

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO HENRIQUE DIAS CORRÊA

CONTROLE INTELIGENTE DE SEMÁFOROS UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY

CAMPO MOURÃO

2022

JOÃO HENRIQUE DIAS CORRÊA

CONTROLE INTELIGENTE DE SEMÁFOROS UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY

Intelligent traffic light control using fuzzy logic

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Eletrônica apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador (a): Eduardo Giometti Bertogna

CAMPO MOURÃO

2022



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO HENRIQUE DIAS CORRÊA

CONTROLE INTELIGENTE DE SEMÁFOROS UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Eletrônica apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador (a): Eduardo Giometti Bertogna

Data de aprovação: 08 de novembro de 2022

Leandro Castilho Brolin
Titulação: Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leonardo Faria Costa
Titulação: Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2022

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram
ao longo desta trajetória

RESUMO

Os crescentes aumentos de veículos proporcionam o aumento de congestionamentos em grandes cidades, impactando diretamente a rotina da população. Muitas cidades possuem a situação de tráfego saturada, no qual não há muitas alternativas para a resolução deste efeito. Grande parte do tempo em que os motoristas ficam parados no trânsito são em decorrência de semáforos que funcionam continuamente com tempo fixo, independentemente da quantidade de fluxo de veículos. Com isso, o Controle Inteligente de Semáforos utiliza a Lógica *Fuzzy* para minimizar os congestionamentos em horários de pico e possibilitar a fluidez do trânsito. Seu funcionamento é capaz de se adaptar de acordo com a quantidade de fluxo de veículos em cada via. O trabalho tem como objetivo analisar a eficiência do sistema utilizando a Lógica *Fuzzy* obtida pelo *Software* MATLAB e simular através do *Software* SUMO com dados reais de dois cruzamentos com alto fluxo de veículos da cidade de Maringá realizando a comparação do cruzamento com semáforos de tempo fixo e os semáforos utilizando o Controle Inteligente da Lógica *Fuzzy*.

Palavras-chave: controle; semáforos; lógica fuzzy; congestionamento.

ABSTRACT

The growing increase in the number of vehicles leads to increased congestion in large cities, directly impacting the population's routine. Many cities have a saturated traffic situation, in which there are not many alternatives for the resolution of this effect. A large part of the time that drivers are stuck in traffic is due to traffic lights that work continuously with a fixed time, regardless of the amount of vehicle flow. With this, the Intelligent Traffic Light Control uses *Fuzzy* Logic to minimize congestion at peak hours and enable traffic flow. Its operation is able to adapt according to the amount of vehicle flow on each road. The work aims to analyze the efficiency of the system using *Fuzzy* Logic obtained by MATLAB software and simulate through the SUMO software with real data from two intersections with high flow of vehicles in the city of Maringa making the comparison of the intersection with fixed time traffic lights and traffic lights using the Intelligent Control of *Fuzzy* Logic.

Keywords: control; fuzzy; congestion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Função de Pertinência Triangular.....	16
Figura 2 - Função de Pertinência Trapezoidal	16
Figura 3 - Função de Pertinência Gaussiana	17
Figura 4 - Função de Pertinência Sino	17
Figura 5 – Rótulos linguísticos e funções de pertinências Trapezoidais.....	18
Figura 6 - Cruzamentos estudados.....	22
Figura 7 - Funções de pertinência de entrada	26
Figura 8 - Funções de pertinência de saída	26
Figura 9 - Etapa de Defuzzificação	29
Figura 10 - Representação da via no software SUMO.....	30
Figura 11 - Programação semafórica no software SUMO.....	31
Figura 12 - Programação semafórica no software SUMO.....	31
Figura 13 - Tempo de simulação do semáforo de tempo fixo	33
Figura 14 - Tempo de simulação do semáforo com o tempo baseado na Lógica Fuzzy	33
Figura 15 – Tempo de simulação do semáforo de tempo fixo	34
Figura 16 - Tempo de simulação do semáforo com o tempo baseado na Lógica Fuzzy	34
Figura 17 - Tempo de simulação do semáforo de tempo fixo	35
Figura 18 - Tempo de simulação do semáforo com o tempo baseado na Lógica Fuzzy	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 07:00 e 08:00	23
Quadro 2 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 12:00 e 13:00	23
Quadro 3 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 18:00 e 19:00	23
Quadro 4 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 07:00 e 08:00	24
Quadro 5 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 12:00 e 13:00	24
Quadro 6 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 18:00 e 19:00	24
Quadro 7 – Legenda da Fuzzificação	28
Quadro 8 - Base de Regras.....	28
Quadro 9 - Programação semafórica no local	30
Quadro 10 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação.....	33
Quadro 11 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação.....	35
Quadro 12 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo Geral.....	10
1.1.2	Objetivos Específicos	10
1.2	Justificativa	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Semáforos	12
2.1.1	Breve Histórico	12
2.2	Lógica <i>Fuzzy</i>	13
2.2.1	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	14
3	METODOLOGIA	21
3.1	Caracterização da Pesquisa	21
3.2	Procedimentos Metodológicos	21
3.2.1	Aquisição de dados	21
3.2.2	Implementação do modelo matemático.....	25
3.2.3	Determinar os valores máximos e mínimos das entradas:.....	26
3.2.4	Determinar o modelo de função de pertinência utilizado:.....	27
3.2.5	Implementação do Controlador <i>Fuzzy</i>	27
3.2.6	Simulação de tráfego no <i>software</i> SUMO	29
3.2.6.1	Simulação em tempo fixo:	30
3.2.6.2	Simulação em tempo variável:.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Período entre 07:00 e 08:00	32
4.2	Período entre 12:00 e 13:00	34
4.3	Período entre 18:00 e 19:00	35
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Segundo Pero e Stefanelli (2015), o tempo de deslocamento do trabalhador entre a casa e o trabalho é um importante fator em sua qualidade de vida. Desse modo, a mobilidade urbana exerce uma influência indireta, mas significativa sobre seu bem-estar.

De acordo com Leal e Silva (2019), em decorrência do crescente fluxo de veículos surgem problemas de engarrafamentos que causam diversos transtornos no dia a dia da população. Essas situações de engarrafamento não acontecem somente em grandes metrópoles, como a cidade de São Paulo, um aumento de fluxo de veículos faz com que outras cidades de porte médio também apresentem esse transtorno.

Para Koga, Massete e Travensolli (2012) os congestionamentos ocorrem por dois fatores: o crescimento acelerado da frota de veículos e a carência de investimentos em infraestrutura de transporte.

Yuki (2008) define que grande parte do tempo em que os veículos ficam parados no trânsito é em decorrência de semáforos mal regulados, no qual obrigam o motorista a aguardar a abertura do sinal enquanto a via transversal apresenta pouco ou nenhum fluxo de veículos. Muitas vezes, o motorista apenas atravessa o sinal depois que ele abre três ou mais vezes em uma via de grande movimento. O tempo de espera pode ser reduzido através de um semáforo que atue de acordo com as condições do tráfego no cruzamento, analisando através do uso de sensores se em uma determinada via existe alto número de veículos querendo passar e em outra via o número é menor, resultando em um tempo de sinal aberto maior na via de maior demanda.

Koga, Massete e Travensolli (2012) ressaltam que para controlar adequadamente o sistema de trânsito é necessário selecionar uma Lógica que seja compatível com as principais características do sistema, sendo a principal característica a incerteza. Conforme Tanscheit (2004, p.2), “ a teoria de Conjuntos *Fuzzy* foi concebida por L.A Zadeh com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago”.

Rentería, Tanscheit e Vellasco (2002) afirmam que tem sido cada vez mais comum o emprego de métodos inteligentes, tais como a lógica *Fuzzy* no desenvolvimento de sistemas eficientes de controle de semáforos.

De acordo com Sandri e Correa (1999), a lógica *Fuzzy* é uma tecnologia bem-sucedida para lidar com incertezas de um conjunto de informações. Através do seu uso é possível implementar requerimentos complexos em controladores simples, de fácil manutenção e baixo custo.

Para executar as simulações foram utilizados dois *softwares*: Matlab e SUMO (*Simulation of Urban Mobility*). Através do Matlab será realizado o processo de implementação da lógica *Fuzzy* e o SUMO é um *software* de código aberto que permite simular e analisar sistemas de tráfego, nos quais serão comparados os cruzamentos com semáforo de tempo fixo e os semáforos controlados pela lógica *Fuzzy*. Sendo assim, será apresentado uma abordagem de como o Controle Inteligente de Semáforos pode ser eficiente para lidar com as situações de tráfego urbano.

1.1 Objetivos

Neste capítulo são apresentados os objetivos gerais e específicos para o tema abordado no trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Demonstrar a eficiência de um sistema de controle de semáforos utilizando a Lógica *Fuzzy*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados de dois cruzamentos em sequência.
- Implementar um modelo matemático para a simulação.
- Implementar o controlador *Fuzzy* utilizando os dados reais de trânsito.
- Comparar os resultados obtidos dos semáforos de tempo fixo e do semáforo utilizando o controlador *Fuzzy*.

1.2 Justificativa

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020), apontam que o período entre 2010 e 2020 apresentou um aumento significativo de 60% na frota de veículos no Brasil, resultando em congestionamentos diários em diversas cidades.

Com isso, algumas alternativas podem ser implementadas de modo a minimizar o congestionamento em grandes cidades, como: transportes coletivos (metrô), pedágio urbano, retirada de estacionamentos do centro da cidade, novas vias, mudança de hábitos dos motoristas e alargamentos das ruas. Porém, essas soluções apresentam um alto custo e/ou tempo para implementação, um exemplo claro é o metrô (KOGA; MASSETTE; TRAVENSOLLI, 2012).

Grande parte das cidades apresentam uma situação de tráfego saturada, dificultando a resolução dos congestionamentos. Diante disso, o controlador inteligente utilizando a lógica *Fuzzy* se torna uma importante ferramenta para minimizar os efeitos adversos de congestionamentos nos horários de pico e promover a fluidez, além de promover a segurança dos usuários das vias em todos os períodos, com diferentes quantidades de fluxos de veículos (ANDRADE, 2004).

Desse modo, o uso da Lógica *Fuzzy* em um Controlador Inteligente de Semáforos apresenta uma solução eficiente de baixo custo e rápida execução quando comparado a outras alternativas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será abordado o modelo semafórico no Brasil e o conceito de Lógica *Fuzzy*.

2.1 Semáforos

Em qualquer cidade as localizações mais complexas de ruas e rodovias são os cruzamentos. Os fluxos veiculares provenientes de diversas direções com movimentos de virar à esquerda, à direita ou seguir em frente tendem a ocupar um mesmo espaço físico. Além dos fluxos veiculares há um fluxo de pedestres, ciclistas que também necessitam de utilizar o mesmo espaço para atravessar esses cruzamentos. Para administrar estes conflitos é essencial o uso de semáforos (RENTERÍA, 2002).

2.1.1 Breve Histórico

A engenharia de tráfego urbano é uma ciência recente. O uso de automóvel em massa iniciou-se no século XX e trouxe a necessidade de ordenar o tráfego no meio urbano. Um dos meios inventados para gerenciar os conflitos em intersecções de ruas e avenidas foi o semáforo. O primeiro semáforo surgiu no ano de 1868, na cidade de Westminster, Inglaterra, com lâmpadas verdes e vermelhas a gás. Em 1918, em Nova Iorque surgiu o primeiro semáforo elétrico de três cores operado manualmente e em 1925 o primeiro semáforo de três cores operado de modo automático foi instalado na cidade de Wolverhampton, Inglaterra (BEZERRA, 2007).

2.1.2 Semáforos no Brasil

A implementação de semáforos no Brasil teve início na década de 70 utilizando linhas definidas através de experiências de outros países, liderada pela Companhia de Engenharia de Tráfego do Município de São Paulo. Em um primeiro passo, com os equipamentos ainda eletromecânicos, ocorreu a introdução de controladores multiplanos de tempo fixo. Em seguida, foram implantados

equipamentos com programações a tempo fixos utilizando controladores eletrônicos. Porém, até os dias de hoje o controle semaforico no Brasil não tem sido utilizado em larga escala, exceto para estágios de travessia de pedestres com o acionamento manual por botoeira. As variações de fluxo de veículos são significativas e acontecem de forma aleatória. O semáforo a tempo fixo não apresenta qualquer característica com o objetivo de atender essa variação aleatória (YUKI, 2008).

2.1.3 Controle do tráfego em cruzamentos

Bezerra (2007) apresenta o conceito de que existem três tipos de controle empregados em cruzamentos semaforizados, sendo eles:

- Controle Isolado de Cruzamento: O controle dos movimentos de tráfego se baseia apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não são consideradas as eventuais influencias exercidas pela operação de intersecções sinalizadas adjacentes. Seu objetivo principal é minimizar a demora no cruzamento e/ou o número de paradas.
- Controle Arterial de cruzamentos (rede aberta): Este controle se preocupa em operar os semáforos de uma via principal (corredor) de modo coordenado, com preferência em dar continuidade de movimentos entre as intersecções adjacentes, minimizando a demora total nos semáforos da via, ou o número de paradas.
- Controle de cruzamentos em áreas (rede fechada): Neste tipo de controle são consideradas todas as intersecções sinalizadas em uma região, como a área central das cidades maiores, com o objetivo de minimizar a demora geral e/ou a quantidade de paradas em todos os semáforos pertencentes a esta rede.

2.2 Lógica *Fuzzy*

O conceito de Lógica *Fuzzy* é utilizado para traduzir em termos matemáticos informações imprecisas expressas por um conjunto de regras linguísticas (TANSCHKEIT, 2004).

Segundo Reges, Bezerra e Alexandria (2017, p. 101) “Esta técnica de inteligência artificial foi introduzida nos meios científicos em 1965 por Lofti Asker Zadeh, através da publicação do artigo *Fuzzy Sets* no *Jornal Information and Control*”.

Na lógica *Fuzzy*, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto *Fuzzy* de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógico binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Nos sistemas lógicos multi-valores, o valor verdade de uma proposição pode ser ou um elemento de um conjunto finito, num intervalo, ou uma álgebra booleana. Na lógica nebulosa os valores verdade são expressos linguisticamente, (e.g: verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso), onde cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto *Fuzzy* do intervalo unitário (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHHEIT,1995, p. 1).

Nos sistemas lógicos binários, os predicados são exatos (e.g.: *par, maior que*), entretanto, na lógica *Fuzzy* os predicados são nebulosos (e.g.: *alto, baixo*) e existem uma variedade de modificadores de predicados possíveis (e.g.: *muito, mais ou menos*) (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

A Lógica *Fuzzy* é considerada uma técnica semelhante à forma humana de se pensar, assim, um controlador *Fuzzy* pode ser projetado para se comportar com um raciocínio dedutivo baseado em informações obtidas anteriormente (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 2).

2.2.1 Conjuntos *Fuzzy*

Os conjuntos *Fuzzy* apresentam características de não possuir fronteiras bem definidas, foram desenvolvidos para lidar com problemas onde as transições de uma classe para outra não acontecem de forma suave (ORTEGA,2001).

Um conjunto *Fuzzy* é representado por uma função denominada função de pertinência, no qual cada função de pertinência define um conjunto *Fuzzy* através da atribuição de graus de pertinência.

De acordo com Tanscheit (2004), na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido. Dado um conjunto A em um universo X , os elementos simplesmente pertencem ou não a aquele conjunto, sendo expresso pela função f_A :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Zadeh (1965 apud Koga, Masette E Travensolli, 2012) apresenta o conceito de que alguns elementos pertencem mais a um conjunto do que outros. Desse modo o fator de pertinência pode assumir uma quantidade infinita de valores no intervalo $[0,1]$, sendo que os valores 0 e 1 indicam completa exclusão ou completa pertinência respectivamente. Um conjunto *Fuzzy* A contido em um universo U é definido por uma função de pertinência μ_A que apresenta valores no intervalo $[0,1]$:

$$\mu_A(u): U \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

Desse modo, o conjunto A é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ \mu_A(u)/u \}, u \in U \quad (3)$$

No qual $\mu_A(u)$ indica o quanto o elemento u é pertinente ao conjunto A , visto que um elemento pode pertencer a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência. É chamado de conjunto suporte de um conjunto *Fuzzy* A , o conjunto dos elementos no universo U tal que $\mu_A(u) > 0$ (KOGA; MASSETTE; TRAVENSOLLI, 2012).

2.2.2 Funções de Pertinência

As funções de pertinência representam aspectos fundamentais das ações teóricas e práticas de um sistema *Fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *Fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso, ou seja, cada função de pertinência define um conjunto *Fuzzy*. Sendo o universo todo os possíveis valores reais que uma variável pode assumir dentro de um intervalo. (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 46).

“As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas” (TANSCHKEIT, 2004, p. 5).

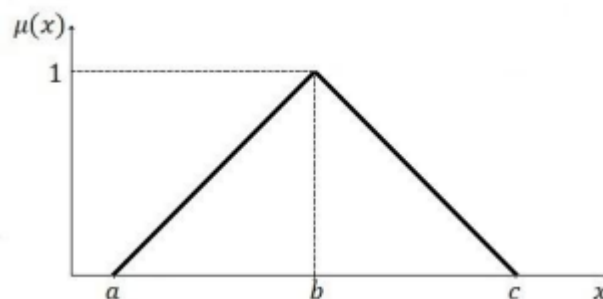
De acordo com Koga, Massette e Travensolli (2012, p. 21), “estas funções podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, porém é comum empregar funções padrão, como: as de forma triangular, trapezoidal, gaussiana e sino”.

Em alguns casos onde o desempenho suave é de grande importância podem ser usadas funções do tipo $\cos^2(x)$, sigmoide e spline cúbico. As funções de pertinência não precisam necessariamente ser simétricas ou igualmente espaçadas, além disso, cada variável pode ter um conjunto de funções de pertinência diferente, com diversos formatos e atribuições (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 47).

A seguir, Martins (2007) define as funções de pertinência comumente utilizadas:

- Triangular: definida por três parâmetros $\{a, b, c\}$ que determinam as coordenadas x dos seus três vértices.

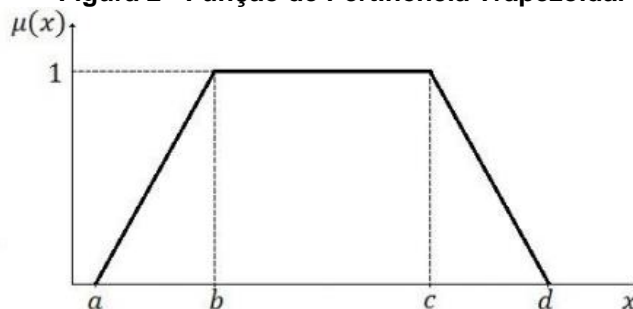
Figura 1 - Função de Pertinência Triangular



Fonte: Koga, Massette e Travensolli (2012, p.21).

- Trapezoidal: definida por quatro parâmetros $\{a, b, c, d\}$.

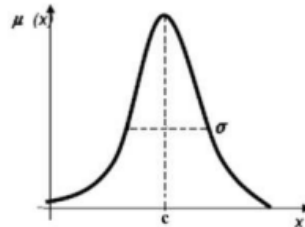
Figura 2 - Função de Pertinência Trapezoidal



Fonte: Koga, Massette e Travensolli (2012, p.22).

- Gaussiana: especificada por dois parâmetros $\{\sigma, c\}$, onde c representa o centro da função de pertinência, e o σ determina a sua largura.

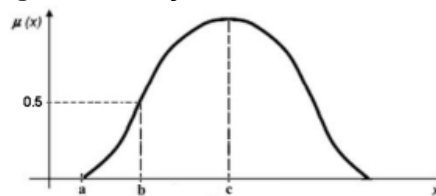
Figura 3 - Função de Pertinência Gaussiana



Fonte: Martins (2007, p.44).

- Sino: definida por três parâmetros $\{a, b, c\}$, onde b normalmente é positivo.

Figura 4 - Função de Pertinência Sino

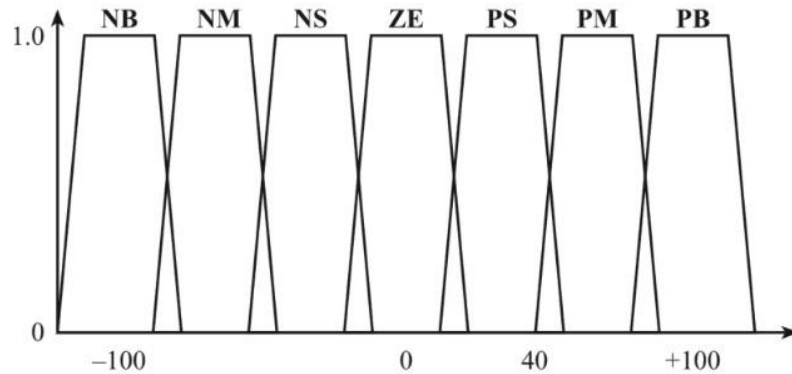


Fonte: Martins (2007, p.44).

A precisão de funções de pertinência *Fuzzy* podem ser afetadas pelo grau de superposição entre as funções. Um mínimo de 25% e um máximo de 75% foram determinados experimentalmente como adequados, sendo 50% um compromisso razoável. Os rótulos linguísticos tradicionais em um sistema industrial para sete conjuntos de pertinência em funções trapezoidais são apresentados pela Figura (5) (SIMÕES; SHAW, 2007, p. 47):

Figura 5 – Rótulos linguísticos e funções de pertinências Trapezoidais

NB = grande_negativo *PS* = pequeno_positivo
NM = médio_negativo *ZE* = zero *PM* = médio_positivo
NS = pequeno_negativo *PB* = grande_positivo



Fonte: Simões e Shaw (2007, p.48).

2.2.3 Proposições *Fuzzy*

Martins (2007, p. 50) define proposição *Fuzzy* como: “A proposição *Fuzzy* é uma frase do tipo x é A , onde x é o nome de uma variável linguística e A é um conjunto *Fuzzy* pertencente ao universo X ”.

Proposições *Fuzzy* podem ser combinadas utilizando-se diferentes operadores, gerando novas proposições *Fuzzy*. Exemplos de operadores incluem os conectivos lógicos *E* e *OU*, bem como o operador de implicação *SE...ENTÃO*. As proposições *Fuzzy* resultantes da combinação podem ser descritas em termos de relações *Fuzzy* (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995, p. 6).

O conectivo *ou* é aplicado a variáveis em um mesmo universo, o conectivo *e* é aplicado em variáveis de universos diferentes. O conectivo *ou*, quando usado em variáveis de sentenças do tipo *se...então*, pode ser usado com duas variáveis diferentes. O operador *se...então* é chamado de declaração condicional *Fuzzy* e descreve a dependência do valor de uma variável em relação ao valor de outra. São aplicadas diversas aplicações com frases do tipo *se t é A então u é B* (KOGA; MASSETE; TRAVENSOLLI, 2012).

2.2.4 Fuzzificação

Simões e Shaw (1999) definem o processo de Fuzzificação como um mapeamento do domínio de números reais para o domínio *Fuzzy*. Se tornando um pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados, consequentemente aumentando a velocidade de processamento dos dados.

2.2.5 Base de Regras

O conjunto de regras *Fuzzy* são estruturas amplamente utilizadas, podendo ser estendida de inúmeras maneiras. Conceitualmente, as regras *Fuzzy* descrevem situações específicas que podem ser submetidas a análise de um painel de especialistas, cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado (ORTEGA, 2001).

Através das regras é possível especificar como as entradas e saídas se relacionam. Atualmente a Lógica *Fuzzy* utiliza regras no lugar de equações. As regras estão na forma de instruções do tipo IF-THEN (se – então). Onde IF é conhecida como o antecedente e THEN é o consequente (SUMATHI; PANEERSELVAM, 2010, tradução nossa).

Os antecedentes e consequentes são definidos pelas funções de pertinência. Os antecedentes definem uma região *Fuzzy* no espaço das variáveis de entrada do sistema enquanto os consequentes descrevem uma região no espaço das variáveis de saída do sistema (MACÊDO, 2012).

2.2.6 Inferência

O processo de inferência representa o estado do processador após adquirir os dados de entrada e antes de disponibilizar ao sistema os dados de saída. Após a Fuzzificação o controlador é responsável por interpretar os dados de entrada transformando-os em variáveis *Fuzzy* (KOGA; MASSETTE; TRAVENSOLLI, 2012).

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *Fuzzy* propriamente ditas: combinação dos antecedentes das regras, implicação e modus ponens generalizado. Os conjuntos *Fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das

regras, e o de saída, referente ao conseqüente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados (TANSCHEIT, 2004, p. 27).

Os tipos de inferência comumente usados são os modelos clássicos de Mamdani e de Larsen, os modelos de interpolação comumente usados são de Takagi-Sugeno e de Tsukamoto (SANDRI; CORREA, 1999).

O modelo de Mamdani é conhecido como um modelo linguístico, pois é formado por regras do tipo:

$$R^j: \text{Se } x_1 \text{ é } A_1^j \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_n^j \text{ então } y \text{ é } B^j \quad (4)$$

Onde A_1^j e B^j ($j = 1, 2, \dots, J$) são os conjuntos *Fuzzy* das variáveis de entrada e saída $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathfrak{R}^n$ e $y \in \mathfrak{R}$, respectivamente. O método adotado para o trabalho será o de Mamdani, pois neste as regras para a sua construção são fornecidas por operadores humanos e através delas é possível realizar sua interpretação linguística do sistema e suas ações (MARTINS, 2007).

2.2.7 Defuzzificação

Durante o processo de Defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida através do conjunto de regras *Fuzzy* será traduzido para um valor discreto. Logo, a Defuzzificação se torna uma transformação inversa que traduz o domínio *Fuzzy* para o domínio discreto. Existem diferentes técnicas de Defuzzificação e entre as mais utilizadas estão: Centro da área (C-o-A), Centro do máximo (C- o -M) e Média do máximo (M-o-M) (MACÊDO, 2012).

O método de Defuzzificação Centro da Área é o mais utilizado, por possuir várias propriedades desejadas como: os valores Defuzzificados tendem a se mover suavemente em torno da região *Fuzzy* de saída, em mudanças de topologia do conjunto *Fuzzy* de um modelo para outro se torna fácil de calcular e pode ser aplicado a diferentes geometrias de conjunto de saídas *Fuzzy* (COX 1994, apud ROCHA, 2017).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo realizar a abordagem sobre a caracterização e os procedimentos da pesquisa.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Essa pesquisa é classificada em relação à natureza como pesquisa aplicada. Segundo Gerhardt (2009) esse tipo de pesquisa tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática, destinado a solução de um problema em específico. O objetivo da pesquisa é do tipo explicativa, pois tem como preocupação identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos (GIL, 2002). Em relação aos procedimentos de pesquisa é uma pesquisa experimental, pois de acordo com Fonseca (2002) esse tipo de pesquisa seleciona assuntos coincidentes e os submetem a diferentes tratamentos com objetivo de verificar se as respostas são estatisticamente significantes. Em termos de aplicabilidade é uma abordagem quantitativa, pois é baseada na medida numérica de variáveis com ênfase na comparação de resultados e no uso de técnicas estatísticas (WAINER, 2007).

3.2 Procedimentos Metodológicos

A execução do trabalho será feita através da análise por simulação. Com isso, será necessário seguir as seguintes etapas:

3.2.1 Aquisição de dados

Foram analisadas a sequência de dois cruzamentos com alto fluxo de veículos de uma mesma avenida da cidade de Maringá – Paraná. Após consultar a Secretaria de Mobilidade Urbana de Maringá (SEMOB) constatou-se que os maiores fluxos de veículos ocorriam entre os períodos de: 07:00 - 08:00, 12:00 - 13:00 e 18:00 - 19:00.

Tendo posse dessas informações, o levantamento de dados foi realizado em uma terça feira, com a necessidade de duas pessoas. Em uma aplicação real os dados são obtidos por sensores e câmeras para contagem de veículos. Porém, no trabalho os dados foram obtidos pela contagem manual. No qual uma pessoa ficou na intersecção da Avenida Brasil e Avenida Herval e a outra na intersecção da Avenida Brasil e Avenida São Paulo (Figura 6).

Figura 6 - Cruzamentos estudados



Fonte: Adaptado de Google Maps (2022).

Os fluxos foram coletados da seguinte forma: em cada intersecção foram destinadas categorias de intervalo de tempo, numeração referente ao trecho e tipo de veículo.

Por exemplo, através do Quadro 1 podemos observar que na intersecção da Avenida Brasil com a Avenida Herval entre o trecho 1 e 3 que representa uma parcela da via com direção ao sul da Avenida Herval teve o fluxo de 341 carros entre o período das 07:00 as 08:00 da manhã.

Quadro 1 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 07:00 e 08:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
1 – 3	341	83	17	9
1 – 5	280	62	0	1
2 – 4	395	51	0	2
2 - 8	80	44	0	1
7 - 3	96	70	0	0
7 - 8	315	86	0	3
6 - 5	294	63	35	2

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 2 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 12:00 e 13:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
1 – 3	270	103	10	2
1 – 5	240	80	0	3
2 – 4	197	98	0	1
2 - 8	63	61	0	0
7 - 3	71	42	0	1
7 - 8	293	105	0	4
6 - 5	260	110	16	6

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 3 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida Herval entre 18:00 e 19:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
1 – 3	214	70	8	4
1 – 5	173	51	0	1
2 – 4	142	63	0	6
2 - 8	52	30	0	1
7 - 3	82	37	0	4
7 - 8	215	68	0	5
6 - 5	280	71	20	8

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 4 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 07:00 e 08:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
11 – 9	515	91	0	12
11 – 13	111	62	0	4
12 – 10	410	84	0	14
12 – 16	197	71	0	8
14 – 10	322	76	1	7
14 – 13	326	80	35	5
15 - 16	312	87	0	8

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 5 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 12:00 e 13:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
11 – 9	312	121	0	3
11 – 13	80	94	0	0
12 – 10	215	139	0	8
12 – 16	241	112	0	4
14 – 10	281	84	0	2
14 – 13	271	126	16	5
15 - 16	340	117	0	7

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 6 - Fluxo Avenida Brasil x Avenida São Paulo entre 18:00 e 19:00

Tipo	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão (2 eixos)
Segmento				
11 – 9	241	73	0	2
11 – 13	87	51	0	1
12 – 10	260	41	0	5
12 – 16	161	62	0	0
14 – 10	231	81	1	2
14 – 13	271	55	20	3
15 - 16	241	79	0	4

Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.2 Implementação do modelo matemático

Utilizando os dados obtidos acima é necessário realizar a Fuzzificação, para transmitir essas informações do mundo real para o ambiente computacional e compor a base de dados no *software* de simulação MATLAB. Para isso, deve-se seguir a sequência de passos:

1) Determinar a quantidade de entradas e saídas:

O sistema é composto por 14 entradas, sendo 7 entradas provenientes da intersecção representada nos Quadros 1 a 3 e as outras 7 representadas nos Quadros 4 a 6. No qual cada uma representa o tipo de veículo, direção e quantidade em um intervalo de 1 hora. A partir disso, são obtidas 4 saídas em relação ao tempo de semáforo variando entre 15 e 60 segundos, sendo elas:

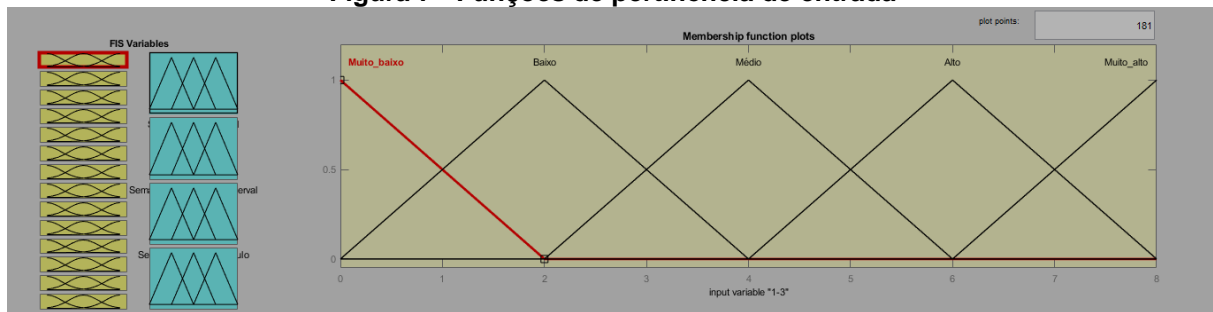
1. Tempo de sinal verde do semáforo da Avenida Herval;
2. Tempo de sinal verde do semáforo da Avenida Brasil, na intersecção com a Avenida Herval.
3. Tempo de sinal verde do semáforo da Avenida São Paulo;
4. Tempo de sinal verde do semáforo da Avenida Brasil na intersecção com a Avenida São Paulo.

2) Determinar a quantidade de funções de pertinência:

Quanto maior a quantidade de funções de pertinência, mais refinado é o controlador, porém isso implica em um maior número de regras de controle. Portanto, foram utilizadas 5 funções de pertinência de entrada de modo a classificar ao volume do fluxo de veículos, sendo nomeadas como:

Muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto (Figura 7).

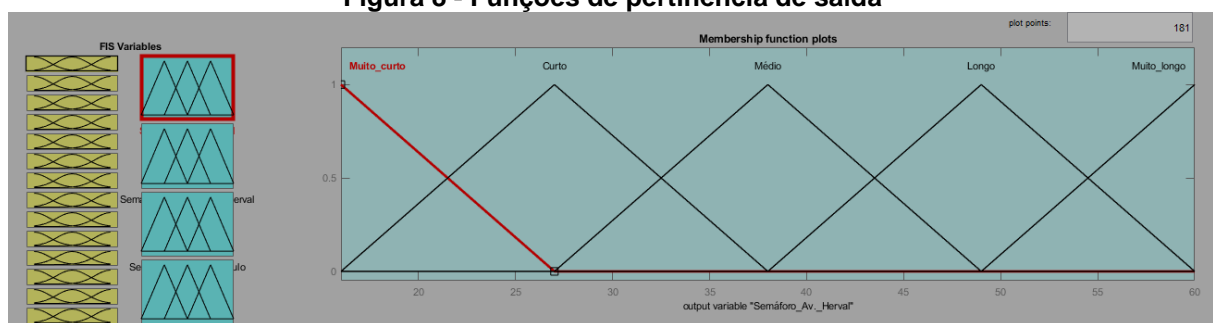
Figura 7 - Funções de pertinência de entrada



Fonte: Autoria própria (2022).

De modo análogo também foram utilizadas 5 funções de pertinência de saída em relação ao tempo de sinal verde em cada semáforo, entretanto foram nomeadas como: Muito curto, curto, médio, longo e muito longo (Figura 8).

Figura 8 - Funções de pertinência de saída



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.3 Determinar os valores máximos e mínimos das entradas:

Os valores máximos e mínimos foram utilizados de acordo com os dados obtidos (Quadros 1 a 6), sendo assim, cada função de pertinência de entrada possui um universo correspondente, variando entre o mínimo e máximo para cada entrada.

Todas elas possuem um mínimo em comum que é o valor 0, representando nenhum fluxo no período. Em relação ao valor máximo foi utilizado o fluxo de veículos por minuto, sendo obtido através do quociente entre a soma dos veículos em dado período e o valor de 60, representando a quantidade de minutos em 1 hora.

3.2.4 Determinar o modelo de função de pertinência utilizado:

Em ambos os casos, entrada e saída, foram utilizadas as funções de pertinência triangulares, devido aos parâmetros possuírem uma faixa com maior possibilidade de acontecer em um pico, sua taxa de sobreposição e facilidade de implementação.

3.2.5 Implementação do Controlador *Fuzzy*:

A partir da base de dados é necessário criar a base de regras, especificando como as entradas e saídas se relacionam. O sistema é composto por 14 entradas onde cada entrada possui 5 possibilidades em relação ao nível de fluxo de veículos, totalizando em 5^{14} possibilidades. Tornando a implementação inviável de ser feita manualmente.

Porém, algumas entradas possuem a origem em comum e somente o destino é diferente, com isso elas podem ser agrupadas para reduzir o número de possibilidades.

Sendo assim, foram formados 4 grupos associando os segmentos:

- Grupo 1: 1 – 3, 1 – 5, 2 – 4, 2 – 8.
- Grupo 2: 7 – 3, 7 – 8, 6 – 5.
- Grupo 3: 11 – 9, 11 – 13, 12 – 10, 12 – 16.
- Grupo 4: 14 – 10, 14 – 13, 15 – 16.

Através do Quadro 7 são apresentadas as siglas utilizadas para classificar a quantidade de fluxo de veículos e o tempo de semáforo. Ao todo foram elaboradas 16 regras associando as possibilidades dos 4 grupos, relacionando o fluxo de cada entrada com a temporização semafórica correspondente (Quadro 8).

Quadro 7 – Legenda da Fuzzificação

Variável Linguística	Significado
MB	Muito baixo
B	Baixo
M	Médio
A	Alto
MC	Muito curto
C	Curto
L	Longo
ML	Muito longo

Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 8 - Base de Regras

Entradas														Saídas			
1	1	2	2	7	7	6	11	11	12	12	14	14	15	S1	S2	S3	S4
3	5	4	8	3	8	5	9	13	10	16	10	13	16				
B	B	B	B	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	C	MC	MC	MC
MB	MB	MB	MB	B	B	B	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MC	C	MC	MC
MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	B	B	MB	MB	MB	MC	MC	C	MC
MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	B	MC	MC	MC	C
M	M	M	M	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	M	C	C	C
B	B	B	B	M	M	M	B	B	B	B	B	B	B	C	M	C	C
B	B	B	B	B	B	B	M	M	M	M	B	B	B	C	C	M	C
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	M	M	M	C	C	C	M
A	A	A	A	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	L	M	M	M
M	M	M	M	A	A	A	M	M	M	M	M	M	M	M	L	M	M
M	M	M	M	M	M	M	A	A	A	A	M	M	M	M	M	L	M
M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	A	A	A	M	M	M	L
MA	MA	MA	MA	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	ML	L	L	L
A	A	A	A	MA	MA	MA	A	A	A	A	A	A	A	L	ML	L	L
A	A	A	A	A	A	A	MA	MA	MA	MA	A	A	A	L	L	ML	L
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	MA	MA	MA	L	L	L	ML

Fonte: Autoria própria (2022).

Feito isso, se torna necessário efetuar o processo de Defuzzificação, ou seja, traduzir a variável estudada em um valor numérico.

Através da Figura 9 é possível observar o processo de Defuzzificação, no qual a partir do fluxo de veículos por minuto de cada entrada temos um tempo em segundos de sinal verde para cada semáforo. Devido ao pouco espaço da imagem foi alterado

os nomes das variáveis de entrada e saída. A saída S1 corresponde ao tempo de sinal verde no semáforo existente na Avenida Herval, a saída S2 corresponde ao tempo de sinal verde no semáforo existente na intersecção da Avenida Herval com a Avenida Brasil no sentido da Avenida Brasil, S3 corresponde ao tempo de sinal verde do semáforo existente no sentido da Avenida São Paulo e por fim S4 representa o tempo de sinal verde do semáforo existente na intersecção da Avenida São Paulo e Avenida Brasil no sentido da Avenida Brasil.

Figura 9 - Etapa de Defuzzificação



Fonte: Autoria própria (2022).

Como mencionado anteriormente, o *software* Matlab foi utilizado apenas para a implementação da lógica *Fuzzy*. Para simular a eficiência semafórica foi utilizado o *software* SUMO.

3.2.6 Simulação de tráfego no *software* SUMO

A implementação no SUMO nos permite representar fielmente a via estudada, alterar o tipo e quantidades de veículos, sentido das vias, quantidade de faixas, programação semafórica, entre outras opções. Com isso, a simulação de tráfego ocorreu em 6 etapas: simulação entre os períodos 07-08h, 12-13h, 18-19h para o tempo fixo e entre os períodos 07-08h, 12-13h, 18-19h para o tempo obtido pelo processo de defuzzificação visto no tópico anterior.

3.2.6.1 Simulação em tempo fixo:

Durante essa etapa utilizou-se a mesma programação semafórica existente no local (Quadro 9). Além disso, há um tempo de 4 segundos no qual todos os semáforos permanecem fechados simultaneamente. Na Figura 11 temos a implementação no qual cada caractere representa uma faixa da via, sendo configurados através do tempo e siglas para o estado do semáforo. Onde G corresponde a *Green* (Verde), Y para *Yellow* (Amarelo) e R para *Red* (Vermelho).

Quadro 9 - Programação semafórica no local

Trecho	Tempo de sinal vermelho (s)	Tempo de sinal amarelo (s)	Tempo de sinal Verde (s)
Sentido Avenida Brasil	42	4	20
Sentido Avenida Herval	28	4	34
Sentido Avenida São Paulo	28	4	34

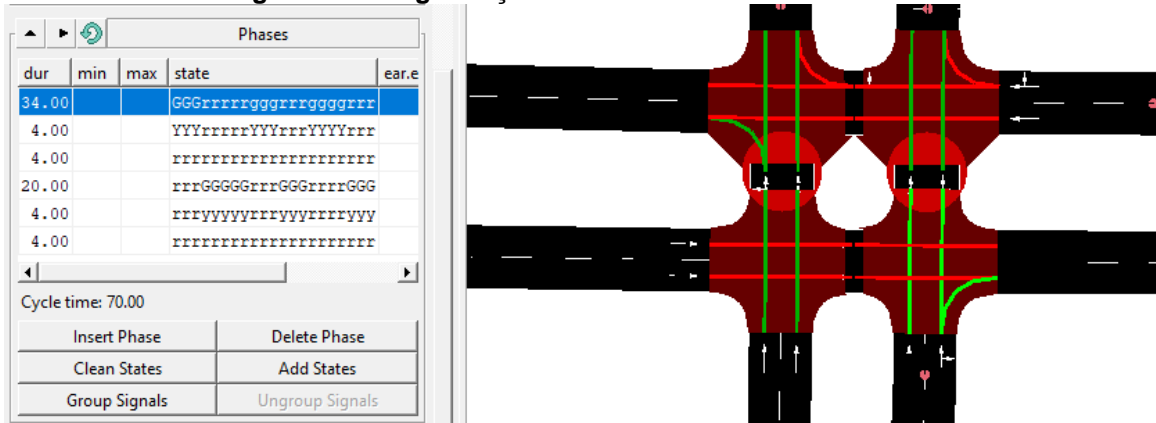
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 10 - Representação da via no software SUMO



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 11 - Programação semafórica no software SUMO

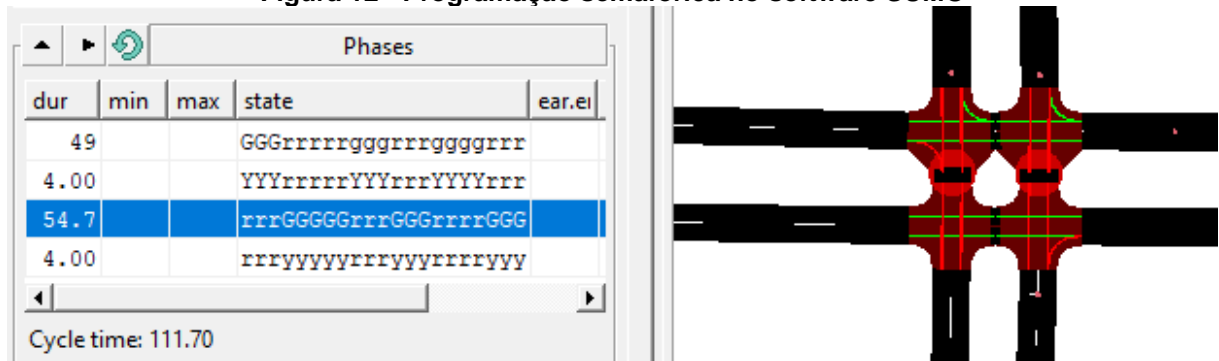


Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.6.2 Simulação em tempo variável:

Nesse caso, o tempo de sinal vermelho e amarelo permanecem e altera-se o tempo de sinal verde em cada via conforme o resultado da Defuzzificação (Figura 9).

Figura 12 - Programação semafórica no software SUMO



Fonte: Autoria própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir foram obtidos de acordo com os dados coletados, todas as simulações ocorreram durante o período de 3600 segundos (1 hora). Para cada intervalo foram comparados os 2 resultados, um proveniente da simulação de tempo fixo e o outro proveniente da simulação do tempo determinado pela lógica *Fuzzy*.

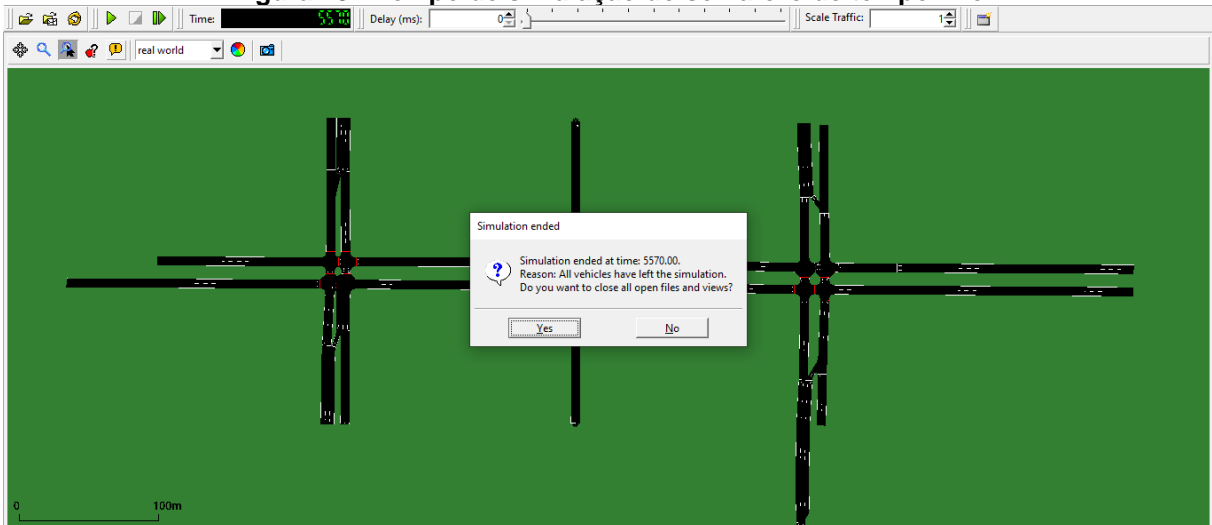
Os resultados das simulações foram classificados em: tempo médio de espera, tempo médio de viagem e tempo total de simulação. O tempo médio de espera é um parâmetro do *software* SUMO, no qual mede o tempo em que o veículo demora a ser inserido em situações que o tráfego está totalmente preenchido. O tempo médio de viagem corresponde ao tempo médio em que o veículo demora para realizar o trajeto. Por fim, o tempo total de simulação corresponde ao tempo necessário para que os volumes de veículos obtidos consigam realizar o seu trajeto.

4.1 Período entre 07:00 e 08:00

A Figura 13 representa o tempo de simulação do semáforo de tempo fixo. Nesse cenário, o volume de 5150 veículos dispostos entre carros, motos, ônibus e caminhões conforme os Quadros 1 a 6, atrasaria em aproximadamente 1970 segundos (33 minutos) no tempo de simulação.

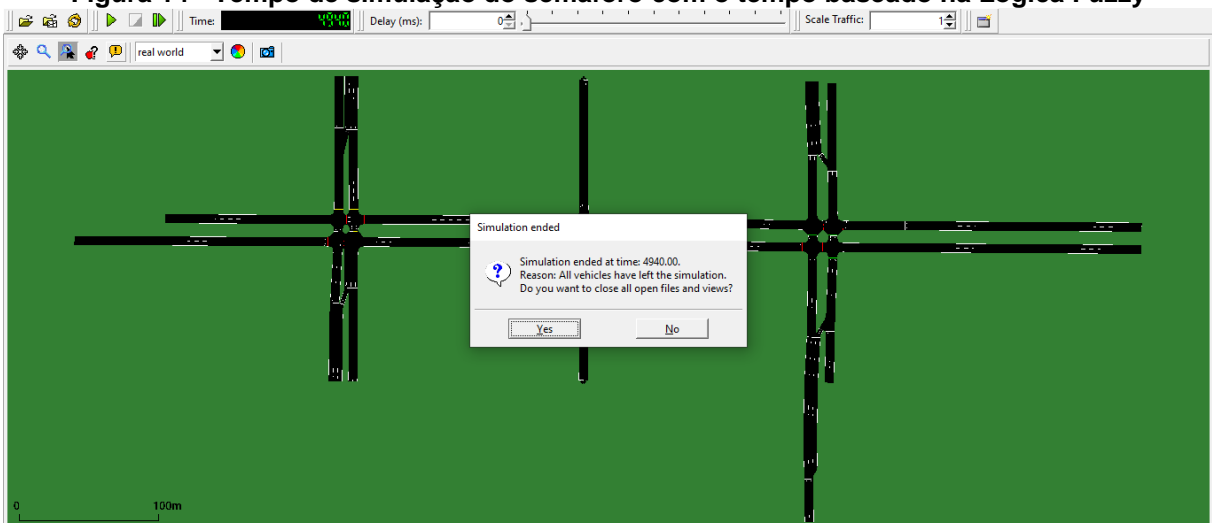
Utilizando o Controlador *Fuzzy*, na Figura 14, é possível notar que esse atraso é reduzido para 1340 segundos (22 minutos). Em relação ao tempo médio de viagem, ele é reduzido de 76,27 para 56,11 segundos (Quadro 10).

Figura 13 - Tempo de simulação do semáforo de tempo fixo



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 14 - Tempo de simulação do semáforo com o tempo baseado na Lógica Fuzzy



Fonte: Autoria própria (2022).

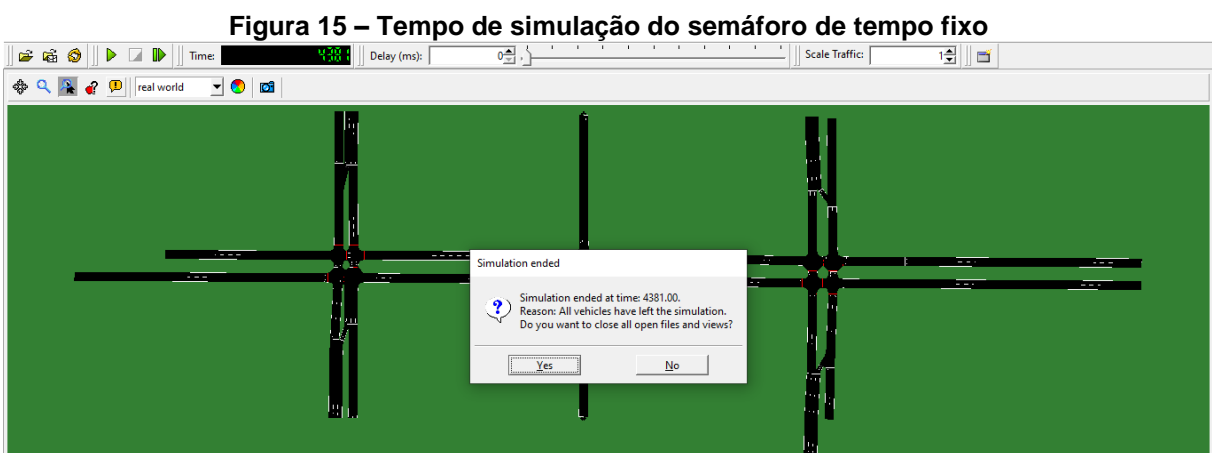
Quadro 10 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação

Tipo da programação	Tempo Fixo (s)	Determinado por <i>Fuzzy</i> (s)
Tempo médio de espera	403	143,65
Duração média da viagem	76,27	56,11
Tempo total de simulação	5570	4940

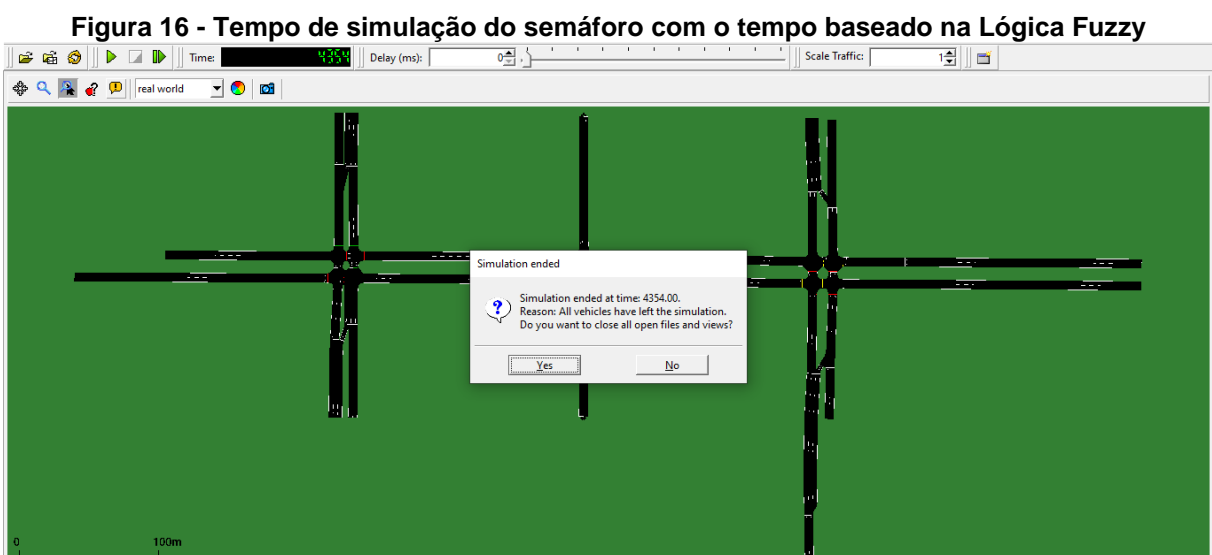
Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 Período entre 12:00 e 13:00

Através da Figura 15 podemos notar que nesse cenário a quantidade de 4597 veículos com os semáforos em tempo fixo o atraso seria de cerca de 781 segundos (13 minutos), enquanto que com a lógica *Fuzzy* o tempo é reduzido para 754 segundos (12 minutos). A diferença maior acontece no tempo médio de viagem e no tempo de espera, reduzindo notavelmente o tempo (Quadro 11).



Fonte: Autoria própria (2022).



Fonte: Autoria própria (2022).

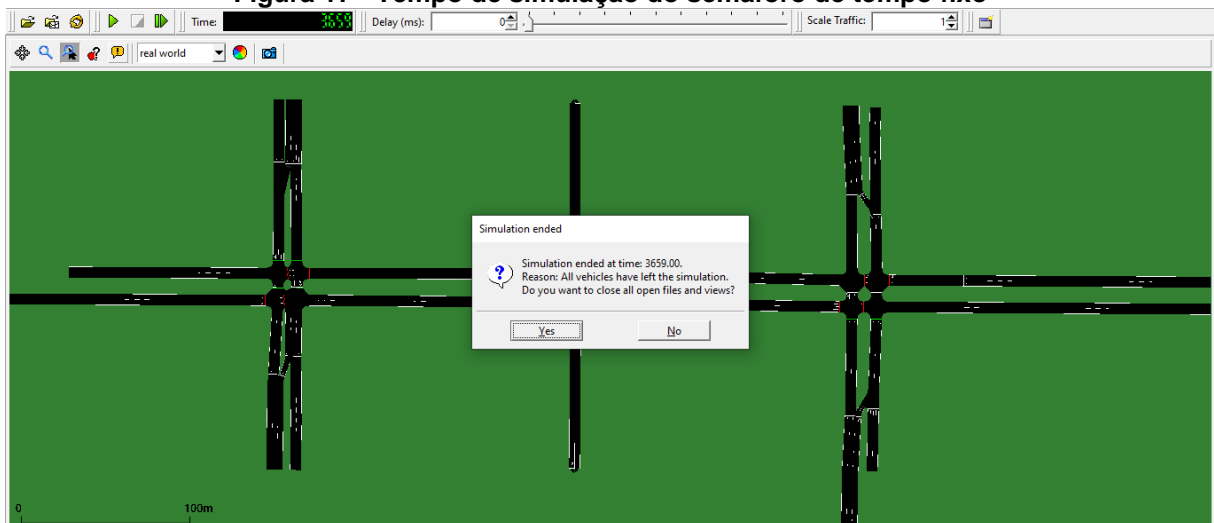
Quadro 11 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação

Tipo de programação	Tempo Fixo (s)	Determinado por <i>Fuzzy</i> (s)
Tempo médio de espera	157,19	49,56
Duração média da viagem	84,15	50,44
Tempo total de simulação	4381	4354

Fonte: Autoria própria (2022).

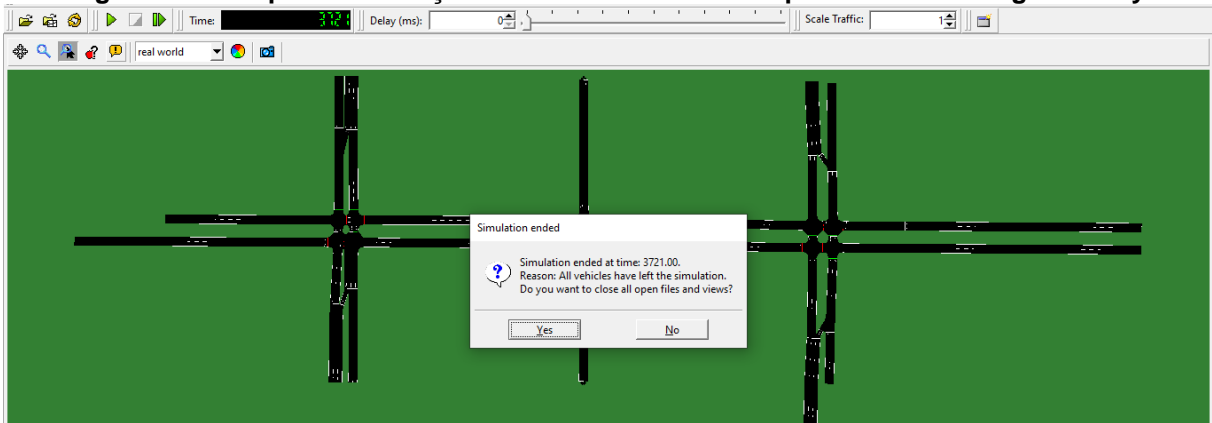
4.3 Período entre 18:00 e 19:00

Por fim, durante esse período o volume de 3548 veículos resultou em tempos de simulações próximos, mas com o controle *Fuzzy* o tempo médio de duração da viagem e tempo médio de espera é menor (Quadro 12).

Figura 17 - Tempo de simulação do semáforo de tempo fixo

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18 - Tempo de simulação do semáforo com o tempo baseado na Lógica Fuzzy



Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 12 - Tempo médio de espera, duração média e tempo total de simulação

Tipo de programação	Tempo Fixo (s)	Determinado por <i>Fuzzy</i> (s)
Tempo médio de espera	2,25	4,52
Duração média da viagem	48,62	42,29
Tempo total de simulação	3659	3721

Fonte: Autoria própria (2022).

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo analisar um Controle Inteligente de Semáforos de modo a reduzir o congestionamento existente em grandes cidades a partir da aplicação da Lógica *Fuzzy*.

Para analisar a eficiência foram definidos 4 objetivos específicos. O primeiro deles foi analisar um ponto de alto fluxo e o melhor horário para coletar dados de uma sequência de dois cruzamentos da cidade de Maringá, possibilitando obter os dados de tipo e quantidade de fluxo de veículos por hora.

Após isso, através da implementação da simulação do modelo matemático e a implementação do Controlador *Fuzzy* aplicado aos dados reais, o *Software* MATLAB possibilitou fornecer valores para realizar a simulação utilizando o *Software* SUMO. No qual apresentou uma excelente ferramenta para comparar os resultados e confirmar a eficiência do fluxo de veículos quando se utiliza a Lógica *Fuzzy*.

Sendo assim, diante do cenário de congestionamentos diários existente nas grandes cidades o Controle Inteligente se torna uma opção viável, tanto por sua eficiência, redução no tráfego urbano, consumo de combustível, desperdício de tempo no trânsito bem como pelo baixo custo e rápida execução, quando comparado a outras alternativas que atualmente estão sendo muito aplicadas em grandes cidades que não possuem espaço para expansão das vias, desse modo é de extrema importância otimizar a infraestrutura existente.

Por fim, nesse cenário foram analisadas apenas a sequência de dois cruzamentos, em um trabalho futuro será interessante analisar o impacto que o Controle Inteligente pode causar em vias próximas, no qual para reduzir o fluxo em uma via pode ocasionar em um trânsito mais denso em outra.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. **Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semáforicos Fuzzy**. 2004. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/5589/1/2004-Michelle%20Andrade.pdf>. Acesso em: 08 out. 2022.

BEZERRA, B. S. **Semáforos: gestão técnica, percepção do desempenho, duração dos tempos**. 2007. Tese (Doutorado em Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-18062007-093237/publico/Barbara.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UFRGO, 2009. 120 p. Apostila. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 08 out. 2022.

GIL, A. C. Como classificar as pesquisas. **Como elaborar projetos de pesquisa**, v. 4, p. 44-45, 2002. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38881088/como_classificar_pesquisas-with-cover-page-v2.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-23.4208877,-51.9347046,337m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 15 ago. 2022.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *Fuzzy*. **SBA controle & Automação**, Campinas, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994. Disponível em: <https://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/ftp/publications/RevSBA94.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

GOMIDE, F.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos Fuzzy, lógica Fuzzy e aplicações**. In: 6 th IFSA Congress-Tutorials. 1995. p. 1-38. São Paulo. 1995. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Gudwin/publication/268371800_CONCEITOS_FUNDAMENTAIS_DA_TEORIA_DE_CONJUNTOS_FUZZY_LOGICA_FUZZY_E_APLICACOES/links/5591377908ae47a3490f584b/CONCEITOS-FUNDAMENTAIS-DA-TEORIA-DE-CONJUNTOS-FUZZY-LOGICA-FUZZY-E-APLICACOES.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Frota de Veículos: série histórica**. Brasil. 202[?]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?tipo=grafico>. Acesso em: 11 out. 2022.

KOGA, C. A; MASSETTE, G. V.; TRAVENSOLLI, W. P. **Controlador Fuzzy de semáforos**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica / Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/664/1/CT_COELE_2012_1_03.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

LEAL, I. M. ; SILVA, G. C. C. Controle Inteligente de Semáforo usando a Lógica Fuzzy. In: CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 19., 2019, São Paulo. **Anais** [...]. Bauru: Universidade do Sagrado Coração, 2019. p. 2. Disponível em: <http://conic-semesp.org.br/anais/files/2019/trabalho-1000004719.pdf>. Acesso em: 07 set. 2022.

MACÊDO, A. V. de A. **Controle do ângulo de passo de uma turbina eólica utilizando lógica Fuzzy**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/9462/ANA%20VIT%203%93RIA%20DE%20ALMEIDA%20MAC%20c%8aDO%20-%20DISSERTA%20c%87%20c%83O%20PPGEE%202012.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 09 out. 2022.

MATLAB M. The language of technical computing. Version R2022a. MathWorks, 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/>. Acesso em: 01 set. 2022.

MARTINS, W. F. **Controle Fuzzy em Tempo Real, Aplicado ao Sistema Plataforma-Esfera**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.pgee.ime.eb.br/pdf/pdf/wander_martins.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria de conjuntos Fuzzy a problemas da biomedicina**. 2001. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~tonelli/verao-Fuzzy/neli/principal.pdf>. Acesso em: 08 out. 2022.

PERO, V.; STEFANELLI, V. A questão da mobilidade urbana nas metrópoles brasileiras. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 19, p. 366-402, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rec/a/ktc7kfNQ4KH5vbhn6sdCwwJ/?lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2022.

REGES, J. P.; SILVA, J. L. N.; BEZERRA, L. C. S.; ALEXANDRIA, A. R. Controle Fuzzy de Robô Diferencial. **HOLOS**, Natal, v. 7, p. 98-109, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481554852009.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

RENTERÍA, A. R. **Controle de semáforos por lógica Fuzzy e redes neurais**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: [2695-with-cover-page-v2.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#). Acesso em: 10 out. 2022.

ROCHA, M. M. **Estudo de um Controlador Fuzzy aplicado a um sistema eólico de velocidade variável conectado à rede elétrica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/tede/746/1/Manass%c3%a9sMR_DISSERT.pdf. Acesso em: 13 out. 2022.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica nebulosa**. V Escola de Redes Neurais, Conselho Nacional de Redes Neurais. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1999. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/ensino/cpe717-2011/curso_ERN99_Fuzzy.pdf. Acesso em: 13 out. 2022.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. Editora Blucher, São Paulo, 2007.

SUMATHI, S.; PANEERSELVAM, S.; **Computational intelligence and paradigms: theory & applications using MATLAB**. Boca Raton, Fl: Taylor And Francis Group, Londres, 2010.

SUMO: Simulation of Urban MObility. Version 1.14.1. Eclipse Foundation, 2022. Disponível em: <https://www.eclipse.org/sumo/> Acesso em: 02 set. 2022.

TANSCHUIT, R. Sistemas Fuzzy. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE. **Anais [...]** Bauru: Sociedade Brasileira de Automática, 2004. p. 2-27. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/sumar/ensino/sistemas-Fuzzy/sistemas-Fuzzy/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

WAINER, J. Métodos de pesquisa quantitativa e qualitativa para a Ciência da Computação. **Atualização em informática**, v.1, n 221-262, p. 32-33, 207 Disponível em: <https://ic.unicamp.br/~wainer/papers/metod07.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

YUKI, H. S. **Projeto de controlador inteligente para semáforo**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2008_ControladorInteligenteParaSem%C3%A1foro_TG_H%C3%A9lioYuki.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.