógico *fuzzy* são formuladas seguindo os mesmos protocolos

que um operador humano usaria para controlar o tempo de verde dos semáforos. O trabalho de Teo et al. (2013) apresenta um sistema de controle de temporização semafórica baseado em lógica *fuzzy* para otimizar o tempo médio de espera nas interseções, usando como parâmetro o fluxo de veículos obtido através da contagem realizada por meio da captação visual do tráfego local através de equipamentos estrategicamente instalados. Em Kumar e Jha (2013) os autores propõem uma técnica flexível de controle semafórico através da lógica *fuzzy*, utilizando como parâmetro a densidade do tráfego e o tamanho das filas de espera ao decorrer do período apurado. Este esforço utiliza sensores para determinar a densidade do fluxo de veículos, tornando o modelo flexível ao adaptar os tempos de verde para cada configuração em diferentes momentos ao decorrer do dia.

Como proposta inicial e uma primeira abordagem para o problema de fluxo de veículos em centros urbanos, este artigo aborda a otimização do tempo de verde de uma única interseção de quatro tempos com elevada e seccionada intensidade de tráfego. Para executar as simulações propostas, utilizou-se o *software* SUMO (*Simulation of Urban Mobility*), um pacote de simulação de tráfego rodoviário microscópico e contínuo altamente portátil. O SUMO é um projeto de código aberto do Instituto de Sistemas de Transporte no Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e seu simulador é projetado para lidar com grandes redes e estradas. O objetivo geral deste trabalho consiste em utilizar uma ferramenta de inteligência computacional para resolver um problema de otimização referente ao tempo de verde de semáforos presentes em uma única interseção de trânsito. Com a finalidade de mensurar a qualidade obtida nas soluções, o tempo médio de permanência dos veículos na interseção é utilizado neste artigo como medida de avaliação.

Na Seção 2, a modelagem do problema de temporização é proposta através de revisões da literatura sobre controladores semafóricos, partições de entrada/saída, base de conhecimento, modelo de inferência e lógica *fuzzy*. Em seguida, na Seção 3, a simulação de tráfego em uma única interseção de quatro tempos é proposta e detalhada em dois períodos de um dia útil. A Seção 4 discorre sobre os resultados obtidos e demonstra breve estudo estatístico sobre o tempo médio de permanência dos veículos na interseção. Por fim, a Seção 5 aborda as conclusões obtidas neste trabalho e também novas propostas para trabalhos futuros.

2 MODELAGEM DO PROBLEMA

Um dos principais problemas de uma interseção com alto fluxo de veículos consiste no elevado tempo gasto por cada motorista dentro desta estrutura urbana, causando gargalo nas vias e retardando a chegada de novos veículos. Deseja-se que todo veículo que entre na interseção permaneça o menor tempo possível nesta, permitindo maior fluxo de automóveis na região. Logo, o problema de temporização abordado neste trabalho pode ser escrito como um

problema de otimização da seguinte forma:

$$\text{minimizar } T_{\text{médio}} \tag{1}$$

$$\text{sujeito a: } \begin{cases} E_s \geq 15 \\ V_s \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

onde, $T_{\text{médio}}$ corresponde ao tempo médio em que todos os veículos $v \in V$ delongam na interseção, E_s corresponde ao tempo de verde do sinal $s \in S$ e v_s define o número mínimo de veículos $v \in V$ que transitam pelo semáforo s .

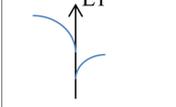
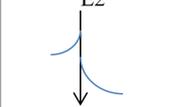
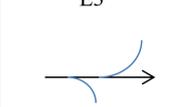
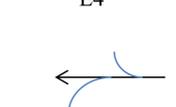
2.1 Controlador Semafórico

Segundo o Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito DENATRAN (2014), a sinalização semafórica de regulamentação tem por finalidade realizar o controle do trânsito, transmitindo aos usuários a informação sobre o direito de passagem em interseções de via, onde o espaço viário é disputado por movimentos conflitantes.

Os principais componentes da sinalização semafórica utilizados neste trabalho são descritos a seguir:

1. Grupo de movimentos: É o conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem;
2. Ciclo: Sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica;
3. Fase: Parte do ciclo destinada a um determinado conjunto de movimentos;
4. Estágio: Intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. Na Tabela 1 pode-se observar um diagrama de quatro estágios.

Tabela 1 – Diagrama de Estágio

Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4
E1 	E2 	E3 	E4 

5. Interseção Sinalizada: São as interseções nas quais a permissão de passagem é dada por semáforos de trânsito. Uma interseção de duas vias pode ser descrita pelo diagrama da Figura 1;

6. Controlador de Tempo Fixo: Utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo;
7. Diagrama de Tempos: Relaciona os instantes de mudança dos estágios com a sequência de cores e duração das fases, como pode ser observado na Figura 2;

Figura 1 – Interseção entre duas vias

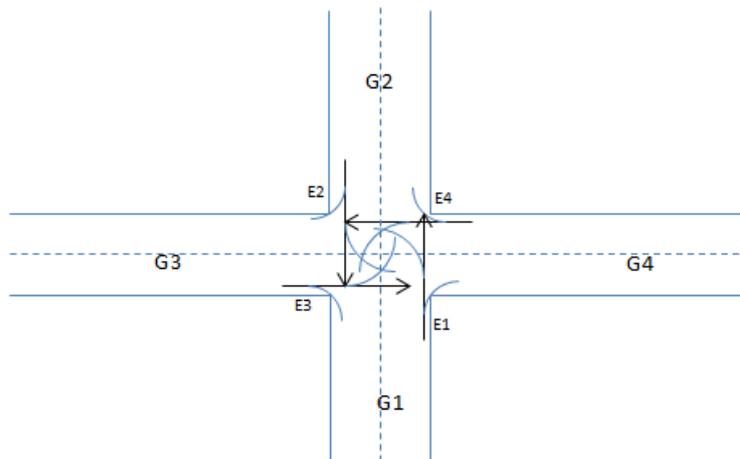


Figura 2 – Diagrama de Tempo

Fase 1	VERDE	A	VERMELHO	G1 (mov. 1 e 2)
Fase 2	VERMELHO		VERDE	A
Estágios	1	I_1	2	I_2
Dimensão (seg.)	30	3	24	3
Um ciclo				

Fonte: (DENATRAN, 2014)

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) 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.

Neste estudo, as especificações relacionam as variáveis de entrada (chegada e fila) à variável de saída (tempo de verde e extensão do tempo de verde), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – 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; NITTYMÄKI; PURSULA, 2002)

Segundo Almeida e Evsukoff (2003), um conjunto *fuzzy* F de um universo de discurso U é caracterizado por uma função real, chamada função de pertinência, que associa um grau de pertinência de cada entrada x a um conjunto *fuzzy*, com um número real no intervalo $[0, 1]$. Para representar conhecimento através da lógica *fuzzy* é necessário definir os conceitos acerca do problema. Estes conceitos, denominados variáveis linguísticas, são por sua vez, representados através das partições *fuzzy*.

O controlador semafórico *fuzzy* implementado neste trabalho utiliza como referência o modelo de inferência de Mamdani e os conjuntos *fuzzy* utilizados foram baseados nas definições propostas pelo controlador semafórico de Pappis e Mamdani (1977).

2.2 Partições *fuzzy* de entrada e saída

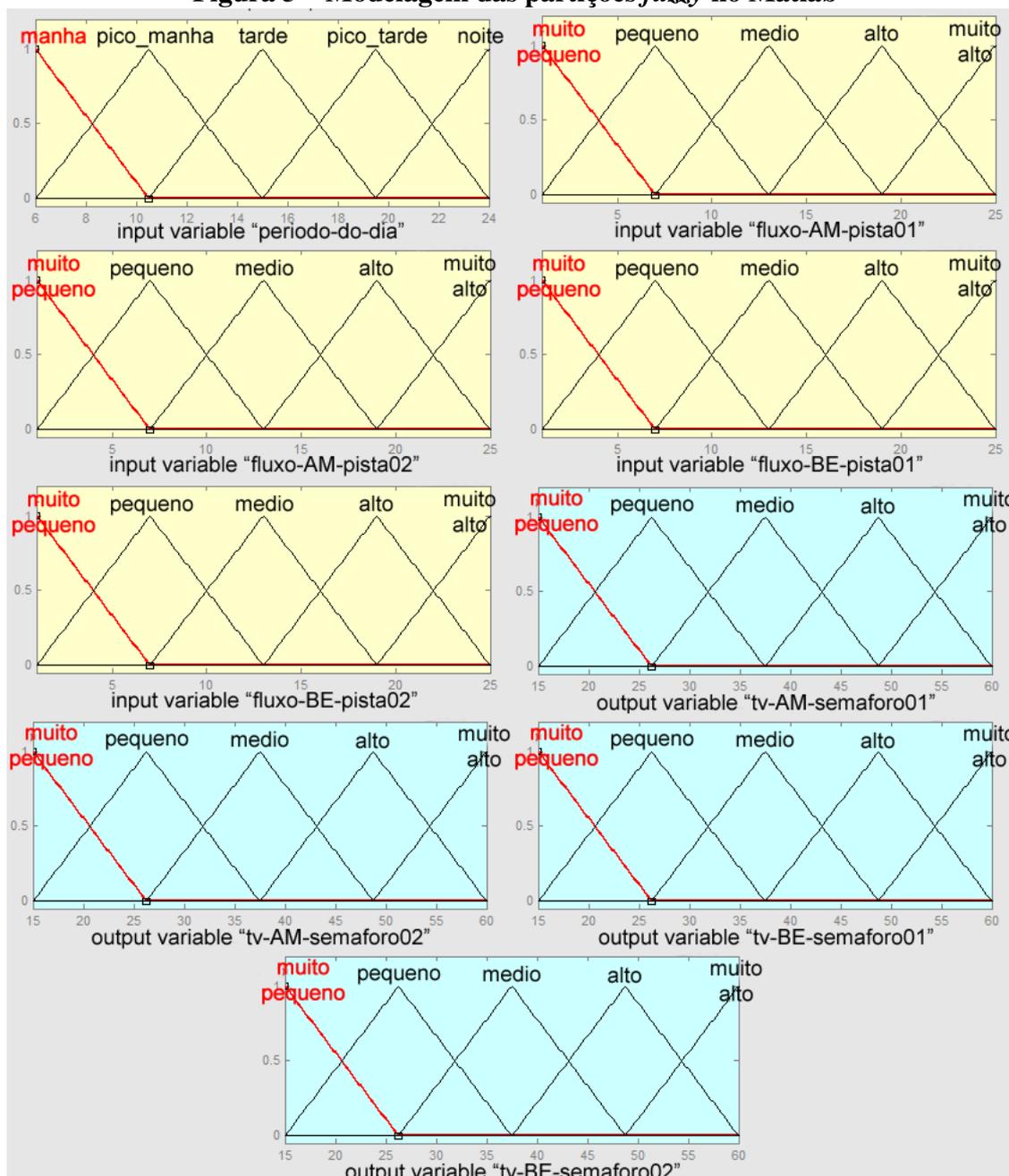
As partições *fuzzy*, também conhecidas como termos primários de uma variável linguística formam a sua estrutura de conhecimento. Para este trabalho as partições *fuzzy* (e seus respectivos universos de discurso U) são descritas na Tabela 3. Por simplificação, foram criadas funções triangulares para os respectivos termos. As partições definidas na *fuzzy toolbox* do Matlab encontram-se representadas na Figura 3.

Tabela 3 – Partições *fuzzy*

Variáveis de Entrada	Universo de Discurso U	Termos Primários
Período do dia	Horas (24 horas)	[manhã, pico da manhã, tarde, pico da tarde, noite]
4 Fluxos de carro: Av. Abílio Machado AM (pista 1 e 2) Av. Brg. Eduardo Gomes BE (pista 1 e 2)	Veículos por minutos (1 a 25).	[muito pequeno, pequeno, médio, alto, muito alto]
Variável de Saída	Universo de Discurso U	Termos Primários
4 Tempos de Verde: Av. Abílio Machado AM (semáforo 1 e 2) Av. Brg. Eduardo Gomes BE (semáforo 1 e 2)	Segundos (15s a 60s)	[muito pequeno, pequeno, médio, alto, muito alto]

Assim, as partições de entrada possuem as informações de fluxos de veículos na interseção entre duas vias de mão dupla e o período do dia em que se deseja obter o melhor tempo

Figura 3 – Modelagem das partições *fuzzy* no Matlab



de verde necessário para cada semáforo, a fim de diminuir o trânsito local e melhorar o fluxo de carros.

2.3 Base de conhecimento e modelo de inferência

A maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento *fuzzy* é a representação por meio de regras de produção *fuzzy* (ALMEIDA; EVSUKOFF, 2003). Uma regra *fuzzy* é do tipo:

se < *antecedente* > **então** < *consequente* > (3)

Quando a condição do antecedente é satisfeita, a regra é processada gerando um consequente, pelo mecanismo de inferência. O modelo de inferência, basicamente, realiza o processamento de conhecimento através das propriedades sintáticas definidas.

As regras deste trabalho foram criadas baseando-se na realidade da interseção de estudo e desconsiderando eventuais acidentes nas vias ou na região que possam acarretar na mudança do fluxo padrão de carros. Cada semáforo funciona de forma isolada e, quando um semáforo está com sinal verde, todos os outros estão com sinal vermelho. Assim, o período de verde de cada semáforo é determinado pelo fluxo de carros que passam por este semáforo durante determinado período do dia.

As seguintes considerações foram levadas em conta para construção da base de conhecimento:

1. Durante o período da manhã, o fluxo de carros é pequeno na interseção;
2. Durante a tarde, o fluxo é pequeno e pode chegar a médio na interseção;
3. Durante os picos da manhã e da tarde, o fluxo é alto e pode chegar a muito alto na interseção;
4. Durante a noite, o fluxo é muito pequeno e pode chegar a pequeno nas vias;
5. A base das regras de produção *fuzzy* implementada para esse trabalho encontra-se representado na Tabela 4.

Para este trabalho, foi utilizado o modelo de inferência de Mandani, que usa o operador “máx-min” para realizar o processamento das regras de produção *fuzzy*, que corresponde as operações de união e interseção, respectivamente. Este processo é descrito pelas etapas de conversão escalar-*fuzzy* e *fuzzy*-escalar, comumente chamadas de inferência *fuzzy* e conversão.

Na etapa conversão escalar-*fuzzy*, os valores de pertinência da entrada nos conjuntos *fuzzy* são calculados. Os antecedentes das regras são ativados pelo operador de interseção "min", obtendo-se os valores difusos de saída de cada regra. Então, através do operador de união "max" obtém-se um único conjunto difuso como saída do sistema, pelo modelo de inferência de Mandani. Finalmente, na etapa conversão *fuzzy*-escalar, o conjunto difuso obtido é transformado em uma única saída escalar através do método de centro de gravidade. Com a aplicação destas etapas, é possível processar as entradas por regras *fuzzy* e obter um valor único de saída que corresponde ao melhor tempo de verde para cada via.

Tabela 4 – Base de Conhecimento

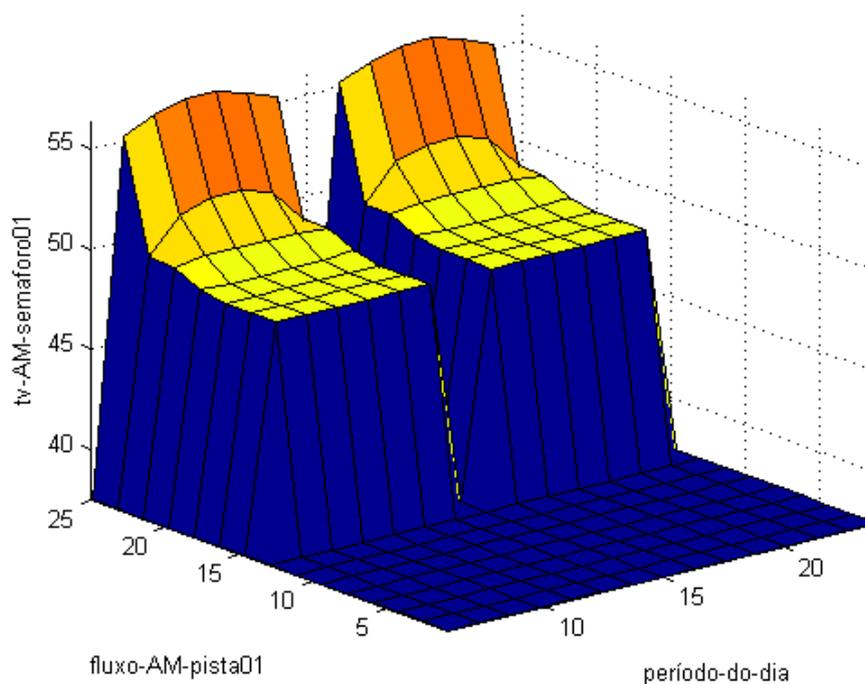
	Período	fluxo AMp01	fluxo AMp02	fluxo BEp01	fluxo BEp02		AM- s01	AM s02	BE s01	BE s02
1	manhã	pequeno	muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno		pequeno	muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno
2	manhã	muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno		muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno
3	manhã	muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno		muito pequeno	muito pequeno	pequeno	muito pequeno
4	manhã	muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno		muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno	pequeno
5	tarde	medio	pequeno	pequeno	pequeno		medio	pequeno	pequeno	pequeno
6	tarde	pequeno	medio	pequeno	pequeno		pequeno	medio	pequeno	pequeno
7	tarde	pequeno	pequeno	medio	pequeno		pequeno	pequeno	medio	pequeno
8	tarde	pequeno	pequeno	pequeno	medio		pequeno	pequeno	pequeno	medio
9	pico manhã	alto	médio	médio	médio		alto	médio	médio	médio
10	pico manhã	médio	alto	médio	médio		médio	alto	médio	médio
11	pico manhã	médio	médio	alto	médio		médio	médio	alto	médio
12	pico manhã	médio	médio	médio	alto		médio	médio	médio	alto
13	pico manhã	muito alto	médio	médio	médio		muito alto	médio	médio	médio
14	pico manhã	médio	muito alto	médio	médio		médio	muito alto	médio	médio
15	pico manhã	médio	médio	muito alto	médio	Então	médio	médio	muito alto	médio
16	pico manhã	médio	médio	médio	muito alto		médio	médio	médio	muito alto
17	pico tarde	alto	médio	médio	médio		alto	médio	médio	médio
18	pico tarde	médio	alto	médio	médio		médio	alto	médio	médio
19	pico tarde	médio	médio	alto	médio		médio	médio	alto	médio
20	pico tarde	médio	médio	médio	alto		médio	médio	médio	alto
21	pico tarde	muito alto	médio	médio	médio		muito alto	médio	médio	médio
22	pico tarde	médio	muito alto	médio	médio		médio	muito alto	médio	médio
23	pico tarde	médio	médio	muito alto	médio		médio	médio	muito alto	médio
24	pico tarde	médio	médio	médio	muito alto		médio	médio	médio	muito alto
25	noite	pequeno	muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno		pequeno	muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno
26	noite	muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno		muito pequeno	pequeno	muito pequeno	muito pequeno
27	noite	muito pequeno	muito pequeno	pequeno	muito pequeno		muito pequeno	muito pequeno	pequeno	muito pequeno
28	noite	muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno	pequeno		muito pequeno	muito pequeno	muito pequeno	pequeno

2.4 Máquina *Fuzzy*

A Figura 4 representa o conjunto *fuzzy* gerado como saída deste sistema. O gráfico representa a função tempo de verde em relação ao fluxo da pista e o período do dia, conforme

descrito nas regras.

Figura 4 – Superfície de saída da Máquina *Fuzzy*



Para uma melhor análise da saída do sistema, é necessária a etapa de conversão da saída demonstrada no gráfico para um escalar. Nesta etapa, a partir de algumas entradas utilizadas para teste, foi utilizado o método de centro da gravidade e os valores de saída obtidos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Saída da conversão *fuzzy*-escalar

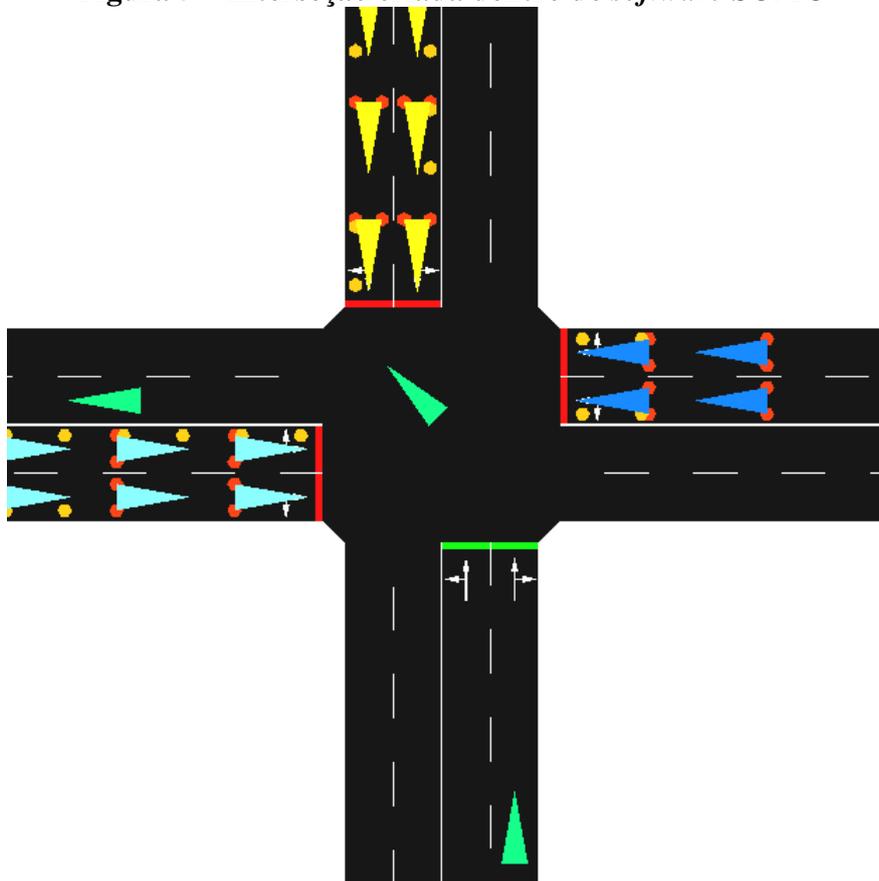
Entrada					Saída			
Período	Fluxo AM-p01	Fluxo AM-p02	Fluxo BE-p01	Fluxo BE-p02	Semáforo AM-p01	Semáforo AM-p02	Semáforo BE-p01	Semáforo BE-p02
06:00	10	4	4	4	26.2s	19.3s	19.3s	19.3s
09:00	20	15	16	15	49s	37.5	37.5	37.5
12:00	8	6	6	6	37.5s	37.5s	37.5s	37.5s
15:00	6	6	6	12	26.2s	26.2s	26.2s	37.5
18:00	18	18	18	25	37.5s	37.5s	37.5s	54.9s
21:00	7	7	7	10	37.5s	37.5s	37.5s	37.5s
23:00	2	1	2	6	21.9s	18.8s	21.9s	26.1s

3 EXPERIMENTOS

De acordo com Terra (2002), para determinar o intervalo de veículos pode-se observar o maior valor de fluxo por hora para a pista e efetuar uma divisão por sessenta minutos, que nos dá um valor de veículos por minuto. Considerando um fluxo de 1200 veículos por hora para as vias em estudo, temos 20 veículos por minuto. Conforme proposto pelo autor, é possível "estimar" uma margem para cima de mais cinco veículos por minuto, chegando a um intervalo de 25 veículos por minuto.

Para a execução de experimentos deste artigo, dois cenários C_1 e C_2 foram elaborados com o intuito de avaliar a qualidade do modelo *fuzzy* em relação aos estados estáticos de tempo de verde nos semáforos de uma interseção. Tal interseção é ilustrada pela Figura 5, modelada no *software* SUMO, o qual é responsável, também, pela geração de relatórios ao final de cada execução.

Figura 5 – Interseção criada dentro do *software* SUMO



A configuração de cada cenário é composta por um dia útil de 24 horas e apresenta apenas uma classe de veículos determinísticos. Esta classe de veículos é definida através de configurações contínuas e fixas, ou seja, todas as componentes físicas (massa, aceleração, dimensão etc) possuem valores únicos definidos previamente. Desta forma, cada veículo é composto pela mesma configuração.

A configuração inicial C_1 do tempo de verde T_s de cada $s \in S$ é estática e composta pelo limiar da restrição presente em (2), ou seja, 15 segundos de tempo de verde para todos os sinais durante todo o período de 24 horas do dia. A configuração C_2 apresenta os tempos de verde da Tabela 5, resultante do processamento *fuzzy* proposto neste trabalho. A proporcionalidade de tráfego entre os intervalos de hora não explicitados na tabela é feita pelas equações da reta obtidas entre dois pontos (*Periodo, Fluxo*).

A análise dos experimentos, presente na próxima seção, descreve o comportamento do tempo de transição T de cada veículo na interseção durante os dois picos de fluxo de automóveis durante um dia útil. Os limites dos dois picos foram estimados em uma hora anterior e uma hora posterior ao momento de maior fluxo de veículos. O conjunto P_1 representa o fluxo

de veículos no intervalo de horas [8, 10] e o conjunto P_2 representa o fluxo de veículos no intervalo de horas [17, 19]. O total de veículos que cruzaram a interseção no intervalo de tempo (população) do experimento P_1 foi de 5570 e, no experimento P_2 , 6766. A amostra utilizada para ambos os experimentos foi de 5000 veículos dentro de cada intervalo proposto, visando maior aproximação da realidade.

4 RESULTADOS

Após a execução dos experimentos, dois gráficos contendo o diagrama *boxplot* foram gerados para análise da variação de tempo T dentro das configurações C_1 e C_2 para cada intervalo de tempo P_1 e P_2 .

A Figura 6 representa a comparação dos resultados obtidos no experimento P_1 . Em "1" estão localizados os dados de tempo médio de cada veículo para a configuração C_1 (estático) e, em "2", a configuração C_2 (*fuzzy*). A configuração C_2 mostra-se estatisticamente mais adequada e satisfatória para o problema de temporização deste trabalho, já que dada as amostras de tempo T nas duas configurações, nenhum quartil de C_1 possui interseção com outro quartil de C_2 . Da mesma forma, a Figura 7 também informa que, utilizando uma abordagem *fuzzy*, o tempo médio de permanência dos veículos dentro da interseção é menor.

Os valores atípicos marcados no gráfico demonstram um comportamento previsto do problema de tráfego urbano. Na Figura 6, observa-se diversos valores atípicos quando o modelo *fuzzy* é aplicado devido ao gargalo máximo de tempo de transição T ocorrido no pico de tráfego, porém percebe-se que faz parte de uma parcela isolada da maior parte de dados coletados. Já na Figura 7, os valores atípicos demonstram o início e/ou fim de um gargalo no fluxo de carros, estabilizando em alto tempo de transição T devido ao horário de pico.

A média aritmética obtida para C_1 (modelagem estática) e C_2 (modelagem *fuzzy*) no primeiro pico P_1 do dia foi de, respectivamente, 478.7041 e 182.8697 segundos. Já para o segundo pico do dia, P_2 , a média de tempo dos veículos utilizados na amostra foi de, respectivamente, 577.5056 e 322.8549 segundos. A Tabela 6 apresenta os dados estatísticos levantados acerca dos experimentos.

Tabela 6 – Resultados

Experimento	População	Amostra	Erro Padrão	Diferença entre médias
P_1	5570	5000	1.8912	296.1712
P_2	6766	5000	1.3197	255.4280

A melhora de tempo médio de P_1 foi de aproximadamente 296 segundos, enquanto de P_2 foi de aproximadamente 255 segundos. Devido ao valor da amostra ser próximo ao valor da população, observa-se baixo erro padrão para os dois experimentos em relação ao tempo médio gasto pelos veículos. Isto significa que a configuração C_2 apresenta resultados satisfatórios para

o problema de temporização semafórica em comparação a configuração C_1 .

Figura 6 – Diagrama *Boxplot* para P_1

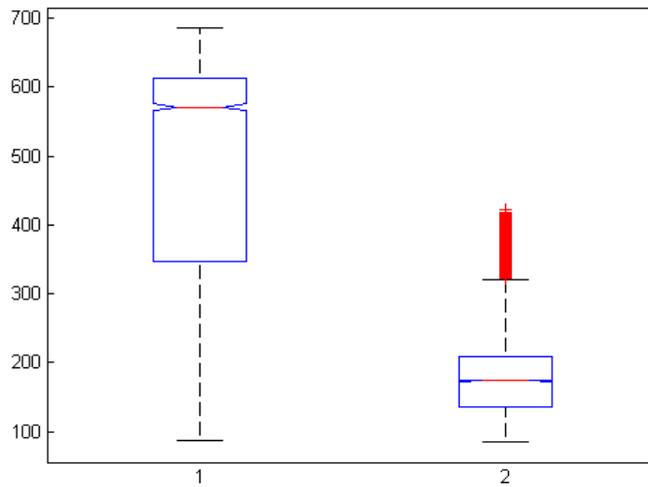
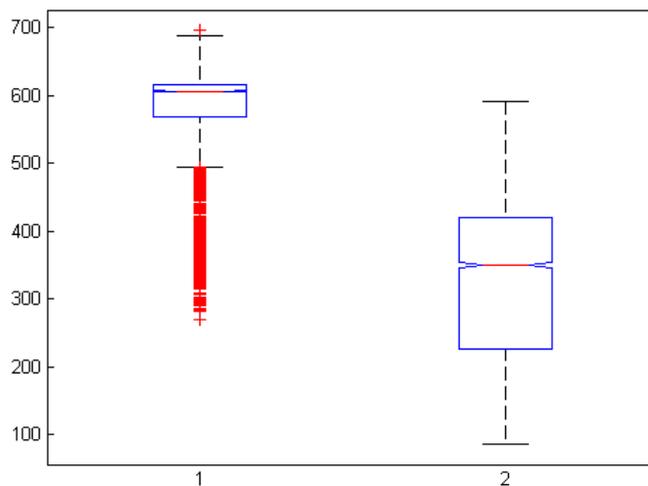


Figura 7 – Diagrama *Boxplot* para P_2



5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A eficácia do modelo *fuzzy* foi comprovada para o problema de controle semafórico proposto. Observou-se melhora significativa no tempo médio gasto pelos veículos dentro da intersecção em horários de pico, promovendo maior fluidez e contribuindo para o sistema econômico, social e ambiental.

Em relações aos esforços anteriores, este trabalho contribuiu com a aplicação da lógica *fuzzy* para controle de tempo semafórico em intersecções com vias de mão dupla e semáforos de quatro tempos. A ferramenta SUMO mostrou-se de grande utilidade nas simulações desta inter-

seção. A facilidade na descrição de vias, fluxos e veículos contribuiu para a rápida compreensão dos resultados obtidos.

Para trabalhos futuros, faz-se necessário o mesmo esforço com diferentes parâmetros de aleatoriedade, planejamento de cenários de acordo com diferentes classes de veículos portando características distintas e adição de novas interseções (expansão da visão do centro urbano) e pistas prioritárias.

Referências

- ALMEIDA, P. E. M.; EVSUKOFF, A. G. Sistemas fuzzy. In: REZENDE, Solange Oliveira (Ed.). **Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2003.
- DENATRAN. **Sinalização Semafórica do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. [S.l.], 2014.
- DETRAN-MG. **Glossário**. 2012. Disponível em: <<https://www.detran.mg.gov.br/duvidas-frequentes/glossario>>. Acesso em: 3 de Out. 2014.
- HOYER, R.; JUMAR, Ulrich. Fuzzy control of traffic lights. In: CONFERENCE ON IEEE WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 3, 1994, Orlando. **Proceedings...** Washington, DC: IEEE, 1994. v. 3, p. 1526–1531.
- JACQUES, M. A. P.; NITTYMÄKI, J.; PURSULA, M. Analyzing different fuzzy traffic signal controllers for isolated intersections. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 81, 2002, Washington. **Proceedings...** Washington, DC, 2002. p. 18.
- KULKARNI, Girija H.; WAINGANKAR, Poorva G. Fuzzy Logic based traffic light controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND INFORMATION SYSTEMS, 2, 2007, Sri Lanka. **Proceedings...** Washington, DC: IEEE, 2007.
- KUMAR, Neeraj; JHA, Govind. Intelligent traffic light controller: A Fuzzy Logic approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT INFRASTRUCTURE, 5, 2012. **Proceedings...** India: CSI, 2013.
- PAPPIS, C. P.; MAMDANI, E. H. A Fuzzy Logic controller for a traffic junction. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 7, n. 10, p. 707–717, 1977.
- SCHUTTER, Bart De; MOOR, Bart De. Optimal traffic light control for a single intersection. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONLINEAR THEORY AND ITS APPLICATIONS, 1, 1997. **Proceedings...** Hawaii, 1997.
- SLINN, M.; MATTHEWS, P.; GUEST, P. **Traffic Engineering Design: Principles and practice**. 2. ed. London: Elsevier, 2005.
- TEO, K.T.K. et al. Design and development of portable Fuzzy Logic based traffic optimizer. In: ICCE-CHINA WORKSHOP (ICCE-CHINA), 2013, Shenzhen. **Proceedings...** Washington, DC: IEEE, 2013. p. 7–12.
- TERRA, Tiago. **Aplicação de lógica fuzzy no controle de trânsito urbano**. 2002. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina.
- VAZ, Alessandro Márcio. **Estudo das funções de pertinência para conjuntos fuzzy utilizados em controladores semafóricos fuzzy**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia.