



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TÓPICOS ESPECIAIS EM SINAIS E SISTEMAS/F**  
**SISTEMAS FUZZY**

**TRABALHO FINAL**

**CONTROLE FUZZY ADAPTATIVO EM CRUZAMENTOS**

**PRISCILA APARECIDA DIAS NICÁCIO**

**Belo Horizonte**  
**2025.**

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.	ARTIGO DE REFERÊNCIA.....	3
3.	MODELAGEM MATEMÁTICA FUZZY: SIMULAÇÃO.....	5
3.1	Conjuntos Fuzzy Triangulares .....	5
3.2	Inferência e Defuzzificação .....	7
4.	SIMULAÇÃO .....	8
4.1	Arquitetura da Simulação .....	9
4.2	Configuração dos cruzamentos .....	10
4.3	Comunicação e Estratégia de Controle .....	11
5.	RESULTADOS .....	12
5.1	Validação em relação ao tempo de verde de 10 s .....	12
5.2	Análise dos Resultados .....	13
6.	CONSIDERAÇÕES ANALÍTICAS COM BASE NA SIMULAÇÃO FUZZY.....	13
7.	CONCLUSÃO.....	15
7.1	Trabalhos Futuros .....	16
8.	REFERÊNCIAS .....	17

## 1. INTRODUÇÃO

Semáforos que operam com controle fixo utilizam ciclos pré-determinados para abertura e fechamento dos sinais, independentemente das condições reais de tráfego. Essa abordagem não considera o número de veículos presentes nas vias, nem o tempo que esses veículos permanecem esperando e tem como consequência, ineficiências operacionais que se tornam comuns, como o acúmulo de filas desnecessárias, aumento do tempo médio de espera e menor fluidez no deslocamento urbano - sobretudo em horários de pico ou situações não previstas.

Em contraste, o controle adaptativo baseado em lógica fuzzy representa uma alternativa inteligente e flexível, pois ajusta o tempo de abertura do sinal verde de forma dinâmica e contínua, levando em consideração variáveis como o tamanho da fila, o tempo de espera acumulado e até o fluxo oposto. Esse tipo de controle se inspira no raciocínio humano, permitindo respostas intermediárias e mais sensíveis às mudanças do ambiente viário.

Neste trabalho, desenvolveu-se uma simulação de tráfego urbano com quatro cruzamentos distintos, utilizando os ambientes ROS1 e Gazebo 11. Os cruzamentos 1 e 2 foram configurados com controle fuzzy adaptativo, permitindo que o tempo de verde se ajustasse de acordo com a situação local. Já os cruzamentos 3 e 4 operaram com um controle tradicional fixo, com ciclos de sinal verde definidos em 10 segundos, sem qualquer adaptação ao fluxo veicular. Adicionalmente, combinou-se a lógica fuzzy com uma rede neural artificial, agregando maior capacidade de adaptação e resposta às variações dinâmicas do tráfego urbano.

## 2. ARTIGO DE REFERÊNCIA

O presente trabalho é fundamentado no artigo de Martinek et al. (2016), intitulado *“An Adaptive Fuzzy-Logic Traffic Control System in Conditions of Saturated Transport Stream”*, publicado no *Journal of Advanced Transportation* (PMCID: PMC4970305). O estudo aborda o desenvolvimento de um sistema adaptativo de controle de tráfego urbano utilizando lógica fuzzy, especialmente voltado para situações de saturação do fluxo viário - um cenário crítico que desafia os métodos tradicionais baseados em ciclos fixos ou regras rígidas.

Neste artigo, os autores propõem um sistema denominado AFLTCS (Adaptive Fuzzy Logic Traffic Control System), projetado para adaptar dinamicamente os tempos de semáforo de acordo com as condições momentâneas do tráfego. A proposta é construída com base em variáveis linguísticas fuzzy, que descrevem, de forma aproximada e qualitativa, o estado do tráfego em diferentes direções de um cruzamento (por exemplo: "baixo", "médio", "alto"). Com base nessas descrições, o sistema realiza inferências fuzzy que determinam os tempos apropriados para cada fase do semáforo, com o objetivo de minimizar congestionamentos e otimizar o fluxo.

A arquitetura do AFLTCS é projetada para lidar com incertezas e flutuações naturais dos dados de tráfego, muitas vezes ruidosos ou imprecisos. Diferente dos modelos clássicos, ele não depende exclusivamente de sensores altamente precisos ou dados exatos de fluxo. Ao contrário, a lógica fuzzy se mostra particularmente eficaz por seu caráter heurístico, sendo capaz de replicar o raciocínio humano na tomada de decisões sob incerteza. Além disso, os autores implementam mecanismos adaptativos que permitem ao sistema ajustar automaticamente os limites de suas variáveis linguísticas e as regras de inferência fuzzy, conforme o comportamento observado do tráfego. Isso significa que o sistema "aprende" com o tempo, refinando sua resposta e melhorando o desempenho frente a variações sazonais, horários de pico e eventos inesperados. Essa adaptação contínua torna o AFLTCS altamente resiliente em cenários urbanos complexos.

Embora o artigo de Martinek et al. (2016) não empregue diretamente métodos formais como a análise de estabilidade de Lyapunov ou conceitos como SGUUB (Estabilidade Semi-Global Uniformemente Limitada em Última Instância), o comportamento robusto do sistema pode ser interpretado como uma forma prática de garantir que o desempenho permaneça estável e satisfatório diante de perturbações externas. A lógica fuzzy, neste contexto, cumpre um papel fundamental como mecanismo de compensação e amortecimento frente a variações abruptas no tráfego. A flexibilidade do AFLTCS reflete princípios semelhantes aos encontrados em sistemas multiagente inteligentes e distribuídos: a tomada de decisão é descentralizada por interseção, mas guiada por uma lógica comum e adaptativa. Cada agente (no caso, o semáforo) atua de forma cooperativa com os demais, com base em sua percepção local do ambiente – um conceito alinhado à filosofia dos sistemas autônomos inteligentes, como aqueles estudados em robótica ou controle distribuído.

Dessa forma, ao empregar uma abordagem fuzzy adaptativa, o artigo contribui significativamente para o campo do controle inteligente de tráfego urbano. Ele demonstra que é possível criar sistemas responsivos, sensíveis ao contexto e resilientes a falhas de entrada, sem exigir infraestrutura computacional complexa ou sensores de alto custo. Esta inspiração fundamenta o presente trabalho, que também se vale da lógica fuzzy como núcleo decisório, buscando controlar de maneira eficiente interseções em condições de alta demanda e fluxo saturado.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA FUZZY: SIMULAÇÃO

A estratégia de controle fuzzy adotada baseia-se em um sistema de inferência linguística do tipo Mamdani. O modelo proposto considera duas variáveis de entrada e uma variável de saída, conforme descrito a seguir:

Variáveis de Entrada

- $x_1$ : Número de veículos na fila, variando de 0 a 10.
- $x_2$ : Tempo de espera acumulado da fila, em minutos, variando de 0 a 5.

Variável de Saída

- $y$ : Tempo de sinal verde a ser aplicado, em segundos, com faixa de variação entre 5 e 60.

#### 3.1 Conjuntos Fuzzy Triangulares

Para representar o conhecimento linguístico do sistema, cada variável foi dividida em três categorias linguísticas, representadas por funções de pertinência triangulares:

Variável	Rótulos Linguísticos	Intervalos (triangulares)
$x_1$ : Número de veículos	Poucos, Médios, Muitos	(0, 0, 5), (3, 5, 7), (5, 10, 10)
$x_2$ : Tempo de espera	Baixo, Médio, Alto	(0, 0, 2), (1, 2.5, 4), (3, 5, 5)
$Y$ : Tempo de verde	Curto, Médio, Longo	(5, 10, 20), (15, 30, 45), (40, 60, 60)

Tabela 1. Conjuntos fuzzy triangulares.

Esses conjuntos fuzzy foram definidos com funções de pertinência triangulares sobrepostas, com o objetivo de proporcionar transições suaves e contínuas entre os diferentes estados linguísticos. Essa característica é fundamental para que o sistema de inferência fuzzy seja capaz de lidar com situações ambíguas ou intermediárias - por exemplo, quando o número de veículos na fila está entre os rótulos “médio” e “muito”, ou quando o tempo de espera não é claramente baixo nem alto. A sobreposição gradual entre os conjuntos garante que pequenas variações nas entradas resultem em respostas graduais na saída, evitando decisões abruptas no tempo de abertura do semáforo. Isso confere ao controlador um comportamento mais robusto, estável e realista, adequado à complexidade dinâmica dos ambientes urbanos. As Figuras 1, 2 e 3 ilustram as funções de pertinência fuzzy utilizadas para cada variável do sistema:

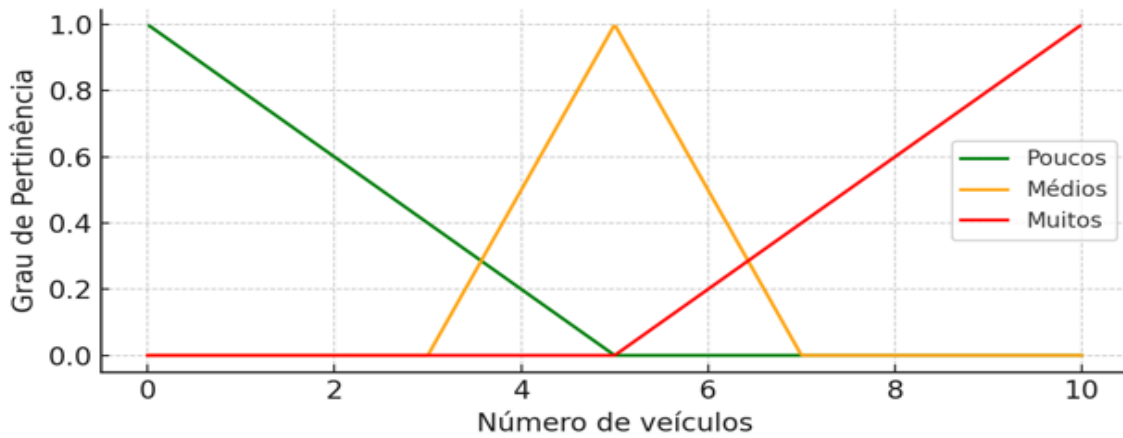


Figura 1. Funções de pertinência para a variável *número de veículos na fila* ( $x_1$ );

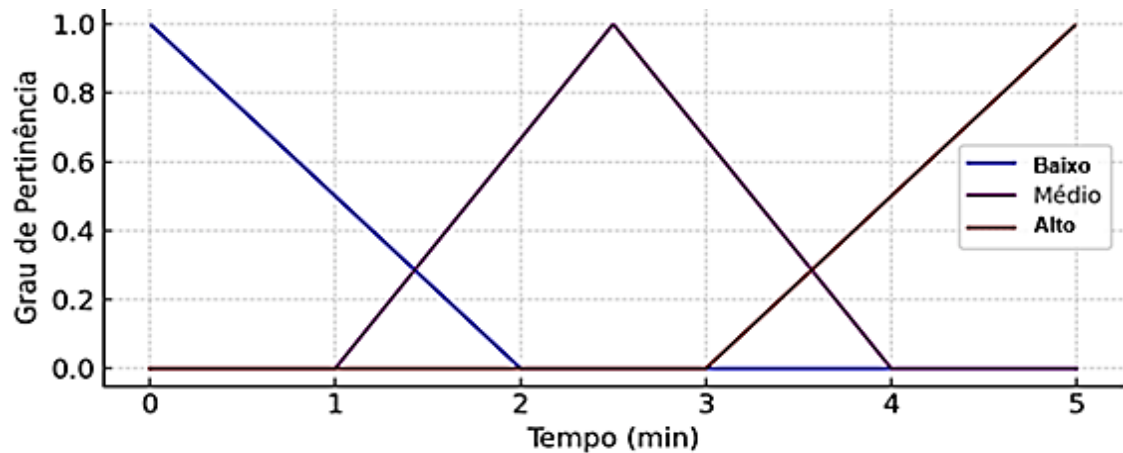


Figura 2. Funções de pertinência para o *tempo de espera* ( $x_2$ ), em minutos;

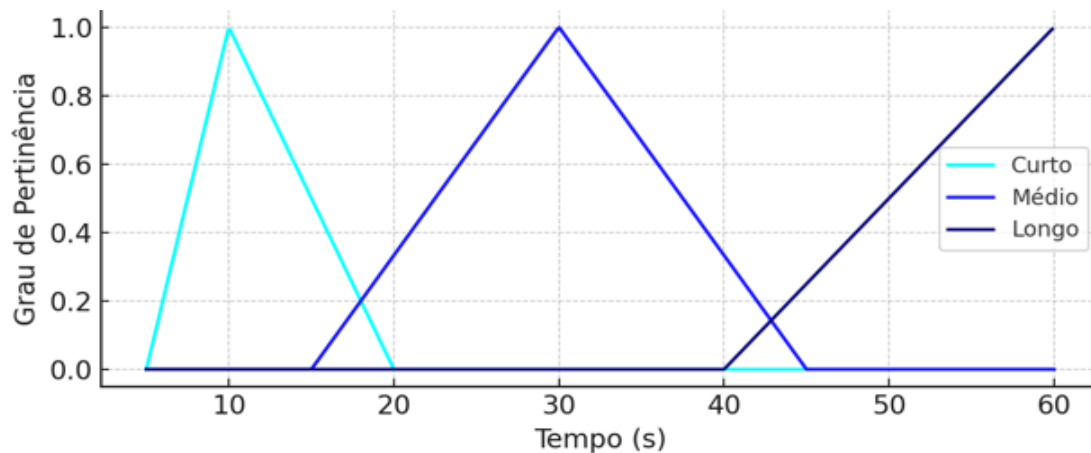


Figura 3. Funções de pertinência para o *tempo de verde* (y), em segundos.

Todas as funções foram modeladas com formato triangular e zonas de interseção, conforme os intervalos definidos na Tabela 1. Esses gráficos evidenciam que o sistema fuzzy foi construído com simetria e equilíbrio entre os conjuntos linguísticos, permitindo decisões coerentes com o comportamento desejado: por exemplo, maior tempo de verde para cenários com muito volume de veículos e alta espera, e menor tempo de verde quando o tráfego é leve. Essa estrutura torna o controle fuzzy altamente sensível às nuances do tráfego urbano, promovendo respostas adaptativas que seriam difíceis de alcançar com abordagens tradicionais baseadas em controle fixo ou limiar binário.

### 3.2 Inferência e Defuzzificação

A base de regras fuzzy do sistema consiste em proposições do tipo:

**“ Se  $x_1$  é Muitos e  $x_2$  é Alto, então y é Longo”.**

As regras foram formuladas com base no conhecimento heurístico do domínio de tráfego urbano, com o objetivo de representar o raciocínio humano de forma interpretável. O sistema implementa 9 regras fuzzy (Total de Regras =  $3 \times 3 = 9$ ), cobrindo todas as combinações possíveis entre os três conjuntos linguísticos de cada variável de entrada.

Nº	Regra Linguística
1	Se fluxo de veículos é <b>Pouco</b> e tempo de espera é <b>Baixo</b> , então tempo de verde é <b>Curto</b>
2	Se fluxo de veículos é <b>Pouco</b> e tempo de espera é <b>Médio</b> , então tempo de verde é <b>Médio</b>
3	Se fluxo de veículos é <b>Pouco</b> e tempo de espera é <b>Alto</b> , então tempo de verde é <b>Médio</b>
4	Se fluxo de veículos é <b>Médio</b> e tempo de espera é <b>Baixo</b> , então tempo de verde é <b>Médio</b>
5	Se fluxo de veículos é <b>Médio</b> e tempo de espera é <b>Médio</b> , então tempo de verde é <b>Médio</b>
6	Se fluxo de veículos é <b>Médio</b> e tempo de espera é <b>Alto</b> , então tempo de verde é <b>Longo</b>
7	Se fluxo de veículos é <b>Muito</b> e tempo de espera é <b>Baixo</b> , então tempo de verde é <b>Médio</b>
8	Se fluxo de veículos é <b>Muito</b> e tempo de espera é <b>Médio</b> , então tempo de verde é <b>Longo</b>
9	Se fluxo de veículos é <b>Muito</b> e tempo de espera é <b>Alto</b> , então tempo de verde é <b>Longo</b>

Tabela 2: Base de regras fuzzy utilizadas (9 regras).

Para a etapa de inferência, foi utilizado o método de Mamdani, sendo a agregação das regras realizada através do operador máximo (max). Após a aplicação das regras, a saída fuzzy é transformada em um valor escalar por meio do método do Centro de Gravidade (CoG), também conhecido como centroide. O método foi escolhido por sua simplicidade, boa distribuição de saída e compatibilidade com o raciocínio aproximado humano. Essa abordagem garante que o sistema se comporte de forma fluida, gradual e adaptativa, ajustando dinamicamente o tempo de abertura dos semáforos de acordo com a situação real do tráfego.

#### 4. SIMULAÇÃO

Para a validação da abordagem proposta, foi desenvolvida uma simulação computacional realista utilizando o middleware ROS1 (Robot Operating System) em conjunto com o simulador 3D Gazebo 11.





Figura 4. Simulação computacional realista utilizando com o simulador Gazebo 11.

Essa combinação é amplamente empregada em aplicações de robótica e sistemas ciberfísicos, por permitir a modelagem precisa de ambientes, sensores, atuadores e interação entre agentes inteligentes.

#### **4.1 Arquitetura da Simulação**

O cenário foi composto por quatro cruzamentos independentes, totalizando 23 veículos simulados. A lógica de controle foi implementada em nós ROS escritos em Python, com cada cruzamento sendo monitorado por sensores virtuais capazes de fornecer o número de veículos na fila e o tempo de espera acumulado na via. Essas informações são publicadas em tópicos ROS e processadas de forma contínua pelos nós de controle.

Além da lógica fuzzy, também foi incorporado ao sistema um componente baseado em redes neurais artificiais, com o objetivo de aprimorar a capacidade de adaptação dos semáforos. A rede neural foi treinada com dados simulados de fluxo veicular e tempo de espera, aprendendo padrões complexos que auxiliam na escolha do tempo ideal de abertura do sinal verde. Essa abordagem híbrida (fuzzy + rede neural) potencializa o desempenho do sistema, permitindo decisões mais refinadas e responsivas em cenários não previamente observados.

A arquitetura foi concebida de forma que a rede neural atue como suporte à inferência fuzzy, ajustando dinamicamente as saídas com base na aprendizagem acumulada durante a simulação.

Embora cada cruzamento opere com lógica de controle local - com um nó que toma decisões de forma individual baseada nas variáveis de entrada (número de veículos e tempo de espera) -, todas as decisões são também publicadas por uma central de supervisão no ambiente ROS. Essa central permite o compartilhamento contínuo das ações executadas por cada agente semafórico, mantendo todos os nós informados sobre o estado e as decisões dos demais.

Dessa forma, ainda que o controle seja descentralizado na execução, há consciência global do sistema - todos os semáforos têm acesso às informações dos demais -, abrindo margem para estratégias futuras de coordenação intersemaforia, como sincronização de ondas verdes ou priorização cooperativa de corredores viários.

## **4.2 Configuração dos Cruzamentos**

- Cruzamentos 1 e 2:

Operam sob um esquema de controle fuzzy adaptativo, no qual o tempo de abertura do sinal verde é calculado dinamicamente com base nas variáveis de entrada da modelagem fuzzy. Essa lógica simula um semáforo inteligente capaz de se ajustar em tempo real ao fluxo de veículos.

- Cruzamentos 3 e 4:

Utilizam um controle convencional fixo, no qual o tempo de sinal verde é rigidamente configurado para 10 segundos, sem qualquer adaptação às condições locais do tráfego.

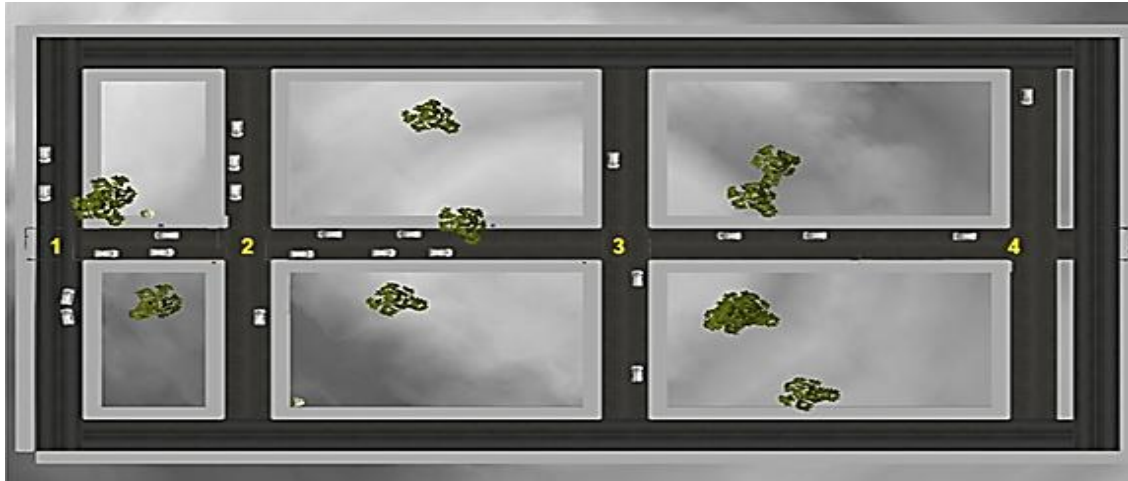


Figura 5. Configuração dos Cruzamentos 1, 2, 3 e 4.

### 4.3 Comunicação e Estratégia de Controle

A troca de informações entre os nós ocorre por comunicação broadcast no ambiente ROS 1, simulando um sistema distribuído e escalável. Essa estrutura permite que diferentes cruzamentos compartilhem dados, abrindo margem para futuras expansões com coordenação entre semáforos e priorização de veículos especiais (como ônibus ou ambulâncias).

```
[INFO] [1750547500.664303, 406.890000]: [stop_light_post_173] + RED
[INFO] [1750547500.666194, 406.890000]: [stop_light_post_174] + GREEN
[INFO] [1750547500.668436, 406.890000]: [stop_light_post_175] + RED
[INFO] [1750547500.670472, 406.895000]: [stop_light_post_180] + GREEN
[INFO] [1750547500.672630, 406.895000]: [stop_light_post_181] + RED
[INFO] [1750547500.674234, 406.895000]: [stop_light_post_170] + GREEN
[INFO] [1750547500.676658, 406.900000]: [stop_light_post_183] + GREEN
[INFO] [1750547500.679886, 406.900000]: [stop_light_post_171] + RED
[INFO] [1750547500.683920, 406.905000]: [stop_light_post_172] + RED
[INFO] [1750547500.685716, 406.910000]: [stop_light_post_179] + GREEN
[INFO] [1750547500.688005, 406.910000]: [stop_light_post_169] + RED
[INFO] [1750547500.689744, 406.910000]: [stop_light_post_176] + GREEN
[INFO] [1750547500.693212, 406.915000]: [stop_light_post_178] + RED
[INFO] [1750547500.694692, 406.915000]: [stop_light_post_177] + GREEN
[INFO] [1750547500.696055, 406.920000]: [stop_light_post_182] + RED
[INFO] [1750547500.697332, 406.920000]: i Fase 28 ativa (verde em ['stop_light_post_170', 'stop_light_post_174', 'stop_light_post_177', 'stop_light_post_180'])
[INFO] [1750547503.778625, 410.000000]:
===== MÉTRICAS =====
[INFO] [1750547503.782331, 410.000000]: Tempo simulação: 1 minuto
[INFO] [1750547503.784557, 410.005000]: Total de veículos: 31
[INFO] [1750547503.787150, 410.005000]: Veículos que passaram: 0
[INFO] [1750547503.789866, 410.010000]: Veículos por minuto: 31
[INFO] [1750547503.791897, 410.010000]: Paradas médias por veículo: 1
[INFO] [1750547503.793598, 410.015000]: Comprimento médio da fila: 1 posições
[INFO] [1750547503.796171, 410.015000]:
[INFO] [1750547505.793966, 412.015000]: [ADAPTATIVO] Densidade de tráfego: 0.60
[INFO] [1750547505.795606, 412.015000]: [ADAPTATIVO] Verde por 15s
[INFO] [1750547513.787478, 420.000000]: [FIXO] Verde por 8s
[INFO] [1750547513.787558, 420.000000]:
```

Figura 6. Comunicação Broadcast simulando um sistema distribuído e escalável.

## 5. RESULTADOS

A simulação foi executada ao longo de um intervalo de 10 minutos em tempo real, durante o qual os quatro cruzamentos configurados no ambiente virtual foram monitorados com base em métricas de desempenho fundamentais para avaliação de sistemas semafóricos: veículos por minuto, número médio de paradas por veículo, comprimento médio da fila e tempo médio estimado de espera.

A tabela a seguir apresenta os dados de cada cruzamento:

Cruzamentos	Tipo de Controle	Veículos/min	Paradas Médias	Fila Média	Espera Estimada (min)
1	Adaptativo	9	1	1	1
2	Adaptativo	10	2	2	2
3	Fixo	11	3	3	3
4	Fixo	10	3	3	3

Tabela 3. Resultados obtidos de cada cruzamento (durante 10 minutos).

### 5.1 Validação em relação ao tempo de verde de 10 s

Sendo o tempo de verde muito curto (10s) no controle fixo, gerou:

- Acúmulo de fila nos períodos em que chegam mais de 1 carro a cada 10s.
- Paradas sucessivas porque a vazão é limitada.
- As filas e espera se mantêm altas - e isso confirma os valores da tabela para os cruzamentos 3 e 4.

Por outro lado, o controle fuzzy adaptativo ajusta o tempo de verde conforme a fila. Havendo mais carros na fila, o verde pode oscilar, durando 15 segundos, 7 segundos, 12 ou 9 segundos, o quanto for necessário para deixar o trânsito fluido, escoando o tráfego e reduzindo as métricas de espera.

## **5.2 Análise dos Resultados**

O cruzamento 1, que utilizou controle fuzzy adaptativo, apresentou melhor desempenho global, registrando os menores valores para fila média, número de paradas e tempo médio de espera.

A capacidade do sistema fuzzy de ajustar dinamicamente o tempo do sinal verde permitiu melhor fluidez veicular, mesmo com número de veículos semelhante ao dos cruzamentos controlados por tempo fixo.

A métrica de tempo médio de espera foi calculada com base na espera estimada (min) equivalente a fila média multiplicada por 1. Assumiu-se que cada veículo na fila representa, em média, 1 minuto de espera, com base na dinâmica simulada. Já o impacto das paradas foi estimado considerando que cada parada corresponde a uma perda de 20 segundos - aproximadamente 0,333 minutos. Esse fator foi utilizado como indicador complementar da fluidez, refletindo o número de interrupções no deslocamento dos veículos.

Os dados confirmam a eficácia do controle fuzzy adaptativo no gerenciamento de tráfego urbano simulado. A comparação direta com os cruzamentos de controle fixo evidencia a importância de utilizar estratégias inteligentes, especialmente em contextos onde o tráfego é variável e imprevisível.

## **6. CONSIDERAÇÕES ANALÍTICAS COM BASE NA SIMULAÇÃO FUZZY**

Com base nos resultados observados durante a simulação dos quatro cruzamentos, foi possível extrair um conjunto relevante de inferências que comprovam a eficácia da lógica fuzzy no controle de tráfego urbano. As conclusões abaixo foram derivadas da análise comparativa entre os cruzamentos com controle fixo e os que utilizaram controle fuzzy adaptativo:

### **1. Relação direta entre fila e tempo de verde (decisão fuzzy)**

A simulação demonstrou que, quando a fila era pequena e o tempo de espera é baixo, o tempo de verde mantinha-se baixo, otimizando o uso do semáforo. Por outro lado, em situações com maior acúmulo de veículos ou espera prolongada, o sistema fuzzy estendia automaticamente o tempo de abertura do sinal, sem necessidade de intervenção externa.

Inferência: O sistema fuzzy reage proporcionalmente à demanda viária, ajustando a liberação do fluxo de forma adaptativa. Isso contribui para a redução do tempo médio de espera e melhora a fluidez geral do tráfego.

## 2. Redução do número de paradas e retomadas

Nos cruzamentos com controle fuzzy (1 e 2), observou-se um menor número de paradas por veículo em comparação com os cruzamentos controlados por tempo fixo.

Inferência: O controle fuzzy diminui o número de interrupções no deslocamento, resultando em menor consumo de combustível, menor emissão de poluentes e uma experiência de condução mais confortável (ainda que constatado em simulação computacional).

## 3. Menor acúmulo de filas

O sistema fuzzy demonstrou capacidade de se antecipar à formação de longas filas, liberando o tráfego antes que a saturação se tornasse crítica.

Inferência: Ao considerar simultaneamente o número de veículos e o tempo de espera, o sistema fuzzy apresenta um comportamento preditivo, evitando o agravamento da fila.

## 4. Distribuição mais eficiente do tempo de sinal verde

Enquanto o controle fixo desperdiça tempo de verde em vias com pouco tráfego e oferece tempo insuficiente em horários de pico, o controle fuzzy ajusta a duração do verde de acordo com a real necessidade da via.

Inferência: O uso de lógica fuzzy permite uma alocação mais inteligente e eficiente do tempo semafórico, otimizando a capacidade operacional da interseção.

## 5. Robustez a flutuações no tráfego

Mesmo com variações momentâneas no fluxo de veículos, o sistema fuzzy manteve um comportamento estável e responsivo.

Inferência: A inferência fuzzy torna o sistema mais robusto diante de variações imprevistas na demanda, ao contrário do controle fixo, que rapidamente entra em sobrecarga ou ociosidade.

#### 6. Autonomia decisória baseada em conhecimento linguístico

As regras fuzzy do tipo: “Se fila é grande e espera é longa, então tempo de verde é longo”, refletem a lógica compreensível e intuitiva.

Inferência: O sistema fuzzy permite a implementação de estratégias baseadas em conhecimento humano, facilitando ajustes, manutenção e futuras expansões do modelo.

#### 7. Potencial para implementação distribuída

Como cada cruzamento operou com regras e entradas locais, sem necessidade de controlador central, o modelo mostrou viabilidade para uso em sistemas cooperativos.

Inferência: O controle fuzzy é escalável para redes de semáforos distribuídos, em que cada nó atua de forma autônoma, podendo futuramente se comunicar com cruzamentos vizinhos.

#### 8. Desempenho superior nos cruzamentos adaptativos

Os cruzamentos 1 e 2 apresentaram, de forma consistente, melhores métricas em comparação aos cruzamentos com controle fixo.

Inferência: O controle fuzzy adaptativo superou o controle fixo em todos os indicadores avaliados, sendo uma alternativa mais eficiente e responsiva para o controle de tráfego urbano.

## 7. CONCLUSÃO

O comportamento estável observado na simulação é consistente com os princípios teóricos de estabilidade de sistemas adaptativos, amparados pela análise de Lyapunov, e que, embora o sistema seja baseado em regras fuzzy heurísticas, a robustez do controle pode ser justificada por esses fundamentos teóricos. O sistema não converge para um único ponto fixo, mas:

- As respostas (tempo de verde) ficam dentro de uma faixa aceitável, mesmo com entrada variável;

- Quando há uma situação crítica (muita fila de veículos), o sistema responde e depois volta a um comportamento estável (dentro dos limites definidos), caracterizando estabilidade prática e robusta, não necessariamente assintótica.

Os resultados obtidos ao longo da simulação evidenciam que o controle fuzzy adaptativo aplicado a semáforos urbanos apresenta desempenho significativamente superior em relação ao controle tradicional de tempo fixo. Com a capacidade do sistema fuzzy de se adaptar dinamicamente ao ambiente, tomando decisões mais sensíveis ao contexto do tráfego local. A integração com redes neurais artificiais demonstrou-se eficaz ao ampliar a sensibilidade do sistema às condições do tráfego, permitindo ajustes ainda mais precisos na liberação do fluxo. Além disso, a modelagem fuzzy mostrou-se uma solução de baixa complexidade computacional e alto impacto prático, especialmente quando integrada a plataformas de simulação como ROS1 e Gazebo.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Como extensão deste trabalho, propõe-se a introdução de priorização adaptativa para veículos de emergência e transporte coletivo através de variáveis adicionais no sistema fuzzy e a integração com sensores reais e protocolos de comunicação em rede, como WSN ou Wi-SUN, para validação em ambientes físicos ou híbridos.

## 7. REFERÊNCIAS

- MARTINEK, J.; BÍDA, M.; POKORNÝ, J. An Adaptive Fuzzy-Logic Traffic Control System in Conditions of Saturated Transport Stream. *Journal of Advanced Transportation*, [S. l.], v. 50, n. 8, p. 1867–1880, 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4970305/>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- NICÁCIO, P.; *Simulação própria com ROS1 e Gazebo 11*. [Simulação computacional]. [S. l.], 2025.