

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus
Governador Valadares**

PEDRO ANTÔNIO DOS SANTOS BHERING

**USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO, ANEXOS A
COLETES, PARA MEDIR PARÂMETROS DE QUALIDADE DO AR,
ENVIANDO DADOS PARA A NUVEM**

Governador Valadares

2025

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus
Governador Valadares**

PEDRO ANTÔNIO DOS SANTOS BHERING

**USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO, ANEXOS A
COLETES, PARA MEDIR PARÂMETROS DE QUALIDADE DO AR,
ENVIANDO DADOS PARA A NUVEM**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, campus Governador Valadares, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, sob a orientação do Prof. Rodrigo Marques.

Governador Valadares

2025

PEDRO ANTÔNIO DOS SANTOS BHERING


**USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO, ANEXOS A
COLETES, PARA MEDIR PARÂMETROS DE QUALIDADE
AMBIENTAIS, ENVIANDO DADOS PARA A NUVEM**

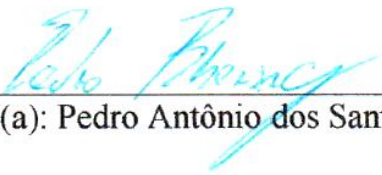
Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, campus Governador Valadares, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, sob a orientação do Prof. Rodrigo Marques de Oliveira

Aprovado em 13 de Março de 2025 pela banca examinadora.


Orientador(a): Prof. Rodrigo Marques de Oliveira


Profa. Déborah Neide de Magalhães Praxedes


Prof. Marcelo Silva Filgueiras


Aluno (a): Pedro Antônio dos Santos Bhering

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rodrigo Marques de Oliveira, pela orientação segura e amizade dispensada

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), uma agência brasileira, pelo apoio financeiro ao projeto. Agradecemos também

Ao Instituto Federal de Minas Gerais, campus Governador Valadares, por fornecer a infraestrutura necessária para a montagem e realização dos experimentos.

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar em ambientes urbanos, utilizando sensores acoplados a um colete. O dispositivo é capaz de medir simultaneamente a concentração de gases poluentes (NH_3 , CO_2 , NO_2), variáveis meteorológicas (temperatura, pressão e umidade) e coordenadas geográficas, enviando os dados coletados para a nuvem em tempo real. Para isso, foram utilizados o módulo WiFi ESP8266 NodeMCU, o sensor de gases MICS-6814, o sensor ambiental BME680 e o módulo GPS NEO-6M V2. O protótipo foi testado em diferentes condições urbanas, demonstrando a capacidade de identificar variações significativas nas concentrações de poluentes em áreas com diferentes níveis de tráfego. Os resultados indicam que o dispositivo pode ser uma ferramenta eficaz para o monitoramento ambiental, fornecendo dados cruciais para a implementação de políticas de saúde pública e planejamento urbano. No entanto, foram identificadas limitações relacionadas à calibração dos sensores e à interferência do calor corporal, sugerindo a necessidade de ajustes futuros para melhorar a precisão e a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Qualidade do ar. sensores de baixo custo. IoT. monitoramento ambiental. ESP8266, MICS-6814. BME680.

ABSTRACT

This work proposes the development of a low-cost prototype for monitoring air quality in urban environments, using sensors attached to a vest. The device is capable of simultaneously measuring the concentration of polluting gases (NH_3 , CO_2 , NO_2), meteorological variables (temperature, pressure, and humidity), and geographic coordinates, sending the collected data to the cloud in real-time. For this purpose, the ESP8266 NodeMCU WiFi module, the MICS-6814 gas sensor, the BME680 environmental sensor, and the NEO-6M V2 GPS module were used. The prototype was tested in different urban conditions, demonstrating the ability to identify significant variations in pollutant concentrations in areas with different traffic levels. The results

indicate that the device can be an effective tool for environmental monitoring, providing crucial data for the implementation of public health policies and urban planning. However, limitations related to sensor calibration and body heat interference were identified, suggesting the need for future adjustments to improve the system's accuracy and reliability.

Keywords: Air quality. low-cost sensors. IoT. environmental monitoring. ESP8266. MICS-6814. BME680.

LISTA DE FIGURAS

1. Fotografia da placa NODEMCU ESP8266.....	16
2. Fotografia do sensor MICS-6814	17
3. Fotografia do sensor BME680	18
4. Módulo GPS NEO-6M V2.....	19
5. Testes sendo realizados em etapas, utilizando uma pequena tela OLED (canto inferior direito) para monitoramento.	23
6. Testes do código e plataforma ThingSpeak.....	24
7. Organização dos eletrônicos na case.....	25
8. Protótipo costurado ao colete..	26
9. Valores medidos para umidade relativa do ar, durante, o movimento do ciclista em uma rua movimentada.....	28
10. Valores medidos para a temperatura, durante o movimento do ciclista em uma rua movimentada..	28
11. Concentração de monóxido de carbono em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com um número maior de veículos	30
12. Concentração de amônia em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com grande circulação de veículos	31
13. Concentração de dióxido de nitrogênio em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com muito trafego de veículos	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Impactos na Saúde Pública	11
2.1.1 Políticas Públicas e Regulamentações.....	12
2.2 Avanços Tecnológicos e Monitoramento Ambiental.....	13
2.3 Estudos Recentes e Aplicações Práticas.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 Descrição dos Componentes do Protótipo	14
3.1.1 Módulo ESP8266 NodeMCU.....	15
3.1.2 Sensor MICS-6814	16
3.1.3 Sensor BME680.....	17
3.1.4 Módulo GPS NEO-6M V2	19
3.1.5 Multiplexador CD74HC4067	20
3.1.6 A Plataforma ThingSpeak	21
3.2 Metodologia de Desenvolvimento	22
3.2.1 Integração dos Componentes	22
3.2.2 Programação do Firmware.....	23

3.2.3 Montagem do Protótipo.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1 Apresentação dos Dados Coletados	27
4.1.1 Umidade Relativa e Temperatura.....	27
4.1.2 Concentração de Gases Poluentes.....	29
4.1.3 Limitações do Protótipo.....	32
4.2 Comparação com Trabalhos Relacionados.....	34
4.3 Implicações para Políticas Públicas e Saúde Urbana.....	36
5. CONCLUSÃO.....	38
6. REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A industrialização e o crescimento desenfreado do consumo de recursos naturais têm provocado uma grave deterioração da qualidade do ar, sobretudo em grandes centros urbanos. Essa poluição atmosférica, causada por emissões de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), material particulado fino (PM_{2.5}) e dióxido de nitrogênio (NO₂), representa uma séria ameaça à saúde pública, estando associada ao aumento de doenças respiratórias, cardiovasculares e até neurológicas.

Nos Estados Unidos, em 2015, os óbitos relacionados à poluição do ar superaram as mortes por diabetes, influenza, doenças renais e suicídio, alcançando aproximadamente 88 mil casos por ano. Essa realidade evidencia a urgência de sistemas eficientes de monitoramento da qualidade do ar. No entanto, em países em desenvolvimento como o Brasil, o cenário é ainda mais preocupante devido à carência de infraestrutura adequada para medição e controle de poluentes. Em metrópoles como São Paulo e Rio de Janeiro, os níveis de contaminação atmosférica frequentemente excedem os padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), expondo milhões de pessoas a riscos crônicos à saúde. Essa lacuna no monitoramento tem impulsionado a busca por novas tecnologias capazes de fornecer dados precisos e acessíveis sobre a poluição do ar, essenciais para a implementação de políticas públicas mais eficazes.

No Brasil, a falta de infraestrutura suficiente para monitorar e relatar a qualidade do ar aumenta o risco de doenças relacionadas à poluição, especialmente em áreas com alta densidade de tráfego ou locais mal ventilados, como academias. Além disso, os medidores de gases disponíveis comercialmente são geralmente caros e específicos, limitando seu uso a aplicações industriais. Isso cria uma lacuna no acesso a informações sobre a qualidade do ar, especialmente para o público em geral, que muitas vezes não tem acesso a dados precisos e em tempo real sobre os níveis de poluição em suas comunidades.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar em ambientes urbanos, utilizando sensores acoplados a um colete. O dispositivo é capaz de medir simultaneamente a

concentração de gases poluentes (NH_3 , CO_2 , NO_2), variáveis meteorológicas (temperatura, pressão e umidade) e coordenadas geográficas, enviando os dados coletados para um servidor remoto em tempo real. A proposta é que esse sistema possa ser utilizado por cidadãos comuns, ciclistas, motociclistas ou gestores públicos para coletar dados em tempo real sobre a qualidade do ar em diferentes áreas urbanas.

A relevância deste trabalho está na sua capacidade de fornecer uma solução acessível e eficiente para o monitoramento da qualidade do ar, especialmente em regiões onde a infraestrutura de monitoramento é insuficiente. Ao utilizar sensores de baixo custo e tecnologias de Internet das Coisas (IoT), o protótipo permite a coleta e transmissão de dados em tempo real, facilitando a identificação de áreas críticas e a implementação de políticas públicas mais eficazes. Além disso, a integração com plataformas de nuvem, como o ThingSpeak, permite que os dados sejam visualizados e analisados remotamente, o que é crucial para a tomada de decisões em tempo hábil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A poluição do ar é um problema global que tem despertado a atenção de pesquisadores, governos e organizações internacionais devido aos seus impactos significativos na saúde humana e no meio ambiente. Conforme a literatura, (BRUGGE; LANE, 2025), a poluição por partículas finas é uma emergência de saúde pública que muitas vezes passa despercebida, mas está diretamente ligada a milhares de mortes prematuras anualmente. Essa afirmação ressalta a gravidade do problema, especialmente em áreas urbanas, onde a concentração de poluentes como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2) e partículas finas (PM2.5) atinge níveis críticos.

2.1 Impactos na Saúde Pública

Os efeitos da poluição do ar na saúde humana são amplamente documentados na literatura científica. Destaca-se que a exposição prolongada a poluentes como o dióxido de nitrogênio (NO_2) e partículas finas está associada ao aumento de doenças respiratórias, cardiovasculares e até mesmo distúrbios neurológicos. Segundo os autores, a poluição do ar não apenas afeta a saúde física, mas também tem impactos cognitivos, especialmente em crianças e idosos, que são mais vulneráveis aos efeitos

dos poluentes (BULL; SUTTON, 1998). Além disso, estudos recentes têm mostrado que a exposição a altos níveis de poluição pode agravar condições pré-existentes, como asma e doenças cardíacas, levando a hospitalizações e mortes prematuras (SUHENDAR et al., 2024).

2.1.1 Políticas Públicas e Regulamentações

As políticas públicas para controle de qualidade do ar no Brasil são muito bem aprimoradas por um marco regulatório eficaz, mas muitas apresentam obstáculos para a implementação. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução nº 491/2018 (BRASIL, 2018) e da Resolução nº 506/2021, estabelece parâmetros para o monitoramento e controle da poluição atmosférica, embora apenas parcialmente em conformidade com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2021). Ambas as resoluções apresentam padrões para poluentes tradicionais, como material particulado ($PM_{2.5}$ e PM_{10}) e ozônio (O_3), conforme metodologias definidas pela ABNT NBR 13412 : 1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), mas há lacunas em relação a inovações emergentes e tecnologias de monitoramento mais avançadas.

A situação atual de monitoramento da qualidade em nenhum país evidencia disparidades de preocupações. De acordo com dados do IBAMA (2022), apenas 12% dos municípios brasileiros possuem estações de monitoramento, com concentração nas regiões mais específicas. Essa distribuição desigual está ligada, conforme Andrade et al (2020), à subnotificação de problemas de saúde em regiões mais desassistidas. A Resolução CONAMA 506/2021 tinha o objetivo de modernizar o marco regulatório ao incluir parâmetros para compostos orgânicos voláteis (VOCs) e metais pesados, além de estimular o uso de tecnologias alternativas de monitoramento.

O Programa Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar (MonitorAr), criado pela Portaria do IBAMA nº 88/2019, é um importante esforço de padronização das práticas de monitoramento a nível nacional. No entanto (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2022), existe uma defasagem tecnológica em relação aos padrões internacionais, sobretudo com relação às técnicas de ponta, como a espectrometria de massa, utilizada na Europa

conforme a Diretiva 2008/50/ CE . Essa lacuna tecnológica impossibilita o país de produzir dados adequados , precisos e comparáveis internacionalmente.

Dentro dessa perspectiva, a criação de alternativas de monitoramento, como o protótipo feito neste trabalho, torna - se particularmente importante . Essas tecnologias poderiam fornecer suporte ao sistema oficial: (1) estendendo a cobertura para locais não cobertos pelo MonitorAr; (2) disponibilizar dados para a observação da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) ; (3) auxiliando a execução do Plano Nacional de Qualidade do Ar (PNQA - Portaria MMA nº 492/2019); e (4) auxiliando na integração do Sistema Nacional de Informação sobre Qualidade do Ar (SINQAIR), conforme previsto na lei . A inclusão estratégica dessas tecnologias inovadoras no arcabouço regulatório brasileiro tem o potencial de transformar radicalmente a gestão da qualidade do ar no Brasil . Ao permitir maior participação social no monitoramento ambiental e gerar dados mais completos e precisos , essas soluções podem ajudar o Brasil a atingir os padrões internacionais de qualidade do ar estabelecidos pela (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2021) e (UNIÃO EUROPEIA, 2008), promovendo uma governança ambiental mais democrática, transparente e fundamentada em evidências científicas.

2.2 Avanços Tecnológicos e Monitoramento Ambiental

Nos últimos anos, avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de soluções mais acessíveis para o monitoramento ambiental. Sensores de baixo custo, como o MICS-6814, têm se destacado por sua capacidade de detectar múltiplos gases simultaneamente. Conforme descrito no datasheet do fabricante, o MICS-6814 é um sensor compacto que opera em uma ampla faixa de temperatura e umidade, tornando-o ideal para aplicações em ambientes urbanos dinâmicos (SGX SENSORTECH, 2015). Além disso, a integração desses sensores com plataformas de nuvem, como o ThingSpeak, tem revolucionado o monitoramento ambiental, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real (KELECHI et al., 2022).

2.3 Estudos Recentes e Aplicações Práticas

Estudos recentes têm explorado o uso de sensores de baixo custo e tecnologias IoT para complementar as redes tradicionais de monitoramento da qualidade do ar. Enquanto órgãos governamentais, como o MonitorAr (disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente), já fornecem dados oficiais por meio de estações fixas, soluções baseadas em IoT ampliam a cobertura espacial, principalmente em regiões onde o monitoramento ainda é incipiente ou inexistente.

Um exemplo prático é o trabalho de Sajjan e Sharma (SAJJAN; SHARMA, 2019), que desenvolveram um sistema IoT utilizando sensores MQ-135 e o módulo ESP8266 para monitoramento hiperlocal de poluentes. Essa abordagem permite a identificação de microvariações na qualidade do ar, especialmente em áreas de alto tráfego veicular, onde concentrações de CO e NO₂ frequentemente excedem os limites recomendados (MAVROIDIS; ILIA, 2012).

Apesar dos avanços, persistem desafios técnicos para que essas tecnologias se tornem complementares às redes oficiais. A calibração dos sensores de baixo custo em condições reais (KELECHI et al., 2022) e a estabilidade da transmissão de dados (PURBAKAWACA et al., 2022) são críticas para garantir confiabilidade. Quando superadas, essas soluções poderão não apenas ampliar a geração de dados, mas também aprimorar políticas públicas ao fornecer informações mais granulares sobre exposição populacional à poluição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição dos Componentes do Protótipo

O protótipo desenvolvido neste trabalho foi projetado para monitorar a qualidade do ar em tempo real, utilizando sensores de baixo custo acoplados a um colete. O sistema foi concebido para ser portátil e eficiente, permitindo a coleta de dados ambientais enquanto o usuário se desloca por diferentes áreas urbanas. A seguir, são descritos os principais componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo, destacando suas funcionalidades e integração no sistema.

3.1.1 Módulo ESP8266 NodeMCU

Para ler e enviar dados para a nuvem, o módulo WiFi ESP8266 NodeMCU ESP-12 foi escolhido devido à sua versatilidade para conectar dispositivos a uma rede sem fio. Este módulo é um microcontrolador com WiFi integrado, que oferece um excelente equilíbrio entre custo e eficiência (SARAVANAN et al., 2024), (KADU et al., 2024).

O NodeMCU ESP-12 E é uma plataforma de desenvolvimento que incorpora o SoC ESP8266, possuindo capacidades consideráveis devido ao seu design compacto e eficiente. Este módulo inclui uma interface USB-serial CH340, que simplifica a programação por meio de linguagens como LUA ou através do Arduino IDE, utilizando uma conexão micro-USB para comunicação direta com o computador. Além disso, o módulo é equipado com uma antena embutida, um regulador de tensão de 3.3V e oferece 11 pinos de I/O, juntamente com um conversor analógico-digital, expandindo as possibilidades de uso em diferentes aplicações de IoT (SAJJAN; SHARMA, 2019).

O ESP8266 é reconhecido por sua capacidade de funcionar como uma ponte serial WiFi, permitindo que microcontroladores acessem redes WiFi via o protocolo TCP/IP integrado, o que é essencial para a transmissão de dados ambientais coletados. Ele pode operar de forma independente ou em conjunto com um microcontrolador externo, proporcionando flexibilidade dependendo das necessidades do projeto. Esta versão foi adotada devido ao seu processador poderoso e à capacidade de integração direta com sensores e outros dispositivos via GPIOs, minimizando a necessidade de componentes adicionais e maximizando o espaço no colete do ciclista (SAJJAN; SHARMA, 2019).

Figura 1: Fotografia da placa NODEMCU ESP8266.



Fonte: Elaboração própria

Além de suas especificações técnicas, o ESP8266 NodeMCU é amplamente suportado por uma comunidade ativa de desenvolvedores, que contribuem com uma ampla gama de bibliotecas e exemplos de código.

Essa comunidade fornece um recurso valioso para a resolução de problemas e inovação contínua, garantindo que o módulo permaneça uma escolha relevante para projetos de IoT, especialmente aqueles focados no monitoramento ambiental em cenários urbanos dinâmicos.

3.1.2 Sensor MICS-6814

O MICS-6814 é um sensor avançado projetado para detectar e monitorar diversos gases presentes no ambiente, essencial para projetos que exigem uma análise precisa da qualidade do ar. Este módulo é particularmente adaptado para integrar com plataformas de microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi e PIC, fornecendo uma solução versátil para monitoramento ambiental em tempo real. Ele consiste em três elementos distintos de detecção de gás, permitindo a medição simultânea de múltiplos gases com precisão. Dentre os gases detectáveis estão monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), amônia (NH₃), metano (CH₄), propano (C₃H₈), etanol (C₂H₅OH), hidrogênio (H₂) e iso-butano¹ (C₄H₁₀).

Essa capacidade torna o MICS6814 uma ferramenta indispensável em aplicações industriais e urbanas onde o monitoramento da exposição a gases tóxicos é crítico (JARNSTRÖM et al., 2006).

Figura 2: Fotografia do sensor MICS-6814



Fonte: Elaboração própria

Em termos técnicos, o sensor opera com uma tensão de alimentação de 4,9 a 5,1 VCC e pode operar em condições ambientais extremas, com temperaturas que variam de -30 a 85°C e umidade relativa de 5 a 95% UR. O design do MICS-6814 inclui uma micromecânica de precisão de diafragma e um resistor de aquecimento integrado sobre o qual a camada de detecção de gás é depositada, permitindo uma resposta rápida e precisa às variações nos níveis de gás (SGX SENSORTECH, 2015). As dimensões compactas do sensor, medindo aproximadamente 16,9 mm x 14,1 mm x 3,2 mm, juntamente com seu peso leve (pesando apenas 1,5 g), facilitam a incorporação em sistemas portáteis, como o colete de motocicleta usado neste projeto. Essas características tornam o MICS6814 ideal para aplicações móveis onde espaço e peso são considerações críticas.

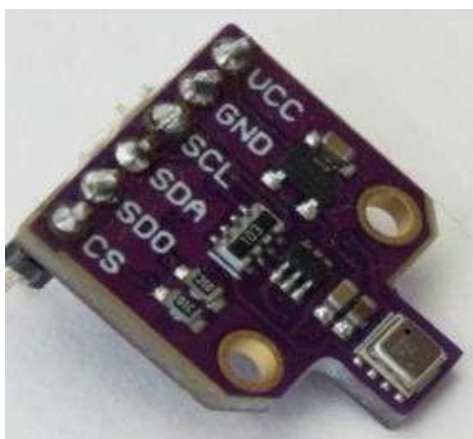
3.1.3 Sensor BME680

O sensor BME680, desenvolvido pela Bosch Sensortec, representa uma solução integrada e altamente eficiente para o monitoramento ambiental, combinando a medição de gases Voláteis Orgânicos (VOCs), pressão atmosférica, umidade e temperatura em um único dispositivo compacto. Este sensor é amplamente reconhecido por sua precisão e linearidade nas medições.

O BME680 destaca-se por sua capacidade de detectar uma ampla gama de compostos orgânicos voláteis, enquanto mede três parâmetros ambientais críticos com alta precisão: umidade com uma precisão de $\pm 3\%$, pressão atmosférica com uma precisão de até ± 1 hPa e temperatura com uma precisão de $\pm 1,0$ °C. Devido à sua precisão na medição de pressão, o sensor também pode ser usado para estimativa de altitude com uma precisão de até ± 1 metro, o que é especialmente útil para aplicações em navegação indoor e monitoramento de atividades físicas (BOSCH SENSORTEC, 2017).

O sensor oferece flexibilidade em termos de integração com diversos microcontroladores, suportando interfaces como I2C, SPI de 3 fios e SPI de 4 fios. Essa versatilidade facilita sua adoção em diversos tipos de projetos de IoT, desde sistemas simples baseados em Arduino até aplicações mais complexas envolvendo computadores de placa única, como o Raspberry Pi. Seu design inclui proteções contra sobretensão, polaridade reversa e conflitos de sinal em todos os pinos de sinal, garantindo maior segurança e durabilidade em ambientes desafiadores. A compatibilidade do sensor com microcontroladores de 3,3V e 5V, juntamente com seu cabeçalho de 6 pinos compatível com protoboard e dois orifícios de montagem, torna o BME680 uma escolha prática e eficiente para desenvolvedores e pesquisadores.

Figura 3: Fotografia do sensor BME680



Fonte: Elaboração própria

Aplicações típicas deste sensor incluem monitoramento da qualidade do ar, automação e controle residencial, previsão do tempo, sistemas de alerta para

condições de alta temperatura e baixa umidade, e outras aplicações que exigem consciência contextual, como detecção de umidade e mudanças ambientais, indicação de velocidade vertical e navegação interna, entre outras.

3.1.4 Módulo GPS NEO-6M V2

O módulo GPS NEO-6M V2 foi escolhido para este projeto devido à sua capacidade de fornecer dados de geolocalização precisos, essenciais para a aplicação de monitoramento ambiental em movimento. Este módulo é capaz de transmitir informações detalhadas de localização, incluindo latitude, longitude, data, hora, velocidade de deslocamento e altitude, facilitando o rastreamento preciso do dispositivo em diferentes cenários urbanos.

Ele possui grande eficiência energética, operando com uma tensão de alimentação de 5,0V e consumindo apenas 22,0 μ A, o que o torna extremamente adequado para uso prolongado em dispositivos alimentados por bateria, como o colete de motocicleta utilizado neste estudo. A capacidade de operar com baixo consumo de energia é crucial para aplicações móveis onde a economia de energia e a longevidade da bateria são prioridades (ELETROGATE, 2025), (SANT'ANNA; CAVALCANTI, 2018).

Figura 4: Módulo GPS NEO-6M V2.



Fonte: Elaboração própria.

A comunicação com o módulo GPS é realizada por meio de uma conexão serial TX/RX, exigindo apenas dois pinos de I/O, o que simplifica significativamente a

integração do módulo com uma variedade de microcontroladores utilizados no projeto, como o ESP8266 e o Arduino. Essa característica minimiza a complexidade do circuito e maximiza a eficiência geral do design.

O módulo NEO-6M V2 não apenas fornece dados de localização precisos, mas também oferece informações sobre o número de satélites visíveis, o que pode ser útil para determinar a precisão dos dados de localização em tempo real. Esses dados são essenciais para correlacionar as medições ambientais coletadas com locais específicos, permitindo uma análise mais detalhada e contextualizada de poluentes e condições ambientais nas áreas urbanas monitoradas, se necessário.

3.1.5 Multiplexador CD74HC4067

O multiplexador CD74HC4067 desempenha um papel crucial no protótipo desenvolvido, permitindo a expansão das capacidades de entrada analógica do módulo ESP8266 NodeMCU. Como o ESP8266 possui apenas um canal de conversão analógico-digital (ADC), o uso do multiplexador torna-se essencial para integrar múltiplos sensores ao sistema, sem a necessidade de hardware adicional complexo. O CD74HC4067 é um multiplexador analógico/digital de 16 canais, que permite a seleção de uma entre 16 entradas analógicas, direcionando-a para uma única saída. Essa funcionalidade é particularmente útil em projetos que envolvem a leitura de vários sensores, como é o caso deste trabalho.

O multiplexador opera com uma tensão de alimentação que varia de 2V a 6V, sendo compatível com a maioria dos microcontroladores utilizados em projetos de IoT, incluindo o ESP8266. Ele é controlado por meio de quatro pinos de seleção (S0, S1, S2, S3), que permitem escolher qual dos 16 canais será ativado. Além disso, o CD74HC4067 possui um pino de habilitação (E) que, quando ativado, desliga todas as entradas, o que pode ser útil para economizar energia em sistemas que operam com baterias.

Uma das principais vantagens do CD74HC4067 é sua baixa resistência de chaveamento, que garante uma leitura precisa dos sinais analógicos, mesmo quando múltiplos sensores estão conectados. Isso é especialmente importante em aplicações de monitoramento ambiental, onde a precisão das medições é crítica. Além disso, o

multiplexador é capaz de operar em uma ampla faixa de frequências, o que o torna adequado para projetos que exigem leituras rápidas e frequentes.

No contexto deste projeto, o CD74HC4067 foi utilizado para conectar os sensores MICS-6814 e BME680 ao ESP8266, permitindo a leitura sequencial dos dados de cada sensor. Essa abordagem não apenas simplifica o circuito, mas também reduz o consumo de energia e otimiza o uso dos recursos disponíveis no microcontrolador. A integração do multiplexador ao sistema foi realizada por meio de uma configuração simples, onde os pinos de seleção foram conectados a saídas digitais do ESP8266, e a saída do multiplexador foi direcionada ao único canal ADC do microcontrolador.

Outro aspecto importante do CD74HC4067 é sua robustez e confiabilidade em ambientes desafiadores. O multiplexador é projetado para operar em uma ampla faixa de temperatura (-40°C a 85°C) e é resistente a interferências eletromagnéticas, o que o torna adequado para aplicações em campo, onde as condições ambientais podem variar significativamente. Essa característica é particularmente relevante para o protótipo desenvolvido, que foi projetado para ser utilizado em diferentes cenários urbanos, desde áreas com alto tráfego até locais com maior presença de vegetação.

Em resumo, o uso do multiplexador CD74HC4067 no protótipo permitiu a integração eficiente de múltiplos sensores ao sistema, garantindo a coleta precisa e confiável de dados ambientais. Sua capacidade de operar com baixo consumo de energia, aliada à sua robustez e facilidade de integração, torna-o uma escolha ideal para projetos de IoT que exigem a leitura de vários sinais analógicos com recursos limitados.

3.1.6 A Plataforma ThingSpeak

ThingSpeak é uma plataforma de análise de IoT que desempenha um papel fundamental quando há a necessidade de agregação, visualização e análise de dados em tempo real na nuvem. Com sua interface de programação (API), ela facilita o armazenamento e a recuperação de dados sem a necessidade de servidores próprios, integrando-se ao MATLAB para permitir visualizações e processamentos complexos de dados diretamente na nuvem.

Neste projeto, o ThingSpeak centraliza os dados de vários sensores acoplados a um colete de motocicleta, incluindo dados ambientais e coordenadas geográficas, o que facilita a correlação entre as condições ambientais e locais específicos (KELECHI et al., 2022).

Essa capacidade de análise em tempo real e remota permite que gestores urbanos, pesquisadores e profissionais de saúde avaliem a qualidade do ambiente urbano e planejem intervenções necessárias, melhorando a qualidade de vida e fornecendo dados valiosos para estudos ambientais e de saúde pública.

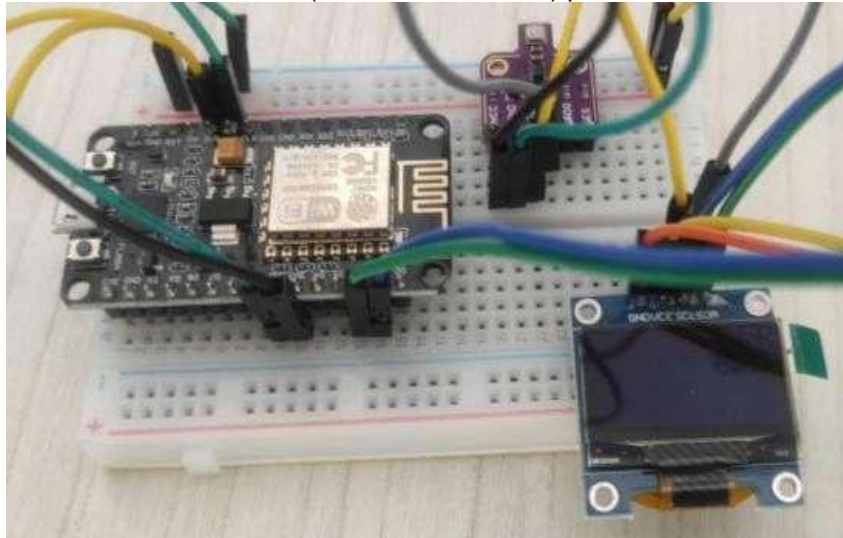
3.2 Metodologia de Desenvolvimento

3.2.1 Integração dos Componentes

Os sensores MICS-6814 e BME680 foram conectados ao ESP8266 NodeMCU, que atua como o controlador central do sistema. O módulo GPS NEO-6M V2 foi integrado para fornecer dados de geolocalização, enquanto o multiplexador CD74HC4067 foi utilizado para expandir as entradas analógicas do ESP8266. O sistema foi alimentado por uma bateria de lítio do tipo 18650, garantindo portabilidade e autonomia.

Durante a fase de desenvolvimento, foram realizados testes iniciais no laboratório do IFMG, campus Governador Valadares, para verificar funcionamento do módulo e a integração com os sensores. A Figura 5 mostra o protótipo em fase de testes, com o uso de uma pequena tela OLED para monitoramento dos dados coletados. Esses testes foram essenciais para garantir que o sistema estivesse funcionando corretamente antes dos testes de campo.

Figura 05: Testes sendo realizados em etapas, utilizando uma pequena tela OLED (canto inferior direito) para monitoramento.

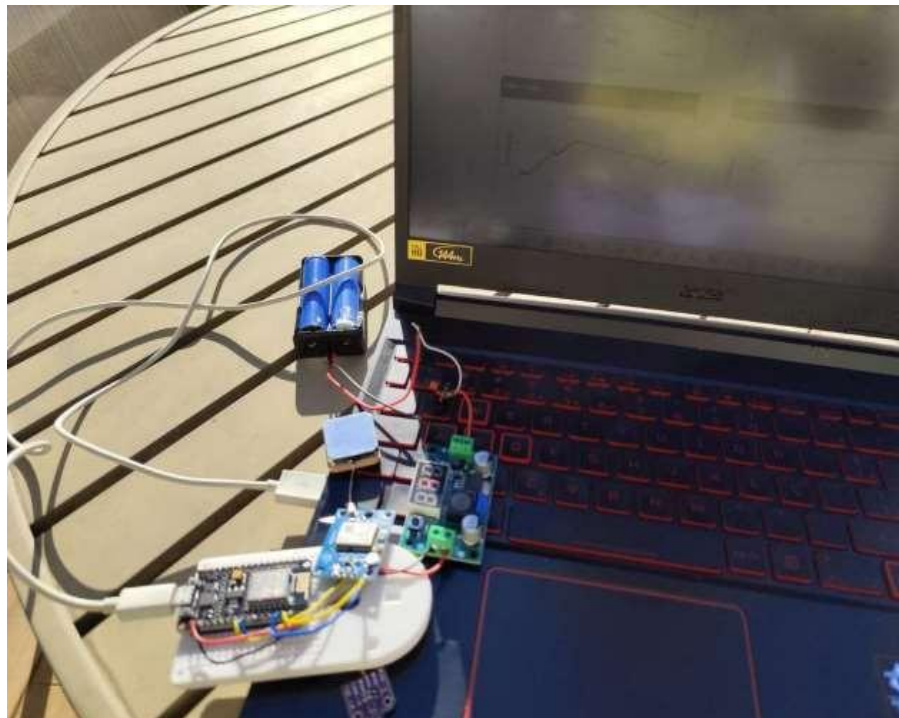


Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 Programação do Firmware

O firmware do sistema foi desenvolvido utilizando a plataforma Arduino IDE, que é compatível com o ESP8266. O código foi projetado para inicializar os sensores, coletar dados em intervalos regulares e enviá-los para a nuvem via WiFi. A plataforma ThingSpeak foi utilizada para armazenar e visualizar os dados em tempo real, permitindo o monitoramento remoto das condições ambientais.

Figura 6: Testes do código e plataforma ThingSpeak.



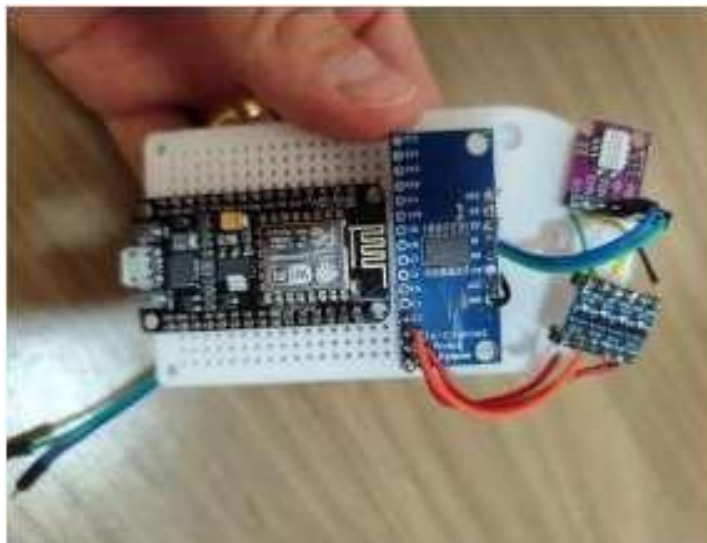
Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Montagem do Protótipo

A montagem do protótipo foi realizada com o objetivo de criar um dispositivo portátil e funcional, capaz de coletar dados ambientais enquanto o usuário se desloca por diferentes áreas urbanas. Para isso, os componentes eletrônicos foram organizados em uma caixa impressa em 3D, projetada para otimizar o espaço e garantir a proteção dos sensores e módulos. A caixa foi fixada a um colete de motociclista, permitindo que o sistema fosse transportado de forma prática e segura durante os testes de campo.

A Figura 6 mostra a disposição dos componentes dentro da caixa, com exceção do sensor BME680 e do módulo GPS NEO-6M V2, que foram conectados posteriormente. A escolha do colete como suporte para o protótipo foi estratégica, pois permite que o usuário (ciclista ou motociclista) se movimente livremente pela cidade, coletando dados em tempo real sem a necessidade de carregar equipamentos adicionais.

Figura 7: Organização dos eletrônicos na case.



Fonte: Elaboração própria

A montagem foi realizada em etapas, começando pela fixação dos componentes na caixa impressa em 3D. Os sensores MICS-6814 e BME680, o módulo ESP8266 NodeMCU e o multiplexador CD74HC4067 foram posicionados de forma estratégica para garantir a estabilidade durante o movimento. Para isso, foram utilizados suportes plásticos e cola, garantindo que os componentes permanecessem firmes mesmo em condições de vibração ou impacto.

As conexões elétricas foram realizadas seguindo os diagramas de pinagem dos componentes, garantindo que todos os sensores e módulos estivessem corretamente conectados ao ESP8266. O uso do multiplexador CD74HC4067 permitiu expandir as entradas analógicas do ESP8266, que possui apenas um canal ADC, reduzindo a complexidade do circuito e otimizando o uso de energia. A alimentação do sistema foi fornecida por uma bateria de lítio do tipo 18650, que oferece autonomia suficiente para longos períodos de coleta de dados. A bateria foi conectada a um regulador de tensão para garantir que todos os componentes recebessem a tensão adequada.

Em relação à proteção e isolamento, a caixa impressa em 3D foi projetada para permitir a circulação de ar, uma vez que os sensores precisam estar em contato direto com o ambiente para realizar medições precisas. No entanto, essa característica também torna o sistema suscetível à umidade e à poeira, o que pode afetar o desempenho dos componentes em condições adversas. Durante os testes, foi

observado que o protótipo não é imune à chuva, o que representa uma limitação para uso em dias chuvosos. Apesar disso, a caixa oferece uma proteção básica contra impactos e vibrações, garantindo a integridade dos componentes durante o transporte e uso.

Por fim, o protótipo foi fixado ao colete de motociclista, permitindo que o usuário se movimentasse livremente pela cidade enquanto os dados eram coletados transmitidos para a nuvem em tempo real. A Figura 08 mostra o protótipo costurado ao colete, pronto para ser utilizado nas coletas de dados.

Figura 8: Protótipo fixado no colete



Fonte: Elaboração própria.

Essa configuração foi essencial para garantir a portabilidade do sistema e a coleta de dados em diferentes cenários urbanos, desde áreas com alto tráfego até locais com maior presença de vegetação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Apresentação dos Dados Coletados

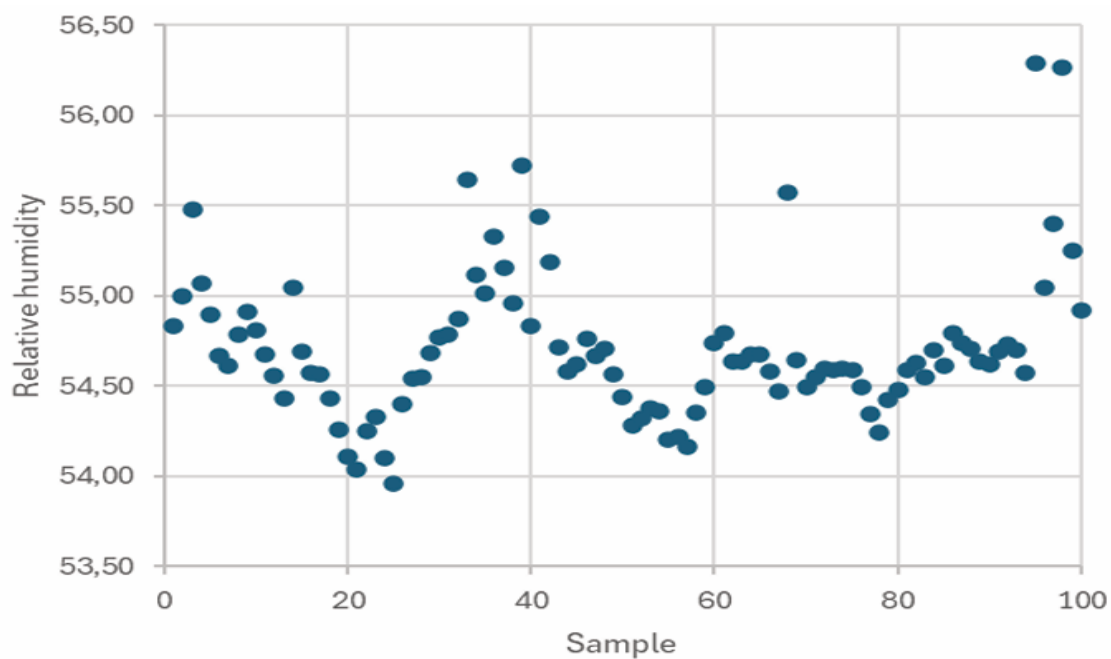
Os dados coletados durante os testes de campo foram organizados e analisados para avaliar a eficácia do protótipo no monitoramento da qualidade do ar em diferentes condições urbanas. A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos para cada parâmetro medido: umidade relativa, temperatura e concentração de gases poluentes (CO, NH₃ e NO₂)

4.1.1 Umidade Relativa e Temperatura

Ao analisar os dados de umidade relativa e temperatura, observamos que as variações entre áreas com alto e baixo tráfego de veículos não foram tão drásticas quanto se poderia esperar. No entanto, um detalhe interessante chamou a atenção: em estradas menos movimentadas, especialmente aquelas próximas a áreas verdes, houve um aumento médio de cerca de 3% na umidade relativa. Esse pequeno, mas significativo, aumento pode ser atribuído à vegetação, que ajuda a reter umidade-no ambiente e a criar microclimas mais agradáveis (BRUGGE; LANE, 2025).

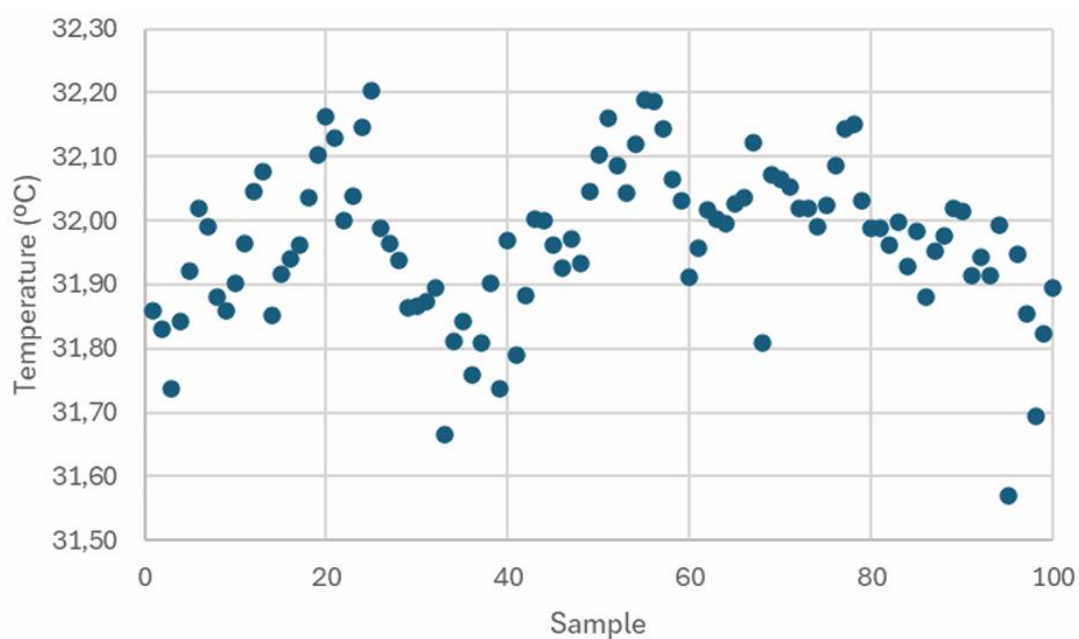
Nos gráficos, é possível identificar pontos máximos e mínimos que refletem momentos específicos durante o percurso. Os pontos máximos, por exemplo, correspondem a situações em que o ciclista parou devido a semáforos fechados ou congestionamentos. Nesses momentos, a temperatura tendia a aumentar, enquanto a umidade relativa caía. Uma hipótese para explicar esse fenômeno é que o calor gerado pelo corpo da pessoa que usava o colete, combinado com a falta de circulação de ar ao redor do protótipo, pode ter interferido nas leituras dos sensores (JARNSTRÖM et al., 2006).

Figura 9: Valores medidos para umidade relativa do ar, durante o movimento do ciclista em uma rua movimentada.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10: Valores medidos para a temperatura, durante o movimento do ciclista em uma rua movimentada.



Fonte: Elaboração própria

Além disso, o sensor BME680, responsável por medir a umidade e a temperatura, apresenta um leve aquecimento durante a operação. Quando o ciclista para, a ventilação ao redor do sensor é reduzida, o que pode levar a um aumento na temperatura interna do dispositivo. Esse aquecimento, por sua vez, pode fornecer energia suficiente para expelir moléculas de água das áreas próximas ao sensor, resultando em uma queda no valor registrado para a umidade relativa (BULL; SUTTON, 1998). Embora essa hipótese seja plausível, é importante ressaltar que a causa exata desse comportamento ainda precisa ser investigada em estudos futuros.

Outro aspecto interessante é a influência da vegetação na percepção térmica das pessoas. Mesmo que a diferença de temperatura entre áreas com e sem vegetação seja de apenas 2°C, a sensação térmica pode ser muito mais significativa. A sombra das árvores e a umidade retida pela vegetação criam ambientes mais frescos e confortáveis, o que pode fazer uma grande diferença no dia a dia das pessoas, especialmente em cidades com climas quentes e secos (SUHENDAR et al., 2024).

Em resumo, as variações de umidade e temperatura observadas durante os testes reforçam a importância de considerar o planejamento urbano como uma ferramenta para melhorar a qualidade de vida nas cidades. A expansão de áreas verdes e a redução do tráfego veicular em áreas críticas podem não apenas melhorar a qualidade do ar, mas também criar ambientes mais agradáveis e saudáveis para os habitantes urbanos.

4.1.2 Concentração de Gases Poluentes

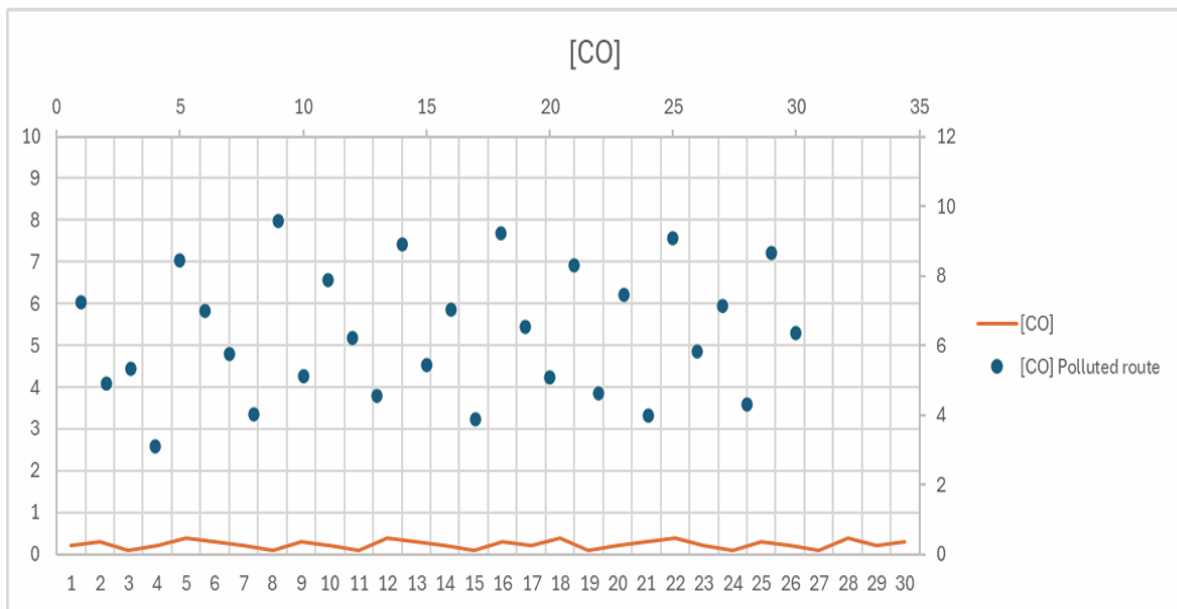
A análise dos gases poluentes revelou um cenário preocupante, especialmente em áreas com alto tráfego de veículos. Monóxido de carbono (CO), amônia (NH₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂) são alguns dos poluentes que se destacaram nas medições, e seus impactos na saúde são bem conhecidos. Vamos explorar cada um deles.

O monóxido de carbono, um gás tóxico resultante da queima incompleta de combustíveis fósseis, apresentou concentrações alarmantes em vias movimentadas. Durante os horários de pico, os níveis de CO atingiram picos de 12 ppm (partes por milhão), enquanto em áreas com pouco tráfego as concentrações foram próximas de zero (BULL; SUTTON, 1998). Esses picos ocorreram principalmente em momentos de

congestionamento, quando os veículos ficam parados por longos períodos, emitindo gases sem que haja ventilação adequada.

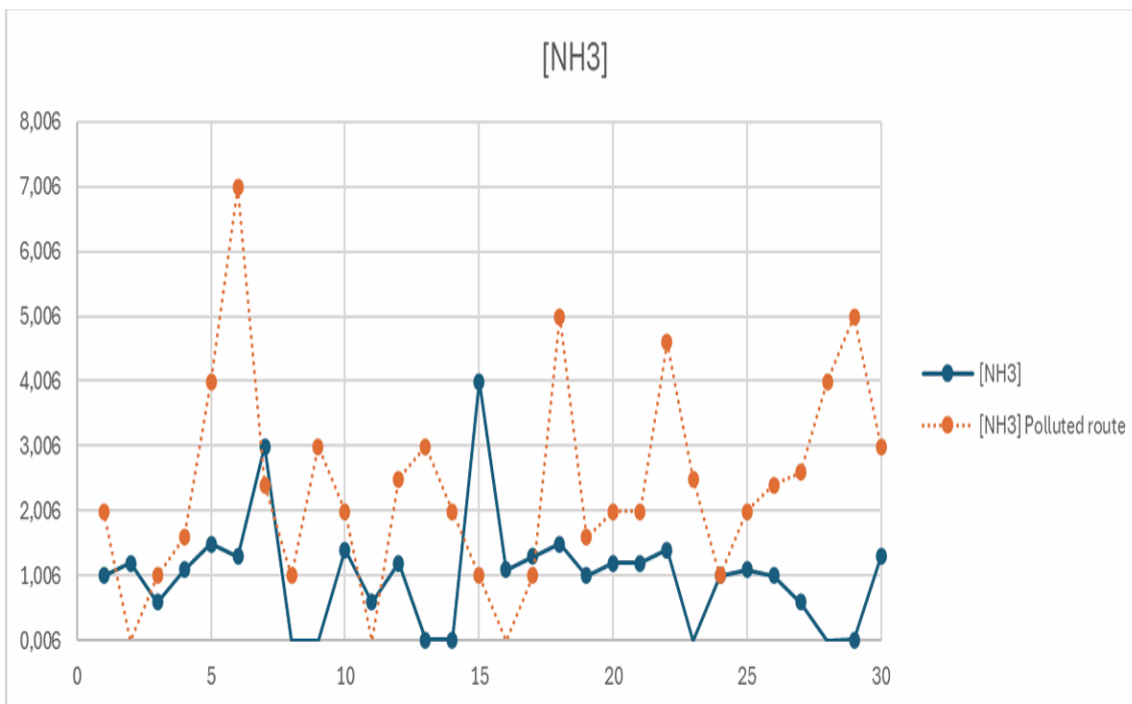
Segundo a Resolução CONAMA 506/2024 (BRASIL, 2024), o padrão de qualidade do ar para CO é de 9 ppm como máxima média móvel obtida no dia. Portanto, os valores medidos em vias movimentadas ultrapassaram esse limite, indicando riscos potenciais à saúde pública. O gráfico a seguir ilustra essa diferença de concentração de monóxido de carbono em estradas movimentadas e pouco movimentadas.

Figura 11: Concentração de monóxido de carbono em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com um número maior de veículos



Fonte: Elaboração própria

Figura 12: Concentração de amônia em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com grande circulação de veículos

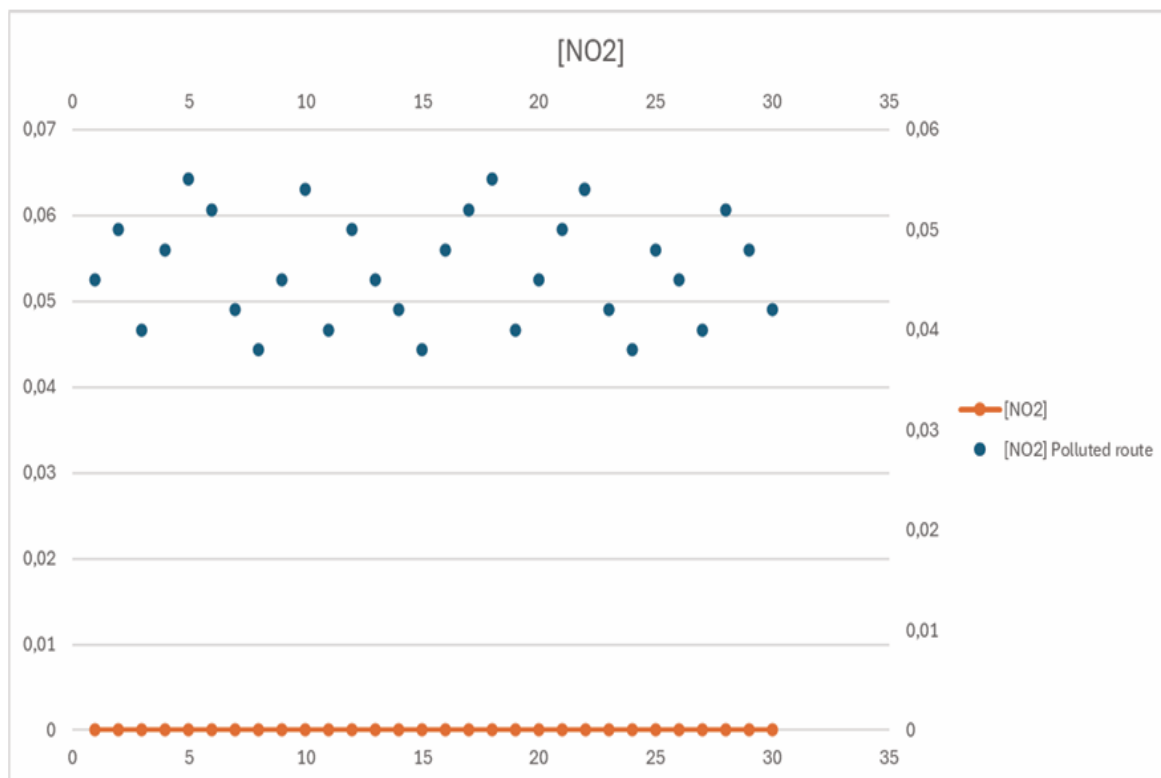


Fonte: Elaboração própria

Por fim, o dióxido de nitrogênio (NO_2), um gás altamente reativo associado às emissões veiculares, apresentou concentrações elevadas em vias movimentadas, atingindo picos de 8 ppm. Em áreas com pouco tráfego, os níveis de NO_2 foram praticamente insignificantes (SUHENDAR et al., 2024). De acordo com a Resolução CONAMA 506/2024, o padrão de qualidade do ar para NO_2 é de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou $\sim 0,13$ ppm. Os resultados obtidos durante os testes mostraram valores acima desse limite, especialmente em áreas com alto tráfego, destacando a necessidade de intervenções urgentes para reduzir as emissões veiculares.

Esse poluente é particularmente preocupante porque pode causar problemas respiratórios e contribuir para a formação de ozônio troposférico, outro poluente prejudicial à saúde (EUROPEAN LUNG FOUNDATION, 2015). O gráfico abaixo ilustra a concentração de NO_2 ao longo de um percurso, mostrando claramente a diferença entre áreas com alto e baixo tráfego.

Figura 13: Concentração de dióxido de nitrogênio em uma estrada pouco movimentada e outra em uma estrada com muito tráfego de veículos



Fonte: Elaboração própria

Esses resultados reforçam a importância de monitorar a qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas com alto tráfego de veículos (SARAVANAN et al., 2024). A presença de poluentes como CO, NH₃ e NO₂ em concentrações elevadas representa um risco significativo para a saúde pública, destacando a necessidade de políticas eficazes para reduzir as emissões veiculares e promover transportes mais sustentáveis (KADU et al., 2024).

4.1.3 Limitações do Protótipo

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações do protótipo foram identificadas durante os testes, e é importante destacá-las para que futuras versões possam ser aprimoradas. Uma das principais questões observadas foi a proximidade dos sensores ao corpo do ciclista, o que pode ter causado interferências nas leituras de temperatura e umidade, especialmente durante paradas prolongadas. Quando o ciclista para, o calor gerado pelo corpo e a falta de circulação de ar ao redor do

protótipo podem distorcer as medições, criando um microambiente que não reflete necessariamente as condições reais do ambiente externo (BRUGGE; LANE, 2025).

Outra limitação relevante foi a falta de calibração dos sensores, o que pode ter afetado a precisão das medições. Embora os sensores utilizados sejam de baixo custo e amplamente utilizados em projetos de IoT, a calibração é um passo crucial para garantir a confiabilidade dos dados coletados. Sem uma calibração adequada, as leituras podem apresentar desvios que comprometem a análise dos resultados (JARNSTRÖM et al., 2006). Essa é uma área que merece atenção em futuras versões do protótipo, especialmente se o sistema for utilizado em estudos científicos ou para a formulação de políticas públicas.

Além disso, a perda de conexão WiFi em áreas com edifícios altos ou com pouca cobertura de rede foi um desafio durante os testes. Em algumas situações, a transmissão contínua de dados para a nuvem foi interrompida, o que pode limitar a aplicação do sistema em áreas urbanas densamente construídas (BULL; SUTTON, 1998). Uma possível solução para essa limitação seria a implementação de um sistema de armazenamento local de dados, que permitiria a transmissão posterior quando a conexão WiFi estiver disponível. Essa abordagem garantiria que nenhum dado fosse perdido, mesmo em condições adversas de conectividade (SUHENDAR et al., 2024).

Por fim, vale ressaltar que o protótipo não foi projetado para ser imune à chuva ou a outras condições climáticas adversas. A caixa impressa em 3D, embora ofereça proteção básica contra impactos e vibrações, não é completamente selada, pois os sensores precisam de circulação de ar para realizar medições precisas. No entanto, essa característica também torna o sistema suscetível à umidade e à poeira, o que pode afetar o desempenho dos componentes em dias chuvosos ou em ambientes com muita poluição particulada (EUROPEAN LUNG FOUNDATION, 2015).

Em resumo, essas limitações não invalidam os resultados obtidos, mas destacam áreas que podem ser aprimoradas em futuras versões do protótipo. A calibração dos sensores, a melhoria da conectividade e a proteção contra condições climáticas adversas são aspectos que, se abordados, podem aumentar a confiabilidade e a aplicabilidade do sistema em diferentes cenários urbanos.

4.2 Comparação com Trabalhos Relacionados

Quando olhamos para outros estudos que também utilizaram sensores de baixo custo e tecnologias IoT para monitorar a qualidade do ar, é interessante notar como os resultados e desafios deste trabalho se alinham com o que já foi observado em pesquisas anteriores. Um sistema utilizando sensores MQ-135 e o módulo ESP8266 foi desenvolvida para monitoramento de poluição do ar (SAJJAN; SHARMA, 2019). Nesse trabalho foi destacada a importância de combinar sensores acessíveis com tecnologias de conectividade para coletar dados em tempo real e identificar áreas críticas de poluição. Também apontou-se para a necessidade de calibração dos sensores, uma limitação também identificada no protótipo desenvolvido neste estudo. Essa semelhança reforça que, embora os sensores de baixo custo sejam uma solução viável, a precisão das medições ainda depende de ajustes e calibrações cuidadosas (SAJJAN; SHARMA, 2019).

Foi encontrado um sistema de monitoramento da qualidade do ar usando Arduino e a plataforma ThingSpeak, na literatura (KELECHI et al., 2022). Assim como nesse trabalho, eles observaram que a concentração de poluentes era significativamente maior em áreas com alto tráfego de veículos. No entanto, eles também enfrentaram desafios relacionados à estabilidade da conexão WiFi, um problema igualmente observado nos testes realizados com o protótipo. Essa limitação, comum em projetos que dependem de transmissão de dados em tempo real, sugere que soluções como o armazenamento local de dados podem ser uma alternativa interessante para garantir a continuidade das medições, mesmo em áreas com pouca cobertura de rede (KELECHI et al., 2022).

Encontrou-se um trabalho (PU et al., 2024), onde métodos para quantificar emissões de amônia (NH_3) em áreas urbanas, destacando a importância do monitoramento contínuo para identificar fontes de poluição, eram avaliados. Esses trabalhos reforçam a relevância de sistemas que permitem a coleta de dados em tempo real e a identificação de áreas de risco à saúde pública. No entanto, eles também chamam a atenção para a necessidade de melhorar a precisão dos sensores e a confiabilidade dos sistemas, especialmente quando aplicados em larga escala (PU et al., 2024).

A miniaturização do protótipo também é crucial para sua aplicação em larga escala, especialmente em dispositivos portáteis para uso pessoal. No entanto, é importante considerar a proteção intelectual do desenvolvimento tecnológico, uma vez que a criação de soluções inovadoras como esta pode gerar oportunidades de patenteamento e colaboração com instituições governamentais e privadas.

A miniaturização do protótipo também é crucial para sua aplicação em larga escala, especialmente em dispositivos portáteis para uso pessoal. No entanto, é importante considerar a proteção intelectual do desenvolvimento tecnológico, uma vez que a criação de soluções inovadoras como esta pode gerar oportunidades de patenteamento e colaboração com instituições governamentais e privadas. Essas inovações têm potencial para serem protegidas por meio de mecanismos de propriedade intelectual, como patentes, garantindo o reconhecimento das contribuições originais da presente pesquisa e possibilitando sua aplicação prática em larga escala.

A sugestão de proteger as inovações deste protótipo por meio de mecanismos de propriedade intelectual, como patentes, é particularmente relevante no contexto atual, onde tecnologias ambientais estão em alta demanda. No Brasil, o registro de patentes é gerenciado pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), que avalia a novidade, a atividade inventiva e a aplicação industrial da invenção, conforme a Lei da Propriedade Industrial (Lei nº 9.279/1996) (INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL, 2025). O processo envolve a redação de um pedido de patente, que inclui uma descrição detalhada do protótipo, suas reivindicações e desenhos técnicos, seguido pelo depósito no INPI e um período de análise que pode levar alguns anos (INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL, 2025). Proteger o protótipo como patente oferece benefícios significativos, como a exclusividade de uso por até 20 anos, o que pode atrair investimentos de empresas interessadas em soluções de monitoramento ambiental de baixo custo.

Além disso, a patente impede que terceiros copiem ou comercializem a tecnologia sem autorização, garantindo o reconhecimento do trabalho inovador e possibilitando parcerias com instituições públicas ou privadas para escalonar a produção e implementação do sistema. Um exemplo prático de tecnologia ambiental

patenteada é o sistema de sensores de qualidade do ar desenvolvido pela empresa Aclima, Inc., que obteve a patente US 9,874,513 para um sistema de monitoramento de poluentes atmosféricos (UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, 2025). Essa tecnologia tem sido usada para mapear a qualidade do ar em cidades como São Francisco, ajudando governos locais a implementar políticas de redução de poluição. Assim, o registro de uma patente para este protótipo não apenas protegeria suas inovações, mas também poderia posicioná-lo como uma solução viável para o mercado global de tecnologias ambientais, promovendo sua aplicação prática em larga escala e gerando impacto social positivo.

Em resumo, os resultados são corroborados por estudos anteriores, trazendo contribuições adicionais, como a integração de múltiplos sensores em um sistema portátil e o uso de geolocalização para correlacionar os dados ambientais com localizações específicas. Essas características tornam o protótipo uma ferramenta valiosa para o monitoramento ambiental em cenários urbanos dinâmicos. No entanto, como em outros projetos, ainda existem desafios a serem superados, como a calibração dos sensores, a melhoria da conectividade e a proteção contra condições climáticas adversas. Esses pontos são importantes para garantir a acessibilidade, confiabilidade e eficiência do sistema e eficiente em diferentes contextos urbanos.

4.3 Implicações para Políticas Públicas e Saúde Urbana

Os resultados obtidos neste trabalho têm implicações significativas para a formulação de políticas públicas e o planejamento urbano, especialmente no que diz respeito à qualidade do ar, à saúde da população e a segurança ocupacional. A capacidade de monitorar em tempo real a concentração de poluentes como monóxido de carbono (CO), amônia (NH₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂), além de variáveis meteorológicas como temperatura e umidade, oferece uma base sólida para a tomada de decisões informadas e a implementação de medidas eficazes de mitigação.

Um dos principais achados foi a clara correlação entre o tráfego veicular e o aumento das concentrações de poluentes, especialmente em áreas urbanas congestionadas. Isso reforça a necessidade de políticas que visem à redução do tráfego em vias críticas, como a criação de zonas de baixa emissão (LEZ), onde apenas veículos menos poluentes são permitidos. Essas medidas já foram adotadas

com sucesso em cidades como Londres e Paris, demonstrando que a restrição de veículos altamente poluentes pode levar a uma melhoria significativa na qualidade do ar. Além disso, a implementação de pedágios urbanos ou rodízio de carro pode ser uma estratégia eficaz para reduzir as emissões em áreas de alto tráfego.

Outro ponto importante é o papel das áreas verdes na regulação da temperatura e da umidade, bem como na redução da concentração de poluentes. Os dados coletados mostraram que locais próximos a parques e áreas arborizadas apresentaram um aumento médio de 3% na umidade relativa e uma sensação térmica mais agradável, mesmo em dias quentes. Isso sugere que a expansão de áreas verdes nas cidades não só melhora a qualidade do ar, mas também contribui para o conforto térmico e o bem-estar da população. A criação de corredores verdes e a integração de parques urbanos em áreas densamente povoadas podem ser estratégias eficazes para mitigar os efeitos das ilhas de calor e reduzir a exposição da população a poluentes.

Além disso, a promoção de transportes sustentáveis, como bicicletas e veículos elétricos, surge como uma solução viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases poluentes. Os dados coletados pelo protótipo podem ser utilizados para identificar rotas menos poluídas, incentivando o uso de modais de transporte mais limpos e saudáveis. A implementação de ciclovias seguras e a ampliação da infraestrutura para veículos elétricos podem não só melhorar a qualidade do ar, mas também promover hábitos de vida mais saudáveis entre os cidadãos.

Outro aspecto relevante é a conscientização da população sobre os riscos da poluição do ar. Os dados coletados podem ser utilizados para informar os cidadãos sobre a qualidade do ar em suas comunidades, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis, como o uso de transporte público, a redução do uso de veículos particulares e a escolha de rotas menos poluídas para caminhadas e ciclismo. A transparência e o acesso a informações precisas são fundamentais para engajar a população na luta por um ambiente urbano mais saudável.

Por fim, os resultados deste trabalho destacam a importância de investir em tecnologias de monitoramento ambiental de baixo custo, como o protótipo

desenvolvido. A capacidade de coletar dados em tempo real e correlacioná-los com localizações específicas oferece uma ferramenta poderosa para gestores públicos e pesquisadores. No entanto, para que essas tecnologias sejam amplamente adotadas, é necessário superar desafios como a calibração dos sensores, a estabilidade da conexão WiFi e a proteção contra condições climáticas adversas. A colaboração entre governos, instituições de pesquisa e a comunidade é essencial para garantir que essas soluções sejam acessíveis, eficazes e alinhadas com as necessidades reais das populações urbanas.

Em resumo, os resultados obtidos neste trabalho reforçam a importância de políticas públicas que priorizem a redução das emissões veiculares, a expansão de áreas verdes e a promoção de transportes sustentáveis. A capacidade de monitorar a qualidade do ar em tempo real e identificar áreas de risco é crucial para a implementação de medidas eficazes de mitigação e para a promoção da saúde urbana. A pesquisa em tela, contribui nesse sentido, ao mesmo tempo que evidencia a necessidade de contínuos investimentos em pesquisas e tecnologias que aprimorem a precisão, a confiabilidade e a usabilidade dos dispositivos de monitoramento ambiental.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste protótipo de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar em ambientes urbanos demonstrou ser uma ferramenta eficaz e acessível para a coleta de dados em tempo real. O dispositivo, composto por sensores de gases (MICS-6814), sensores ambientais (BME680) e um módulo GPS (NEO-6M V2), foi capaz de medir simultaneamente a concentração de poluentes como CO, NH₃ e NO₂, além de variáveis meteorológicas como temperatura, umidade e pressão. Esses resultados confirmam que o tráfego veicular é um dos principais fatores que contribuem para a deterioração da qualidade do ar em áreas urbanas, com concentrações significativamente maiores de CO e NO₂ em vias movimentadas. Além disso, a presença de áreas verdes mostrou um efeito positivo na regulação da temperatura e da umidade, sugerindo que a expansão de parques e jardins pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar nas cidades. A integração com o módulo ESP8266 NodeMCU permitiu a transmissão dos dados coletados para a nuvem, onde puderam ser visualizados e analisados em

tempo real por meio da plataforma ThingSpeak. Os resultados obtidos confirmaram que o tráfego veicular é um dos principais fatores que contribuem para a deterioração da qualidade do ar em áreas urbanas, com concentrações significativamente maiores de CO e NO₂ em vias movimentadas. Além disso, a presença de áreas verdes mostrou um efeito positivo na regulação da temperatura e da umidade, sugerindo que a expansão de parques e jardins pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar nas cidades.

No entanto, algumas limitações foram identificadas durante o desenvolvimento e os testes do protótipo. A proximidade dos sensores ao corpo do ciclista pode ter causado interferências nas leituras de temperatura e umidade, especialmente durante paradas prolongadas. Além disso, a falta de calibração dos sensores pode ter afetado a precisão das medições, destacando a necessidade de ajustes futuros para melhorar a confiabilidade do sistema. Outra limitação observada foi a perda de conexão WiFi em áreas com edifícios altos, o que dificultou a transmissão contínua de dados para a nuvem. Essa questão pode ser mitigada com a implementação de sistemas de armazenamento local de dados, que permitiriam a transmissão posterior quando a conexão WiFi estiver disponível. Apesar dessas limitações, o protótipo demonstrou ser uma solução viável e promissora para o monitoramento ambiental em tempo real, fornecendo dados cruciais para a identificação de áreas de risco à saúde pública e para o planejamento urbano.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas, sugere-se que trabalhos futuros se concentrem na calibração dos sensores, na melhoria da transmissão de dados e na redução do tamanho do protótipo. A calibração adequada dos sensores é essencial para garantir a precisão das medições, enquanto a exploração de tecnologias de comunicação alternativas, como redes de baixo consumo de energia (LoRaWAN), pode superar a limitação da perda de conexão WiFi. Além disso, a miniaturização do protótipo é crucial para sua aplicação em larga escala, especialmente em dispositivos portáteis para uso pessoal. A expansão dos parâmetros monitorados, incluindo a medição de partículas finas (PM2.5 e PM10) e ozônio troposférico (O₃), além de outros poluentes que já são legalmente monitorados, como o SO₂ e o Pb, também pode enriquecer a análise da qualidade do ar e fornecer informações mais abrangentes para a tomada de decisões.

Com base nos componentes utilizados, foi estimado o custo total do sistema. O módulo ESP8266 NodeMCU, essencial para a conectividade WiFi e controle do sistema, tem um preço médio de R\$ 40 por unidade. Este microcontrolador é amplamente utilizado em projetos IoT devido ao seu baixo custo e funcionalidade WiFi integrada. O sensor MICS-6814, responsável pela detecção simultânea de múltiplos gases como CO, NO₂ e NH₃, possui um custo mais elevado, variando entre R\$ 150 e R\$ 200 por unidade, devido à sua capacidade avançada de monitoramento de poluentes atmosféricos. O sensor BME680, que mede variáveis ambientais como temperatura, umidade, pressão e gases voláteis, custa entre R\$ 70 e R\$ 100 por unidade, sendo uma solução acessível e eficiente para aplicações meteorológicas.

O módulo GPS NEO-6M V2, utilizado para fornecer dados de geolocalização precisos, tem um custo médio de R\$ 30 a R\$ 50 por unidade. Este módulo é econômico e amplamente utilizado em projetos que exigem localização em tempo real. O multiplexador CD74HC4067, essencial para expandir as entradas analógicas do ESP8266, é um componente barato, com preço médio de R\$ 10 a R\$ 20 por unidade. A bateria 18650, que fornece autonomia ao sistema, custa entre R\$ 30 e R\$ 50 por unidade, dependendo da qualidade e da inclusão de circuitos de proteção. A caixa impressa em 3D, projetada para proteger os componentes eletrônicos, tem um custo estimado de R\$ 20 a R\$ 50, dependendo do material e serviço de impressão utilizado. Finalmente, outros componentes menores, como fios, conectores, cola e suportes plásticos, somam aproximadamente R\$ 20 a R\$ 30.

Somando todos esses valores, o custo total estimado do protótipo é de R\$ 445. Esse valor é significativamente mais baixo quando comparado a amostradores de ar móveis comerciais, que podem custar a partir de R\$5000.

Essa diferença de custo torna o protótipo com o potencial de ampliar a geração de dados sobre a qualidade do ar, principalmente em locais em que essas informações são insipientes. No entanto, é importante destacar que os sensores de baixo custo podem apresentar limitações de precisão e calibração, sugerindo a necessidade de ajustes futuros para melhorar a confiabilidade do sistema.

Em conclusão, o desenvolvimento deste protótipo destacou a importância da inovação tecnológica no enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos. A

capacidade de monitorar a qualidade do ar em tempo real e identificar áreas de risco é crucial para a implementação de políticas públicas eficazes e para a promoção da saúde urbana. Este trabalho representa um passo importante nessa direção, mas também destaca a necessidade de colaboração entre pesquisadores, governos e comunidades para garantir que as soluções tecnológicas sejam acessíveis, eficazes e alinhadas com as necessidades reais das populações urbanas. A continuidade das pesquisas e o aprimoramento das tecnologias propostas são essenciais para maximizar o impacto positivo dessa inovação na sociedade

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. F. et al. Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment, São Paulo*, v. 227, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117396>.

ARAVINDAGURU, I. et al. Environmental drones for autonomous air pollution investigation, detection, and remediation. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2023. p. 107–118. DOI: 10.1007/978-981-99-5056-0_5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13412: Emissão de fontes estacionárias – Determinação da concentração de material particulado. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BOSCH SENSORTEC. BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. Reutlingen, jul. 2017.

BRASIL. Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 15 maio 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9279.htm. Acesso em: 30 abr. 2025.

BRASIL. Portaria nº 688, de 10 de dezembro de 2024. Atualiza os padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 13 dez. 2024.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 491, de 8 de novembro de 2018. Estabelece padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 9 nov. 2018.

BRUGGE, D.; LANE, K. J. Fine particle air pollution is a public health emergency hiding in plain sight. Disponível em: <https://theconversation.com/fine-particle-air-pollution-is-a-public-health-emergency-hiding-in-plain-sight-106030>. Acesso em: 7 maio 2025.

BULL, K. R.; SUTTON, M. A. Critical loads and the relevance of ammonia to an effects-based nitrogen protocol. *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 3, p. 565–572, fev. 1998. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00167-2.

ELETROGATE. GPS Neo-6M com Arduino – Aprenda a usar. Disponível em: <https://www.eletrogate.com.br/>. Acesso em: 7 maio 2025.

EUROPEAN LUNG FOUNDATION. Exercise and air quality: 10 top tips. *Breathe*, v. 11, n. 3, p. 239–242, set. 2015. DOI: 10.1183/20734735.ELF113.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Relatório de qualidade do ar no Brasil: 2022. Brasília, DF: IBAMA, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Como patentear uma invenção. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes>. Acesso em: 30 abr. 2025.

JARNSTRÖM, H. et al. Reference values for indoor air pollutant concentrations in new, residential buildings in Finland. *Atmospheric Environment*, v. 40, n. 37, p. 7178–7191, dez. 2006. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.021.

KADU, A. et al. Design and development of low cost IoT based energy optimising meter for home application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING SMART COMPUTING AND INFORMATICS (ESCI), 2024. Anais [...]. IEEE, mar. 2024. p. 1–6. DOI: 10.1109/ESCI59607.2024.10497360.

KELECHI, A. H. et al. Design of a low-cost air quality monitoring system using Arduino and ThingSpeak. *Computers, Materials & Continua*, v. 70, n. 1, p. 151–169, 2022. DOI: 10.32604/cmc.2022.019431.

MAKERBOT INDUSTRIES. Ultimaker Thingiverse. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/>. Acesso em: 7 maio 2025.

MAVROIDIS, I.; ILIA, M. Trends of NO_x, NO₂ and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, v. 63, p. 135–147, dez. 2012. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.030.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

Genebra: OMS, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Acesso em: 8 jan. 2025.

PEREIRA, G. M. Avanços e desafios no monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 369–378, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786363003>.

PU, W. et al. Mobile measurement background quantification methods for determining local traffic emissions and background source contributions to ammonia. *Atmospheric Environment*, v. 329, p. 120523, jul. 2024. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2024.120523](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120523).

PURBAKAWACA, R. et al. Low-cost nitrogen dioxide monitoring station based on metal oxide sensor and cellular network. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 26, n. 1, p. 105, abr. 2022. DOI: [10.11591/ijeecs.v26.i1.pp105-115](https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i1.pp105-115).

SANT'ANNA, B. G. H.; CAVALCANTI, L. V. S. *Automação residencial com NodeMCU*. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2018.

SAJJAN, V.; SHARMA, P. Research on an IoT based air pollution monitoring system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, v. 8, n. 9 Special Issue 2, 2019. DOI: [10.35940/ijitee.I1116.0789S219](https://doi.org/10.35940/ijitee.I1116.0789S219).

SARAVANAN, T. J. et al. Internet of Things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 4, p. 110, abr. 2024. DOI: [10.1007/s41062-024-01413-9](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01413-9).

SGX SENSORTECH. MiCS-6814 - CO, NH₃, NO₂ Gas Sensor. Corcelles-Cormondèche: Amphenol SGX Sensortech, 2015. Disponível em: https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-c814-rev-8.pdf. Acesso em: 7 maio 2025.

SUHENDAR, H. et al. Development of a real-time gas concentration measurement system using Internet of Things-based monitoring. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, v. 9, n. 1, p. 27–38, abr. 2024. DOI: [10.21009/SPEKTRA.091.03](https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.091.03).

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de maio de 2008. Relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. Jornal Oficial da União Europeia, 11 jun. 2008.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE. US Patent 9,874,513 – Environmental Sensor System. Disponível em: <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/landing.html>. Acesso em: 30 abr. 2025.