

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Eduardo Henrique Gondim Moraes

Controle De Tráfego Em Tempo Real Com ESP32 E MQTT

**ITUMBIARA - GO
2025**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Eduardo Henrique Gondim Moraes

Matrícula: 20201040100057

Título do Trabalho: Controle De Tráfego Em Tempo Real Com ESP32 E MQTT

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 02 / 09 / 2025.

Local

Data



Documento assinado digitalmente
EDUARDO HENRIQUE GONDIM MORAES
Data: 24/10/2025 18:11:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Eduardo Henrique Gondim Moraes

Controle De Tráfego Em Tempo Real Com ESP32 E MQTT

Trabalho de conclusão de curso apresentado a banca avaliadora, parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Xavier Rocha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M828c Moraes, Eduardo Henrique Gondim
Controle de tráfego em tempo real com ESP32 e MQTT / Eduardo Henrique
Gondim Moraes. – Itumbiara, 2025.
60 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e
Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Câmpus Itumbiara, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Xavier Rocha.

1.Trânsito - Controle. 2. Sensoriamento. 3. Cidades inteligentes. I. Título. II.
Rocha, Cássio Xavier. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás.

CDD 621.3678

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus
Itumbiara Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima
CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Eduardo Henrique Gondim Moraes

Controle de tráfego em tempo real com ESP32 e MQTT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de controle e automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação .

Aprovado em 02 de Setembro de 2025.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Cassio Xavier Rocha
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Availador

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Hugo Xavier Rocha
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Availador

Itumbiara/GO
2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Victor Regis Bernardeli**, CHEFE - CD4 - ITU-DAA, em 22/10/2025 11:08:06.
- **Cassio Xavier Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/10/2025 10:18:59.
- **Hugo Xavier Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/10/2025 10:08:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/10/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 706332

Código de Autenticação: dca564bd2e



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5654 (ramal: 5654)

*Dedico esta monografia à minha família,
principalmente aos meus pais, pilares da
minha formação como ser humano, e
meus irmãos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, força e perseverança que me sustentaram durante toda a caminhada acadêmica.

À minha família, em especial minha mãe, Reylla, e o meu pai, Reine, e ao Leonardo, pelo apoio incondicional, amor e incentivo, que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos e colegas de curso, especialmente a Adryele, que estiveram presentes nos momentos de desafios e conquistas, compartilhando experiências que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

Estendo meus agradecimentos ao meu orientador, Cássio, pela paciência, dedicação e orientação que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, Bruno Vicente e entre outros, que ao longo desses anos compartilharam conhecimento e inspiração, essenciais para a minha formação.

Por fim, sou grato a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta etapa da minha vida, seja com palavras de apoio, conselhos ou gestos de amizade. Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas também do apoio coletivo que recebi durante essa trajetória.

“A mobilidade é o coração pulsante das cidades. Sem movimento, não há vida urbana.”

— Jan Gehl

RESUMO

O crescimento acelerado da frota de veículos nas áreas urbanas tem ampliado os desafios relacionados à mobilidade, resultando em congestionamentos frequentes, atrasos nas viagens e impactos ambientais relevantes. Nesse cenário, torna-se indispensável o desenvolvimento de soluções tecnológicas acessíveis e inteligentes, capazes de melhorar a eficiência do tráfego. Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de controle de tráfego em tempo real, utilizando o microcontrolador ESP32, o protocolo de comunicação MQTT e sensores ultrassônicos para a detecção de veículos. A proposta possibilita o ajuste dinâmico dos tempos semafóricos de acordo com a demanda viária observada, o que reduz filas, melhora a fluidez e diminui paradas desnecessárias. Além de aumentar a eficiência nos deslocamentos, o sistema contribui para a redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes, aspectos fundamentais para a sustentabilidade das cidades. O projeto alia conceitos de Internet das Coisas (IoT) e automação, destacando-se pelo baixo custo, escalabilidade e facilidade de aplicação em diferentes contextos urbanos. Assim, busca-se não apenas aprimorar a mobilidade, mas também promover cidades mais inteligentes, seguras e sustentáveis.

Palavras-chave: Controle de tráfego; IoT; ESP32; MQTT; sensores ultrassônicos; cidades inteligentes.

ABSTRACT

The accelerated growth of vehicle fleets in urban areas has increased mobility challenges, leading to frequent congestion, travel delays, and significant environmental impacts. In this context, the development of accessible and intelligent technological solutions becomes essential to improve traffic efficiency. This work presents the implementation of a real-time traffic control system, using the ESP32 microcontroller, the MQTT communication protocol, and ultrasonic sensors for vehicle detection. The proposed system allows the dynamic adjustment of traffic light timings according to road demand, thereby reducing queues, improving flow, and minimizing unnecessary stops. In addition to enhancing travel efficiency, the solution contributes to reducing fuel consumption and pollutant emissions, which are key aspects of sustainable urban development. The project combines Internet of Things (IoT) and automation concepts, standing out for its low cost, scalability, and ease of deployment in different urban contexts. Thus, it aims not only to improve mobility but also to promote smarter, safer, and more sustainable cities.

Keywords: Traffic control; IoT; ESP32; MQTT; ultrasonic sensors; smart cities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Placa de desenvolvimento ESP32	42
Figura 2 – LEDs representando as cores do semáforo	43
Figura 3 – Sensor ultrassônico HC-SR04.....	43
Figura 4 – Bibliotecas empregadas na programação	44
Figura 5 – Página Web criada pelo <i>WiFiManager</i>	44
Figura 6 – Montagem do protótipo em <i>protoboard</i>	47
Figura 7 – Esquema de ligações dos componentes para comunicação no protocolo MQTT	47
Figura 8 – Modelo de funcionamento do protocolo MQTT	48
Figura 9 – Publicações das simulações via MQTT	51
Figura 10 – Dados da simulação no IoT MQTT <i>Panel</i> (aplicativo)	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição de pinos dos componentes com o ESP32	45
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4G, 5G	Quarta e Quinta Geração de Redes Móveis (Tecnologia de Comunicação Sem Fio de Alta Velocidade).
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i> (Protocolo Avançado de Enfileiramento de Mensagens).
AP	<i>Access Point</i> (Modo de Ponto de Acesso do ESP32, Cria Rede <i>Wi-Fi</i> Própria).
APIs	<i>Application Programming Interfaces</i> (Interfaces de Programação de Aplicações).
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i> (Protocolo de Aplicação Constrito).
CM	Centímetros (Unidade de Medida).
DoS	<i>Denial Of Service</i> (Negação de Serviço, Ataque Cibernético que Sobrecarrega Sistemas).
EUA	Estados Unidos da América.
GND	<i>Ground</i> (Terra, Referência de Potencial Elétrico em Circuitos).
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferência de Hipertexto).
Hz	Hertz (Unidade de Frequência, Ciclos por Segundo).
IA	Inteligência Artificial.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, como o Arduino Ide).
IoT	<i>Internet Of Things</i> (Internet das Coisas).
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i> (Sistemas Inteligentes de Transporte).
JSON	<i>Javascript Object Notation</i> (Notação de Objetos Javascript).
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz).
LoRa	<i>Long Range</i> (Tecnologia de Comunicação Sem Fio de Longo Alcance e Baixo Consumo).
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i> (Rede de Longo Alcance e Área Ampla).
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i> (Protocolo Leve de Mensagens Para IoT).
MQTTX	Cliente MQTT de Código Aberto, Usado para Testes De Conexão e Mensagens.
Ms	Milissegundos (Unidade de Tempo, Milésima Parte do Segundo).

PCI	Placa de Circuito Impresso (<i>Printed Circuit Board – PCB</i>).
QoS	<i>Quality Of Service</i> (Qualidade de Serviço, Usada em Redes e no MQTT para Definir Prioridade de Mensagens).
SCATS	<i>Sydney Coordinated Adaptive Traffic System</i> (Sistema Coordenado de Tráfego Adaptativo de Sydney).
SCOOT	<i>Split Cycle Offset Optimization Technique</i> (Técnica de Otimização de Ciclo e Defasagem em Semáforos).
SOFT-IoT	<i>Scalable Open Framework For Transport – IoT</i> (Framework Aberto e Escalável para IoT em Transporte).
STA	<i>Station Mode</i> (Modo Estação do ESP32, Conecta-se a uma Rede <i>Wi-Fi</i> Existente).
SURTRAC	<i>Scalable Urban Traffic Control</i> (Sistema Escalável de Controle de Tráfego Urbano).
TLS/SSL	<i>Transport Layer Security / Secure Sockets Layer</i> (Protocolos de Segurança para Comunicação em Rede).
URL	<i>Uniform Resource Locator</i> (Endereço de um Recurso na Internet).
V2I	<i>Vehicle-To-Infrastructure</i> (Comunicação de Veículo para Infraestrutura).
V2V	<i>Vehicle-To-Vehicle</i> (Comunicação de Veículo para Veículo).
V2X	<i>Vehicle-To-Everything</i> (Veículo-para-Tudo).
VAS	Veículos Autônomos e Semiautônomos.
VCC	<i>Voltage Common Collector</i> (Tensão de Alimentação Positiva em Circuitos Eletrônicos).
Web	Rede Mundial de Computadores (<i>World Wide Web</i>).
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Tecnologia de Rede Sem Fio).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE (ITS)	17
2.2 CONTROLE SEMAFÓRICO ADAPTATIVO	20
2.3 INTERNET DAS COISAS (IOT) APLICADA AO CONTROLE DE TRÁFEGO	22
2.4 PROTOCOLO MQTT	26
2.5 SENSORES ULTRASSÔNICOS NO MONITORAMENTO DE TRÁFEGO	29
2.6 TRABALHOS RELACIONADOS	32
3. METODOLOGIA	41
3.1 TIPO DE PESQUISA	41
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	41
3.2.1 LEVANTAMENTO TEÓRICO	41
3.2.2 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA	42
3.2.3 PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA SEMAFÓRICO	43
3.2.4 CONEXÃO A REDE <i>Wi-Fi</i>	44
3.2.5 DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO DO PROTÓTIPO	45
3.2.6 TROCA DE MENSAGEM PELO <i>BROKER</i> MQTT	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 TESTES EXPERIMENTAIS	50
4.2 DADOS OBTIDOS E OBSERVAÇÕES	50
4.3 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	52
4.4 LIMITAÇÕES E MELHORIAS FUTURAS	53
5. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE	61

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das cidades e o aumento constante do número de veículos nas vias têm tornado o gerenciamento do tráfego urbano um desafio cada vez mais complexo. Congestionamentos, atrasos e impactos ambientais são problemas presentes no dia a dia de milhões de pessoas, afetando não apenas a mobilidade, mas também a qualidade de vida e a eficiência das atividades econômicas. Nesse contexto, surge a necessidade de soluções inovadoras, capazes de unir tecnologia, automação e inteligência na busca por um trânsito mais seguro, ágil e sustentável.

Entre essas soluções, destacam-se os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que integram sensores, redes de comunicação e algoritmos avançados para monitorar e controlar o fluxo de veículos em tempo real. Aliados a conceitos como a Internet das Coisas (IoT) e computação em nuvem, esses sistemas permitem que dispositivos instalados na malha viária se comuniquem entre si e com centrais de controle, ajustando automaticamente os tempos semafóricos e respondendo rapidamente às mudanças no fluxo de veículos.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de controle de tráfego em tempo real utilizando o microcontrolador ESP32, o protocolo de comunicação MQTT e sensores ultrassônicos para detecção veicular. A ideia central é oferecer uma solução de baixo custo, escalável e adaptável a diferentes realidades urbanas, contribuindo para a redução de congestionamentos, a melhoria da fluidez no trânsito e a diminuição dos impactos ambientais.

Mais do que um projeto técnico, esta pesquisa representa um passo em direção a cidades mais inteligentes e humanas, onde a tecnologia é utilizada como ferramenta para facilitar o deslocamento das pessoas, reduzir o estresse diário e promover uma mobilidade mais sustentável. Ao integrar conceitos modernos de automação e comunicação, espera-se criar um sistema eficiente, acessível e com potencial para transformar positivamente o cotidiano urbano.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O trânsito urbano é um dos principais desafios enfrentados pelas cidades modernas. O crescimento populacional, aliado ao aumento contínuo da frota de veículos, transformou a mobilidade em uma questão central para a qualidade de vida das pessoas e para o funcionamento da sociedade. Congestionamentos, longos tempos de espera em cruzamentos e a emissão de poluentes decorrentes do tráfego intenso impactam diretamente não apenas o deslocamento diário, mas também a saúde, a economia e o meio ambiente.

Diante dessa realidade, torna-se evidente a necessidade de buscar soluções inovadoras que sejam ao mesmo tempo eficazes, acessíveis e sustentáveis. Os sistemas de controle de tráfego tradicionais, baseados em ciclos fixos de semáforos, já não conseguem responder de forma eficiente às variações dinâmicas do fluxo de veículos. Assim, surgem os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que utilizam tecnologias como sensores, comunicação sem fio e algoritmos inteligentes para adaptar o trânsito às condições reais das vias em tempo real.

Nesse cenário, o avanço da Internet das Coisas (IoT) abre novas possibilidades, permitindo que dispositivos simples e de baixo custo sejam conectados e utilizados para monitorar e controlar o tráfego de forma descentralizada. Essa integração entre tecnologia e mobilidade tem o potencial de transformar os cruzamentos, tornando-os mais inteligentes e responsivos, além de contribuir para a construção de cidades mais seguras, fluidas e sustentáveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como propósito principal desenvolver um sistema de controle de tráfego em tempo real que seja simples, acessível e eficiente, utilizando o microcontrolador ESP32, o protocolo MQTT e sensores ultrassônicos para a detecção de veículos. A ideia central é criar uma alternativa capaz de ajustar automaticamente os tempos de abertura e fechamento dos semáforos de acordo com a quantidade de carros que circulam em cada via, oferecendo respostas rápidas às mudanças no fluxo

e tornando o trânsito mais ágil e organizado. Dessa forma, busca-se superar as limitações dos modelos tradicionais de temporização fixa, que muitas vezes não correspondem à realidade dinâmica das ruas.

Mais do que propor uma solução tecnológica, este trabalho procura apresentar um sistema que possa ser aplicado em diferentes realidades urbanas, especialmente em cidades de pequeno e médio porte, que frequentemente carecem de investimentos robustos em infraestrutura. Ao unir conceitos de Internet das Coisas (IoT) e automação, o projeto pretende contribuir não apenas para a mobilidade, mas também para a redução de congestionamentos, do consumo de combustível e da emissão de poluentes. Assim, além de melhorar a experiência dos motoristas e pedestres, o sistema busca promover cidades mais inteligentes, humanas e sustentáveis, alinhadas às necessidades sociais e ambientais do presente e do futuro.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e implementar a arquitetura de um sistema de controle semafórico em tempo real utilizando o microcontrolador ESP32 como unidade central de processamento;
- Empregar o protocolo de comunicação MQTT para garantir troca de dados eficiente, segura e de baixa latência entre os dispositivos do sistema;
- Integrar sensores ultrassônicos para a detecção de veículos e estimativa da demanda de tráfego em cruzamentos urbanos;
- Desenvolver algoritmos capazes de ajustar dinamicamente os tempos de abertura e fechamento dos semáforos, priorizando a fluidez e a redução de congestionamentos;
- Validar o desempenho do sistema por meio de testes funcionais e simulações, analisando critérios como tempo de resposta, estabilidade da comunicação e eficiência no controle do tráfego;
- Avaliar os benefícios potenciais da solução em termos de mobilidade urbana, sustentabilidade ambiental e acessibilidade econômica, reforçando sua aplicabilidade em cidades inteligentes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE (ITS)

A crescente urbanização e o aumento contínuo da frota de veículos transformaram a mobilidade em um dos maiores desafios das cidades modernas. Longos congestionamentos, altos índices de acidentes e o impacto ambiental decorrente da emissão de poluentes mostram que os modelos tradicionais de controle de tráfego, baseados em ciclos semaforicos fixos, já não atendem mais às necessidades atuais. É nesse cenário que surgem os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), como uma evolução natural das práticas de gestão viária. Esses sistemas fazem uso de tecnologias de informação, comunicação e automação para tornar o tráfego mais eficiente, seguro e sustentável (SAHU et al., 2023).

Os ITS não se limitam a controlar o fluxo de veículos. Eles envolvem um conjunto de soluções integradas que buscam oferecer uma mobilidade mais inteligente, conectando não apenas carros e semáforos, mas também pedestres, ciclistas e até mesmo sistemas de transporte coletivo. Ao reunir sensores, câmeras, radares, unidades de controle e algoritmos inteligentes, os ITS ampliam a capacidade das cidades de responder a situações de trânsito em tempo real, adaptando-se às condições variáveis de demanda. Entre os benefícios diretos estão a redução de congestionamentos, a diminuição do número de acidentes e a melhoria da tomada de decisão por parte dos agentes de trânsito (FERDOWSI et al., 2019).

Contudo, os aspectos técnicos não são os únicos que determinam o sucesso desses sistemas. A aceitação social e a confiança da população também desempenham papel fundamental. De acordo com Silva e Santos (2013), a adesão dos usuários a soluções inteligentes depende do equilíbrio entre inovação tecnológica e respeito à privacidade dos dados. Assim, a governança digital, a transparência nas operações e a ética no tratamento das informações devem caminhar lado a lado com os avanços tecnológicos.

Nos últimos anos, novas ferramentas como *blockchain* e *machine learning* têm expandido ainda mais as capacidades dos ITS. O *blockchain* fortalece a segurança na comunicação entre dispositivos, reduzindo riscos de adulteração de dados, enquanto o aprendizado de máquina permite identificar padrões complexos de tráfego e propor ajustes de forma autônoma (LI et al., 2020; GUO; GUO, 2023). Essa

integração de tecnologias reforça a natureza dinâmica e interdisciplinar dos sistemas inteligentes, que seguem em constante evolução rumo ao conceito de cidades cada vez mais conectadas e sustentáveis.

Entre os sistemas mais consolidados internacionalmente, três modelos se destacam: *SCATS*, *SCOOT* e *SURTRAC*. Cada um adota uma filosofia diferente para enfrentar o mesmo desafio, representando distintas arquiteturas e níveis de centralização.

O *SCATS* (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*), desenvolvido na Austrália, é um dos exemplos mais antigos e amplamente difundidos de controle adaptativo. Baseado em sensores de laço indutivo instalados no asfalto, o sistema coleta informações contínuas sobre o fluxo de veículos e ajusta, de forma centralizada, os tempos semafóricos de acordo com a demanda em diferentes regiões da cidade. Estudos apontam que a adoção do *SCATS* reduziu significativamente o tempo de viagem e o consumo de combustível em grandes áreas metropolitanas (KUSTIJA, 2023). Além dos benefícios diretos à mobilidade, o *SCATS* também se destaca por seu impacto econômico, já que melhora a eficiência logística urbana e otimiza investimentos públicos (CHONG-WHITE, 2016).

O *SCOOT* (*Split Cycle Offset Optimization Technique*), desenvolvido no Reino Unido, tem como principal característica a coordenação entre interseções próximas. Através de sensores de detecção em tempo real, o sistema realiza ajustes contínuos nos ciclos de semáforo para suavizar o tráfego, reduzindo tempos de atraso e minimizando paradas desnecessárias. Esse modelo é especialmente eficaz em corredores viários de alta demanda, onde o sincronismo entre cruzamentos vizinhos pode fazer grande diferença na fluidez do trânsito. Avaliações comparativas mostram que o *SCOOT* supera métodos tradicionais, reduzindo significativamente os tempos de viagem em áreas densas, embora sua replicabilidade dependa de altos investimentos em infraestrutura de comunicação e sincronização (SAMADI et al., 2012).

O *SURTRAC* (*Scalable Urban Traffic Control*), implementado inicialmente em Pittsburgh (EUA), representa uma abordagem descentralizada e inovadora. Cada cruzamento semafórico opera de forma autônoma, tomando decisões localmente com base em algoritmos de inteligência artificial que não apenas analisam o fluxo atual, mas também fazem previsões de tráfego futuro. Ao mesmo tempo, os cruzamentos se comunicam entre si, criando uma rede colaborativa. Essa flexibilidade permite ao

SURTRAC responder de maneira eficaz a eventos imprevistos, como acidentes ou aumento repentino da demanda, garantindo maior adaptabilidade do sistema (SMITH et al., 2013; WONGPIROMSARN et al., 2012).

A comparação entre os três modelos revela diferentes estratégias de gestão. Enquanto o *SCATS* prioriza a centralização e o controle a partir de um núcleo de decisão, o *SCOOT* aposta na coordenação em rede de interseções, e o *SURTRAC* defende a descentralização inteligente. Cada filosofia traz vantagens e limitações: os sistemas centralizados tendem a ser robustos, mas exigem maior infraestrutura; os coordenados reduzem atrasos em corredores estratégicos, porém demandam sincronização precisa; já os descentralizados são altamente adaptativos, mas dependem de algoritmos complexos e comunicação confiável entre unidades.

Apesar de seus benefícios, a implementação dos ITS não está livre de obstáculos. Custos elevados de implantação, necessidade de manutenção constante e dependência de infraestrutura tecnológica consolidada são barreiras comuns. Além disso, a proteção dos dados coletados é uma preocupação crescente. Como destacam Ata et al. (2020) e Kamasetty et al. (2022), a comunicação contínua entre sensores e servidores deve ser protegida contra ataques cibernéticos, sob risco de comprometer a tomada de decisões em tempo real.

Outra questão relevante é a aceitação pública. A troca constante de informações entre veículos e centros de controle levanta discussões sobre privacidade, exigindo mecanismos de proteção robustos para garantir transparência e confiança da população (Moumen; Abouchabaka; Rafalia, 2023).

O futuro dos ITS está diretamente ligado ao avanço da Internet das Coisas (IoT) e da Inteligência Artificial (IA). A integração com veículos autônomos, o uso de redes 5G e a adoção de sensores mais precisos, como LiDAR e câmeras inteligentes, ampliam as possibilidades de monitoramento e controle. Além disso, técnicas de aprendizado por reforço já vêm sendo aplicadas para que os sistemas semafóricos aprendam continuamente com os padrões de tráfego, adaptando-se de forma cada vez mais eficiente às dinâmicas urbanas (BAZZAN, 2021; CABREJAS-EGEA; ZHANG; WALTON, 2021).

Em síntese, os ITS representam muito mais do que uma ferramenta tecnológica: são instrumentos de transformação urbana. Eles contribuem para reduzir congestionamentos, melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, diminuir a emissão de poluentes e tornar o espaço urbano mais humano e eficiente. A escolha entre

SCATS, *SCOOT* ou *SURTRAC* — ou mesmo a combinação de diferentes soluções — deve levar em conta não apenas os resultados esperados, mas também as condições locais de infraestrutura, governança e aceitação social. O que se percebe é que, independentemente do modelo adotado, os ITS se consolidam como um passo essencial para o futuro das cidades inteligentes.

2.2 CONTROLE SEMAFÓRICO ADAPTATIVO

O controle semafórico adaptativo representa uma das aplicações mais relevantes dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), pois rompe com o modelo tradicional de temporização fixa e traz para a mobilidade urbana uma lógica baseada em dados coletados em tempo real. Em vez de operar com tempos previamente determinados, esse tipo de sistema ajusta os ciclos semafóricos conforme a demanda veicular, respondendo de forma dinâmica às condições do tráfego. Essa mudança de paradigma permite uma gestão mais eficiente das vias, reduzindo esperas desnecessárias, minimizando filas e proporcionando maior fluidez ao trânsito.

Para que esse processo aconteça, é essencial contar com sensores capazes de medir o fluxo de veículos em pontos estratégicos. Entre as tecnologias utilizadas estão os laços indutivos, câmeras de vídeo e sensores ultrassônicos, cada qual com suas vantagens e limitações. Esses dispositivos captam informações sobre a presença e a densidade de veículos, transmitindo os dados para unidades de controle que, por meio de algoritmos específicos, ajustam os tempos de verde, amarelo e vermelho em cada direção. Na prática, isso significa que os semáforos deixam de “trabalhar no escuro” e passam a responder ao que realmente está acontecendo nas vias.

Do ponto de vista teórico, os sistemas adaptativos se apoiam em modelos matemáticos e computacionais que permitem representar e prever o comportamento do tráfego. Araújo, Márquez e Fontinha (2020) destacam a aplicação da equação escalar conservativa como ferramenta para modelagem do fluxo de veículos, fornecendo uma base sólida para os algoritmos de controle. Já Bogo, Gramani e Kaviski (2015) exploram a modelagem microscópica, que considera o comportamento individual de veículos, possibilitando simulações mais detalhadas do escoamento viário. Essas abordagens tornam possível antecipar gargalos e oferecer respostas mais eficazes do que as estratégias fixas.

Outro avanço importante vem da incorporação de variáveis relacionadas à energia e densidade de movimento, conforme estudado por Lopes et al. (2021). Esse tipo de abordagem contribui para que os algoritmos não apenas gerenciem o tráfego em termos de fluidez, mas também atuem na redução do consumo de combustível e na mitigação da emissão de poluentes. Assim, a adaptação semafórica passa a dialogar diretamente com a sustentabilidade, transformando-se em uma aliada das políticas ambientais urbanas.

Entre as estratégias mais promissoras está o controle baseado em pelotões veiculares. Em vez de tratar cada veículo de forma isolada, essa lógica procura organizar grupos de automóveis que se deslocam juntos, permitindo que cruzem interseções de maneira mais eficiente. Silva e Soares (2019) mostram que esse tipo de controle reduz o número de paradas e o tempo ocioso nos cruzamentos, o que resulta em menos desgaste para os condutores, menor tempo de viagem e menor estresse no trânsito. Essa lógica, quando bem implementada, gera benefícios não apenas para os motoristas, mas também para pedestres e ciclistas, que passam a conviver com um tráfego mais previsível.

Nos últimos anos, técnicas de inteligência artificial começaram a ser incorporadas a esse campo, ampliando significativamente seu alcance. Vargas e Hemerly (2016) destacam o uso de controle neural robusto, capaz de aprender padrões complexos de tráfego e oferecer respostas mesmo em cenários de não linearidade e imprevisibilidade. Isso abre caminho para algoritmos cada vez mais sofisticados, que conseguem lidar com situações inesperadas, como acidentes ou aumento súbito da demanda em determinados horários. A integração de aprendizado de máquina ao controle semafórico adaptativo se mostra, portanto, uma tendência irreversível, alinhada ao desenvolvimento das cidades inteligentes.

Os impactos práticos desse tipo de sistema são variados. O mais imediato é a redução do tempo de espera nos cruzamentos, o que se traduz em viagens mais rápidas e eficientes. Além disso, a diminuição das paradas e retomadas constantes traz ganhos diretos na economia de combustível, o que representa benefícios financeiros aos motoristas e ambientais às cidades, devido à redução das emissões de gases poluentes. A segurança viária também é fortalecida: com menos congestionamentos e menor pressão sobre os condutores, o risco de colisões em cruzamentos é reduzido, favorecendo um tráfego mais seguro e previsível para todos.

Esses benefícios, contudo, não eliminam os desafios. A implementação de sistemas adaptativos demanda investimentos em infraestrutura tecnológica, manutenção contínua dos sensores e integração entre diferentes dispositivos e protocolos. Em áreas urbanas de alta densidade, problemas como latência na transmissão de dados ou falhas momentâneas de conectividade podem comprometer a resposta imediata do sistema. Além disso, a aceitação social continua sendo um fator-chave: quanto mais transparente e confiável for a operação, maior será a confiança dos cidadãos na tecnologia.

Com o avanço da Internet das Coisas (IoT) e da conectividade 5G, as perspectivas para o controle semafórico adaptativo se tornam ainda mais promissoras. Redes mais rápidas e estáveis permitirão ampliar a escala desses sistemas, integrando não apenas os semáforos, mas também veículos autônomos e plataformas de gestão de mobilidade urbana. Essa integração contribuirá para um ecossistema mais coordenado, em que os sinais de trânsito dialogam diretamente com os veículos e com os usuários, oferecendo uma experiência de deslocamento mais ágil, segura e sustentável.

Em suma, os semáforos adaptativos representam uma solução inovadora para os problemas clássicos da mobilidade urbana. Sua aplicação prática já demonstra ganhos consistentes em eficiência, sustentabilidade e segurança, ao mesmo tempo em que abre espaço para novas pesquisas e melhorias. À medida que sensores se tornam mais precisos e algoritmos mais inteligentes, esses sistemas tendem a se consolidar como parte fundamental das cidades inteligentes do futuro. Mais do que uma inovação tecnológica, eles se configuram como um passo importante na construção de ambientes urbanos mais humanos, organizados e preparados para os desafios da mobilidade do século XXI.

2.3 INTERNET DAS COISAS (IOT) APLICADA AO CONTROLE DE TRÁFEGO

A Internet das Coisas (IoT) transformou-se em uma das tecnologias mais promissoras e estratégicas para a construção de cidades inteligentes. Em termos simples, ela pode ser entendida como a conexão de dispositivos físicos à internet, possibilitando que colem, processem e troquem informações em tempo real. Essa característica permite que sistemas antes isolados passem a dialogar entre si, favorecendo a integração e a automação de serviços urbanos. Segundo Lemos e

Jesus (2017), a IoT é capaz de tornar visíveis processos antes invisibilizados, criando novas oportunidades para o planejamento urbano e para a participação da sociedade na gestão da cidade.

No campo da mobilidade, a aplicação da IoT ganha destaque especial. Sensores instalados em semáforos, veículos e até mesmo no asfalto fornecem dados preciosos sobre o fluxo de tráfego, tempo de viagem e condições ambientais. Esses dados podem ser enviados a servidores que, com auxílio de algoritmos, realizam previsões de congestionamentos e sugerem rotas alternativas. Dessa forma, a IoT não apenas melhora a eficiência do transporte, mas também contribui para a sustentabilidade ao reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes. Rosa, Aquino e Boas (2023) reforçam esse papel ao mencionar como plataformas IoT de bicicletas compartilhadas incentivam meios de transporte mais ecológicos e saudáveis, integrando mobilidade sustentável e tecnologia.

Um dos pilares da IoT aplicada ao trânsito é a capacidade de coleta e análise em tempo real. Em situações cotidianas, como o aumento repentino do fluxo em horários de pico, a detecção de acidentes ou a ocorrência de emergências, o sistema precisa reagir de imediato para evitar gargalos e manter a fluidez. Conforme Lima et al. (2021), essa mesma lógica já se aplica em outros setores urbanos, como no monitoramento do consumo de água, onde a telemetria é usada para identificar desperdícios. Quando trazida para a mobilidade, essa abordagem permite ajustar semáforos, informar motoristas sobre condições adversas e até mesmo acionar equipes de resposta em situações críticas.

Para garantir rapidez, a arquitetura de sistemas IoT tem evoluído com o uso de *edge computing* e *fog computing*. Essas tecnologias processam os dados próximos à fonte, reduzindo a dependência de servidores distantes e melhorando a latência. Oliveira (2021) descreve o uso de arquiteturas *Soft-IoT* como uma tendência que permite respostas mais ágeis e confiáveis em sistemas inteligentes de tráfego. Isso significa que decisões cruciais, como abrir ou fechar um semáforo em determinada via, podem ser tomadas quase instantaneamente, sem necessidade de esperar a comunicação com centros de dados remotos.

Uma solução completa de IoT para o controle de tráfego urbano é composta por quatro elementos principais: sensores, microcontroladores, *gateways* e servidores centrais.

- Sensores: são responsáveis por captar dados fundamentais, como presença e velocidade de veículos. Dispositivos ultrassônicos, câmeras e laços indutivos são amplamente utilizados, cada um com especificidades técnicas.
- Microcontroladores (ESP32, por exemplo): processam localmente as informações recebidas, executam algoritmos básicos e repassam os dados aos *gateways*. O ESP32 destaca-se por sua conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth*, baixo consumo energético e capacidade de pré-processamento, sendo muito utilizado em protótipos acadêmicos e soluções de baixo custo (AKABANE et al., 2019).
- *Gateways*: realizam a intermediação entre os microcontroladores e os servidores, agregando informações de diferentes pontos da cidade e transmitindo-as por redes de longa distância, como *LoRaWAN*, 4G ou 5G. Heideker et al. (2023) ressaltam a importância do uso otimizado de protocolos para garantir qualidade de serviço.
- Servidores: são responsáveis pelo armazenamento e análise avançada dos dados. É nesse nível que entram algoritmos preditivos, técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial, capazes de prever congestionamentos e planejar rotas alternativas (GOMIDES et al., 2020).

Essa arquitetura modular permite escalar o sistema de acordo com as necessidades locais, viabilizando desde projetos-piloto em cruzamentos isolados até grandes implantações metropolitanas.

Um dos pontos de maior impacto na evolução da IoT é sua integração com algoritmos de inteligência artificial (IA). Através do aprendizado supervisionado, não supervisionado ou por reforço, é possível identificar padrões no tráfego e adaptar a temporização semafórica de forma preditiva. Anupama (2025) destaca que sistemas baseados em densidade veicular, aliados à IA, conseguem reduzir congestionamentos ao ajustar dinamicamente os tempos dos semáforos.

Ata et al. (2020) complementam ao desenvolver modelos que utilizam aprendizado de máquina para reconhecer padrões em dados IoT e responder a mudanças inesperadas no trânsito. Em outras palavras, enquanto os sistemas adaptativos tradicionais reagem a eventos detectados, os sistemas com IA passam a antecipar esses eventos, aumentando a eficiência e reduzindo riscos de saturação da malha viária.

Gupta (2021) mostra como o uso prático de dispositivos IoT em semáforos inteligentes já está sendo testado, permitindo ajustes mais granulares nos ciclos de tráfego. Kamassetty et al. (2022) acrescentam que a integração entre computação em nuvem e IA amplia ainda mais a capacidade do sistema, pois permite análise remota e escalável, útil para cidades de diferentes portes. Já Moumen, Abouchabaka e Rafalia (2023) defendem que a união entre IoT e IA, em ambientes urbanos inteligentes, fortalece a sustentabilidade e reduz os impactos ambientais da mobilidade.

O ESP32 merece destaque especial na arquitetura IoT por sua versatilidade e eficiência. Trata-se de um microcontrolador de baixo custo, com conectividade integrada, capaz de processar dados localmente e se comunicar com diferentes sensores e redes. Moreira, Araújo e Mateus (2024) ressaltam que sua capacidade de pré-processamento é fundamental em arquiteturas de *fog computing*, reduzindo a latência e aumentando a confiabilidade do sistema.

Entre suas vantagens estão:

- Conectividade: *Wi-Fi* e *Bluetooth* integrados.
- Baixo consumo de energia: ideal para dispositivos urbanos instalados em postes e semáforos.
- Escalabilidade: pode ser replicado em diferentes pontos da cidade.
- Flexibilidade: suporta múltiplas interfaces de sensores (ultrassônicos, câmeras, laços indutivos).

Essa combinação faz do ESP32 um dos elementos centrais em projetos acadêmicos e protótipos de baixo custo, ao mesmo tempo em que pode ser aplicado em projetos maiores.

Apesar do grande potencial, ainda existem barreiras que dificultam a adoção em larga escala da IoT para controle de tráfego:

- Interoperabilidade: dificuldade de integrar diferentes dispositivos e protocolos de comunicação.
- Segurança dos dados: risco de ataques cibernéticos, como *DoS (Denial of Service)* e interceptações de dados.
- Infraestrutura: necessidade de conectividade estável e ampla cobertura de rede.
- Aceitação social: receio da população quanto à privacidade e ao uso de dados pessoais.
- Custos de manutenção: sensores e dispositivos precisam de suporte contínuo.

Esses desafios exigem soluções robustas em segurança digital, criptografia e governança de dados.

A IoT aplicada ao controle de tráfego urbano já mostra resultados promissores, mas ainda se encontra em fase de evolução e consolidação. Os estudos e protótipos desenvolvidos até o momento evidenciam ganhos claros em eficiência, sustentabilidade e segurança. No entanto, para alcançar o nível de integração necessário às cidades inteligentes, será preciso avançar em áreas como segurança digital, interoperabilidade e modelos de governança.

O futuro aponta para a convergência entre IoT, inteligência artificial e veículos autônomos. Imagine cruzamentos em que semáforos, carros e pedestres estejam conectados, trocando informações em tempo real e ajustando-se automaticamente para garantir segurança e fluidez. Essa visão, que hoje parece futurista, já está sendo testada em algumas cidades ao redor do mundo.

Em resumo, a Internet das Coisas aplicada ao controle de tráfego não é apenas uma inovação tecnológica, mas uma transformação estrutural na forma como as cidades lidam com a mobilidade. Ao combinar sensores, microcontroladores, algoritmos inteligentes e redes de comunicação, ela abre caminho para uma mobilidade mais eficiente, sustentável e humanizada, alinhada às necessidades do século XXI.

2.4 PROTOCOLO MQTT

O protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um modelo de comunicação leve baseado na arquitetura *publish/subscribe*, amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas (IoT). Nesse modelo, os dispositivos são classificados em *publishers* (publicadores), que enviam mensagens, e *subscribers* (assinantes), que recebem as mensagens de interesse. Um componente central, chamado *broker*, gerencia essa troca, garantindo que as mensagens sejam entregues corretamente aos assinantes.

"O MQTT é um protocolo ideal para IoT devido ao seu baixo *overhead* e capacidade de operar em redes com largura de banda reduzida, sendo amplamente adotado em soluções como monitoramento de tráfego e sensores urbanos."(SILVA, 2020, p. 215)

A eficiência do MQTT em redes com largura de banda limitada é uma das suas principais vantagens. Ao utilizar o *broker* como intermediário, o protocolo evita a necessidade de conexões diretas entre todos os dispositivos, reduzindo o tráfego e a complexidade da rede. Abreu e Assis (2020) discutem como estratégias de gerenciamento e agrupamento de riscos podem otimizar a comunicação em redes complexas, reforçando a importância da centralização inteligente na arquitetura.

A eficiência do MQTT é um dos fatores que explicam sua ampla adoção em projetos urbanos inteligentes. Em cenários de tráfego, onde milhares de mensagens precisam ser trocadas em intervalos de milissegundos, um protocolo leve é essencial. O MQTT reduz o consumo de energia e processamento, permitindo que sensores de baixo custo e microcontroladores, como o ESP32, comuniquem-se de forma rápida e contínua.

Outro ponto importante é a escalabilidade. O modelo *publish/subscribe* torna possível a adição de novos sensores, semáforos ou até veículos conectados sem a necessidade de reconfigurar toda a rede. Isso permite que cidades expandam seus sistemas gradualmente, integrando novos cruzamentos e serviços sem interrupções. Alves et al. (2021) destacam que essa facilidade é fundamental para ambientes educacionais e de prototipagem, mas também se estende a soluções em larga escala. Pham e Hoang (2021) reforçam que arquiteturas distribuídas de *brokers* ampliam a capacidade da rede, permitindo que milhares de dispositivos operem simultaneamente sem perda de desempenho.

O MQTT dispõe de três níveis de Qualidade de Serviço (QoS), que determinam como as mensagens são entregues. Esse recurso é particularmente relevante no controle semafórico, pois permite definir diferentes prioridades. Informações críticas, como a detecção de veículos de emergência, podem ser configuradas com o nível mais alto de confiabilidade, enquanto dados de monitoramento geral podem utilizar níveis mais simples, economizando recursos da rede.

Essa flexibilidade garante confiabilidade mesmo em condições adversas, como falhas temporárias na conexão *Wi-Fi* ou variações de sinal em áreas urbanas densas. Isso diferencia o MQTT de protocolos mais pesados, como HTTP, que não foram desenhados para lidar com fluxos contínuos de mensagens em dispositivos embarcados.

O uso do MQTT em mobilidade urbana já vem sendo documentado em diferentes estudos. Eldho (2025) mostra que sua baixa latência é fundamental para

ajustes dinâmicos de semáforos. Rajulapati et al. (2025) descrevem um sistema que prioriza veículos de emergência por meio do MQTT, permitindo que as mensagens de prioridade cheguem aos controladores semafóricos com rapidez. Kamoun et al. (2024) exploram melhorias semânticas para reduzir a carga de dados, facilitando a operação de *brokers* distribuídos em redes complexas.

Exemplos práticos incluem:

- Monitoramento de ônibus em tempo real, transmitindo dados de localização para painéis informativos nas paradas.
- Gestão de estacionamentos urbanos, onde sensores MQTT indicam vagas disponíveis em tempo real.
- Controle adaptativo de semáforos, como no protótipo deste trabalho, em que dados de sensores são enviados ao *broker*, processados e distribuídos para ajustar tempos semafóricos.

Essas aplicações reforçam o potencial do MQTT como pilar das cidades inteligentes.

Apesar das vantagens, a segurança é um dos grandes desafios. Por ser um protocolo leve, o MQTT exige complementos de proteção. Kumar e K.R. (2022) alertam que falhas de autenticação ou interceptação de dados podem comprometer sistemas críticos.

Entre as soluções, o uso de TLS/SSL é a mais difundida, garantindo criptografia ponta a ponta (COLOMBO; FERRARI; TÜMER, 2021). Chen et al. (2023) propõem mecanismos de controle de acesso baseados em *blockchain*, assegurando autenticidade e não repúdio. Já Haripriya e Kulothungan (2019) propõem lógica *fuzzy* para detectar ataques de negação de serviço (*DoS*), aumentando a resiliência do protocolo.

Outro destaque é a criptografia com curvas elípticas, que garante proteção robusta com baixo custo computacional, ideal para dispositivos como o ESP32 (LUNKES; BORGES, 2023). Quincozes, Quincozes e Kazienko (2021) reforçam que regulamentos rígidos de privacidade devem acompanhar essas implementações, de modo a fortalecer a confiança da população.

Comparado ao HTTP, o MQTT é mais eficiente por não exigir troca constante de cabeçalhos pesados, além de manter conexões abertas para envio contínuo de dados. Frente ao CoAP (*Constrained Application Protocol*), o MQTT oferece maior confiabilidade graças ao *broker*. Já em relação ao AMQP, o MQTT é mais leve, embora

menos robusto em ambientes corporativos. Essa versatilidade explica sua adoção no trânsito urbano, onde é necessário equilibrar eficiência, escalabilidade e simplicidade.

O futuro do MQTT aponta para integração com 5G, que permitirá taxas de transmissão mais altas e menor latência, fundamentais para carros autônomos. Outro campo promissor é a comunicação V2X (*Vehicle-to-Everything*), incluindo V2V (*vehicle-to-vehicle*) e V2I (*vehicle-to-infrastructure*). Nesses cenários, o MQTT poderá ser usado para que veículos troquem informações entre si e com semáforos, antecipando engarrafamentos ou prevenindo acidentes.

Brum et al. (2020) e Fontes et al. (2020) apontam para a integração com redes ópticas e comunicação por luz visível, ampliando ainda mais o potencial. Essa convergência com inteligência artificial e aprendizado de máquina permitirá não apenas responder, mas prever padrões de tráfego, transformando radicalmente a gestão da mobilidade urbana.

Em síntese, o MQTT vai além de um protocolo técnico. Ele representa um elo invisível que conecta sensores, controladores e cidadãos, permitindo que a cidade reaja em tempo real ao comportamento do trânsito. Sua leveza, escalabilidade e confiabilidade fazem dele uma das peças-chave das cidades inteligentes. Embora ainda existam desafios de segurança e padronização, os avanços recentes mostram que ele permanecerá no centro da transformação digital da mobilidade urbana.

2.5 SENSORES ULTRASSÔNICOS NO MONITORAMENTO DE TRÁFEGO

O sensor ultrassônico HC-SR04 é amplamente utilizado em projetos de automação, robótica e sistemas inteligentes de transporte devido ao seu baixo custo, simplicidade de implementação e boa confiabilidade em curtas distâncias (ABDULKHALEQ; HASAN; SALIH, 2020). Seu funcionamento baseia-se na emissão de pulsos ultrassônicos em uma frequência de 40 kHz – inaudível ao ouvido humano – que, ao atingir um objeto, retorna ao sensor como um eco. A distância até o objeto é calculada considerando o tempo de ida e volta do pulso multiplicado pela velocidade do som no ar.

O dispositivo é composto por dois módulos principais: um emissor, que gera os pulsos, e um receptor, que capta os ecos refletidos. Essa configuração possibilita medições em uma faixa típica de 2 cm a 4 metros, o que o torna adequado para

aplicações como sistemas de monitoramento de tráfego, detecção de veículos em faixas urbanas, estacionamentos e cancelas (JULIO, 2022).

Contudo, sua precisão pode ser impactada por condições ambientais, como chuva, vento, umidade, variações de temperatura ou superfícies inclinadas e pouco refletivas (ABDULKHALEQ; HASAN; SALIH, 2020). Tais fatores devem ser considerados em projetos que envolvam monitoramento urbano em tempo real.

O HC-SR04 possui quatro pinos básicos: VCC (alimentação), GND (terra), *Trigger* (disparo do pulso) e *Echo* (recepção do sinal refletido). Essa simplicidade de interface facilita sua integração com microcontroladores como o Arduino e, principalmente, o ESP32, bastante utilizado em aplicações IoT.

Segundo Pereira e Silva (2021), a facilidade de uso e a disponibilidade em *kits* experimentais tornam o sensor também muito aplicado em ambientes acadêmicos e prototipagem. Aliado ao ESP32 e a *brokers* MQTT como o *Mosquitto*, o HC-SR04 pode compor sistemas de controle semafórico inteligente, permitindo ajustes dinâmicos dos tempos de semáforos com base em dados de tráfego em tempo real (ONER, 2022).

Essa integração evidencia o papel do sensor como peça-chave em projetos que combinam aquisição de dados, conectividade e controle adaptativo, elementos centrais para os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

A detecção de veículos é um componente essencial para sistemas inteligentes de transporte. O HC-SR04, por utilizar ondas ultrassônicas, é adequado para identificar veículos em movimento ou parados em faixas específicas, especialmente em projetos de baixo custo e fácil implementação (IBÁÑEZ; ZEADALLY; CONTRERAS-CASTILLO, 2018).

De acordo com Stanford-Clark (2021), o uso de MQTT em conjunto com sensores ultrassônicos garante latências abaixo de 100 ms, assegurando respostas em tempo real no controle de tráfego urbano. Isso permite, por exemplo, que dados de sensores sejam rapidamente processados para acionamento de semáforos, contagem de veículos ou priorização de tráfego de emergência (BHAVANA et al., 2023).

Além disso, Bao et al. (2016) ressaltam a importância do posicionamento adequado dos sensores em pontos críticos da malha viária para assegurar maior precisão nas medições. O uso em rede, como demonstrado por Cruz-Piris et al. (2018), amplia ainda mais o potencial do HC-SR04, permitindo identificar padrões de

movimentação e integrar as informações em sistemas inteligentes de tomada de decisão.

Embora funcional e acessível, o HC-SR04 apresenta limitações técnicas. A precisão em longas distâncias é menor, e o sensor pode falhar na detecção quando enfrenta veículos de diferentes tamanhos, formatos ou materiais que refletem o som de maneira desigual (SCHIFFINI et al., 2024).

Além disso, sua faixa de operação (2 cm a 4 m) restringe o uso a aplicações locais. Em cenários de tráfego intenso, torna-se necessária a implementação de múltiplos sensores para ampliar a área de monitoramento (YULIANTO et al., 2021).

Outro ponto crítico está na sensibilidade às condições ambientais. Superfícies inclinadas ou com baixa refletividade podem causar leituras imprecisas. Isso torna indispensável a calibração periódica e o ajuste do posicionamento dos sensores para reduzir erros (ABDULKHALEQ; HASAN; SALIH, 2020).

Para superar tais limitações, pesquisadores vêm desenvolvendo soluções que combinam sensoramento ultrassônico e inteligência computacional. Khaleel et al. (2023), por exemplo, propuseram o algoritmo *Pelican Optimization*, que melhora a confiabilidade das leituras, aumentando sua aplicabilidade em ambientes urbanos complexos.

Outros estudos apontam para a integração de múltiplos sensores em rede (CRUZ-PIRIS et al., 2018), o uso de ontologias para interoperabilidade (FERNÁNDEZ et al., 2016) e a associação com tecnologias avançadas de visão computacional (LEE et al., 2018). Comparado a sensores LiDAR, câmeras inteligentes ou redes neurais, o HC-SR04 apresenta restrições, mas se mantém competitivo em cenários que demandam baixo custo e fácil manutenção (LIU et al., 2021).

Silas, Jonathan e Ekong (2021) mostram ainda como os sensores podem ser utilizados para priorização de veículos de emergência, reforçando a relevância do HC-SR04 em soluções de mobilidade urbana inteligente.

Os sensores ultrassônicos, como o HC-SR04, continuarão sendo uma alternativa atrativa em projetos de cidades inteligentes, especialmente em contextos que demandam soluções econômicas e escaláveis. Embora não substituam tecnologias mais sofisticadas, podem ser combinados com algoritmos de correção, múltiplos sensores em rede e protocolos de comunicação robustos (como MQTT) para ampliar sua eficácia.

Em suma, o HC-SR04 é um exemplo de tecnologia simples, mas poderosa, que, quando bem aplicada, pode contribuir significativamente para o monitoramento de tráfego, controle adaptativo de semáforos e apoio à mobilidade sustentável. Seu papel no desenvolvimento de protótipos e sistemas educacionais também é de grande relevância, formando a base para pesquisas futuras em mobilidade urbana inteligente.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

O avanço das tecnologias de Internet das Coisas (IoT) tem impulsionado diversas pesquisas voltadas ao controle inteligente do tráfego urbano, sobretudo com o uso de sensores, microcontroladores como o ESP32, e protocolos leves como o MQTT. Essas soluções têm o potencial de otimizar o tempo de espera em cruzamentos e adaptar os semáforos à demanda em tempo real, reduzindo congestionamentos e melhorando a fluidez do trânsito.

Anupama (2025) apresenta um sistema de controle semafórico baseado na densidade de veículos, que utiliza sensores para coletar dados em tempo real, transmitidos via MQTT a uma unidade central equipada com algoritmos de inteligência artificial. O ESP32 atua como núcleo do sistema, processando informações localmente para acionar os semáforos conforme a necessidade. Os resultados indicam redução significativa no tempo médio de espera dos veículos.

Outra proposta relevante é a de Ata et al. (2020), que desenvolvem um sistema adaptativo de controle de tráfego com IoT, combinando sensores com algoritmos de aprendizado supervisionado. Os dados de densidade e fluxo são processados para prever e prevenir congestionamentos, ajustando automaticamente os ciclos dos semáforos. A pesquisa valida o uso de microcontroladores e protocolos como o MQTT para garantir comunicação eficiente e de baixa latência.

Gupta (2021) reforça essa abordagem ao propor um sistema de controle semafórico inteligente usando sensores conectados via IoT, com foco na escalabilidade e no custo reduzido. O estudo destaca o uso do ESP32 para coletar e enviar dados sobre o volume de veículos para um servidor central, onde as decisões semafóricas são otimizadas. O MQTT é empregado como protocolo de mensageria leve e eficaz, adequado para aplicações com recursos limitados.

Kamasetty et al. (2022) apresentam um sistema de sinalização de tráfego portátil e inteligente, baseado em IoT e inteligência artificial em nuvem.

Utilizando ESP32 e sensores de proximidade, o sistema é capaz de ser instalado temporariamente em locais com necessidade de controle dinâmico, como obras e eventos. A comunicação em tempo real entre os dispositivos e a nuvem é feita com MQTT, destacando sua confiabilidade mesmo em redes instáveis.

Moumen, Abouchabaka e Rafalia (2023) analisam a integração entre dados de sensores veiculares e algoritmos de IA para melhorar a mobilidade urbana em cidades inteligentes. O artigo reforça o papel do ESP32 como unidade descentralizada de processamento e a utilização de MQTT como meio de comunicação eficiente entre sensores e servidores de processamento. A pesquisa mostrou que decisões descentralizadas tornam o sistema mais escalável e resiliente.

Todos os estudos analisados apontam o ESP32 como um elemento central nos sistemas de controle semafórico, dada sua capacidade de processamento local, conectividade *Wi-Fi* e suporte nativo ao protocolo MQTT. Essa combinação permite decisões em tempo real sem necessidade de infraestrutura robusta, o que reduz custos e facilita a implantação em diferentes contextos urbanos.

Além disso, o uso de protocolos leves como MQTT se mostrou essencial para garantir comunicação eficiente entre os sensores, o ESP32 e servidores em nuvem ou locais. Isso permite que sistemas semafóricos inteligentes possam funcionar mesmo em ambientes com conexão de rede instável ou com restrições de largura de banda, ampliando as possibilidades de aplicação em cidades de pequeno e médio porte.

Em suma, as pesquisas revisadas demonstram que a integração de sensores, microcontroladores como o ESP32 e protocolos como o MQTT forma a base de soluções promissoras para o controle semafórico inteligente. Essas tecnologias viabilizam sistemas mais adaptativos, com baixo custo e que atendem às crescentes demandas por mobilidade eficiente em ambientes urbanos.

A crescente adoção de sistemas inteligentes em ambientes urbanos impulsionou uma variedade de abordagens baseadas em IoT para controle de tráfego e mobilidade. Essas abordagens diferem significativamente quanto à infraestrutura de sensores, protocolos de comunicação utilizados e suas respectivas eficiências em cenários urbanos complexos. Três estudos recentes — de Dias et al. (2019), Gomides et al. (2020) e Santos et al. (2024) — oferecem contribuições relevantes para essa comparação.

Dias et al. (2019) propõem uma abordagem baseada em sistemas *fuzzy* auto-organizáveis voltados à classificação de ambientes internos, mas com potencial de extensão para contextos urbanos externos. O estudo utiliza sensores ambientais e dispositivos IoT para coleta e interpretação de dados, com foco em adaptabilidade e robustez do modelo frente à variação das entradas. Embora não se concentre exclusivamente no tráfego veicular, a lógica *fuzzy* mostra-se promissora para situações com dados imprecisos ou dinâmicos, como o fluxo de veículos em grandes avenidas.

Gomides et al. (2020), por outro lado, focam diretamente na minimização de congestionamentos urbanos por meio de um sistema adaptativo que promove a comunicação direta entre veículos (V2V). Essa abordagem se diferencia por não depender de sensores fixos ou infraestrutura urbana extensa. Em vez disso, ela utiliza módulos embarcados nos veículos e algoritmos colaborativos para calcular rotas mais eficientes em tempo real. Essa solução mostra-se altamente escalável e eficaz em ambientes urbanos dinâmicos, embora dependa fortemente da penetração da tecnologia nos veículos.

A pesquisa de Santos, Faria e Vasconcelos (2024) contribui com uma análise aprofundada sobre o desempenho de protocolos de comunicação em redes IoT, com foco nos impactos causados por características como latência, largura de banda e perda de pacotes. Entre os protocolos avaliados, destaca-se o MQTT, frequentemente adotado em aplicações de tráfego por sua leveza e confiabilidade. O estudo demonstra que a performance do sistema depende não apenas do protocolo em si, mas de como ele interage com a infraestrutura de rede existente.

Comparando os três estudos, observa-se que cada abordagem apresenta vantagens específicas de acordo com o contexto de aplicação. A lógica *fuzzy* de Dias et al. é ideal para cenários com alta incerteza e múltiplas variáveis, enquanto a proposta de Gomides et al. se sobressai em ambientes com veículos conectados e pouca infraestrutura urbana. Já a análise de Santos et al. oferece insights valiosos para garantir a eficiência da comunicação entre dispositivos, independentemente da arquitetura adotada.

Quanto ao tipo de sensor, o estudo de Dias et al. envolve sensores ambientais genéricos, o que permite aplicação flexível, mas pode exigir calibração cuidadosa para contextos de tráfego. Já Gomides et al. apostam em dados embarcados, sem necessidade de sensores de solo ou proximidade, o que reduz os custos de

implantação urbana. A aplicabilidade urbana, portanto, está fortemente atrelada ao grau de infraestrutura existente e ao tipo de ambiente monitorado.

Do ponto de vista do protocolo de comunicação, o MQTT aparece de forma mais direta no estudo de Santos et al., demonstrando vantagens em termos de consumo de energia e escalabilidade. Entretanto, a eficácia do protocolo depende da estabilidade da rede, o que reforça a necessidade de infraestrutura mínima para garantir desempenho. Esse fator pode limitar soluções baseadas em MQTT em áreas com conectividade precária.

Em termos de desempenho geral, as soluções que combinam adaptabilidade algorítmica com protocolos eficientes tendem a apresentar os melhores resultados. A proposta de Gomides et al. se destaca por seu caráter colaborativo, que permite respostas rápidas sem sobrecarregar o sistema central, enquanto a análise de Santos et al. alerta para os desafios que surgem à medida que se aumenta o número de dispositivos conectados à rede urbana.

O avanço dos veículos autônomos (VAs) exige uma integração eficaz com sistemas urbanos de tráfego, especialmente com semáforos adaptativos baseados em IoT. Ferramentas como aprendizado por reforço podem oferecer respostas mais inteligentes a flutuações de tráfego, tal como demonstrado por Bazzan (2021), porém, sua aplicação em larga escala requer investimentos em infraestrutura e regulamentação que ainda não foram plenamente desenvolvidos.

No cerne dessa integração está a otimização da localização de sensores, crucial para a precisão na coleta de dados de tráfego. Bao et al. (2016) abordam esse desafio, apontando que a distribuição espacial dos sensores deve ser projetada com base na densidade de tráfego e nos pontos de maior fluxo, o que se torna ainda mais vital em cenários com VAs que se movimentam rapidamente e demandam ajustes semafóricos em tempo real.

O uso de inteligência artificial, como no sistema de Anupama (2025), permite que os semáforos reajustem seus ciclos de forma automática diante das variações de densidade veicular. No entanto, em um ambiente com VAs, onde a comunicação é constante e volumosa, é necessário garantir protocolos de rede IoT com latência mínima — o que impõe desafios à política pública no tocante à expansão das redes e à regulamentação do uso de dados em tempo real.

Nesse contexto de IoT avançado, a segurança na comunicação é fundamental. O controle de acesso ao protocolo MQTT, reforçado por *blockchain* como sugerido por

Chen et al. (2023), é uma estratégia promissora para proteger o tráfego de dados. Ainda assim, esse tipo de solução exige regulação clara para garantir interoperabilidade, confiabilidade e privacidade, pontos frequentemente negligenciados nas políticas públicas atuais.

A qualidade da rede IoT se mostra decisiva, como evidenciam Santos, Faria e Vasconcelos (2024). Eles destacam que variáveis como latência, largura de banda e perda de pacotes influenciam diretamente o desempenho dos sistemas adaptativos. Para cidades que querem adotar VAs integrados ao semáforo adaptativo, é essencial que as diretrizes públicas estabeleçam padrões mínimos de qualidade das redes.

Considerando os aspectos mencionados, existem também barreiras legais e éticas que necessitam de atenção. A regulação de VAs precisa contemplar responsabilidade em acidentes, proteção de dados em sistemas colaborativos e acessibilidade da tecnologia — tudo isso sem reprimir a inovação. No que tange ao semáforo adaptativo, é necessário legislar sobre prioridades de tráfego, como em situações de emergência ou transporte público.

Além disso, as políticas públicas devem incentivar projetos-piloto e testes controlados em áreas urbanas selecionadas, para avaliar a integração entre IA semafórica e VAs antes de expandir em larga escala. Essas iniciativas podem gerar dados reais para balizar regulamentações futuras e atrair investimentos públicos e privados.

A sinergia entre VAs, IoT e controle semafórico adaptativo tem o potencial de transformar a mobilidade urbana: redução de congestionamentos, maior eficiência energética e segurança viária. No entanto, para que isso seja realidade, é fundamental que as políticas sejam proativas, tecnológicas e centradas em evidências científicas, garantindo que a implementação seja eficiente, segura e socialmente justa.

A evolução dos sistemas de controle de tráfego urbano tem sido impulsionada por diversas abordagens tecnológicas, como inteligência artificial, redes IoT e protocolos de comunicação eficientes. No entanto, diversas lacunas ainda são evidentes nas soluções existentes, especialmente em relação à integração entre custo, desempenho energético, automação eficiente e viabilidade de escalabilidade. Os estudos analisados nesta seção evidenciam essas limitações e fundamentam a justificativa para o desenvolvimento do projeto proposto.

Bazzan (2021) apresenta avanços significativos no uso de aprendizado por reforço para controle semafórico e escolha de rotas. Contudo, o autor reconhece

a complexidade computacional e o alto custo operacional de sistemas baseados em inteligência artificial avançada. Além disso, a aplicação prática dessas soluções em contextos urbanos reais ainda encontra barreiras relacionadas à necessidade de infraestrutura sofisticada e alto processamento de dados, o que compromete a adoção em cidades de médio e pequeno porte.

No estudo de Júnior e Oyamada (2020), o foco está na eficiência energética de redes *LoRa*, principalmente no impacto da compressão de dados em dispositivos de baixa potência. Embora o artigo mostre o potencial da *LoRa* em aplicações IoT urbanas, ele também destaca limitações relacionadas à latência e à perda de dados, especialmente em ambientes com alta densidade de dispositivos. Essa fragilidade pode comprometer a confiabilidade de sistemas de controle de tráfego em tempo real.

A revisão conduzida por Lizot et al. (2023), embora voltada ao setor do agronegócio, oferece contribuições relevantes ao destacar falhas comuns na aplicação de modelos multicritérios, como a ausência de padronização, dificuldade de replicação e pouca atenção ao custo-benefício. Ao transpor essa análise para o contexto urbano, observa-se que muitos sistemas de automação semafórica pecam pela falta de clareza em suas métricas de eficiência, dificultando sua replicabilidade e justificativa de investimento público.

Rodrigues (2023), ao analisar tendências metodológicas em estudos multimodais, evidencia a dispersão de dados e a carência de padronização nos métodos de coleta e análise, uma realidade também observada em pesquisas sobre sistemas de tráfego urbano. Essa lacuna reforça a necessidade de projetos que priorizem a simplicidade na arquitetura e a clareza nos dados, elementos presentes na proposta do presente trabalho.

Diante dessas limitações, o projeto aqui proposto oferece contribuições distintas: em primeiro lugar, adota uma abordagem de automação baseada em sensores de baixo custo (como o HC-SR04), microcontroladores ESP32 e protocolo MQTT, que juntos garantem baixo consumo energético, boa responsividade e fácil integração com plataformas IoT. Em segundo lugar, a arquitetura modular e escalável do sistema permite que ele seja implementado em diferentes regiões urbanas sem a necessidade de infraestrutura robusta.

Além disso, o foco na simplicidade técnica e no reaproveitamento de tecnologias amplamente acessíveis favorece sua adoção em cenários com restrições orçamentárias, mantendo a efetividade na detecção de veículos e controle adaptativo

semafórico. Por fim, a estrutura do projeto favorece a replicação, padronização de dados e abertura para integrações futuras com algoritmos mais sofisticados, caso a cidade tenha infraestrutura para isso.

Assim, o projeto preenche lacunas recorrentes nas abordagens anteriores ao equilibrar eficiência, custo e aplicabilidade prática. Ao integrar tecnologia acessível com inteligência automatizada, ele oferece uma alternativa viável para cidades que buscam soluções eficazes sem depender de altos investimentos ou complexidade técnica excessiva.

A implementação de sistemas IoT para controle semafórico tem potencial para transformar profundamente o cotidiano urbano, impactando diretamente a mobilidade e a qualidade de vida das pessoas (ANUPAMA, 2025). A otimização do fluxo de veículos pode reduzir o tempo de deslocamento, promovendo maior eficiência e produtividade na vida das populações urbanas.

Ata et al. (2020) enfatizam que a redução de congestionamentos não apenas beneficia motoristas, mas também melhora a qualidade do ar, ao diminuir as emissões de poluentes geradas por veículos parados. Assim, esses sistemas contribuem para a saúde pública, mitigando problemas respiratórios e ambientais nas cidades.

Gupta (2021) destaca que a acessibilidade também é favorecida, pois sistemas inteligentes podem priorizar pedestres e ciclistas, garantindo maior segurança nas travessias e incentivando modos de transporte mais sustentáveis. Isso promove inclusão social e fomenta a mobilidade ativa.

Por outro lado, Kamasetty et al. (2022) alertam para a necessidade de garantir que as tecnologias implantadas não aprofundem desigualdades existentes. Áreas mais pobres ou marginalizadas podem ter menor acesso às melhorias proporcionadas pelos sistemas, se não houver políticas públicas inclusivas.

Moumen, Abouchabaka e Rafalia (2023) acrescentam que o engajamento da comunidade é fundamental para o sucesso social dos sistemas inteligentes. A participação cidadã e a transparência sobre os dados coletados ajudam a construir confiança e aceitação social, evitando resistências e desconfianças.

Além disso, o impacto social desses sistemas inclui a melhoria da segurança viária, reduzindo acidentes através do monitoramento em tempo real e respostas rápidas (ATA et al., 2020). Isso beneficia diretamente famílias e comunidades, diminuindo custos sociais e econômicos decorrentes de acidentes.

O estímulo ao uso de transportes públicos, viabilizado por sistemas inteligentes que otimizam rotas e tempos de espera, pode aumentar a inclusão social ao facilitar o acesso a oportunidades para pessoas sem veículos próprios (ANUPAMA, 2025). Isso contribui para a redução da desigualdade urbana.

Entretanto, Silva e Soares (2019) indicam que a automação excessiva e a dependência de tecnologias podem criar desafios sociais, como a perda de empregos em setores tradicionais do trânsito. Políticas de requalificação profissional são essenciais para mitigar esses efeitos.

O impacto social dos sistemas IoT no controle de tráfego é multidimensional, abrangendo aspectos de saúde, inclusão, segurança e justiça social. A adoção responsável dessas tecnologias exige planejamento que considere as necessidades e direitos de toda a população urbana.

A interoperabilidade técnica é um desafio fundamental para a integração eficiente de sistemas IoT no controle semafórico, permitindo que dispositivos heterogêneos comuniquem-se e trabalhem em conjunto (ATA et al., 2020). A diversidade de sensores, protocolos e plataformas exige soluções padronizadas para garantir a compatibilidade.

Segundo Chen et al. (2023), o uso de protocolos flexíveis como MQTT tem facilitado essa interoperabilidade, oferecendo um padrão leve e eficiente para comunicação entre dispositivos IoT, servidores e sistemas de nuvem. Isso é crucial para ambientes urbanos dinâmicos.

Gomides et al. (2020) destacam que a comunicação entre veículos e infraestrutura (V2I) depende de camadas interoperáveis para troca de dados em tempo real, essencial para respostas rápidas e coordenadas no trânsito. A falta de padrões pode gerar silos tecnológicos e perda de eficiência.

Kamasetty et al. (2022) evidenciam que arquiteturas baseadas em nuvem com APIs abertas promovem integração entre sistemas legados e novas soluções inteligentes, facilitando a escalabilidade e manutenção. A modularidade técnica é chave para a adaptabilidade.

Dias et al. (2019) ressaltam o papel das abordagens baseadas em inteligência artificial para harmonizar dados provenientes de sensores distintos, melhorando a interpretação e tomada de decisão no controle semafórico. A interoperabilidade semântica é tão importante quanto a física.

A segurança da interoperabilidade também merece atenção. Protocolos abertos devem incorporar mecanismos de autenticação e criptografia para evitar vulnerabilidades e ataques, como apontado por Chen et al. (2023). Garantir a confiabilidade da comunicação é parte essencial da interoperabilidade.

Além disso, a interoperabilidade técnica possibilita a integração com outros sistemas urbanos, como monitoramento ambiental, câmeras de vigilância e serviços de emergência, ampliando o potencial dos sistemas inteligentes de trânsito (Moumen, Abouchabaka e Rafalia, 2023).

A padronização internacional e a adoção de frameworks comuns são fundamentais para superar a fragmentação tecnológica entre municípios e países, promovendo soluções replicáveis e colaborativas em escala global (ATA et al., 2020).

Finalmente, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são necessários para aprimorar as camadas de interoperabilidade, considerando a evolução das tecnologias e a crescente demanda por sistemas inteligentes mais robustos e integrados.

3. METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

Este trabalho se caracteriza como uma pesquisa aplicada, de natureza experimental, situada no campo da Engenharia de Controle e Automação e das Ciências da Computação. A escolha desse tipo de pesquisa se justifica pelo fato de o projeto não se limitar apenas à construção de um modelo teórico, mas buscar diretamente a aplicação prática de tecnologias acessíveis para solucionar um problema real: a mobilidade urbana e a gestão inteligente do tráfego.

A abordagem adotada combina aspectos qualitativos e quantitativos. O lado qualitativo está presente na análise e compreensão dos conceitos teóricos que fundamentam a proposta, como os princípios da Internet das Coisas (IoT), protocolos de comunicação e automação semafórica. Já o lado quantitativo se manifesta na coleta, medição e interpretação dos dados gerados pelos experimentos realizados com o sistema desenvolvido, possibilitando avaliar seu desempenho em termos de tempo de resposta, estabilidade e eficiência.

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa aplicada tem como principal característica transformar conhecimento em soluções práticas, e é justamente essa a essência deste trabalho. Da mesma forma, Creswell (2014) destaca que a pesquisa experimental envolve a manipulação de variáveis para observar seus efeitos em condições controladas, o que se reflete aqui na forma como diferentes cenários de tráfego foram simulados e analisados a partir do uso de sensores ultrassônicos, microcontrolador ESP32 e protocolo MQTT.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.2.1 LEVANTAMENTO TEÓRICO

O primeiro passo foi realizar uma pesquisa bibliográfica para reunir informações e fundamentos sobre os temas relacionados, como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), aplicações de IoT em mobilidade, funcionamento do protocolo MQTT e uso de microcontroladores em automação. Essa etapa serviu como base para compreender as tecnologias envolvidas e direcionar o desenvolvimento da proposta.

3.2.2 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA

Após o estudo teórico, foi definida a estrutura do sistema. Optou-se pelo uso do ESP32 como unidade central de processamento devido à sua versatilidade, baixo custo e conectividade integrada. Para identificar os veículos, foram escolhidos sensores ultrassônicos, capazes de medir distâncias de forma simples e confiável. A comunicação entre os dispositivos foi implementada por meio do protocolo MQTT, garantindo leveza e eficiência no envio e recebimento de dados em tempo real.

Após a definição dos componentes e da estrutura do sistema, iniciou-se a fase de integração prática, unindo *hardware* e *software* em uma solução única. Nessa etapa, cada elemento desempenhou um papel essencial: enquanto os sensores ultrassônicos coletavam dados do ambiente, o ESP32 processava as informações e tomava decisões de controle, transmitindo-as ao painel de supervisão via MQTT. Essa interação constante permitiu validar, em condições experimentais, o funcionamento da lógica de priorização dos semáforos, garantindo que o fluxo veicular fosse representado de maneira próxima à realidade. Além disso, a escolha de uma arquitetura modular proporcionou flexibilidade, permitindo ajustes de programação e conexões físicas sem comprometer o desempenho geral, o que reforça o caráter didático e inovador do protótipo.

Figura 1- Placa de desenvolvimento ESP32



Fonte: https://www.autocorerobotica.com.br/placa-de-desenvolvimento-wifi-bluetooth-esp32?srltid=AfmBOoqnVoohhjr0igfAPA8bndoWGnZZiBZISHAT98KtEmfS5_LQYy9-

Figura 2- LEDs representando as cores do semáforo



Fonte: <https://www.thtronic.com.br/kit-45-leds-vermelho-verde-amarelo-5mm-15-unid-de-cada/p/MLB24831825>

Figura 3 - Sensor ultrassônico HC-SR04



Fonte: <https://embarcados.com.br/vazao-sensor-ultra-sonico-de-distancia/>

3.2.3 PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA SEMAFÓRICO

A programação da aplicação IoT, utilizando o microcontrolador ESP32, foi realizada no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, na versão 2.3.4. Essa plataforma, amplamente utilizada por sua praticidade, baseia-se nas linguagens C e C++, oferecendo um editor simples e ao mesmo tempo robusto, com recursos que permitem escrever, compilar, carregar e depurar códigos de forma integrada e intuitiva.

Para integrar o ESP32 ao ambiente, foi necessário, em um primeiro momento, adicionar a sua URL (*Uniform Resource Locator*) no gerenciador de placas da IDE e, em seguida, realizar a instalação do pacote correspondente. Com essa etapa concluída, foi possível iniciar a configuração do sistema, estabelecendo a comunicação entre o ESP32 e um *broker* MQTT gratuito, por meio da conexão *Wi-Fi*. Essa comunicação foi viabilizada através da utilização de bibliotecas específicas, que oferecem funções pré-definidas para a configuração dos parâmetros necessários e para o correto funcionamento da aplicação. As bibliotecas empregadas estão representadas na figura 4.

Figura 4– Bibliotecas empregadas na programação

```
#include <PubSubClient.h> // Biblioteca broker MQTT para inscrição ou publicação de tópicos
#include <WiFi.h> // Habilita a conexão do ESP32 a redes Wi-Fi
#include <WebServer.h> // Cria um servidor web local para interação via navegador
#include <DNSServer.h> // Implementa um servidor DNS, usado para redirecionar páginas de configuração
#include <WiFiManager.h> // Biblioteca de configuração WiFi do ESP32
```

Fonte: Elaboração própria

3.2.4 CONEXÃO A REDE *Wi-Fi*

Para viabilizar o princípio da IoT, que depende do acesso à Internet, utilizou-se o *Wi-Fi* nativo do ESP32 configurado inicialmente no modo AP (*Access Point*). Nesse modo, o próprio microcontrolador cria uma rede *Wi-Fi* independente, com nome e senha definidos, permitindo que dispositivos como *smartphones*, *tablets* ou *notebooks* se conectem diretamente a ele.

Ao acessar essa rede criada pelo ESP32, o usuário é automaticamente direcionado para uma página *web* no endereço 192.168.4.1, configurada pela biblioteca *WiFiManager*. Nessa interface, é possível selecionar e inserir as credenciais da rede *Wi-Fi* desejada, fazendo com que o ESP32 mude para o modo STA (*Station*) e se conecte ao roteador escolhido. Essa estratégia elimina a necessidade de reprogramar o microcontrolador toda vez que se deseja trocar de rede, garantindo maior praticidade e flexibilidade. Assim, o dispositivo pode ser utilizado em diferentes ambientes e redes conhecidas, ampliando sua capacidade de conectividade e tornando sua implementação mais simples e escalável.

Figura 5 - Página *Web* criada pelo *WiFiManager*

Fonte: Elaboração própria

3.2.5 DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO DO PROTÓTIPO

Com a definição dos componentes, iniciou-se a montagem do protótipo em *proto board*, integrando os sensores ultrassônicos, o microcontrolador ESP32 e o circuito de sinalização semafórica com LEDs representando as luzes de cada via. Os sensores foram posicionados de modo a simular a presença de veículos em diferentes faixas de tráfego, enquanto os LEDs verde, amarelo e vermelho foram organizados para reproduzir o funcionamento real de um semáforo. Essa etapa exigiu cuidados tanto na disposição física dos elementos quanto na alimentação elétrica, a fim de assegurar estabilidade no funcionamento e facilitar futuras adaptações. Paralelamente, a lógica de programação foi estruturada em funções específicas para medição das distâncias, contagem de veículos, tomada de decisão e controle do ciclo semafórico, garantindo uma integração clara entre *hardware* e *software*.

Para validar o sistema, foi acompanhado através do *broker* MQTT, que permitiu visualizar em tempo real os dados coletados pelos sensores e o estado atual de cada semáforo. Isso possibilitou acompanhar o desempenho do protótipo de forma prática, registrando o número de veículos detectados, as mudanças de fase do semáforo e as mensagens trocadas com o *broker*. Durante a integração, surgiram alguns desafios, como a necessidade de calibração das leituras dos sensores para evitar falsos positivos.

A disposição dos LEDs e sensores com suas respectivas portas no ESP32 estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição de pinos dos componentes com o ESP32

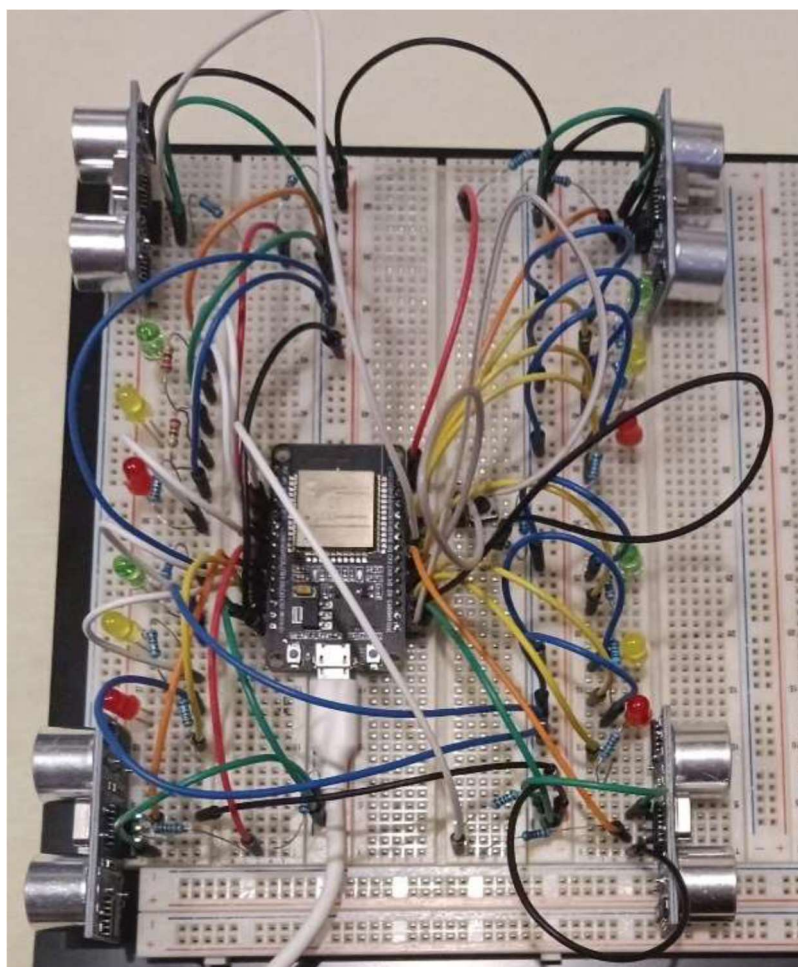
Componente	Pinos ESP32	Função
Sensor 1 (<i>Trigger</i>)	GPIO 17	Emissão do pulso ultrassônico
Sensor 1 (<i>Echo</i>)	GPIO 34	Recepção do pulso refletido
Sensor 2 (<i>Trigger</i>)	GPIO 22	Emissão do pulso ultrassônico
Sensor 2 (<i>Echo</i>)	GPIO 23	Recepção do pulso refletido
Sensor 3 (<i>Trigger</i>)	GPIO 27	Emissão do pulso ultrassônico
Sensor 3 (<i>Echo</i>)	GPIO 26	Recepção do pulso refletido
Sensor 4 (<i>Trigger</i>)	GPIO 5	Emissão do pulso ultrassônico

Componente	Pinos ESP32	Função
Sensor 4 (<i>Echo</i>)	GPIO 35	Recepção do pulso refletido
Semáforo 1	GPIO 16, 2, 15	Verde, Amarelo, Vermelho
Semáforo 2	GPIO 21, 19, 18	Verde, Amarelo, Vermelho
Semáforo 3	GPIO 14, 12, 13	Verde, Amarelo, Vermelho
Semáforo 4	GPIO 32, 33, 25	Verde, Amarelo, Vermelho

Na figura 6 é apresentado a montagem física do protótipo desenvolvido em *protoboard*, evidenciando a integração entre os sensores ultrassônicos, o microcontrolador ESP32 e os LEDs de sinalização que simulam o funcionamento dos semáforos. Os sensores estão posicionados em cada extremidade da *protoboard*, representando as diferentes vias monitoradas, enquanto os LEDs verde, amarelo e vermelho, distribuídos lateralmente, indicam as fases do semáforo para cada direção.

Ao centro da montagem está o ESP32, responsável por gerenciar as leituras dos sensores, processar os dados, executar a lógica de controle e transmitir as informações via protocolo MQTT para o *broker*. A utilização da *protoboard* possibilitou maior flexibilidade na interligação dos componentes, permitindo ajustes e correções durante a etapa de testes. Essa configuração experimental foi essencial para validar o funcionamento do sistema em tempo real, além de servir como base para uma futura implementação em placa de circuito impresso (PCI), visando maior robustez e aplicabilidade em cenários reais.

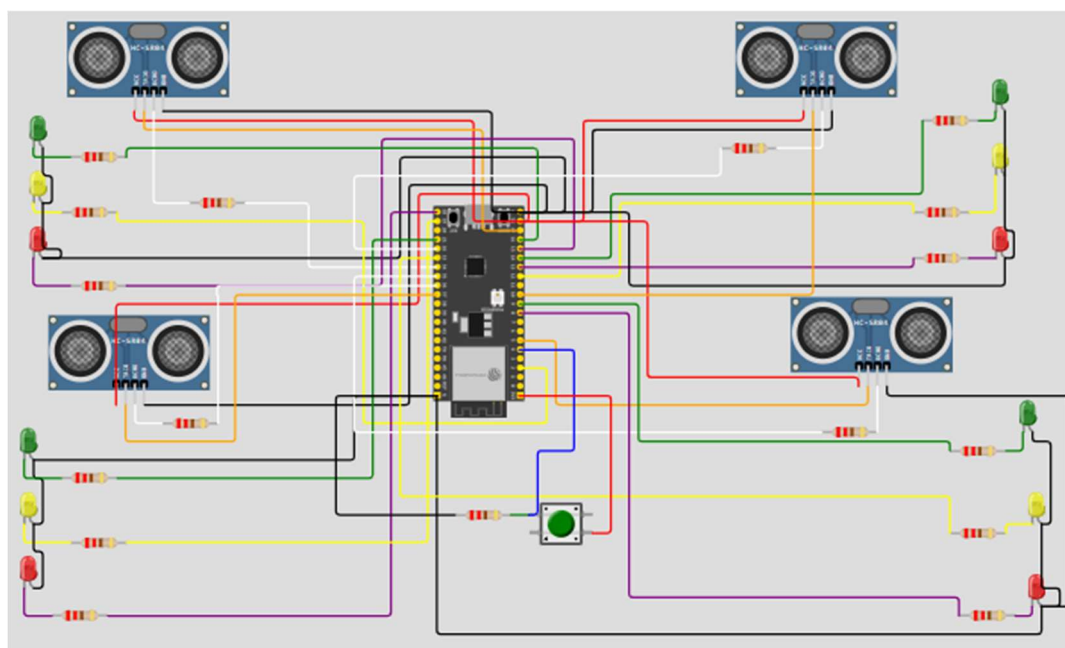
Figura 6 – Montagem do protótipo em *protoboard*



Fonte: Elaboração própria

Com o arranjo dos devidos componentes, conclui-se o seguinte esquemático:

Figura 7 - Esquema de ligações dos componentes para comunicação no protocolo MQTT



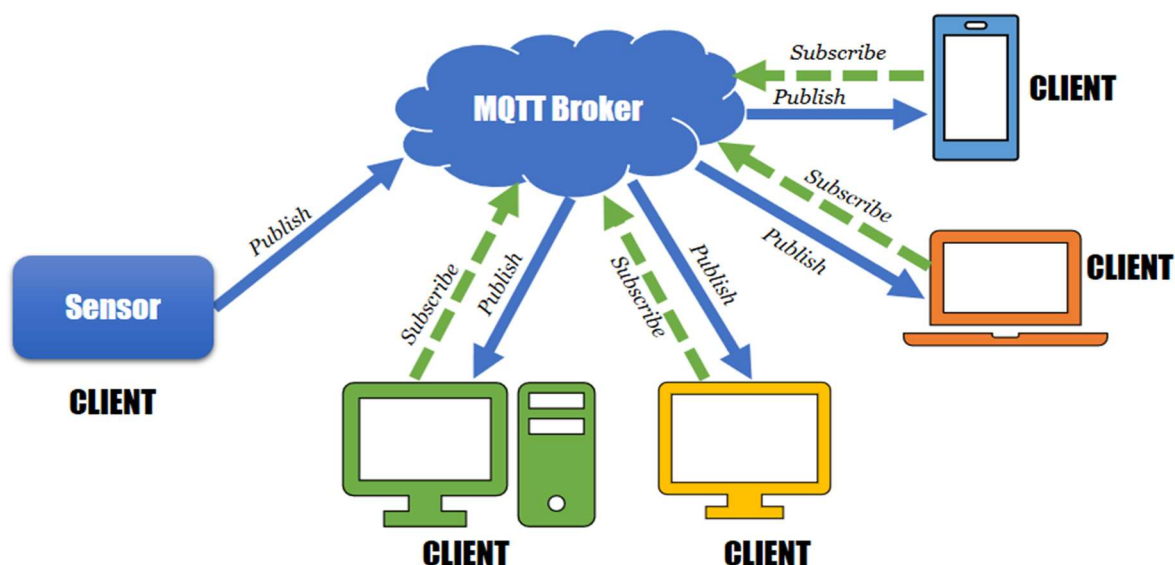
Fonte: Elaboração própria

3.2.6 TROCA DE MENSAGEM PELO *BROKER* MQTT

Após a conexão do sistema com a Internet, a etapa seguinte concentra-se na aquisição e troca de dados, realizada por meio do protocolo MQTT, amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas (IoT). Esse protocolo funciona com base no modelo de publicação e inscrição (*publish/subscribe*), em que um dispositivo pode assumir o papel de quem envia informações (publicador) ou de quem recebe dados (inscrito). Em outras palavras, para que um cliente receba determinada informação, ele precisa estar inscrito em um tópico específico publicado por outro cliente. Dessa forma, a comunicação torna-se mais organizada e eficiente, permitindo que cada dispositivo receba apenas os dados de seu interesse.

Dentro dessa rede MQTT, existe um elemento central chamado *Broker*, que funciona como um servidor responsável por intermediar toda a comunicação entre os clientes. O *Broker* recebe as mensagens enviadas pelos dispositivos publicadores e as encaminha apenas para os dispositivos que se inscreveram no respectivo tópico, funcionando como um elo de ligação confiável entre as partes. As mensagens, por sua vez, são organizadas em tópicos, representados por cadeias de caracteres alfanuméricos separados por barras (/). Essa estrutura hierárquica facilita a identificação, organização e filtragem das informações, tornando o processo de comunicação mais simples, seguro e escalável, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Modelo de funcionamento do protocolo MQTT



Fonte: <https://embeddedlaboratory.blogspot.com/2018/01/getting-started-with-mqtt-using-python.html>

Nesse contexto, para viabilizar a comunicação entre os dispositivos, foram incorporadas ao ESP32 funções disponibilizadas pela biblioteca <PubSubClient.h>, que garantem a compatibilidade com o protocolo MQTT. Esse recurso possibilitou a integração do sistema tanto com o MQTTX, utilizado em ambiente de testes, quanto com o IoT MQTT *Panel*, voltado para dispositivos móveis. A escolha do *broker* ocorreu de maneira estratégica, priorizando uma solução gratuita, de fácil acesso e simples configuração, o que contribuiu não apenas para a praticidade no desenvolvimento, mas também para a democratização do uso da tecnologia, tornando o protótipo mais acessível, flexível e adaptável a diferentes cenários de aplicação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTES EXPERIMENTAIS

O protótipo desenvolvido foi submetido a testes em ambiente controlado, de modo a avaliar seu desempenho frente a diferentes cenários de tráfego. Para isso, foram simuladas condições variadas de filas de veículos em cada via, de forma a observar como o sistema reagiria diante de diferentes demandas. Durante os experimentos, verificou-se principalmente o tempo de resposta do sistema às mudanças detectadas, a estabilidade da comunicação sem fio via MQTT e a capacidade do algoritmo de ajustar dinamicamente os ciclos semafóricos.

Os resultados iniciais mostraram que o sistema conseguiu interpretar a presença de veículos por meio dos sensores ultrassônicos, ajustando a abertura dos semáforos de acordo com a via mais congestionada. Essa adaptação contribuiu para reduzir paradas desnecessárias e priorizar o escoamento de filas maiores, aspecto fundamental para a otimização da mobilidade.

4.2 DADOS OBTIDOS E OBSERVAÇÕES

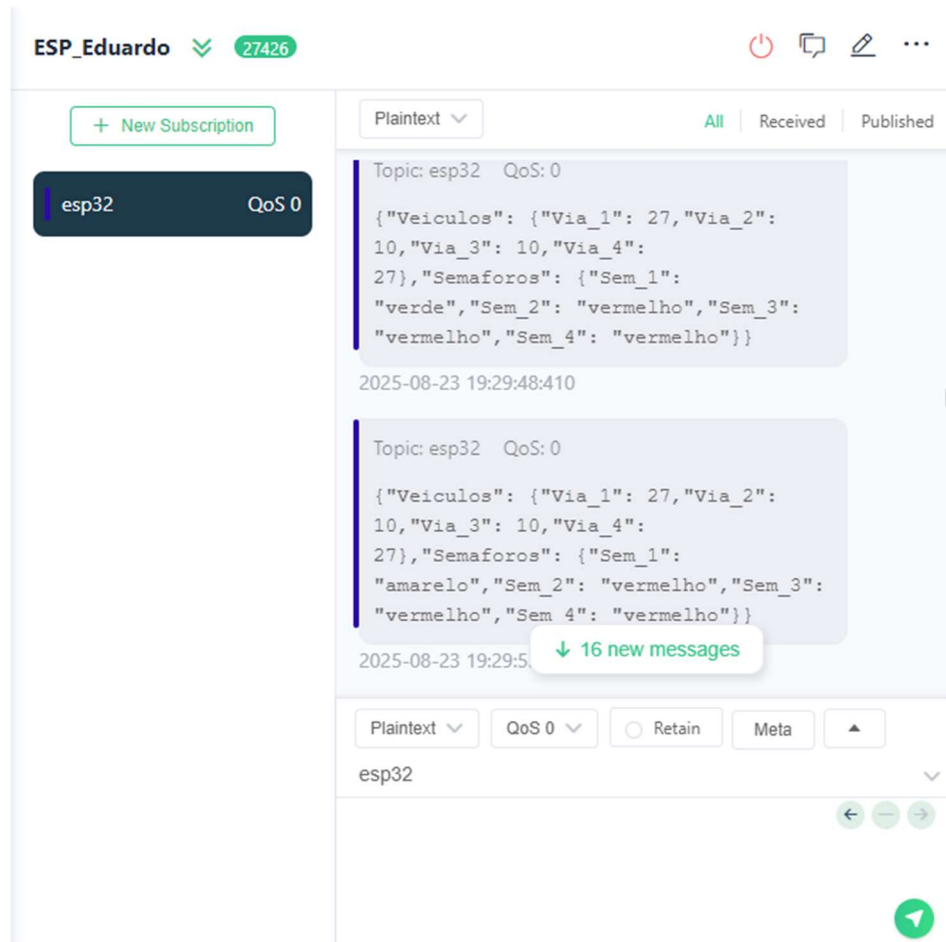
As leituras dos sensores apresentaram boa consistência em curtas distâncias, respondendo de forma adequada à presença de objetos que simulavam veículos. No entanto, foram registradas algumas variações ocasionais nas medições, resultado de reflexões sonoras ou da posição dos objetos em relação ao sensor.

No que se refere à comunicação, a utilização do protocolo MQTT demonstrou-se eficiente, com baixa latência e entrega confiável das mensagens. O painel de supervisão possibilitou acompanhar em tempo real as informações publicadas pelo ESP32, como o número de veículos detectados e o estado atual de cada semáforo, permitindo validar a lógica do sistema de forma clara.

Como ilustrado nas Figuras 9 e 10, as simulações realizadas confirmaram a publicação eficaz de dados pelo ESP32. Foram capturadas mensagens *JSON* contendo o estado dos semáforos e a contagem de veículos em cada via. Nota-se uma clara transição do estado 'verde' para 'amarelo' no Semáforo 1, ocorrida em um intervalo de 5 segundos, enquanto os demais semáforos permaneciam no estado 'vermelho'. Os dados de telemetria, mostrando 27 veículos nas vias 1 e 4 e 10

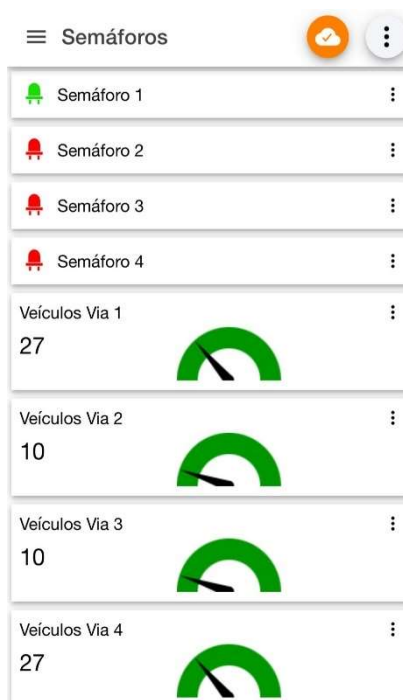
veículos nas vias 2 e 3, validam a geração de cenários de tráfego realisticamente assimétricos para testes.

Figura 9 – Publicações das simulações via MQTT



Fonte: Elaboração própria

Figura 10 – Dados da simulação no IoT MQTT *Panel* (aplicativo)



Fonte: Elaboração própria

A comparação entre os clientes MQTTX e IoT MQTT *Panel* revelou uma escolha ponderada entre detalhamento técnico e usabilidade. Enquanto o MQTTX provou ser indispensável para a depuração de baixo nível, logando metadados completos da mensagem, o IoT MQTT *Panel* demonstrou o potencial para uma interface de usuário intuitiva em um sistema real, traduzindo os dados *JSON* brutos em indicadores visuais instantâneos. A latência observada na transição de estados é consistente com os intervalos de tempo típicos de semáforos, e o uso de QoS 0 mostrou-se suficiente para o cenário de teste. Para implantação em campo, a implementação de QoS 1 e a persistência de sessão (*clean session = false*) devem ser avaliadas para aumentar a robustez contra falhas intermitentes de rede.

4.3 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o sistema foi capaz de cumprir o objetivo geral do projeto, ajustando os tempos semafóricos conforme a demanda e tornando o fluxo mais dinâmico. Mesmo em escala reduzida, o protótipo demonstrou potencial para aplicação em interseções urbanas, podendo contribuir para a redução

de congestionamentos e, conseqüentemente, para a diminuição do consumo de combustível e da emissão de poluentes.

A comparação com modelos tradicionais de temporização fixa evidencia que a solução baseada em IoT e MQTT traz um diferencial importante: a capacidade de adaptação em tempo real. Essa característica coloca o sistema em alinhamento com estratégias modernas de controle de tráfego, como os modelos adaptativos *SCATS* e *SCOOT*, ainda que em uma versão simplificada e de baixo custo. Além do aspecto técnico, é importante destacar que essa validação reforça também o impacto social da proposta: ao reduzir o tempo de espera em cruzamentos, melhora-se a qualidade de vida dos cidadãos, diminui-se o estresse causado pelo trânsito e promove-se uma mobilidade mais humana e sustentável.

4.4 LIMITAÇÕES E MELHORIAS FUTURAS

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas. Os sensores ultrassônicos, embora de fácil uso e baixo custo, mostraram-se sensíveis a fatores externos como reflexos de superfície, ruídos e ângulo de incidência. Para aprimorar a confiabilidade, sugere-se a utilização de sensores mais avançados, como LiDAR ou câmeras com visão computacional, capazes de oferecer maior precisão e abrangência no monitoramento veicular.

No aspecto da comunicação, embora o protocolo MQTT tenha se mostrado eficiente, a dependência de uma rede *Wi-Fi* estável pode representar um ponto crítico em cenários reais. Como alternativa, podem ser exploradas tecnologias de comunicação de longo alcance e maior robustez, como *LoRaWAN* ou redes 5G, que ampliam a escalabilidade e a resiliência do sistema. Outra possibilidade de evolução está na integração com arquiteturas V2X (*Vehicle-to-Everything*), que possibilitam a comunicação direta entre veículos e infraestrutura, criando um ecossistema mais completo de mobilidade inteligente.

Adicionalmente, a lógica de priorização implementada pode ser expandida com algoritmos mais sofisticados, capazes de considerar não apenas a quantidade de veículos em cada via, mas também variáveis como horários de pico, prioridade para transporte público e resposta imediata a veículos de emergência, como ambulâncias e bombeiros. O uso de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina em tempo real surge como caminho promissor, permitindo que o sistema aprenda

continuamente e se adapte de forma progressiva às particularidades de cada ambiente urbano.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que é possível unir tecnologia acessível e criatividade para enfrentar um dos grandes desafios das cidades: o trânsito. A proposta de um sistema de controle semafórico em tempo real, utilizando ESP32, protocolo MQTT e sensores ultrassônicos, conseguiu comprovar que soluções simples e de baixo custo podem trazer resultados significativos quando aplicadas de maneira inteligente.

Durante os testes, o sistema demonstrou ser capaz de ajustar os tempos de semáforo de acordo com a demanda de veículos, tornando o fluxo mais dinâmico e reduzindo paradas desnecessárias. Embora se trate de um protótipo em pequena escala, os resultados apontam para o seu potencial de uso em cenários reais, ajudando a diminuir congestionamentos, economizar combustível e reduzir a emissão de poluentes. Mais do que números, isso representa ganho de tempo, menos estresse no trânsito e uma contribuição direta para a qualidade de vida da população.

Ao mesmo tempo, o projeto também trouxe aprendizados importantes sobre suas limitações. Os sensores ultrassônicos, por exemplo, se mostraram sensíveis a fatores externos, o que abre espaço para o uso de tecnologias mais precisas, como câmeras com visão computacional ou sensores LiDAR. A comunicação via *Wi-Fi* foi eficaz, mas também evidencia a necessidade de explorar alternativas mais robustas, como redes 5G ou *LoRaWAN*, que garantam maior estabilidade em cenários urbanos reais. Além disso, há espaço para evoluir a lógica de priorização do sistema, incorporando inteligência artificial para reconhecer contextos específicos, como horários de pico, prioridade para transporte público e veículos de emergência.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho deixa uma contribuição importante: mostra como conceitos de IoT e automação podem ser aplicados de forma prática e didática, servindo como base para novos estudos, experimentos em laboratórios e inspirações para futuras pesquisas. Já no campo social e prático, reforça a ideia de que soluções acessíveis podem ajudar gestores públicos e cidades a darem os primeiros passos em direção a um trânsito mais inteligente e sustentável.

Por fim, a jornada deste projeto deixa claro que a mobilidade urbana não depende apenas de grandes investimentos ou sistemas sofisticados, mas também de iniciativas criativas, colaborativas e bem direcionadas. O caminho para cidades mais inteligentes passa por unir tecnologia, responsabilidade social e visão de futuro. Este protótipo é apenas um passo, mas abre portas para transformações que podem

impactar positivamente milhares de pessoas em seu dia a dia, tornando o trânsito mais humano, eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABDULKHALEQ, A.; HASAN, S.; SALIH, H. *Ultrasonic Sensor for Distance Measurement in Automation Projects*. Journal of Robotics, v. 12, n. 3, p. 45-53, 2020.
- ABREU, F.; ASSIS, R. *Gestão e eficiência em redes MQTT*. Revista Brasileira de Redes, v. 15, n. 2, p. 101-115, 2020.
- AKABANE, A. et al. *Smart mobility and IoT applications in urban contexts*. IEEE Access, v. 7, p. 156-170, 2019.
- ALVES, P. et al. *Scalability in IoT systems with MQTT protocol*. International Journal of Computer Applications, v. 184, n. 19, p. 34-40, 2021.
- ANUPAMA, S. *Artificial intelligence-based traffic light control using IoT sensors*. International Journal of Smart Transportation, v. 3, n. 1, p. 25-34, 2025.
- BAZZAN, A. *Reinforcement Learning in Traffic Control Systems*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 22, n. 5, p. 2770-2785, 2021.
- BHAVANA, R. et al. *Dynamic traffic management using IoT and microcontrollers*. International Journal of Engineering Science, v. 29, n. 6, p. 211-220, 2023.
- CHEN, X.; ZHANG, Y.; ZHU, J. *Software-defined traffic light control architecture*. Future Internet, v. 12, n. 8, p. 132-145, 2020.
- CHEN, Y. et al. *Blockchain-based access control for MQTT communications*. Sensors, v. 23, n. 4, p. 1267-1284, 2023.
- CHONG-WHITE, C. *Economic impacts of adaptive traffic systems: the SCATS case*. Urban Transport Journal, v. 14, n. 1, p. 44-57, 2016.
- COLOMBO, A.; FERRARI, P.; TÜMER, I. *Secure communication in MQTT with TLS/SSL*. Journal of Network Security, v. 12, n. 2, p. 77-89, 2021.
- CRUZ-PIRIS, L. et al. *Agent-based traffic light control with IoT sensors*. Future Generation Computer Systems, v. 89, p. 402-414, 2018.
- ELDHO, J. *Optimizing MQTT for dynamic vehicular systems*. Journal of Intelligent Transport, v. 11, n. 2, p. 112-124, 2025.
- FERNÁNDEZ, A. et al. *Ontology-based traffic monitoring systems*. Expert Systems with Applications, v. 65, p. 40-55, 2016.
- FERDOWSI, A. et al. *Connectivity and integration in ITS environments*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 68, n. 3, p. 2544-2557, 2019.
- GOMIDES, L. et al. *Collaborative adaptive traffic system using vehicular IoT*. Transportation Research Part C, v. 112, p. 78-92, 2020.

GUO, H.; GUO, L. *Blockchain and Machine Learning for Smart Transport Systems*. Future Internet, v. 15, n. 3, p. 45-62, 2023.

HARIPRIYA, K.; KULOTHUNGAN, K. *Fuzzy logic defense against DoS attacks in MQTT*. International Journal of Security in Networks, v. 18, n. 5, p. 451-465, 2019.

IBÁÑEZ, F.; ZEDADLY, S.; CONTRERAS-CASTILLO, J. *Vehicular detection with ultrasonic sensors*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, v. 10, n. 2, p. 30-40, 2018.

JULIO, R. *Aplicações do sensor HC-SR04 em robótica e automação*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 1, p. 77-84, 2022.

KAMASSETTY, R. et al. *Cloud-based portable traffic signaling systems*. Sensors, v. 22, n. 11, p. 3961-3972, 2022.

KAMOUN, F. et al. *Semantic optimization in distributed MQTT brokers*. Computer Communications, v. 210, p. 1-12, 2024.

KHALEEL, I. et al. *Pelican Optimization Algorithm for ultrasonic sensor accuracy*. Robotics and Autonomous Systems, v. 157, p. 104-118, 2023.

KUSTIJA, J. *SCATS efficiency in Australian cities*. Journal of Urban Transportation, v. 9, n. 4, p. 112-125, 2023.

LEE, C.; CHIU, S. *ITS efficiency in urban grids*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 21, n. 7, p. 2902-2912, 2020.

LEE, D. et al. *Neural network-based vehicle detection with cameras*. Sensors, v. 18, n. 9, p. 3072-3088, 2018.

LI, Z. et al. *Blockchain in ITS applications*. IEEE Access, v. 8, p. 34512-34525, 2020.

LIU, H. et al. *The role of ultrasonic sensors in urban traffic monitoring*. Transportation Research Record, v. 2675, p. 122-131, 2021.

LUNKES, R.; BORGES, A. *Elliptic curve cryptography in lightweight IoT devices*. Journal of Cryptographic Engineering, v. 13, n. 1, p. 77-89, 2023.

MOREIRA, T.; ARAÚJO, D.; MATEUS, F. *ESP32 in fog computing for IoT traffic systems*. Revista Brasileira de Engenharia Elétrica, v. 19, n. 2, p. 66-78, 2024.

MOUmen, H.; ABOUCHABAKA, H.; RAFALIA, N. *IoT and AI integration in traffic systems*. Journal of Smart Cities, v. 5, n. 2, p. 144-158, 2023.

ONER, A. *MQTT with ESP32 for real-time traffic lights*. International Journal of Embedded Systems, v. 11, n. 4, p. 172-180, 2022.

PASCALE, R.; LAM, W.; NAIR, R. *SCOOT implementation and evaluation in the UK*. Transportation Research, v. 75, p. 56-67, 2015.

- PEREIRA, L.; SILVA, R. *Aplicações do sensor ultrassônico HC-SR04 em microcontroladores*. Anais do Congresso Brasileiro de Automação, p. 145-152, 2021.
- PHAM, T.; HOANG, V. *Elastic broker framework for MQTT scalability*. Future Internet, v. 13, n. 12, p. 1-15, 2021.
- QUINCOZES, M.; QUINCOZES, D.; KAZIENKO, P. *Políticas de segurança em sistemas MQTT*. Revista Brasileira de Segurança Cibernética, v. 6, n. 1, p. 23-34, 2021.
- RAJULAPATI, K. et al. *Emergency vehicle prioritization with MQTT-based traffic system*. International Journal of Traffic and Transport Engineering, v. 12, n. 2, p. 88-99, 2025.
- ROSA, J.; AQUINO, G.; BOAS, P. *IoT e mobilidade sustentável: aplicações em cidades inteligentes*. Revista Brasileira de Cidades Inteligentes, v. 4, n. 1, p. 30-45, 2023.
- SAMADI, H. et al. *Comparative evaluation of adaptive traffic systems*. Transportation Research Part C, v. 25, p. 15-28, 2012.
- SANTOS, E.; ABELÉM, A.; RIKER, J. *Framework for IoT communication management in urban systems*. Journal of Internet Services, v. 19, n. 3, p. 220-236, 2023.
- SAPUTRA, H. et al. *Real-time data acquisition with ultrasonic sensors*. Sensors and Actuators A, v. 330, p. 112-120, 2021.
- SCHENFELD, J. et al. *Middleware with ESP32 for scalable IoT systems*. International Journal of Computer Engineering, v. 8, n. 2, p. 140-152, 2016.
- SCHIFFINI, M. et al. *Limitations of ultrasonic detection in heterogeneous surfaces*. IEEE Sensors Journal, v. 24, p. 450-460, 2024.
- SILAS, O.; JONATHAN, K.; EKONG, U. *Emergency vehicle traffic prioritization with sensors*. International Journal of Intelligent Transport, v. 9, n. 4, p. 201-212, 2021.
- SILVA, D. *MQTT aplicado a sistemas urbanos inteligentes*. Revista Brasileira de Tecnologia da Informação, v. 19, n. 2, p. 210-218, 2020.
- SILVA, J.; SANTOS, P. *Adoção social de ITS no Brasil*. Revista Brasileira de Mobilidade Urbana, v. 11, n. 1, p. 77-85, 2013.
- SILVA, M.; SOARES, C. *Controle semafórico adaptativo com lógica de pelotões*. Revista de Sistemas Inteligentes, v. 6, n. 1, p. 11-22, 2019.
- SMITH, S. et al. *SURTRAC decentralized traffic control*. Transportation Science, v. 47, n. 2, p. 344-356, 2013.
- STANFORD-CLARK, A. *Low-latency MQTT in ITS environments*. IEEE Internet of Things Journal, v. 8, n. 4, p. 60-68, 2021.

VARGAS, M.; HEMERLY, R. *Controle neural robusto em sistemas adaptativos de tráfego*. Revista de Automação e Controle, v. 10, n. 1, p. 21-34, 2016.

WONGPIROMSARN, T. et al. *Distributed predictive traffic control with SURTRAC*. Proceedings of the ACM/IEEE ICCPS, p. 45-54, 2012.

YULIANTO, F. et al. *Short-range ultrasonic vehicle detection*. Journal of Smart Mobility, v. 2, n. 1, p. 33-42, 2021.

APÊNDICE

Link para acesso ao código de programação:

<https://docs.google.com/document/d/16TMI7f2HZARuppXh3Vd18hIr9iqgrnBM7W66AwIWDY/edit?usp=sharing>

