

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – ICIAG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL – PPGMQ
MESTRADO EM QUALIDADE AMBIENTAL

RENER MARTINS DE MOURA

**PROTÓTIPO COM SENSORES EMBARCADOS EM RPA/*DRONE* PARA COLETA
DE DADOS DA QUALIDADE DO AR**

UBERLÂNDIA

2024

RENER MARTINS DE MOURA

**PROTÓTIPO COM SENSORES EMBARCADOS EM RPA/*DRONE* PARA COLETA
DE DADOS DA QUALIDADE DO AR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (PPGMQ/ICIAG/UFU), como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Qualidade Ambiental.

Área de concentração: Meio Ambiente e Qualidade Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Eulides Antonio Pereira de Lima

UBERLÂNDIA

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M929 Moura, Renner Martins de, 1966-
2024 PROTÓTIPO COM SENSORES EMBARCADOS EM RPA/DRONE PARA
COLETA DE DADOS DA QUALIDADE DO AR [recurso eletrônico]
/ Renner Martins de Moura. - 2024.

Orientador: Claudionor Ribeiro da Silva. Coorientador: Euclides Antonio Pereira de Lima. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Qualidade Ambiental.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.328> Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Desenvolvimento sustentável. I. Silva, Claudionor Ribeiro da, 1975-, (Orient.). II. Lima, Euclides Antonio Pereira de, 1964-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Qualidade Ambiental. IV. Título.

CDU: 502.33

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele Cristine Nunes do Couto

- CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental

BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6717 - www.ppgmq.iciag.ufu.br - ppgmq@iciag.ufu.br



ATA

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 06/2024, PPGMQ				
Data:	28 de junho de 2024	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:00
Matrícula do Discente:	12212MQA013				
Nome do Discente:	RENER MARTINS DE MOURA				
Título do Trabalho:	PROTÓTIPO COM SENSORES EMBARCADOS EM RPA/DRONE PARA COLETA DE DADOS DA QUALIDADE DO AR				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	Monitoramento e Gestão Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Geotecnologias aplicadas ao estudo dos sistemas ambientais.				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva (Orientador); Prof. Dr. Marcos Esdras Leite (UNIMONTES); Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães (UFU) e Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima (UNIUBE - Coorientador).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Claudionor Ribeiro da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/07/2024, às 21:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Euclides Antônio Pereira de Lima, Usuário Externo**, em 12/07/2024, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Fonseca Durães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/07/2024, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCOS ESDRAS LEITE, Usuário Externo**, em 12/07/2024, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5524286** e o código CRC **EA99142C**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de completar esta etapa da jornada acadêmica.

Aos incentivos de meus pais idosos e que tiveram a honra de vivenciar esta vitória.

À minha esposa e aos meus filhos, por terem de suportar meu humor vacilante nas horas mais difíceis.

Aos meus orientadores, Profs. Drs. Claudionor Ribeiro da Silva e Euclides Antônio Pereira de Lima, que me deram apoio, conselhos e liberdade de escolha para o encaminhamento deste trabalho no decorrer do curso.

Não poderia me esquecer dos amigos do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LTCM/FEMEC/UFU), pelo apoio dos Profs. Drs. Valério Luiz Borges, Solidônio Rodrigues de Carvalho e do então mestrando Moises Mbier.

E à Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação (PROPP), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e ao Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ) da UFU, pelo incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento sustentável e ambiental.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	i
LISTA DE GRÁFICOS	ii
LISTA DE TABELAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	5
1.4 HIPÓTESE CIENTÍFICA	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1 QUALIDADE DO AR E SAÚDE.....	8
2.2 ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE	11
2.2.1 Monitoramento e qualidade do ar no Brasil	12
2.3 EQUIPAMENTOS PARA MONITORAMENTO DE MONÓXIDO DE CARBONO	17
2.4 TÉCNICAS DE MEDIDAS DIGITAIS E PROCESSAMENTO DE SINAIS.....	18
2.4.1 Mau condicionamento e técnicas de regularização	19
2.4.1.1 <i>Mau condicionamento</i>	20
2.4.1.2 <i>Técnicas de regularização tipo Lasso e Ridge</i>	20
2.4.1.3 <i>Técnica de regularização tipo Proporcional, Integral e Derivativo</i>	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 MATERIAL	22
3.1.1 Arduino® 2560 – microcontrolador AVR	22
3.1.2 Sensor MQ-135 para medição do monóxido de carbono	23
3.1.3 RTC1302 – Relógio de Tempo Real	26
3.1.4 Sensores diversos	27
3.1.5 Materiais diversos	28
3.2 MÉTODOS.....	33
3.2.1 Elaboração do protótipo	33
3.2.2 Programação do <i>software</i> do protótipo	35
3.2.3 Modo de leitura e gravação dos dados	36

3.2.4 Ensaio de laboratório para calibração do protótipo.....	36
3.2.5 Calibração do protótipo com base nas leituras do cromatógrafo	38
3.2.6 Fase experimental em ambiente não controlado	39
3.2.6.1 <i>Experimento ao nível do solo</i>	39
3.2.6.2 <i>Experimento em perfil vertical com uso de RPA/drone.....</i>	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO CONFORME AS LEITURAS DO CROMATÓGRAFO.....	42
4.2 COLETA DE DADOS EM AMBIENTE ABERTO.....	43
4.3 COLETA DE DADOS EM NÍVEL DE SOLO	44
4.4 COLETA DE DADOS EM PERFIL VERTICAL COM RPA/DRONE.....	48
5 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS	54

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de estações ativas de monitoramento por estado e região.....	16
Figura 2 – Exemplo de estação da Cetesb	18
Figura 3 – Placa Arduino® Mega e seus componentes.....	22
Figura 4 – Sensor MQ-135	24
Figura 5 – Características de leitura do sensor MQ-135	25
Figura 6 – Esquema eletrônico MQ-135	26
Figura 7 – RTC1302	27
Figura 8 – Sensor DHT22.....	27
Figura 9 – Sensor BMP180	28
Figura 10 – Baterias e carregador.....	28
Figura 11 – Conector P-4 e fonte de alimentação do protótipo.....	29
Figura 12 – Display LCD 16x2 e interface I2C.....	29
Figura 13 – Placa de bornes.....	30
Figura 14 – Caixa de montagem do protótipo	30
Figura 15 – Caixa plástica hermética	31
Figura 16 – <i>Drone</i> T40	31
Figura 17 – Cilindro com CO a 100% de concentração	32
Figura 18 – Tedlar® de 1L com septo para acesso	32
Figura 19 – Seringa de precisão de 1mL	33
Figura 20 – Cromatógrafo Gasoso CG-2014 Shimadzu.....	33
Figura 21 – Diagrama das etapas de desenvolvimento do protótipo.....	34
Figura 22 – Fluxograma do algoritmo gerenciador do protótipo	35
Figura 23 – Diagrama de blocos do protótipo	36
Figura 24 – Esquema de calibração em laboratório	37
Figura 25 – Diagrama de bloco do processo do cromatógrafo.....	38
Figura 26 – Cromatograma obtido para O ₂ , N ₂ e CO.....	38
Figura 27 – Posicionamento dos pontos de coleta de dados com o <i>drone</i>	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de calibração em ppm	43
Gráfico 2 – Curva de calibração em mg x m ³	43
Gráfico 3 – Média móvel de CO em 25 de dezembro de 2023 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)	44
Gráfico 4 – Média móvel de CO em 16 de janeiro de 2024 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)	46
Gráfico 5 – Relação entre temperatura, Umidade Relativa do Ar e monóxido de carbono durante 12 horas do dia 16 de janeiro de 2024	46
Gráfico 6 – Coleta de dados no voo n. 1 em 20 de maio de 2024 – <i>Campus</i> Glória da UFU..	49
Gráfico 7 – Coleta de dados no voo n. 2 em 20 de maio de 2024 – Distrito Industrial de Uberlândia (MG)	50
Gráfico 8 – Coleta de dados no voo n. 3 em 20 de maio de 2024 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões e valores-guia medidos no ar	11
Tabela 2 – Preços dos componentes	34
Tabela 3 – Curva de calibração	42
Tabela 4 – Dados de 25 de dezembro de 2023	44
Tabela 5 – Dados de 16 de janeiro de 2024.....	45
Tabela 6 – Dados do voo n. 1 – <i>Campus</i> Glória da UFU	49
Tabela 7 – Dados do voo n. 2 – Distrito Industrial de Uberlândia (MG).....	50
Tabela 8 – Dados do voo n. 3 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)	51

MOURA, Rener Martins de. **Protótipo com sensores embarcados em RPA/drone para coleta de dados da qualidade do ar**. 73f. 2024. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

RESUMO

A poluição atmosférica representa uma das preocupações globais que impacta a saúde humana, os ecossistemas e o clima da Terra, ao se originar de atividades antropogênicas e processos naturais. Gás letal em altas concentrações, o monóxido de carbono (CO) se destaca como um dos poluentes mais nocivos ao meio ambiente, ao comprometer o transporte de oxigênio (O₂) pelo sangue e causar sintomas graves como cefaleia, náusea, confusão mental e, em casos extremos, a morte. As principais fontes de emissão de CO incluem a queima de combustíveis fósseis, biomassa e processos industriais, cujo controle é desafiador e transcende fronteiras nacionais, por exigir monitoramento e regulamentação contínuos. Nesse contexto, torna-se essencial mensurar a concentração de CO, sobretudo em ambientes públicos, devido à indetectabilidade desse gás pelos sentidos humanos, o que aumenta o risco de intoxicação, apesar de os equipamentos detectores de CO serem geralmente de alto custo de aquisição e operação. Então, este estudo visou abordar a proposta de montagem de um protótipo medidor de CO, em custos acessíveis e de fácil operação em ambientes controlados (laboratórios) e não controlados (campo em nível de solo e perfis verticais). Para tanto, foi criado um protótipo, com sensor digital e emissão de concentração de CO controlada, para avaliar a acurácia desse equipamento em laboratório; também foi testado em ambiente aberto, em um local de alta concentração de CO (estação de ônibus de transporte público, vizinha a ruas com tráfego intenso), em nível de solo; e em três pontos estrategicamente escolhidos para medição em perfil vertical, com uso de uma Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft* – RPA)/*drone*. Os resultados obtidos em laboratório mostraram que o equipamento é promissor, em virtude dos 99% de acurácia com as concentrações testadas, o que permitiu um ajuste linear para conversão da medida digital em leitura de concentração de CO. As medidas em campo foram eficientes e coerentes com as condições de cada localidade testada, isto é, nos pontos com mais fontes de dispersão de CO, houve maiores concentrações do gás. Em complemento, os valores máximos se compararam com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 491 (Brasil, 2018) com o objetivo de demonstrar que, para os dias e horários de medição, a concentração de CO estava em conformidade ao máximo recomendado. Finalmente, embora em experimentos incipientes, o protótipo se mostrou eficaz para a proposta deste trabalho.

Palavras-chave: Monóxido de carbono; MQ-135; Sensores; Protótipo; RPA/*drone*.

MOURA, Renner Martins de. **Prototype with sensors embedded in RPA/drone for air quality data collection**. 73p. 2024. Dissertation (Masters in Environmental Quality) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2024.

ABSTRACT

Air pollution is a global concern that impacts human health, ecosystems and the Earth's climate, originating from anthropogenic activities and natural processes. A lethal gas in high concentrations, carbon monoxide (CO) stands out as one of the most harmful pollutants to the environment, as it compromises the transport of oxygen (O₂) through the blood and causes severe symptoms such as headache, nausea, mental confusion and, in extreme cases, death. The main sources of CO emissions include the burning of fossil fuels, biomass and industrial processes, the control of which is challenging and transcends national borders, as it requires continuous monitoring and regulation. In this context, it is essential to measure CO concentration, especially in public spaces, due to the undetectability of this gas by the human senses, which increases the risk of poisoning, despite the fact that CO detection equipment is generally expensive to purchase and operate. So, this study aimed to address the proposal for assembling a prototype CO meter, at affordable costs and easy to operate in controlled environments (laboratories) and uncontrolled environments (field at ground level and vertical profiles). To this end, a prototype was created, with a digital sensor and controlled CO concentration emission, to evaluate the accuracy of this equipment in the laboratory; it was also tested in an open environment, in a location with high CO concentration (public transport bus station, next to streets with heavy traffic), at ground level; and in three strategically chosen points for measurement in vertical profile, using Remotely Piloted Aircraft (RPA)/drone. The results obtained in the laboratory showed that the equipment is promising, due to its 99% of accuracy with the concentrations tested, which allowed a linear adjustment to convert the digital measurement into CO concentration reading. The field measurements were efficient and consistent with the conditions of each tested location, that is, in the points with more sources of CO dispersion, there were higher concentrations of the gas. In addition, the maximum values were compared with Resolution No. 491 of National Environmental Council (CONAMA) (Brazil, 2018), in order to demonstrate that, for the days and times of measurement, the CO concentration was in compliance with the maximum recommended. Finally, although in incipient experiments, the prototype proved to be effective for the purpose of this work.

Keywords: Carbon monoxide; MQ-135; Sensors; Prototype; RPA/drone.

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um problema global que afeta a qualidade do ar, com impactos significativos na saúde das pessoas, nos ecossistemas e no clima da Terra. Ela é causada principalmente pela liberação de substâncias poluentes na atmosfera por atividades humanas e processos naturais que liberam poluentes atmosféricos como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), Material Particulado (MP), Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO), entre outros.

Nesse ínterim, o CO é um gás inodoro, incolor e altamente tóxico, formado quando o carbono (C) – presente em materiais orgânicos como os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), a madeira, os plásticos e outros materiais – não queima completamente em ambientes com baixo teor de oxigênio (O₂). A principal fonte é antropogênica, gerada por combustíveis fósseis em veículos, indústrias e sistemas de aquecimento, bem como nas queimadas. O CO é uma matéria-prima usada especialmente na indústria, mas também pode ser considerado um vilão, sobretudo um poluente atmosférico (Holgate *et al.*, 2019).

O CO está relacionado à utilização prática predominante em processos industriais e como combustível em motores de combustão interna. Na produção de ferro (Fe) e aço, é um componente essencial nos altos-fornos, ao reagir com o minério de ferro para se reduzir a Fe metálico. Na síntese de químicos, o CO é utilizado na produção de diversos produtos, como metanol (CH₃OH), ácido acético (CH₃COOH) e outros compostos orgânicos. Também é utilizado para a produção do gás de síntese, que corresponde a uma mistura de CO e hidrogênio (H) para produzir combustíveis sintéticos, como gasolina sintética e diesel. Na produção de plásticos, o CO é um intermediário importante na síntese de certos polímeros e plásticos e, ao ser empregado em testes de segurança de dispositivos, o CO se volta à testagem em alarmes e sensores em lugares relacionados à alta concentração, tais como ambientes industriais, áreas de trabalho confinadas, entre outros (Kent, 2012).

Em motores de combustão interna, o CO é obtido como subproduto da combustão incompleta de combustíveis fósseis em motores de carros, caminhões e outras máquinas, com a instalação de mecanismos de reaproveitamento do gás emitido antes de alcançar a fase de escape – por meio de uma turbina, tal produto é injetado na câmara de combustão dos veículos e proporciona melhor aproveitamento do potencial de queima. Embora esses exemplos demonstrem as aplicações práticas do CO em processos industriais, vale lembrar que a exposição ao referido composto químico representa um sério risco à saúde e à vida

humana. Enquanto isso, nos ambientes internos, a principal fonte de CO é a combustão de combustíveis fósseis em sistemas de aquecimento, aquecedores de água (H₂O), fogões, lareiras e outros dispositivos a gás, carvão, madeira ou óleo, cujo uso deve ser acompanhado de ventilação adequada; ademais, a instalação de detectores de CO é altamente recomendada para evitar acidentes com essa substância perigosa (Godish, 2014).

Convém salientar que o CO é extremamente perigoso aos seres humanos e outros organismos vivos, o que leva ao manuseio com cautela, pois a inalação pode ser fatal (Cooper; Alley, 2010). Como poluente atmosférico, tal composto químico contribui para a má qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas com tráfego intenso e indústrias. Por isso, esse composto químico tem atraído a atenção em virtude da associação com a poluição do ar e sua contribuição para a mudança climática, embora não seja o único componente causador do efeito estufa.

A exposição prolongada a níveis elevados de CO pode prejudicar a vegetação e outros organismos presentes no ecossistema, cuja presença na atmosfera pode ser considerada um problema ambiental emergente, à medida que evidências científicas apontam efeitos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Esse gás é perigoso, por se conectar à hemoglobina no sangue com mais afinidade do que o O₂, ou seja, quando inalado, ele forma a carboxiemoglobina e reduz a capacidade do sangue em transportar O₂ para os tecidos, o que pode levar a problemas graves de saúde (Dockery *et al.*, 1993; Pope; Dockery; Schwartz, 1995; Saldiva, 1995).

A exposição a altos níveis de CO pode levar à intoxicação, também conhecida como envenenamento, cujos sintomas incluem dor de cabeça, náusea, tontura, confusão, fraqueza e falta de ar – em casos graves, pode levar à perda de consciência, danos cerebrais, paralisia e à morte. Além disso, a exposição crônica ao CO pode ter efeitos negativos no sistema cardiovascular, ao aumentar o risco de doenças cardíacas em algumas pessoas, e sua toxicidade muitas vezes não é detectada pelos sentidos humanos, como o olfato (Dockery *et al.*, 1993; Pope; Dockery; Schwartz, 1995; Saldiva, 1995).

Nesse contexto, tornam-se fundamentais os sistemas adequados de ventilação e detectores de CO em ambientes onde ocorre a combustão, para evitar riscos à saúde humana. Ao longo das últimas décadas, o CO tem sido objeto de intensas pesquisas e monitoramento por parte da comunidade científica, governos e agências ambientais, especialmente porque a ampla gama de fontes de emissão desse gás (utilização de combustíveis fósseis, queima de

biomassa, processos industriais e atividades naturais) torna a presença generalizada e de difícil controle (Vallero, 2014).

O CO é tratado como um sério problema ambiental e de saúde pública em escala global. Nesse sentido, nove em cada dez pessoas no mundo respiram ar contaminado, com a estimativa de que a má qualidade seja responsável por sete milhões de mortes anuais – no Brasil, o mesmo levantamento indica que esse tipo de poluição causa aproximadamente 50 mil óbitos por ano. Em 2019, aproximadamente 37% das mortes prematuras relacionadas à poluição do ar externo foram causadas por isquemias cardíacas e Acidentes Vasculares Cerebrais (AVCs); 18% por doenças pulmonares obstrutivas crônicas; 23% por infecções respiratórias agudas; e 11% por câncer nas vias respiratórias (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]).

De fato, os órgãos governamentais, as organizações internacionais e os pesquisadores estão atentos aos riscos associados a esse gás tóxico e trabalham para implementar medidas para reduzir sua emissão e minimizar os impactos na saúde humana e no meio ambiente. As principais abordagens adotadas são: regulamentações e padrões, monitoramento da qualidade do ar, conscientização pública, tecnologias limpas, melhoria das tecnologias de combustão e Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]).

Sob esse viés, muitos países e regiões criaram regulamentações e padrões rigorosos para limitar as emissões de CO por fontes industriais e veículos automotores, como os Estados Unidos da América (EUA), que implementaram o Ato do Ar Limpo (*Clean Air Act*) (Environmental Protection Agency, 1990) para estabelecer padrões nacionais e limitar a emissão de poluentes como o CO por fontes industriais e veículos; e a União Europeia, com as Normas Europeias (*Euro Norms*) que compreendem regulamentos para especificar os limites de emissão aos veículos automotores com atualizações periódicas (Euro 1 a Euro 6), além de a Diretiva de Emissões Industriais (*Industrial Emissions Directive – IED*), que regula a emissão de poluentes industriais como o CO.

Tais regulamentações visam melhorar a qualidade do ar e reduzir os riscos à saúde, em que as autoridades governamentais e agências ambientais monitoram regularmente a qualidade do ar para identificar áreas de alto risco e adotar ações corretivas. Aqui, a educação e a conscientização pública são fundamentais, cujas campanhas informativas alertam as pessoas sobre os riscos da exposição ao CO em ambientes internos e a importância de instalar detectores desse composto químico. O incentivo a tecnologias limpas e eficientes em termos de energia nas indústrias e nos meios de transporte pode minimizar a emissão de CO, assim

como a otimização das tecnologias de combustão. Torna-se prioridade o investimento em pesquisa científica para entender os efeitos do CO e buscar formas eficazes de prevenção e controle (Nossa, 2002).

Vale ressaltar que enfrentamento ao CO faz parte de esforços amplos para combater a poluição do ar e mitigar os impactos das mudanças climáticas. A cooperação internacional é essencial para enfrentar o problema, pois a poluição atmosférica pode atravessar fronteiras nacionais e afetar regiões distantes das fontes de emissão. Assim, documentos e eventos internacionais sobre meio ambiente e qualidade do ar visaram abordar o tema em escala global, como a Conferência de Estocolmo, que tratou da redução de poluentes orgânicos persistentes, com implicações para o controle de emissões industriais; o Protocolo de Quioto, acordo internacional que estabeleceu metas para diminuir emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), a exemplo do CO; e o Acordo de Paris, compromisso global para manter o aumento da temperatura global abaixo de 2° C acima dos níveis pré-industriais, em que diversos países adotaram políticas para reduzir emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes (Organização das Nações Unidas, 1972, 1997, 2015a). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão regulador das concentrações permitidas dos poluidores atmosféricos. No caso do CO, a Resolução Conama n. 491, de 19 de novembro de 2018, estabelece a concentração de referência durante o período de oito horas (h) em nove partes por milhão (ppm) para a máxima média móvel obtida no dia (Brasil, 2018).

Segundo dados do último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022), a população de Uberlândia, Minas Gerais (MG) alcançou 713.232 habitantes, o que corresponde à segunda colocação como mais populosa do estado e a 28ª do país, o que classifica o município com um dos maiores crescimentos populacionais no Brasil. Nesse contexto, a rápida expansão demográfica abarca os problemas relacionados às atividades antrópicas vinculadas às necessidades humanas, como aquelas geradoras do CO. Por isso, é necessário quantificar a concentração desse poluente na atmosfera, ao se preocupar com a saúde pública do município.

Em uma análise crítica da literatura científica atualizada sobre como mensurar a concentração de CO na baixa atmosfera, os estudos compreendem a distribuição espacial e temporal desse poluente atmosférico, ao identificarem fontes predominantes e avaliarem os fatores que influenciam sua concentração nos ambientes urbanos e rurais. Algumas questões importantes, como a qualidade da mensuração e o custo de aquisição do equipamento usado

nessa atividade, não são focalizadas nas obras, apesar de serem fatores preponderantes no processo de medição, por influenciarem as análises e os resultados.

Dada a impossibilidade de acesso a um equipamento da linha comercial, especialmente devido ao alto custo, o presente estudo apresentou uma proposta de desenvolvimento de um protótipo calibrado em laboratório como estratégia metodológica para o devido uso. Depois disso, foram realizados experimentos em campo com o equipamento ao nível do solo e em perfis verticais realizados com *drones* (“zangões”, em tradução literal), assim como medições para comparação com medições ao nível do solo. No tocante à escolha dos pontos de coleta de dados, indicou-se a direção predominante dos ventos que, no caso de Uberlândia (MG), é de nordeste para sudoeste.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi construir um protótipo com sensores de baixo custo para a medição de gás CO em ambiente não controlado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- a) montar, programar e calibrar os sensores de CO utilizados no protótipo em ambiente controlado;
- b) avaliar a medição de CO realizada com os sensores do protótipo em ambiente não controlado;
- c) analisar a medição de CO em perfil vertical em ambiente não controlado, com uso de um *drone*.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A construção de um protótipo de sensor para mensurar o CO por meio de sensores de temperatura, Umidade Relativa do Ar (URA) e pressão atmosférica (atm) pretendeu verificar se existe alguma correlação com as condições meteorológicas e a dispersão ou concentração de CO, em consonância às seguintes razões:

- Segurança e saúde pública: o CO é um gás tóxico e incolor, frequentemente chamado de "assassino silencioso" porque é indetectável sem o uso de sensores especializados. O estudo de um sensor de baixo custo pode permitir o monitoramento do ambiente ao redor para evitar exposições perigosas (Godish, 2014).
- Prevenção de acidentes: O CO é produzido pela queima incompleta de combustíveis fósseis, como gás natural, gasolina e carvão. Equipamentos de aquecimento, fogões, veículos e outras fontes podem ser fontes potenciais de emissão de CO. Um sensor portátil e acessível pode ajudar as pessoas a identificar essas fontes e tomar medidas para evitar a exposição (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]).
- Mobilidade e Portabilidade: Ao criar um sensor portátil, as pessoas podem levar o dispositivo consigo e monitorar a qualidade do ar em diferentes locais, como suas casas, locais de trabalho, carros e áreas externas. Isso permite uma avaliação mais abrangente da exposição ao CO em diversas situações.
- Custos Reduzidos: A construção de um protótipo de baixo custo torna o monitoramento da qualidade do ar mais acessível para uma ampla gama de pessoas. Isso é especialmente importante em regiões onde tecnologias avançadas e caras podem não ser viáveis para todos.
- Conscientização Pública: A disponibilidade de sensores de baixo custo pode aumentar a conscientização sobre os riscos do CO e promover a educação pública sobre os perigos associados à exposição.
- Integração de Dados Ambientais: A inclusão de sensores de temperatura, URA e pressão atmosférica no protótipo não só permite a medição do CO, mas também fornece dados adicionais sobre as condições ambientais que podem afetar a produção e dispersão do CO.
- Potencial para monitoramento remoto: com a tecnologia adequada, o protótipo pode ser conectado a dispositivos móveis ou sistemas de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoF), o que permite o monitoramento remoto e em tempo real da qualidade do ar.
- P&D: a construção de protótipos pode incentivar a pesquisa e o desenvolvimento contínuos de tecnologias de sensores, o que contribui para avanços na detecção de poluentes atmosféricos e a geração de patentes.

Em suma, a construção de um protótipo de sensor para medição de CO por meio de sensores de temperatura, URA e atm para entender a correlação entre os dados climáticos e a

dispersão do CO pode contribuir significativamente para a segurança, conscientização e monitoramento da exposição a um gás tóxico comum. Isso pode ser benéfico em locais onde as soluções de monitoramento avançadas não são acessíveis a todos.

1.4 HIPÓTESE CIENTÍFICA

Neste trabalho, questiona-se: é possível desenvolver um equipamento de baixo custo para coleta de dados de concentração de CO por meio de sensores de gás altamente sensíveis e acessíveis, juntamente com técnicas avançadas de processamento de dados, a fim de obter medições precisas e confiáveis de tal gás em ambientes variados?

Acredita-se que, ao otimizar a eficiência dos sensores e aplicar técnicas de calibração apropriadas, será viável criar um dispositivo de baixo custo para ser amplamente utilizado em estudos de qualidade do ar, monitoramento ambiental e até mesmo alertar sobre potenciais riscos à saúde em áreas com alta concentração de CO, o que contribui sobremaneira com a segurança pública e a pesquisa científica.

Tal hipótese se baseia na ideia de que, com o uso de sensores de gás acessíveis e aprimorados, juntamente com métodos de calibração e processamento de dados adequados, é possível desenvolver uma solução de baixo custo para a coleta precisa de dados de concentração de CO, o que pode ter implicações significativas à pesquisa ambiental e à segurança pública.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 QUALIDADE DO AR E SAÚDE

A correlação da qualidade do ar e a saúde é objeto de estudo de vários pesquisadores nas últimas décadas, como Bernstein (2009), Bell, Dominici e Samet (2005), Dominici (2004) e Schwartz (1994). Por se tratar de um assunto amplo e complexo, tais pesquisas foram realizadas por equipes multidisciplinares.

Em seu estudo, Maia, Netto e Costa (2019) apresentaram a complexidade do assunto, principalmente no tocante à questão urbana, visto que as cidades crescem em importância, como centros de concentração populacional, assim como o potencial de poluição atmosférica. O artigo foi baseado nos impactos da forma urbana nas concentrações de diversos contaminantes e sua ligação com a saúde de tais populações, o que leva a refletir sobre como o tema é tratado de forma incipiente no Brasil. A forma urbana, a falta de pesquisas consistentes e os impactos causados para habitantes das cidades e ao meio ambiente são motivos para o desenvolvimento de novas metodologias, a exemplo da modelagem e avaliação de tais relações por meio de um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ). Foram aplicados métodos estatísticos em dados de poluentes como CO, SO₂, Partículas Inaláveis (PIs) e variáveis morfológicas (taxa de ocupação e verticalização das quadras) e climatológicas (direção do vento, pluviosidade e temperatura ambiente). Tal investigação apontou indícios da relação entre ocupação populacional e a forma urbana, com a sugestão de uma abordagem empírica e metodológica. De acordo com os autores, um dos fatores mais importantes para a qualidade do ar nas cidades é a circulação das massas dos gases componentes da atmosfera.

Enquanto isso, Landsberg (1997) e Robaa (2003) sublinham que o padrão natural de circulação atmosférica tende a ser alterado por edificações, por interferirem na velocidade média de tal circulação e na respectiva direção – tais mudanças, inclusive, dificultam as trocas de calor das construções e do meio em que estão inseridas. Características de ventilação podem ser desfavorecidas quando existem situações de calmaria e inversão térmica que provocam o fenômeno *smog*¹.

¹ *Smog* é um termo que combina as palavras “*smoke*” (fumaça) e “*fog*” (neblina), usado para descrever uma forma de poluição atmosférica que ocorre em áreas urbanas densamente povoadas, especialmente durante condições meteorológicas específicas.

Quando os contaminantes retidos na baixa atmosfera se aderem a superfícies ou se ligam à umidade, podem ser retirados pela ação natural da gravidade; porém, quando se conectam à chuva, há a precipitação como chuva ácida (Rio de Janeiro, 2015), cujo processo corresponde ao contato com superfícies, como edifícios, árvores ou o solo, em que podem ser adsorvidos ou absorvidos (aderir ou penetrar na superfície) por esses materiais. A gravidade desempenha um papel importante nesse processo, ao “puxar” os poluentes para baixo, da atmosfera às superfícies, no movimento de deposição seca, em que os poluentes são “lavados” do ar e depositados nas superfícies. No entanto, quando se dissolvem na umidade atmosférica, a exemplo da H₂O presente nas nuvens, eles podem formar compostos como os ácidos sulfúrico (H₂SO₄) e nítrico (HNO₃) que, quando “caem” do céu na forma de precipitação, como chuva, neve ou granizo, resultam na chuva ácida, prejudicial ao meio ambiente e aos ecossistemas por causar danos a plantas, solos, corpos d’água e até mesmo a construções (Likens *et al.*, 1996). Outros fenômenos típicos de áreas urbanas são as ilhas de calor (Oke, 1987), ocasionadas por adensamento construtivo e atividades produtoras de calor, como veículos de transporte urbano movidos à base de hidrocarbonetos (HC) e indústrias. Nessas condições, o ar se insere em um ciclo de circulação entre a área urbana e a periferia, juntamente com o aprisionamento dos poluentes, para criar uma condição denominada por Adler e Tanner (2015) de “domo urbano de poeira”.

Dessa forma, torna-se importante a medição para o controle da poluição. Na cidade do Rio de Janeiro (RJ), por exemplo, três órgãos públicos possuem estações climatológicas equipadas com sensores de medição da qualidade do ar – Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC) –, cujo monitoramento se fundamenta no “Inventário de fontes de emissão de poluentes atmosféricos”, elaborado pela Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) (2004) para identificar que as fontes fixas de poluição, como as indústrias, são responsáveis especialmente pela emissão de SO₂ (88%). Por seu turno, as fontes móveis, a exemplo dos veículos automotores, contribuem com as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), com 67%, CO, de 98%, e HC, 67%. Em relação às PIs (MP10), há uma contribuição equilibrada das fontes fixas e móveis (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]).

Segundo Silva (2017), os poluentes, quando presentes na atmosfera em concentrações elevadas, podem causar efeitos deletérios em diversos órgãos e sistemas do corpo humano, com graves problemas de saúde e aumento da taxa de mortalidade da população. Por sua vez,

Ayoade (2012) argumenta que a poluição do ar compreende a introdução de quaisquer substâncias na atmosfera e diferentes de componentes naturais.

Maia, Netto e Costa (2019) mencionam que as ações antropomórficas nas cidades são associadas à degradação ambiental. Na mesma linha de pensamento, Castro *et al.* (2003) afirmam que a atividade humana e a respectiva concentração em assentamentos urbanos têm sido associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente. Dentre fatores de degradação, a poluição atmosférica e a qualidade do ar se sobressaem devido ao poder de atingir grandes parcelas da população e do ambiente.

Eventos extremos de poluição do ar, tal qual o nevoeiro que cobriu a cidade de Londres em 1952 e causou aproximadamente 12 mil óbitos (Bell; Davis, 2001), despertaram gestores públicos e legisladores acerca dos efeitos adversos da poluição do ar para a saúde, com o desenvolvimento de políticas e legislações relevantes como a legislação federal americana sobre o *Clean Air Act* citado alhures (Environmental Protection Agency, 1990). Costa, Hoek e Brunekreef (2017) explicam que os estudos sobre a qualidade do ar e a poluição atmosférica no Brasil e no mundo se intensificaram nos últimos anos, dado que os efeitos da poluição do ar são considerados alguns dos fatores causadores das mudanças climáticas globais e de impactos na saúde humana e de outras espécies.

Em 2019, a Organização das Nações Unidas (ONU) elegeu a poluição do ar e as mudanças climáticas como principais temas de atenção à saúde. Convocações de várias nações foram feitas para se comprometerem com a iniciativa do ar livre (Academy of Science of South Africa *et al.*, 2019; Organização das Nações Unidas, 2019), em uma tentativa de assegurar melhor qualidade de vida e saúde aos cidadãos por meio de políticas mitigadoras para a diminuição das emissões de gases tóxicos e que impactam sobremaneira a saúde. Historicamente, os dados de monitoramento propiciaram, nas décadas de 1980 e 1990, uma série de estudos epidemiológicos (Dockery *et al.*, 1993; Pope; Dockery; Schwartz, 1995; Saldiva, 1995) para revelar conhecimentos acerca dos efeitos adversos à saúde humana aos poluentes do ar, que culminaram em guias de qualidade do ar (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]). Atualizados de maneira constante, tais documentos estabeleceram os limites de segurança de exposição aos poluentes tóxicos para a maior parte da população e fundamentaram os padrões de qualidade do ar como importantes instrumentos de gestão de riscos e política ambiental das mudanças climáticas globais.

No caso específico do CO, a principal via de exposição é a respiratória, cujas intoxicações agudas podem ser fatais, pois, uma vez inalado, o gás é rapidamente absorvido

nos pulmões, se conecta de maneira estável com a hemoglobina, impede o transporte do oxigênio e causa a hipóxia tecidual. Por isso, a exposição ao composto está também associada a prejuízos na acuidade visual, no aprendizado, na capacidade de trabalho e ao aumento na mortalidade por infarto cardíaco agudo, principalmente entre idosos. A atmosfera é o compartimento principal de dispersão, enquanto as águas superficiais estão saturadas do gás, em que pode sofrer oxidação por radicais livres e formar CO₂. O CO apresenta meia-vida de um a dois meses na atmosfera e pode ser transportado por milhares de quilômetros (km) (Smith, 2017), ao passo que, na água e no solo, existem microrganismos capazes de utilizar o composto como fonte de energia (Smith, 2018).

O CO atravessa rapidamente as membranas alveolar, capilar e placentária, em que 80 a 90% do composto absorvido se liga à hemoglobina para formar carboxiemoglobina (COHb). A afinidade da hemoglobina para o CO é de 200 a 250 vezes maior do que para o O₂; por isso, o CO é classificado toxicologicamente como um asfixiante químico. Na Tabela 1 se encontram os padrões de referência utilizados pela Cetesb:

Tabela 1 – Padrões e valores-guia medidos no ar

Concentração	Comentário	Referência	
100 mg/m ³	Valor-guia da OMS (média de 15 min.)	Organização Mundial de Saúde, [s.d.]	
35 mg/m ³	Valor-guia da OMS (média de 1h)		
10 mg/m ³	Valor-guia da OMS (média de 8h)		
4 mg/m ³	Valor-guia da OMS (média de 24h) ²		
9 ppm	Média 8 horas (média de 1h) ³	Resolução Conama n. 491, de 19 de novembro de 2018 (Brasil, 2018)	
9 ppm	Padrão (média de 8h consecutivas)	Decreto Estadual n. 59.113, de 23 de abril de 2013 (São Paulo, 2013)	
9ppm	8h	Deliberação Normativa Copam n. 248, de 23 de novembro de 2023 (Minas Gerais, 2023)	
15 ppm	Critérios para episódios agudos (média de 8h) ⁵	Decreto Estadual n. 59.113, de 23 de abril de 2013 (São Paulo, 2013)	
30 ppm			Atenção
40 ppm			Alerta Emergência

Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022), com base em dados da Organização Mundial de Saúde ([s.d.]).

Na sequência, aprofundam-se os aspectos citados pela OMS para a qualidade do ar.

2.2 ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE

Valores-guia da OMS são baseados na equação exponencial de Coburn-Foster-Kane (Equação 1), que considera todas as variáveis fisiológicas que afetam a absorção de CO:

$$d \times \frac{[HbCO]}{dt} - K_1 \times [CO] \times (1 - [HbCO]) - k_2 \times [HbCO] \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: [HbCO] é a concentração de carboxihemoglobina no sangue; [CO], a concentração de CO no ar inalado; k_1 , a taxa de associação do CO com a hemoglobina; e k_2 , a taxa de dissociação da HbCO.

Nesse sentido, os valores-guia e períodos de exposição foram determinados de modo a não exceder o nível de COHb de 2,5%, mesmo quando um indivíduo sadio pratica exercícios leves ou moderados. A OMS também estabeleceu o valor provisório igual a 7 mg/m³ (média de 24h), a ser utilizado como etapa de redução progressiva do valor-guia, para localidades em que a concentração existente é alta, diante da heterogeneidade socioeconômica e política dos países, mas que não deve ser excedido mais de uma vez por ano (Organização Mundial de Saúde, [s.d.]).

A legislação de São Paulo (SP), por meio do Decreto Estadual n. 59.113, de 23 de abril de 2013, também estabeleceu critérios para episódios agudos de poluição do ar e contemplou três situações em função das concentrações e a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes, definidos como estados de atenção, alerta e emergência (São Paulo, 2013).

2.2.1 Monitoramento e qualidade do ar no Brasil

No Brasil, de acordo com Vormittag *et al.* (2021), o monitoramento de qualidade do ar é relevante, pois mensura as concentrações dos poluentes atmosféricos, gera dados sobre as condições atuais, constrói um histórico de dados e habilita os tomadores de decisão a planejar ações e políticas públicas no sentido de assegurar tal qualidade. A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) – Lei Federal n. 6.938, de 31 de agosto de 1981 – é um marco regulatório ambiental no país, por ter definido as diretrizes gerais e o método de gestão da qualidade do ar (Brasil, 1981).

Por seu turno, a Resolução Conama n. 5, de 15 de junho de 1989, instituiu o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), que determinou a criação de uma Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar; a Resolução Conama n. 3, de 28 de junho de 1990, posteriormente substituída pela Resolução Conama n. 491, estabeleceu os padrões de qualidade do ar e a responsabilidade dos estados para o monitoramento do ar nos seus respectivos territórios; e a Lei Federal n. 10.650, de 16 de abril de 2003, dispõe sobre o acesso público às informações ambientais existentes nos órgãos e entidades integrantes do Sistema

Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) (Brasil, 1989, 1990, 2003). No entanto, não se sabe o estado de funcionamento dessas redes e, tampouco, se são regularmente feitas leituras de tais equipamentos; todavia, existem 40% de estações instaladas nas unidades federativas, mas a região Norte praticamente não possui esse tipo de estação. De acordo com o Instituto Ar (2022), as estações estão no Distrito Federal e em 10 estados, a saber: Espírito Santo (ES), Goiás (GO), Mato Grosso (MT), MG, Paraná (PR), RJ, Rio Grande do Sul (RS), SP e Sergipe (SE). Por um lado, apenas 1,7% dos municípios brasileiros são cobertos pelo monitoramento do ar, com maior concentração no Sudeste, onde estão 78% dos municípios monitorados. Por outro lado, Norte, Centro-Oeste e Nordeste apresentam enorme carência no acompanhamento da qualidade do ar em seus domínios.

Diante do quadro apresentado acima, em que vários estados não possuem monitoramento, acredita-se que as resoluções (em especial a do PRONAR) existentes no país não definiram prazos para o estabelecimento das determinações e, tampouco, previram sanções cabíveis ao descumprimento por seus destinatários, isto é, os governos dos estaduais e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Tais fatos indicam um longo (e urgente) caminho a ser percorrido para atender aos pressupostos do monitoramento da qualidade do ar no país.

É importante salientar que, em MG, o órgão fiscalizador e provedor de informações sobre a qualidade do ar e outros parâmetros de controle ambiental é a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), vinculada à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), com personalidade jurídica de direito público e autonomia administrativa e financeira. Além de observar as diretrizes da Semad, a Feam apoia e observa as deliberações do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH/MG). No âmbito federal, a fundação integra Sisnama instituído pela Lei Federal n. 6.938 (Brasil, 1981).

De acordo com o Decreto Estadual n. 47.760, de 20 de novembro de 2019, a Feam se responsabiliza por desenvolver e implementar as políticas públicas relativas à mudança do clima, às energias renováveis, à qualidade do ar, à qualidade do solo e à gestão de efluentes líquidos e de resíduos sólidos, com vistas à preservação e à melhoria da qualidade ambiental no estado (Minas Gerais, 2019).

Instituída pelo Decreto Estadual n. 28.163, de 6 de junho de 1988, a Feam foi implementada em definitivo em 29 de abril de 1989 e, à época, era vinculada à então Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Tal conexão foi modificada

em 1995, com a criação da Semad, cuja estrutura orgânica sofreu várias mudanças ao longo do tempo, e sua trajetória se confunde com a evolução da questão ambiental em MG, como o início do licenciamento ambiental no estado e a proposição de normativas relativas ao licenciamento de atividades industriais, minerárias e que afetam diretamente o meio ambiente (Minas Gerais, 1988).

Por fim, a Feam é uma fundação de direito público, sediada em Belo Horizonte (MG). Em conjunto com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), o Instituto Estadual de Florestas (IEF) e a Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário (ARSAE/MG), a Feam está vinculada à Semad nos termos da Lei Estadual n. 12.583, de 17 de julho de 1997, e do artigo 3º da Lei Estadual n. 21.972, de 21 de janeiro de 2016 para, juntas, comporem o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) (Minas Gerais, 1997, 2016).

A Feam monitora a qualidade do ar por meio de equipamentos de alto custo e infraestrutura complexa; logo, o uso de um sistema mais acessível e móvel pode complementar tais esforços com dados adicionais e frequentes, especialmente em áreas menos monitoradas, cuja implementação possui investimento inicial estimado de R\$ 767,00 (sem o *drone*) e é uma solução viável para pequenas e médias cidades. Tal abordagem permite a coleta de dados essenciais à formulação de políticas públicas eficazes e a adoção de medidas mitigadoras, com vistas a um ambiente urbano saudável e sustentável (Silva, 2021). A Feam opera uma rede de estações de monitoramento da qualidade do ar no estado, das quais 29 são automáticas – destas, 10 estão localizadas na Região Metropolitana (RM) de Belo Horizonte (MG) e abrangem, além dessa cidade, Contagem e Betim. Ademais, são equipadas com monitores de PM-10, analisadores de gases, sensores meteorológicos e sistemas de aquisição e transmissão de dados. Existem outras 19 estações automáticas em seis municípios diferentes do estado, que monitoram a qualidade do ar em tempo real e transmitem os dados para a Feam. A rede fornece informações cruciais sobre os níveis de poluição e ajuda a orientar políticas ambientais para melhorar a qualidade do ar no estado. Atualmente, a Feam passa por uma fase de reestruturação, com o escopo de otimizar os serviços oferecidos ao estado.

Também no Brasil, a Cetesb, em SP, é uma empresa pública vinculada à Secretaria do Meio Ambiente. Fundada em 1968, tal instituição desempenha um papel fundamental na gestão e fiscalização ambiental no estado, como referência a outros entes da federação por fazer cumprir a regulamentação em vigor no tocante ao estabelecimento e implantação dos

sistemas de controles ambientais no país. Vale ressaltar que não foram obtidas informações sobre os outros estados.

Com relação ao Pronar, existem 367 estações instaladas no Brasil, porém nem todos os poluentes são monitorados em cada uma, o que agrava a situação. O MP é verificado em 82% das estações; o ozônio (O₃), em 46%; e o SO₂, em 45%. A maior parte dos estados gerencia as próprias estações, com exceção da Bahia (BA), onde acontece apenas por intermédio de empresas privadas. Enfim, o acesso público aos dados sobre o monitoramento não é adequado; parte das unidades federativas não o implementaram nos próprios territórios ou o realizam de forma incompleta, com prejuízos no monitoramento da qualidade do ar no país, no combate à poluição do ar, na saúde dos brasileiros e na divulgação de informações à sociedade (Vormittag *et al.*, 2021).

Dentre os estados supracitados, o de maior expressão e com dados consistentes é SP e a RM, cujos estudos são abrangentes e de fácil acesso. Cumpre frisar que, nesse ente federativo, existem leis específicas que regulam os parâmetros de qualidade do ar. Em relatórios sobre tal aspecto, a Cetesb tem feito apontamentos e definido os poluentes atmosféricos, a quantidade e a concentração de poluentes etc. (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022).

Nacionalmente, o nível de poluição atmosférica é determinado pela quantificação de substâncias poluentes presentes no ar. Conforme a Resolução Conama n. 491, o poluente atmosférico é qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características que tornem (ou possam tornar) o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade. Com relação à origem, tal resolução classifica os poluentes como primários – emitidos diretamente pelas fontes de emissão – e secundários, formados na atmosfera através da reação química entre poluentes e/ou constituintes naturais na atmosfera (Brasil, 2018).

Conforme Lisboa e Kawano (2007), apesar de se manterem as emissões, a qualidade do ar pode mudar em razão das condições meteorológicas que determinam maior ou menor diluição dos poluentes. Por isso, a qualidade do ar piora com relação aos parâmetros CO, MP e SO₂ durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Enquanto isso, o O₃ apresenta maiores concentrações na primavera e verão, por ser um poluente secundário que depende, dentre outros fatores, da intensidade de luz solar para ser formado.

Por questões de ordem prática, a determinação sistemática da qualidade do ar deve ser limitada a um restrito número de poluentes definidos em razão da importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis. De forma geral, o grupo de poluentes consagrados universalmente como indicadores abrangentes dessa qualidade é composto por CO, SO₂, MP e O₃, além do dióxido de nitrogênio (NO₂). Tais parâmetros foram selecionados como indicadores da qualidade do ar está ligada à maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos ocasionados à saúde e ao meio ambiente (Lisboa; Kawano, 2007).

Em se tratando das resoluções legais do Pronar, foram omitidos o cumprimento dos prazos e as sanções cabíveis aos entes federados, o que indica um longo e urgente caminho a ser percorrido, na medida em que se aumenta a problemática em questão. Como exemplo disso, no monitoramento feito pela Cetesb em SP, o investimento foi alto e obedeceu às fases de projeto, obtenção de recursos e implementação de fato. Tabelas disponibilizadas pela Cetesb são utilizadas como parâmetros aos outros entes da federação, a exemplo de MG. Em termos regionais, as estações estão distribuídas da seguinte forma (Figura 1):



Fonte: Vormittag *et al.* (2021).

No que tange à localização interestadual das estações ativas, 191 (52%) se localizam nas RMs e 176 (48%) no interior dos estados. As regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam, respectivamente, 17 (58,6%), 168 (56,4%) e 4 (44,4%) estações localizadas em suas RMs, ao passo que o Norte possui 29 (93,5%) unidades no interior.

2.3 EQUIPAMENTOS PARA MONITORAMENTO DE MONÓXIDO DE CARBONO

Os equipamentos destinados ao monitoramento e à coleta de dados relacionados à qualidade do ar desempenham um papel relevante em duas situações distintas – gestão ambiental e saúde pública –, que incluem o diagnóstico ambiental em áreas de implantação de empreendimentos. No primeiro cenário, realiza-se o diagnóstico ambiental nos locais onde novos empreendimentos industriais, comerciais ou mesmo residenciais estão prestes a ser implantados para avaliar as condições ambientais existentes, sobretudo em relação à qualidade do ar – o monitoramento prévio permite identificar eventuais problemas e determinar se a região escolhida é adequada para o empreendimento, o que ajuda a definir medidas preventivas para minimizar impactos futuros; e na segunda esfera, relativa à avaliação dos impactos pós-implantação e operação do empreendimento, focaliza-se no período posterior à construção do empreendimento que, por estar em funcionamento, necessita do monitoramento da qualidade do ar em seu entorno, preferencialmente nas comunidades próximas, onde a saúde e o bem-estar dos residentes podem ser diretamente afetados – de modo contínuo, auxilia na identificação e quantificação de qualquer impacto adverso causado pelas atividades do empreendimento, bem como na determinação de conformidade (ou não) aos padrões de qualidade do ar estabelecidos na legislação em vigor (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022).

Ambas as abordagens se complementam e são fundamentais para garantir a proteção ambiental e a saúde da população em áreas onde empreendimentos estão em operação ou planejados. Ao reunir dados precisos e atualizados sobre a qualidade do ar, as autoridades regulatórias e os gestores de empreendimentos podem tomar decisões informadas para promover um ambiente saudável e sustentável. Portanto, a utilização desses equipamentos é de extrema importância em todas as fases do ciclo de vida de um empreendimento, desde a concepção até a operação contínua. Em síntese, a Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar (EMQA) da Cetesb é mostrada na Figura 2a e, na 2b, há o centro de telemetria:

Figura 2 – Exemplo de estação da Cetesb



(a) EMQA

(b) Centro de Telemetria

Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022).

A Cetesb possui estações medidoras na RM de SP e no interior e litoral do estado, além de unidades móveis utilizadas em estudos temporários. Conectada a uma central de computadores por meio do sistema de telemetria, a rede registra ininterruptamente as concentrações dos poluentes na atmosfera, cujos dados são processados com base nas médias estabelecidas por padrões legais e disponibilizados de hora em hora na internet e, diariamente às 11h, é divulgado o Boletim de Qualidade do Ar para sintetizar a poluição atmosférica das 24h anteriores a uma previsão meteorológica das condições de dispersão dos poluentes para as 24h seguintes. Com base nisso, pode-se determinar as ações previstas na legislação ambiental, quando os padrões de qualidade do ar são ultrapassados e apresentam níveis prejudiciais à saúde pública (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022).

Com relação aos *drones*, artigos citam a utilização desses Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), tais como Molina *et al.* (2019) e Villa *et al.* (2016),

2.4 TÉCNICAS DE MEDIDAS DIGITAIS E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Esses tipos de procedimento compreendem a aquisição, a análise e o manuseio de dados digitais provenientes de sinais ou informações analógicas (Diniz; Silva; Netto, 2014; Oppenheim; Willsky; Nawab, 2010). Desempenham papel fundamental em uma ampla variedade de campos, como eletrônica, engenharia, ciência da computação, telecomunicações, medicina, processamento de imagens, dentre outros, com base nas seguintes características:

- Amostragem digital: o primeiro passo nas medidas digitais é a amostragem, em que um sinal analógico e discreto em intervalos regulares de tempo produz uma sequência de valores digitais. Essa amostragem permite representar o sinal no domínio digital.
- Conversão Analógico-Digital (A/D): muitas vezes, os sinais analógicos precisam ser convertidos em formato digital para processamento e armazenamento por meio de

conversores A/D que convertem as amplitudes analógicas das amostras em valores digitais.

- Processamento de sinais: série de operações matemáticas e algorítmicas aplicadas aos dados digitais para extrair informações relevantes, melhorar a qualidade do sinal, detectar padrões, filtrar ruídos etc. Alguns exemplos incluem filtragem digital, transformadas de Fourier, detecção de eventos, entre outros.
- Armazenamento e transmissão: os sinais digitais são mais fáceis de armazenar, transmitir e compartilhar do que os sinais analógicos. Nesse caso, podem ser comprimidos para economizar espaço de armazenamento e largura de banda durante a transmissão.
- Processamento de imagens e vídeo: em campos como processamento de imagens e vídeo, as técnicas de medidas digitais e processamento de sinais visam melhorar a qualidade de imagens, detectar objetos, reconhecer padrões, entre outros.
- Telecomunicações: em sistemas de comunicação digital, os sinais analógicos, como voz e dados, são digitalizados e processados para transmitir informações com eficiência e confiabilidade.
- Medicina: o processamento de sinais digitais é usado em várias aplicações, como diagnóstico por imagem, análise de sinais biomédicos – por exemplo, eletrocardiograma e eletroencefalograma – e monitoramento de pacientes.
- Controle automatizado: em sistemas de controle automatizado, como Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning* – AVAC/HVAC) ou veículos autônomos, as medidas digitais e o processamento de sinais desempenham um papel crucial na tomada de decisões e na resposta a eventos.

Sendo assim, tais procedimentos pretendem transformar informações analógicas em formato digital, o que permite uma série de aplicações complexas e avançadas em várias áreas da Ciência e Tecnologia (C&T). Com isso, a análise, interpretação e manipulação de dados ocorre de forma eficiente e precisa.

2.4.1 Mau condicionamento e técnicas de regularização

Esses conceitos são importantes em estatística, otimização e Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* – ML), ao se relacionarem à estabilidade e ao desempenho de modelos matemáticos, sobretudo em situações em que os dados podem ser ruidosos, incompletos ou

altamente correlacionados. Para entender tais conceitos, os próximos subtópicos elencados a seguir abarcam eventos possíveis de observação.

2.4.1.1 Mau condicionamento

Nessa situação, um modelo matemático ou sistema se torna sensível a pequenas variações nos dados de entrada, ou seja, mudanças mínimas nos dados de entrada podem resultar em grandes transformações em saídas ou parâmetros do modelo. Isso pode ocorrer quando os dados estão escalados de maneira inadequada, em que unidades de medida dos dados de entrada possuem ordens de grandeza diferentes ou os dados são altamente correlacionados, o que pode levar à multicolinearidade. O mau condicionamento pode tornar os modelos instáveis e imprecisos (Campos Velho, 2001).

Um exemplo comum desse aspecto ocorre em problemas de regressão linear, na qual as variáveis independentes estão altamente correlacionadas e tornam os coeficientes de regressão instáveis e difíceis de serem interpretados.

2.4.1.2 Técnicas de regularização tipo Lasso e Ridge

Estes métodos visam lidar com o mau condicionamento e melhorar a estabilidade de modelos, especialmente em problemas de ML e regressão. As duas técnicas de regularização mais comuns se referem às Regressões Ridge (L2) (Hoerl; Kennard, 1970) e Lasso (L1) (Tibshirani, 1996), que introduzem um termo de penalização nos algoritmos de otimização para forçar os coeficientes do modelo a serem menores.

Na L2, a penalização é proporcional ao quadrado dos coeficientes, o que tende a reduzi-los de forma igual para tornar o modelo estável e reduzir o impacto do mau condicionamento. Por sua vez, em L1, a penalização é proporcional ao valor absoluto dos coeficientes, o que pode levar a uma seleção automática de características e transformar alguns deles exatamente iguais a zero, o que não apenas melhora a estabilidade, mas também pode resultar em modelos simples e interpretáveis. Outras técnicas de regularização incluem a *Elastic Net* (“Rede Elástica”, em tradução literal), que combina elementos de L1 e L2, e o Dropout (“Desistência/Abandono”), comumente usada em redes neurais para evitar o sobreajuste.

Dessa maneira, os problemas de estabilidade e precisão podem ser minimizados por meio das técnicas de regularização que compreendem ferramentas relevantes das áreas de estatística e ML.

2.4.1.3 Técnica de regularização tipo Proporcional, Integral e Derivativo

O sistema Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é um tipo de algoritmo de regularização amplamente utilizado na automação e no controle de processos industriais, projetado para controlar sistemas dinâmicos, como temperatura, pressão, velocidade, posição e outros. Ele ajusta automaticamente uma saída de controle para manter uma variável de processo (como a temperatura) o mais próximo possível do valor desejado (*setpoint*) e é construído a partir de várias combinações dos termos PID, conforme a necessidade de cumprimento dos requisitos de desempenho específicos. Neste trabalho, apesar de serem citados outros métodos de regularização de sinal, optou-se pelo PID (Johnson; Moradi, 2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

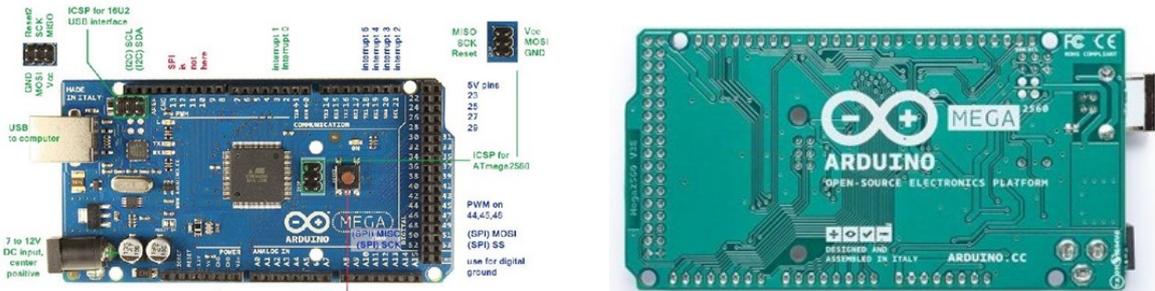
Neste tópico estão detalhados os processos de construção do protótipo, com a abordagem de materiais empregados, métodos adotados e procedimentos essenciais. Foram apresentados os componentes utilizados, a implementação do algoritmo para a leitura dos dados do sensor, o processo de calibração necessário para garantir a precisão das medições e a montagem final do equipamento. Com a devida explanação de cada etapa, pode haver uma compreensão abrangente do desenvolvimento do protótipo.

3.1 MATERIAL

3.1.1 Arduino® 2560 – microcontrolador AVR

O Arduino® é uma plataforma programável, acessível e de baixo custo. Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis desenvolveram essa placa no início dos anos 2000 e a apresentaram em 2005, tendo passado por modificações e melhoramentos. Existem diversos modelos de placas para usos variados e, no caso específico desta pesquisa, será utilizada a placa Arduino® Mega 2560 R3 (Figuras 3a e 3b):

Figura 3 – Placa Arduino® Mega e seus componentes



a) Frente

b) Verso

Fonte: <https://www.vidadesilicio.com.br/>. Acesso em: 3 ago. 2024.

A arquitetura do microcontrolador (Figura 3a) da placa Arduino® Mega 2560 R3 se baseia no sistema de Computador com Conjunto de Instruções Reduzido (*Reduced Instruction Set Computer* – RISC), em que a programação do Arduino® é realizada por meio de um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment* – IDE), cuja linguagem está em C/C++. As especificações técnicas dessa placa são:

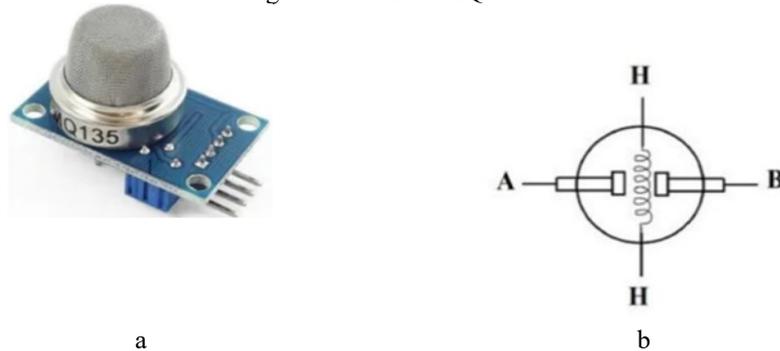
- Tensão de operação do micro controlador de cinco volts (V);

- Tensão de entrada recomendada com variação de sete a 12 V;
- Tensão de entrada com variação de seis a 20 V;
- Pinos de entrada/saída digital de 54, dos quais 15 fornecem Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM);
- 16 pinos de entrada analógica;
- Corrente Direta (*Direct Current* – DC) de 40 miliampères (mA) para cada pino de entrada/saída;
- DC de 50 mA usada para o pino de 3,3 V;
- Memória *flash* com 256 kilobytes (kB), em que 8 kB são usados com a ajuda do carregador de inicialização (*bootloader*);
- Memória de Acesso Aleatório Estática (*Static Random Access Memory* – SRAM) de 8 kB;
- Memória Somente de Leitura Programável Apagável Eletronicamente (*Erasable Programmable Read-Only Memory* – EEPROM) de 4 kB;
- Velocidade do *clock* (CLK) de 16 Megahertz (MHz);
- Hospedeiro do chip (*chip host*) da Porta Serial Universal (*Universal Serial Bus* – USB) MAX3421E;
- Comprimento de 101,52 milímetros (mm) e largura de 53,3 mm da placa;
- 36 gramas (g) de peso da prancha.

3.1.2 Sensor MQ-135 para medição do monóxido de carbono

Com o desenvolvimento das tecnologias de baixo custo, disponibilizaram-se diversos sensores no mercado para aplicações em variadas tarefas, como a elaboração de projetos de baixo custo – neste projeto, inclui-se o monitoramento da qualidade do ar. Entre os sensores disponíveis, encontram-se os de baixíssimo custo, com pouca confiabilidade, e os de baixo custo, com confiabilidade mais adequada. As Figuras 4a e 4b ilustram o principal sensor para medição de gases (sensor MQ-135) usado na pesquisa e a descrição de sua arquitetura:

Figura 4 – Sensor MQ-135



Fonte: <https://www.vidadesilicio.com.br/>. Acesso em: 3 ago. 2024.

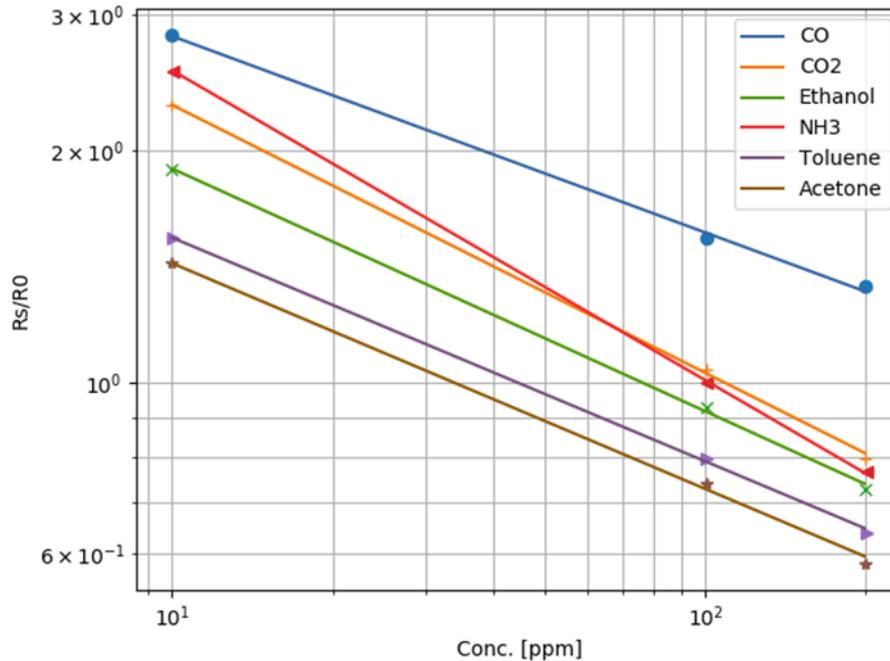
O sensor MQ-135 é capaz de detectar concentrações entre 10 e 300 ppm de amônia (NH_3) e álcool e entre 10 e 1000 ppm de benzeno (C_6H_6) no ar. A sensibilidade do equipamento pode ser ajustada por meio de um potenciômetro miniatura ajustável (*trimmer potentiometer* – trimpot) localizado atrás da placa. Quando algum gás ultrapassa o nível ajustado no trimpot, a Saída Digital (*Digital Output* – DO) do sensor fica em nível alto – em concentrações normais, a DO permanece em nível baixo. O módulo também possui uma Saída Analógica (*Analog Output* – AO), que permite medir a concentração de gases no ar com precisão. A alimentação do MQ-135 é de cinco Tensões Correntes Contínuas (*Voltage Direct Current* – VDC), e a leitura de envio das informações é feita pelo Circuito Integrado LM39 (Guse, 2022). O esquema eletrônico do sensor MQ-135 pode ser visualizado na Figura 4b, com o uso de uma camada de óxido metálico de estanho (SnO_2) como elemento sensível para detectar gases como CO, SO_2 , NO_2 e NH_3 .

De acordo com Shimizu (2014), a camada de SnO_2 no sensor MQ-135 é especialmente projetada para interagir com os gases-alvo de forma seletiva, ao mudar sua condutividade elétrica de maneira específica e em resposta à presença de tais gases. A transformação na condutividade elétrica é medida e convertida em um sinal elétrico interpretado pelo circuito eletrônico do sensor como a presença e a concentração do gás-alvo.

O gráfico a seguir mostra as características de leitura do sensor MQ-135 para os gases apresentados na legenda da Figura 5. Observa-se que o eixo y desse gráfico é (R_s/R_o) , correspondente à razão entre a resistência do sensor em determinado momento (R_s) e outra em um conjunto específico de condições (R_o). Isso ocorre porque a resistência do sensor depende da quantidade exata de material ativo na superfície do equipamento, que varia entre os sensores individuais. Portanto, a resposta da resistência deve ser normalizada em relação a um estado predefinido, para os resultados de diferentes sensores serem comparáveis. Para o MQ-135, esse estado predefinido é de 100 ppm de CO_2 em ar limpo a 20 °C e 65% de URA. A

resistência do sensor nesse estado deve ser conhecida para as curvas do gráfico serem aplicadas:

Figura 5 – Características de leitura do sensor MQ-135



Fonte: Elaboração do autor (2022).

As curvas na Figura 5 foram ajustadas por meio da regressão exponencial. Nesse caso, as respostas mostram um comportamento linear em escala log-log, cuja relação entre resistência e concentração pode ser expressa pela Equação 2:

$$R_s \times R_o = a \times c^b \quad (\text{Equação 2})$$

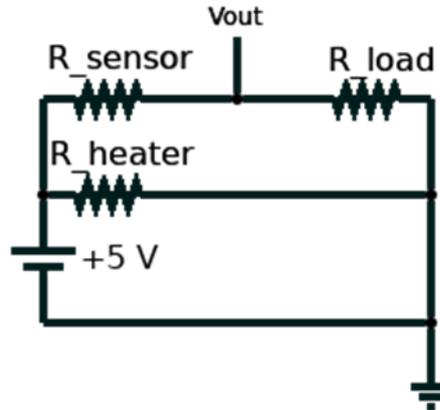
Em que a e b são constantes e c, a concentração de gás em ppm.

O MQ-135 se comporta como um resistor variável quando exposto a diferentes concentrações de gás. Para medir a concentração deste último por meio da Equação 2, é preciso, na realidade, mensurar a resistência do sensor. Ao conectar um resistor em série com o sensor e medir a tensão entre eles, pode-se criar um divisor de tensão (Figura 6). A medição da tensão de saída de um divisor de tensão é determinada pelo modelo apresentado na Equação 3:

$$V_{out} = \frac{R_L}{2 \times R_S} \times V \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: R_L é o resistor de carga; R_S , o resistor do sensor; e V , a tensão contínua fornecida pela bateria ou fonte de alimentação.

Figura 6 – Esquema eletrônico MQ-135



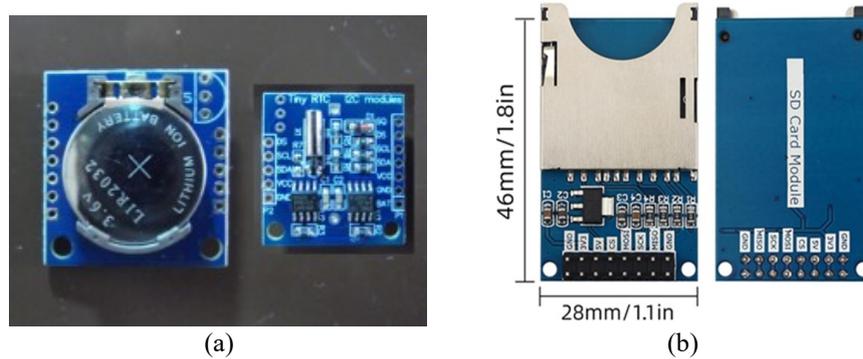
Fonte: Elaboração do autor (2022).

Quando a temperatura aumenta em direção à T_{min} (temperatura mínima), a resistência do sensor diminui, pois a temperatura alta contribui para taxas de reação rápidas entre o gás e o oxigênio adsorvido na superfície do sensor. Em termos simples, a interação entre o gás e o O_2 na superfície do sensor acontece rapidamente em temperaturas altas; no entanto, acima de T_{min} , a resistência do sensor aumenta, devido à reabsorção rápida de O_2 em temperaturas altas. Sendo assim, em temperaturas elevadas, mais O_2 é absorvido pela superfície do sensor para a mesma concentração de gás inflamável, o que pode resultar em menor disponibilidade de O_2 para reagir com o gás, o que aumenta a resistência do sensor. Em suma, abaixo de T_{min} , a resistência diminui devido às reações mais rápidas entre o gás e o O_2 ; acima de T_{min} , a resistência aumenta devido à reabsorção rápida de O_2 , o que limita a disponibilidade desse composto para as reações com o gás inflamável (Shimizu, 2014). As condições meteorológicas não afetam o sensor, por trabalhar em uma temperatura externa de $-20\text{ }^\circ\text{C}$ a mais de $70\text{ }^\circ\text{C}$ e com a URA a mais de 95%, condições favoráveis para o Brasil.

3.1.3 RTC1302 – Relógio de Tempo Real

O Relógio de Tempo Real (*Real Time Clock – RTC*) é utilizado no protótipo para gravar dias, meses, anos, horas, minutos e segundos da mensuração da quantidade de CO , cujos dados servem para a aferição temporal da quantidade de gás medido pelo sistema. A Figura 7a mostra a aparência desse componente, e a 7b, o leitor do Cartão Digital Seguro (*Secure Digital Card – SD Card*), local onde os dados são gravados:

Figura 7 – RTC1302

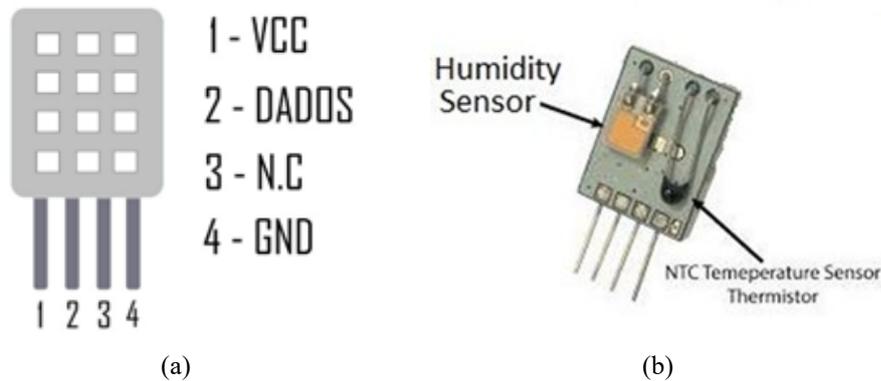


Fonte: <https://www.adafruit.com/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

3.1.4 Sensores diversos

Na Figura 8, observa-se o sensor DHT22, utilizado para coletar os dados referentes à temperatura e umidade. A Figura 8a representa o sensor fechado em seu invólucro, e a 8b, o interior dele (sensor de umidade de um lado e sensor de temperatura no outro):

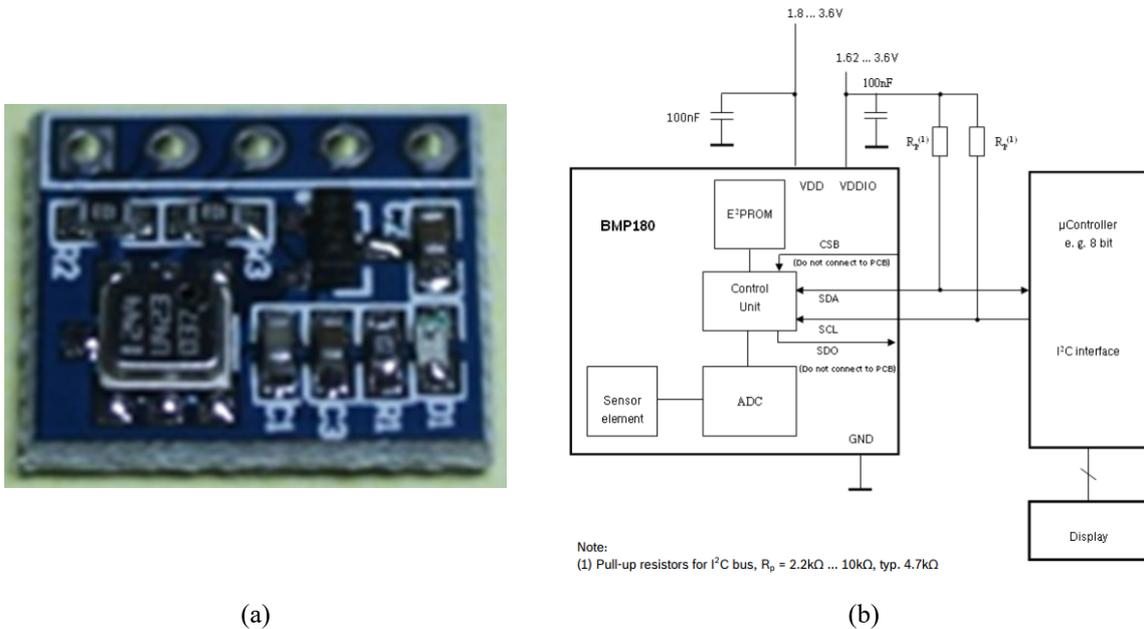
Figura 8 – Sensor DHT22



Fonte: <https://www.adafruit.com/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

O modelo de construção do sensor BMP 180, usado para medir a pressão barométrica, a temperatura e a altitude média é mostrado na Figura 9. Neste projeto, ele será utilizado para medir a altitude do equipamento por meio da Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft – RPA*)/drone de voo em relação ao solo. A Figura 9a indica a aparência do sensor, e a 9b, o diagrama de blocos com a lógica de funcionamento do aparelho:

Figura 9 – Sensor BMP180



(a)

(b)

Fonte: Elaboração do autor (2022).

3.1.5 Materiais diversos

O sistema de alimentação portátil do protótipo, composto por duas baterias de íons de lítio recarregáveis e o carregador, se encontra na Figura 10:

Figura 10 – Baterias e carregador



Fonte: Elaboração do autor (2022).

Enquanto isso, o conector de entrada P4 (Figura 11a) se destina à utilização do protótipo em lugares onde existem meios de alimentação elétrica 110/220v com a fonte de alimentação (Figura 11b):

Figura 11 – Conector P-4 e fonte de alimentação do protótipo



Fonte: <https://www.vidadesilicio.com.br/>. Acesso em: 3 ago. 2024.

Um *Display* de Cristal Líquido (*Liquid Crystal Display* – LCD) de 16x2, com conexão I2C, tipo serial, é mostrado na Figura 12. Tal conexão possibilita a ligação de diversos componentes no barramento serial do protótipo, com a necessidade de identificar o endereço hexadecimal na programação do microcontrolador:

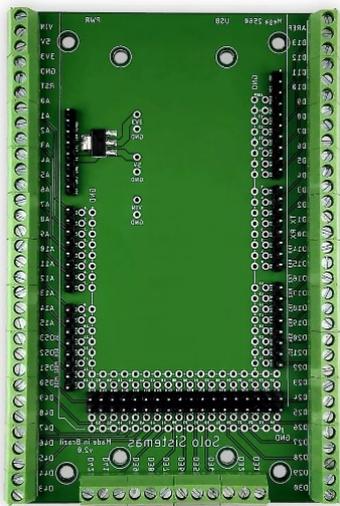
Figura 12 – Display LCD 16x2 e interface I2C



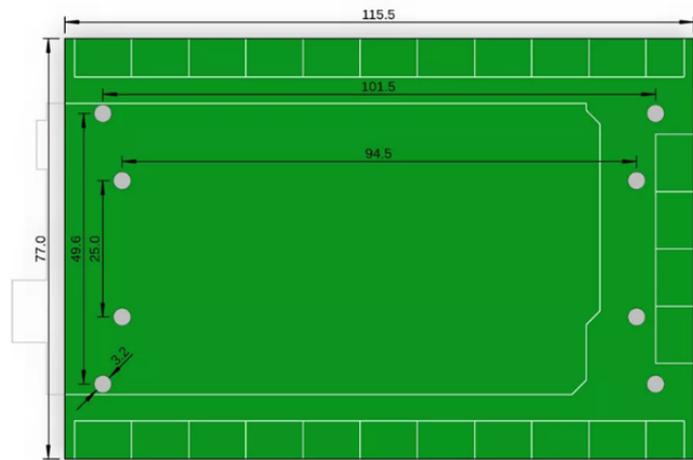
Fonte: <https://www.vidadesilicio.com.br/>. Acesso em: 3 ago. 2024.

Observa-se que a Figura 13 exibe a placa de bornes, a qual desempenha um papel relevante no acoplamento da placa Arduino[®] Mega, como ilustrado na Figura 1. Essa placa facilita a integração da Arduino[®] Mega e mantém uma conexão estável e organizada entre os diversos dispositivos interconectados. Com a função primordial de centralizar as conexões, a placa de bornes contribui para uma montagem eficiente e confiável do sistema, o que garante a eficácia das operações entre os componentes e otimiza o desempenho global do projeto. Sua presença simplifica a gestão de fios e cabos, ao proporcionar uma solução funcional à interconexão dos dispositivos.

Figura 13 – Placa de bornes



(a) Frente da placa

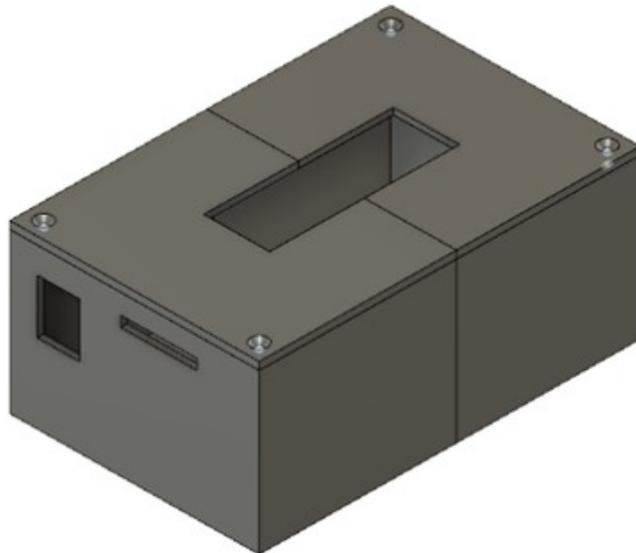


(b) Verso da placa

Fonte: Elaboração do autor (2022).

A caixa de montagem do protótipo, com rasgos, furações e aberturas para instalação do circuito é apresentada na Figura 14:

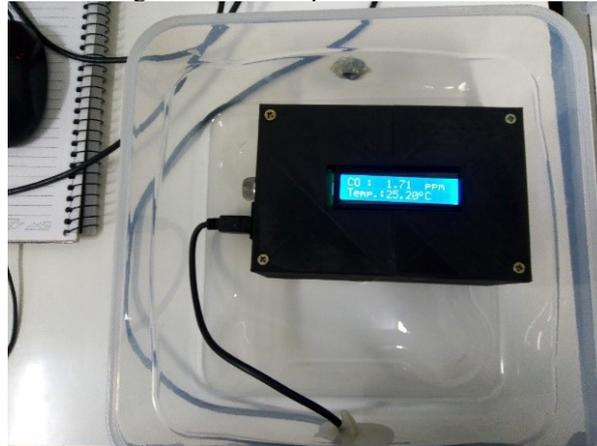
Figura 14 – Caixa de montagem do protótipo



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Por seu turno, a Figura 15 indica a caixa hermética com o protótipo e o cabo de conexão USB A-B:

Figura 15 – Caixa plástica hermética



Fonte: Elaboração do autor (2023).

O RPA/*drone* utilizado para a coleta de dados em perfil vertical foi o T40 3 da empresa DJI é mostrado na Figura 16:

Figura 16 – *Drone* T40



Fonte: Elaboração do autor (2024).

Esse *drone* apresenta autonomia média de voo de 40 minutos e é constantemente monitorado pelo aplicativo *Dji Delay* da própria empresa. Algumas características importantes desse equipamento são: peso total com bateria de 50 quilogramas (kg); velocidades máximas de subida e descida, respectivamente, de seis metros por segundo (m/s) e 12 m/s; velocidade máxima de movimentação de 16 m/s; câmera de 12 megapixels (MP), cujo tamanho máximo das fotografias é de 4.000 x 3.000 elementos de imagem (*picture elements* – pixels), salvas geralmente em formato do Grupo Conjunto de Especialistas em Fotografia (*Joint Photographic Experts Group* – JPEG) ou Imagem Digital Negativa (*Digital Negative Image* – DNG).

O cilindro com o CO com 100% de concentração é mostrado na Figura 17:

Figura 17 – Cilindro com CO a 100% de concentração



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Na Figura 18, há o Tedlar® com capacidade para um litro de gás:

Figura 18 – Tedlar® de 1L com septo para acesso



Fonte: Elaboração do autor (2023).

A seringa de precisão de 1 mililitro (mL) utilizada para manipulação de produtos gasosos está ilustrada na Figura 19:

Figura 19 – Seringa de precisão de 1mL



Fonte: Elaboração do autor (2023).

O Cromatógrafo Gasoso (CG), modelo Shimadzu CG-2014, está instalado no LTCM/Femec/UFU, é apresentado na Figura 20. Esse equipamento é utilizado para diversas funções de medidas e determinações laboratoriais. Assim, as medidas são realizadas por uma coluna Carboxen 1010 PLOT (0,32 mm de diâmetro interno \times 30 m de comprimento \times 15 μ m de espessura de filme):

Figura 20 – Cromatógrafo Gasoso CG-2014 Shimadzu



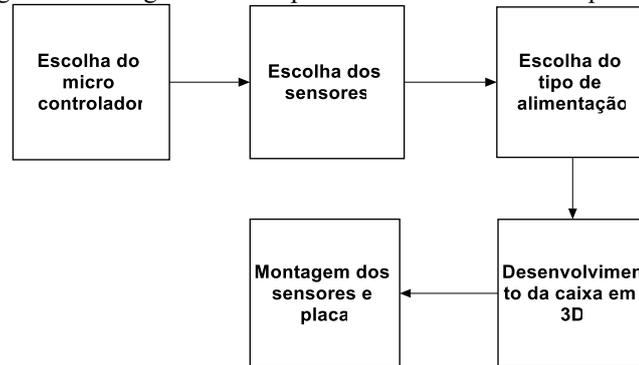
Fonte: Elaboração do autor (2023).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Elaboração do protótipo

O diagrama mostrado na Figura 21 representa as etapas desde a estruturação do protótipo até a programação:

Figura 21 – Diagrama das etapas de desenvolvimento do protótipo



Fonte: Elaboração do autor (2023).

A seleção do microcontrolador foi pautada nos critérios de custo de aquisição e facilidade de programação, os quais orientaram a escolha dos sensores compatíveis com o equipamento. Para funcionar, foi adotada uma fonte de alimentação versátil, que atende a dezenas de microcontroladores e fornece uma potência total adequada ao circuito usado.

Nesse caso, o *design* tridimensional (3D) da caixa que abriga o protótipo foi elaborado por meio do *software* 3D Fusion, versão gratuita para estudantes, fornecido pela empresa Autodesk. Por fim, a caixa foi materializada com base no projeto em 3D elaborado na impressora 3D Easy K7, conforme ilustrado na Figura 14.

O custo total da aquisição de peças varia de acordo com a cotação do dólar americano (US\$), em que foram considerados os valores constantes na Tabela 2:

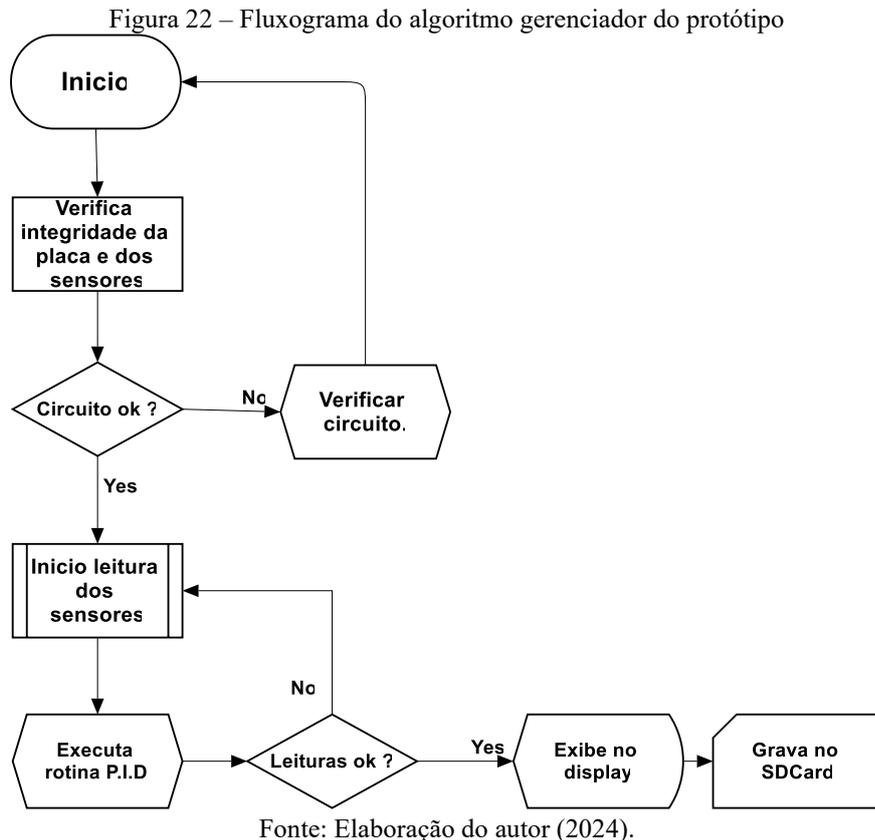
Tabela 2 – Preços dos componentes

Item	Qtde.	Preço em R\$	Valor total	Preço em US\$
Placa Arduino® Mega	1	R\$ 151,90	R\$ 151,90	26,84
Sensor MQ-135	1	R\$ 20,90	R\$ 20,90	3,69
RTC1302	1	R\$ 36,90	R\$ 36,90	6,52
Módulo SD Card	1	R\$ 7,90	R\$ 7,90	1,40
Sensor DHT22	1	R\$ 34,90	R\$ 34,90	6,17
Sensor BMP180	1	R\$ 7,90	R\$ 7,90	1,40
Baterias 18650	2	R\$ 14,90	R\$ 29,80	5,27
Carregador bateria 18650	1	R\$ 22,90	R\$ 22,90	4,05
Conector P-4 macho	1	R\$ 1,71	R\$ 1,71	0,30
Fonte de alimentação para Arduino®	1	R\$ 20,89	R\$ 20,89	3,69
Display LCD 16x2 I2C	1	R\$ 28,40	R\$ 28,40	5,02
Placa de bornes para Arduino® Mega	1	R\$ 163,00	R\$ 163,00	28,80
Caixa de montagem do protótipo	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00	7,07
Mão de obra	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00	35,34
TOTAL FINAL	15	R\$ 767,10		135,53

Fonte: Elaboração do autor (2024), com base no dólar cotado em 20 de junho de 2024 (R\$ 5,66).

3.2.2 Programação do *software* do protótipo

A seguir é apresentado o fluxograma de programação do algoritmo conforme ilustrado na Figura 22. O fluxograma é um instrumento importante para a orientação na construção da lógica de programação do micro controlador.



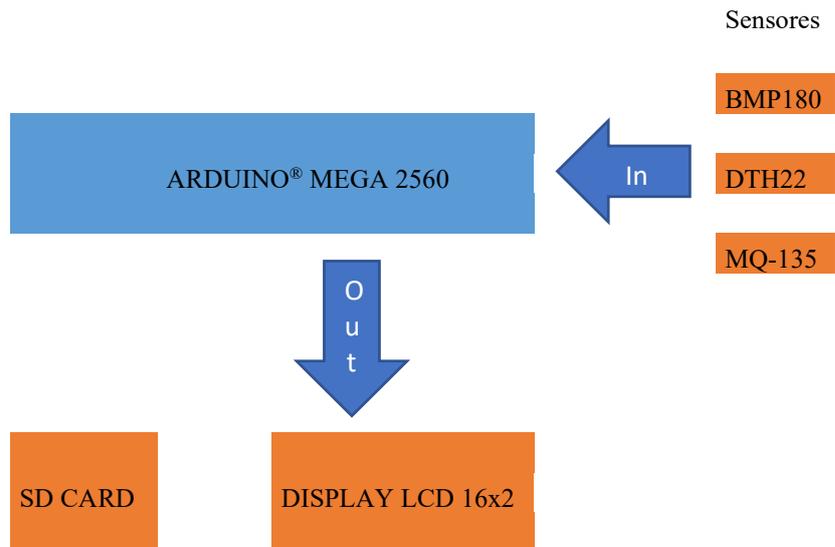
Com base no fluxograma apresentado acima, o algoritmo inicia com a ativação do protótipo e, em seguida, são verificadas as condições operacionais de placas e sensores no circuito. Se houver erro em alguma placa e/ou sensor, o circuito é verificado e o processo recomeça; caso a resposta seja positiva, com placas e sensores em condições operacionais, procede-se à leitura dos sensores.

Depois disso, os dados são submetidos à rotina PID e, se forem considerados íntegros, aparecem no LCD 16x2 e são registrados em um SD card; em caso de inconsistências, uma nova leitura e validação são realizadas, com a repetição sucessiva de tal procedimento.

3.2.3 Modo de leitura e gravação dos dados

O protótipo foi montado na plataforma Arduino® Mega 2560 e conectado a uma placa de organização que dispõe de bornes para a conexão dos sensores de CO, temperatura e umidade, sensor barométrico, display LCD 16x2 e um suporte para as pilhas de alimentação elétrica. A disposição dos componentes do protótipo é ilustrada na Figura 23:

Figura 23 – Diagrama de blocos do protótipo



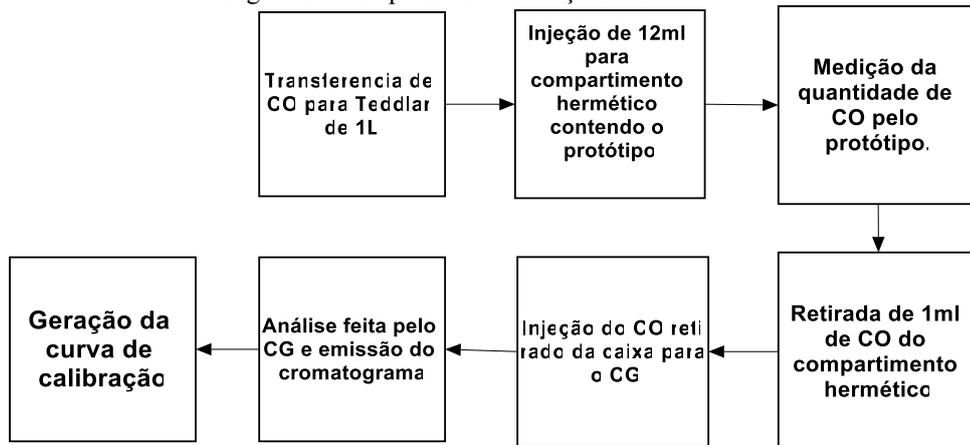
Fonte: Elaboração do autor (2023).

Como dito anteriormente, a linguagem de programação empregada na plataforma Arduino® é a C++, com bibliotecas personalizadas desenvolvidas a todos os sensores utilizados. Ela se destaca pela interface amigável e por uma compilação extremamente estável.

3.2.4 Ensaios de laboratório para calibração do protótipo

O esquema de calibração e ensaios em laboratório, mostrado na Figura 24, denota as etapas seguidas para a aquisição dos dados. Os ensaios para a obtenção da curva de calibração do protótipo foram feitos No LTCM/Femec/UFU, por meio do método de Cromatografia Gasosa (*Gas Chromatography*).

Figura 24 – Esquema de calibração em laboratório



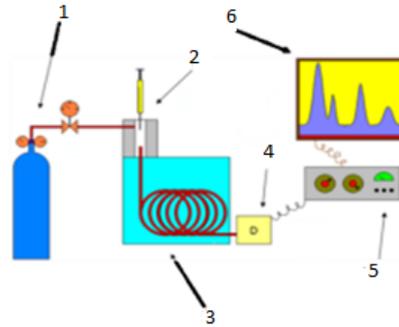
Fonte: Elaboração do autor (2024).

A priori, o protótipo foi colocado em uma caixa hermética, completamente vedada. Com uma microsseringa, 12mL de CO foram injetados no interior da caixa hermética por meio de um septo de vedação (Figura 19). *A posteriori*, realizou-se a leitura no protótipo do teor quantitativo de CO presente na caixa hermética. O procedimento experimental prosseguiu com a extração de uma amostra de 1mL da mistura gasosa presente na caixa, com a mesma microsseringa, para ser introduzida no CG para medida e análise quantitativa do teor gasoso. Tal procedimento experimental foi repetido por três vezes e garantiu triplicidade nos dados registrados/lidos pelo CG.

Conforme descrito por Collins *et al.* (2007) e Skoog *et al.* (2008), a Cromatografia Gasosa é a técnica de separação dos componentes de uma amostra vaporizada, com a distribuição dos componentes entre o gás de arraste (etapa móvel) e uma fase estacionária líquida ou sólida contida na coluna cromatográfica. A base de tal separação reside na diferente afinidade das substâncias da amostra entre as fases móvel e estacionária.

No presente estudo, as análises foram conduzidas por meio de um CG (Figura 19) equipado com uma coluna Carboxen 1010 PLOT (item 3 da Figura 25), instalada internamente. A identificação dos compostos foi realizada pelo Detector de Ionização de Chama (DIC) e Detector de Condutividade Térmica (DCT), também integrados ao cromatógrafo (item 4 da Figura 25). Por fim, os dados obtidos no CG foram processados e analisados com o *software* OriginPro 2024 (64-bit) – versão 101.0.170 (Versão de Aprendizado – *Learning Edition*) (item 6 da Figura 25):

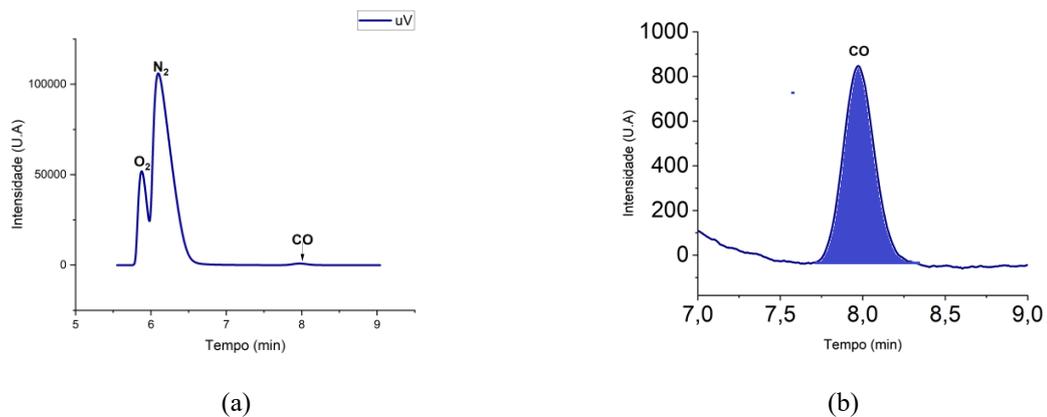
Figura 25 – Diagrama de bloco do processo do cromatógrafo

**LEGENDA**

- 1 - Reservatório de gás e controles de vazão/pressão
- 2 - Injetor (vaporizador) da amostra
- 3 - Coluna cromatográfica e forno da coluna.
- 4 - Detector (DIC e DCT)
- 5 - Tratamento eletrônico (amplificação) de sinal
- 6 - Registro de sinal (registrador ou computador)

Fonte: Point (2018).

Nesse processo, as substâncias eluídas da coluna são conduzidas a um detector, dispositivo que gera sinais elétricos proporcionais à quantidade de material eluído, cujo registro ao longo do tempo resulta no cromatograma (Figura 26a). Segundo Skoog *et al.* (2008) e Collins *et al.* (2007), a área do pico (hachurada em azul) gerada no cromatograma (Figura 26b) pode ser correlacionada à concentração do analito por meio de uma constante de proporcionalidade derivada da curva analítica, o que permite a análise quantitativa:

Figura 26 – Cromatograma obtido para O₂, N₂ e CO

Fonte: Elaboração do autor (2023).

A Figura 26a ilustra o cromatograma com os respectivos picos de O₂, N₂ e CO, e a 25b, o *zoom* do pico de CO. Tal representação se baseia no tempo de reação de cada componente da mistura (1mL) inserida no cromatógrafo.

3.2.5 Calibração do protótipo com base nas leituras do cromatógrafo

O valor da curva de calibração foi determinado por meio de processamento matemático e estatístico, com base no *software* Microsoft® Office Excel, que envolveu a

análise dos dados coletados simultaneamente pelo protótipo e pelo CG. A aplicação de estatística básica desempenhou um papel crucial nesse procedimento, ao incluir a extração de médias, medianas, máximas e mínimas, cujas análises detalhadas culminaram na obtenção do valor final da curva de calibração, com uma base sólida para a precisão e confiabilidade das medições realizadas pelo sistema. Assim, a diferença entre os valores médios das medidas simultâneas do protótipo (MLP) e do cromatógrafo (MLC) foi utilizada como valor de correção (VC), conforme a Equação 4:

$$VC = (MLC - MLP) \quad \text{(Equação 4)}$$

Tal valor foi inserido no algoritmo do protótipo, para as novas leituras serem realizadas conforme os valores de concentração de CO.

3.2.6 Fase experimental em ambiente não controlado

Nesta etapa com o protótipo calibrado, ocorreram ensaios ao ar livre, onde não há controle da concentração de quaisquer gases. O primeiro experimento foi realizado em nível de solo, em um ponto considerado estratégico por ser um terminal de ônibus com grande concentração de CO; o outro aconteceu com o auxílio de um RPA/*drone*, para medir a concentração de CO em alturas diferentes, em um perfil vertical de 80 m (metros) de altura. Em ambos os experimentos, o protótipo foi configurado para realizar leituras de 6 em 6 segundos (s).

3.2.6.1 Experimento ao nível do solo

Durante esta etapa, o protótipo foi operacionalizado na área externa do Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG), com o objetivo de avaliar a presença de concentrações de CO no ambiente. No local, existe uma estrutura para proteção dos sensores contra intempéries, pertencente à Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da UFU, a qual foi empregada nos experimentos desta pesquisa como suporte para acoplamento do protótipo. Para o seu funcionamento, utilizou-se uma rede elétrica local com a fonte de alimentação presente na estrutura.

Nesse ínterim, o experimento foi conduzido ao longo de 24h, em dois experimentos distintos, com a finalidade de monitorar a concentração de CO em duas datas diferentes. Diante das leituras obtidas com o protótipo e tabeladas em Excel, foram realizadas as médias móveis a cada 8h, para verificar se o grau da concentração de CO está em conformidade com a Resolução Conama n. 491 (Brasil, 2018). Como visto anteriormente, tal norma estabelece o limite máximo da concentração de CO em 9 ppm, de acordo com a média móvel máxima calculada a cada período de 8h ao longo do dia.

3.2.6.2 *Experimento em perfil vertical com uso de RPA/drone*

De acordo com Lima (2007), a quantidade de amostras em estudos sobre a qualidade do ar pode ser determinada por um modelo que considera variáveis como a direção do vento, o porte da cidade, entre outras. Para o caso de Uberlândia (MG), o autor aponta a necessidade de cinco pontos amostrais, visto que os ventos sobre o município provêm do Nordeste. Entretanto, devido ao custo elevado dos voos com RPA/*drone* e ao tempo exíguo para a finalização do mestrado, foram realizados voos em apenas três pontos amostrais nesta investigação – eles foram estrategicamente escolhidos, de modo a evitar os locais com restrições estabelecidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), mas deveriam estar em conformidade a (ou próximos de) fontes de emissões de CO, com diferentes concentrações acumuladas.

Para tanto, os três pontos amostrais escolhidos para a execução dos voos foram: voo n. 1, no *Campus* Glória da UFU (coordenadas: 18°56'40"S, 48°12'59"W); voo n. 2 no Distrito Industrial de Uberlândia (MG) (coordenadas: 18°51'04"S, 48°17'46"W); e voo n. 3 no Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG) (coordenadas: 18°54'47"S, 48°16'31"W), conforme a Figura 21. O ponto referente ao primeiro voo é uma área rural, com fazendas ao redor e a presença de duas rodovias nas proximidades; o segundo corresponde a uma área industrial, onde se espera maior concentração de CO disperso pelas empresas; e o terceiro é o mais crítico em termos de fontes de dispersão de CO, pois está em um terminal de transporte urbano que, além de apresentar fluxo intenso de ônibus, é cercado por avenidas de tráfego abundante. Assim sendo, foram efetuadas 88 leituras por ponto em perfil vertical (Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8).

Figura 27 – Posicionamento dos pontos de coleta de dados com o *drone*

Fonte: Uberlândia (2024).

Os voos foram planejados minuciosamente para minimizar ao máximo as vibrações e interferências dos ventos produzidos pelas hélices do RPA/*drone*. Para isso, o protótipo foi fixado ao *drone* em local estratégico, com abraçadeiras plásticas resistentes. As medições foram efetuadas em um perfil vertical iniciado no solo e prolongado até 80 m de altura.

Desse modo, as leituras de CO realizadas com o protótipo foram configuradas com intervalo de seis em seis minutos (min.) durante a subida e a descida do *drone*. No ponto mais alto (80 m), tal equipamento ficou parado por 6 min. para maior repetição de leituras nessa altura específica – a velocidade em ambos os movimentos foi de aproximadamente 2,77 m/s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO CONFORME AS LEITURAS DO CROMATÓGRAFO

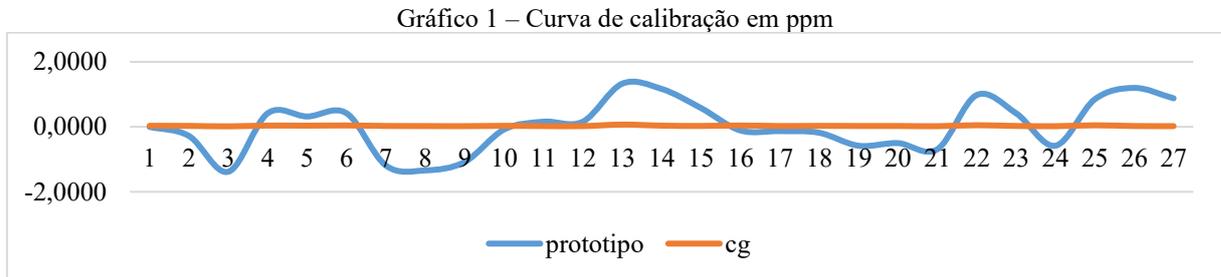
Na calibração em laboratório, foi utilizado o aparelho CG-2014 Shimadzu, o qual proporcionou leituras exatas da concentração de CO e, com base nesses dados, foi criada a Tabela 3 que indica os resultados lidos pelo cromatógrafo e pelo protótipo:

Tabela 3 – Curva de calibração

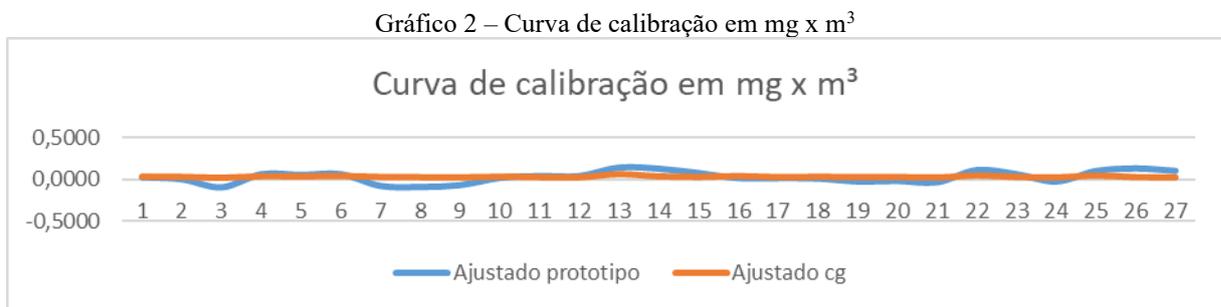
Protótipo	Cromatógrafo gasoso	Ajuste
2,580	0,0280	2,5520
2,300	0,0249	2,2751
1,200	0,0131	1,1869
3,000	0,0338	2,9662
2,900	0,0316	2,8684
3,000	0,0371	2,9629
1,390	0,0240	1,3660
1,240	0,0207	1,2193
1,500	0,0185	1,4815
2,500	0,0273	2,4727
2,740	0,0207	2,7193
2,740	0,0196	2,7204
3,910	0,0611	3,8489
3,750	0,0316	3,7184
3,160	0,0240	3,1360
2,470	0,0360	2,4340
2,450	0,0218	2,4282
2,400	0,0262	2,3738
2,000	0,0229	1,9771
2,080	0,0229	2,0571
1,890	0,0175	1,8725
3,560	0,0436	3,5164
3,000	0,0240	2,9760
2,000	0,0175	1,9825
3,430	0,0415	3,3885
3,780	0,0218	3,7582
3,460	0,0185	3,4415
Média = 2,6085	0,0271	Ajuste 2,5815
Desvio = 0,7810	0,0102	
Min. = 1,2000	0,0131	
Máx. = 3,9100	0,0611	

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Enquanto isso, o Gráfico 1 exibe a curva de calibração em ppm, e o Gráfico 2, os valores em $\text{mg} \times \text{m}^3$:



Fonte: Elaboração do autor (2023).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

O ajuste no protótipo foi realizado pela alteração na saída do sensor MQ-135, ao ser executado via programação, em que foi incluído o valor da diferença de ajuste para igualar as leituras às do CG. As amostras lidas pelo sensor também foram convertidas em $\text{mg} \times \text{m}^3$, com base nas Equações 5 e 6:

$$\text{mg} \times \text{m}^3 = \text{ppm} \times (28,01 - 24,45) \quad (\text{Equação 5})$$

Ou

$$\text{ppm} = \left(\frac{28,01}{\text{mg}/\text{m}^3} \right) \times 24,45 \quad (\text{Equação 6})$$

A massa molar do CO é de aproximadamente 28,01 g/mol, e 24,45 é a resultante da conversão de unidades.

4.2 COLETA DE DADOS EM AMBIENTE ABERTO

Experimentos foram realizados em ambiente aberto, na estação ao nível do solo e em perfil vertical com uso de RPA/drone. Nas primeiras coletas de dados, houve erro no sistema de gravação do protótipo e, após a análise apurada do algoritmo, se descobriu uma falha no registrador de dados (*datalogger*), o qual foi substituído e o sistema voltou ao funcionamento.

4.3 COLETA DE DADOS EM NÍVEL DE SOLO

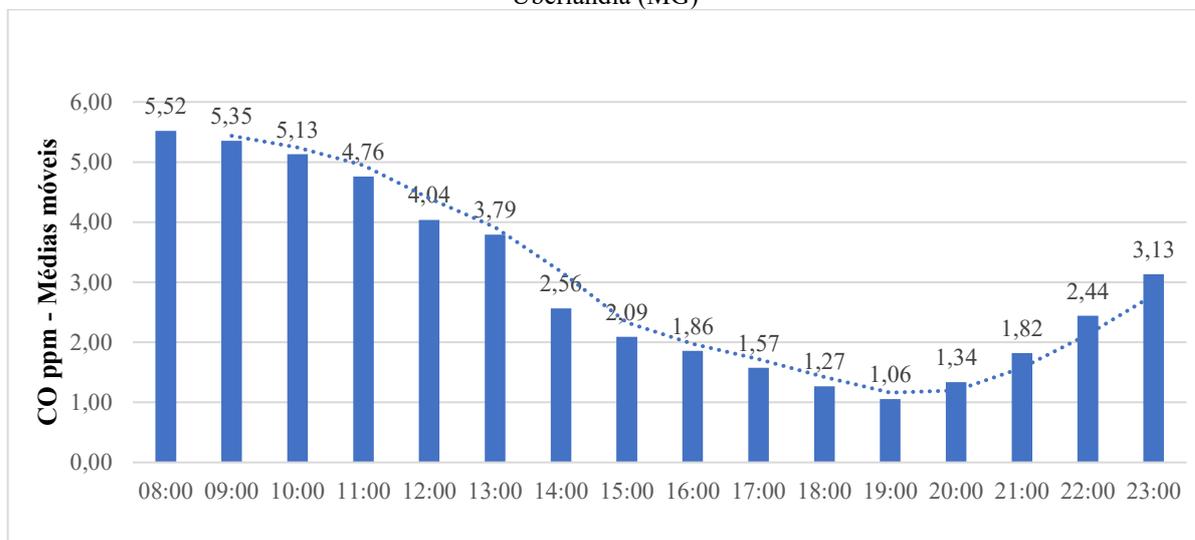
A primeira obtenção de dados aconteceu na estação de coleta de qualidade do ar instalada no Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG), em se tratando das 24h do dia 25 de dezembro de 2023 (Tabela 4). Os dados foram gravados a cada 6 s, com o respectivo tratamento estatístico por meio da média harmônica, método mais adequado ao estudo da variação dos dados em relação ao tempo.

Tabela 4 – Dados de 25 de dezembro de 2023

Tempo	Hora	ppm
0h às 8h	8h	5,52
1h às 9h	9h	5,35
2h às 10h	10h	5,13
3h às 11h	11h	4,76
4h às 12h	12h	4,04
5h às 13h	13h	3,79
6h às 14h	14h	2,56
7h às 15h	15h	2,09
8h às 16h	16h	1,86
9h às 17h	17h	1,57
10h às 18h	18h	1,27
11h às 19h	19h	1,06
12h às 20h	20h	1,34
13h às 21h	21h	1,82
14h às 22h	22h	2,44
15h às 23h	23h	3,13

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Gráfico 3 – Média móvel de CO em 25 de dezembro de 2023 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Diante dos dados do Gráfico 3, nota-se que as concentrações de CO são coerentes com as médias móveis calculadas a cada 8h em 24h. Apesar de o período da 0h às 8h da manhã ter ultrapassado os limites estabelecidos, as médias móveis permaneceram conforme os padrões estabelecidos pela Resolução Conama n. 491 (Brasil, 2018) para a concentração de CO, de 9 ppm para 8h. Foi um dia atípico devido ao feriado de Natal, que resultou em um movimento contínuo e elevado de veículos nas primeiras 8h do dia. Enquanto isso, das 8h às 16h, a média investigada se manteve abaixo do limite, o que indicou uma redução na emissão de poluentes. No entanto, a partir das 16h, o aumento no tráfego de automóveis no local da coleta resultou em ligeira elevação nas concentrações de CO, ao refletir o retorno gradual das atividades urbanas.

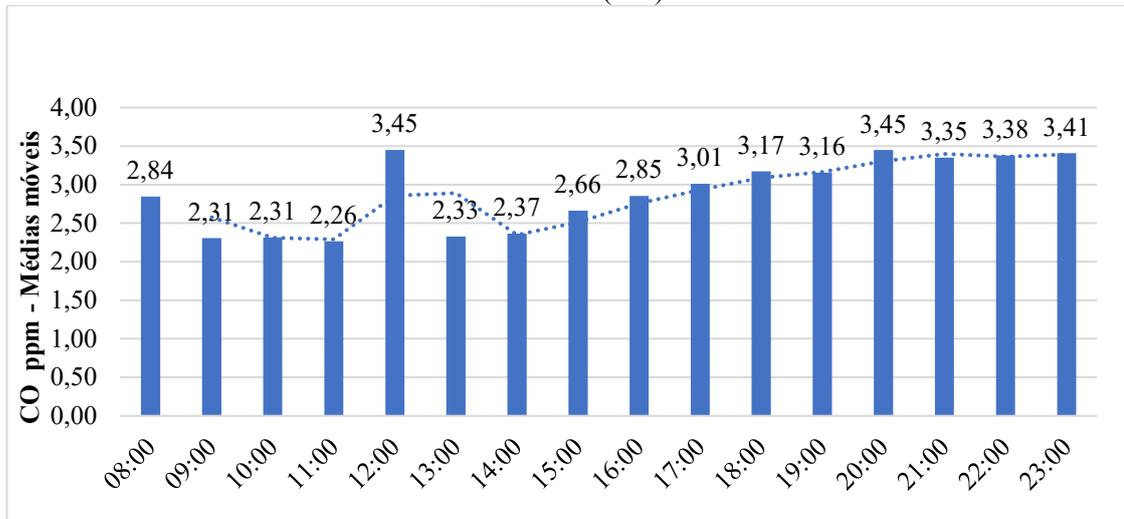
No dia 16 de janeiro de 2024, as leituras de concentração de CO coadunaram os padrões normais, com média móvel de 8h mantida abaixo do limite máximo de 9 ppm estabelecido pela Resolução Conama n. 491 (Brasil, 2018). Como pode ser observado na Tabela 5, os níveis de CO registrados estiveram consistentemente nos valores aceitáveis ao longo do dia, o que indica uma qualidade do ar adequada para a saúde pública:

Tabela 5 – Dados de 16 de janeiro de 2024

Tempo	Hora	ppm
0h às 8h	08h	2,84
1h às 9h	09h	2,31
2h às 10h	10h	2,31
3h às 11h	11h	2,26
4h às 12h	12h	3,45
5h às 13h	13h	2,33
6h às 14h	14h	2,37
7h às 15h	15h	2,66
8h às 16h	16h	2,85
9h às 17h	17h	3,01
10h às 18h	18h	3,17
11h às 19h	19h	3,16
12h às 20h	20h	3,45
13h às 21h	21h	3,35
14h às 22h	22h	3,38
15h às 23h	23h	3,41

Fonte: Elaboração do autor (2024).

Gráfico 4 – Média móvel de CO em 16 de janeiro de 2024 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)

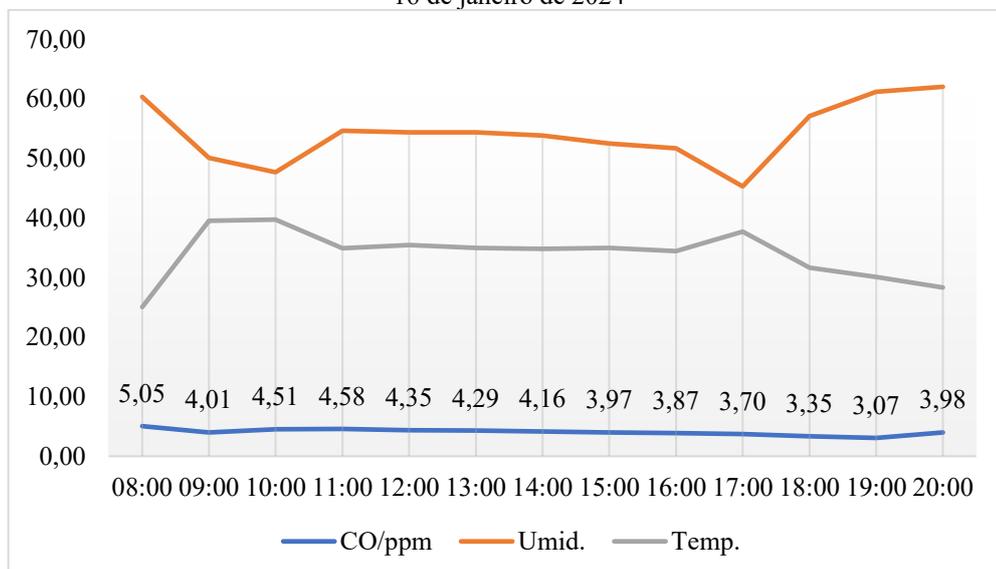


Fonte: Elaboração do autor (2024).

Em 16 de janeiro de 2024, o gráfico mostra o comportamento de CO nos arredores do Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG), com duas máximas médias móveis de 3,45 ppm de CO às 12h e 20h. Tais valores provavelmente foram picos de concentração específicos e denotam a dinâmica do local.

A temperatura ambiente pode influenciar significativamente a formação e dissipação do CO. Por um lado, em temperaturas elevadas, a reação de combustão incompleta com a geração de CO tende a ser eficiente e aumenta a formação desse poluente. Por outro lado, elas também podem acelerar a dispersão do CO na atmosfera devido ao acréscimo na movimentação das moléculas de ar (Seinfeld; Pandis, 2016) (Gráfico 5):

Gráfico 5 – Relação entre temperatura, Umidade Relativa do Ar e monóxido de carbono durante 12 horas do dia 16 de janeiro de 2024



Fonte: Elaboração do autor (2024).

Em geral, reações químicas tendem a ocorrer rapidamente em temperaturas altas. Assim, se houver processos de combustão ou outras fontes de liberação de CO, a temperatura ambiente pode afetar a taxa de produção desse gás. A relação entre o CO e as altíssimas temperaturas está documentada na literatura científica, sobretudo em estudos relacionados a incêndios florestais e queimas controladas, devido à combustão incompleta da biomassa que resulta na liberação de CO. Tal processo ocorre devido à insuficiência de O₂ disponível para a completa oxidação do C presente nos materiais combustíveis. Estudos como os de Andreae (1991) discutem as complexidades da química de gases em incêndios florestais, em que o CO é um dos principais produtos de combustão incompleta.

Conforme os resultados desta pesquisa, a URA não apresentou um efeito direto na formação ou saturação de CO. No entanto, como descrito por Chen *et al.* (2012), a umidade pode influenciar indiretamente a qualidade do ar e a dispersão de poluentes, ou seja, ambientes úmidos podem afetar a dispersão de poluentes atmosféricos, mas essa relação é complexa e depende de vários fatores locais. Portanto, enquanto a temperatura ambiente e a URA podem impactar indiretamente a presença e a dispersão de poluentes atmosféricos, a relação específica com a saturação de CO é complexa e dependente de condições locais, fontes de emissão e características do ambiente. Cumpre afirmar que a monitorização direta dos níveis de CO é essencial para avaliar a qualidade do ar em relação a esse gás tóxico.

A saturação de CO se refere à quantidade de CO presente em relação à capacidade máxima de absorção em determinado ambiente, o que compreende as fontes de emissão de CO e a ventilação do ambiente em detrimento à temperatura ou umidade. Locais mal ventilados, como espaços fechados sem ventilação adequada, podem ter níveis elevados de saturação de CO, sobretudo se houver fontes de combustão no local (por exemplo, aquecedores a gás e fogões). Como não há uma relação direta entre temperatura, URA e CO, este estudo focou apenas a medição do CO, sem se preocupar com as outras mensurações.

Um protótipo com Arduino[®] Mega e o sensor MQ-135 para medição de CO, integrado a um *drone*, pode ser uma ferramenta eficaz na melhoria da qualidade do ar, ao se alinhar aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificamente ao ODS 11, que visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (Organização das Nações Unidas, 2015b). O sensor MQ-135 é especializado na detecção de CO e, ao ser combinado com a versatilidade do Arduino[®] Mega e a mobilidade de um *drone*, é possível monitorar a qualidade do ar de forma abrangente e precisa, mesmo em áreas de difícil acesso. A implementação desse sistema com um investimento inicial estimado entre R\$

767,00 (sem o *drone*) se torna uma solução viável para pequenas e médias cidades. Essa abordagem de baixo custo permite a coleta de dados essenciais à formulação de políticas públicas eficazes e à implementação de medidas mitigadoras, ao promover um ambiente urbano saudável e sustentável (Silva, 2021).

4.4 COLETA DE DADOS EM PERFIL VERTICAL COM RPA/DRONE

Pontos de coleta de dados foram elaborados de acordo com o regime dos ventos que atuam sobre o município de Uberlândia (MG), como exposto anteriormente. No dia da realização dos voos, as condições meteorológicas foram favoráveis, com leve brisa na direção noroeste.

A coleta de dados foi realizada em 20 de maio de 2024, das 15h20 às 16h40, horário propício para os ambientes escolhidos por meio de um *drone* equipado com sensores específicos à medição de CO. O procedimento consistiu em quatro etapas em perfil vertical, que culminaram em uma altitude de 80 m acima do nível do solo. Para garantir a precisão dos dados e permitir uma análise comparativa robusta, o *drone* permaneceu estabilizado a 80 m de altura por um período de 6 min. e programado para realizar as medições de CO em intervalos específicos durante a subida vertical.

Cada etapa de medição foi rigorosamente temporizada e calibrada para garantir a integridade dos dados, com vistas à análise da variação na concentração de CO em função da altitude. Observou-se uma tendência de diminuição da concentração desse composto com o aumento da altura, tendência atribuída a diversos fatores, como a dispersão do poluente devido a correntes de ar e a menor densidade de fontes de emissão em maiores altitudes. Ao comparar os dados obtidos a 80 m de altura com aqueles coletados ao nível do solo, foi possível verificar uma diferença significativa nas concentrações de CO; logo, a dispersão do CO é mais eficiente em maiores altitudes, ao reduzir potencialmente os riscos de exposição humana ao poluente nas camadas altas da atmosfera.

No Gráfico 5, é possível verificar o comportamento dispersivo do CO em um perfil vertical de 80 m de altura – a área selecionada para o estudo, embora próxima a uma rodovia com intenso tráfego de veículos automotores, não apresentou um acúmulo significativo nas concentrações de CO registradas. Por sua vez, a Tabela 6 contém os dados referentes ao voo n. 1, realizado sobre o *Campus* Glória da UFU, com elevação nas leituras de concentração de poluentes nos últimos dois minutos de voo – tal acréscimo pode ser atribuído à presença de

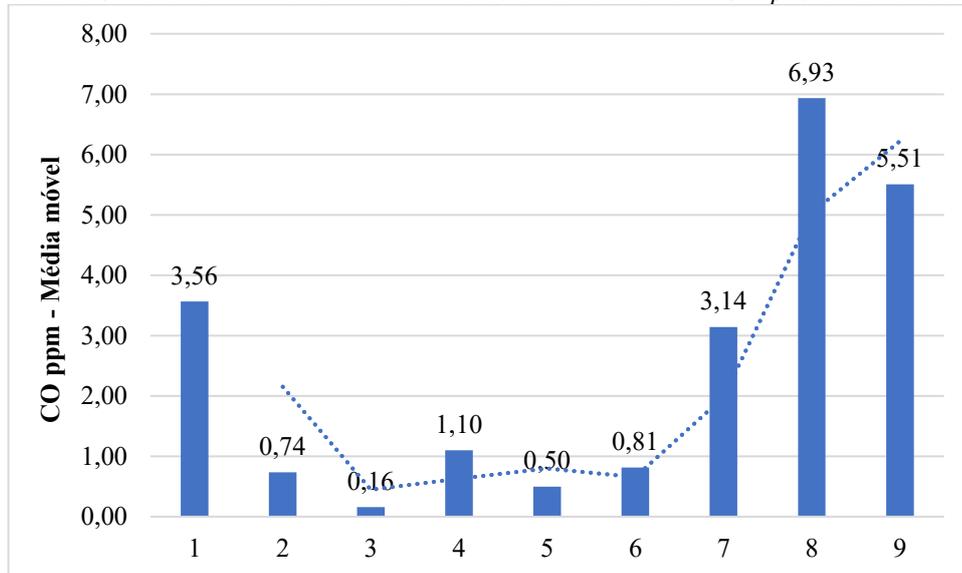
caminhões pesados que trafegaram pelo local durante o período de descida do *drone*. A movimentação desses veículos, conhecidos por suas emissões significativas de CO e outros poluentes, impactou diretamente as medições e resultou em valores superiores aos registrados nos minutos anteriores do voo. Esses dados ressaltam a influência das fontes móveis de emissão na qualidade do ar local que, apesar de ser um ambiente rural, fica próximo a uma rodovia movimentada de fato.

Tabela 6 – Dados do voo n. 1 – *Campus Glória da UFU*

Tempo	Hora	ppm
15h20 às 15h21	15h20	3,56
15h21 às 15h22	15h21	0,74
15h22 às 15h23	15h22	0,16
15h23 às 15h24	15h23	1,10
15h24 às 15h25	15h24	0,50
15h25 às 15h26	15h25	0,81
15h26 às 15h27	15h26	3,14
15h27 às 15h28	15h27	6,93
15h28 às 15h29	15h28	5,51

Fonte: Elaboração do autor (2024).

Gráfico 6 – Coleta de dados no voo n. 1 em 20 de maio de 2024 – *Campus Glória da UFU*



Fonte: Elaboração do autor (2024).

No Gráfico 6 e na Tabela 6, observou-se um acúmulo significativo de monóxido de carbono (CO) no perfil de 80 m de altura. Durante a coleta dos dados, não havia movimentação nas correntes de ar, apesar de a temperatura e a URA estarem consideravelmente alteradas. Contudo, conforme discutido anteriormente, esses parâmetros não possuem correlação direta com as concentrações de CO, pelo fato de a dispersão do CO ser influenciada pela dinâmica atmosférica, como a presença de ventos e turbulências, do que por variáveis meteorológicas isoladas (Smith; Brown; Clark, 2018). A ausência de

movimentação do ar resultou em uma menor dispersão do CO, o que permitiu o acúmulo do poluente na referida altitude.

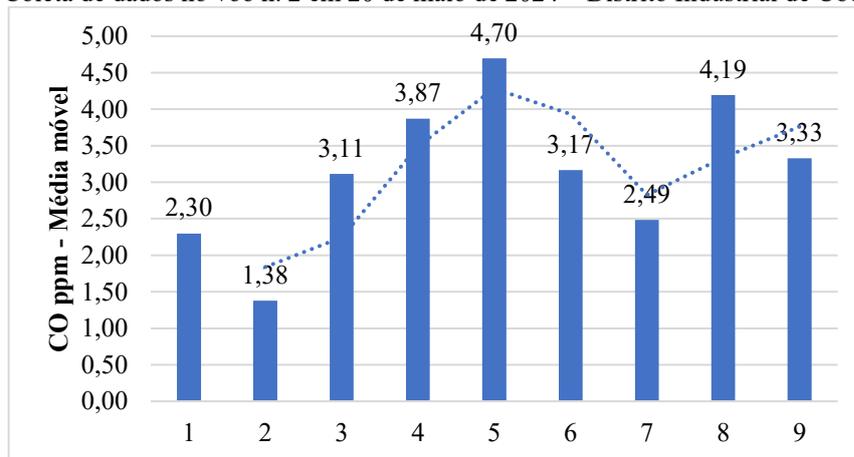
A Tabela 7 mostra os dados coletados do voo n. 2, no Distrito Industrial de Uberlândia (MG):

Tabela 7 – Dados do voo n. 2 – Distrito Industrial de Uberlândia (MG)

Tempo	Hora	ppm
16h às 16h01	16h	2,30
16h01 às 16h03	16h01	1,38
16h03 às 16h04	16h02	3,11
16h04 às 16h05	16h03	3,87
16h05 às 16h06	16h04	4,70
16h06 às 16h07	16h05	3,17
16h07 às 16h08	16h06	2,49
16h08 às 16h09	16h07	4,19
16h09 às 16h10	16h08	3,33

Fonte: Elaboração do autor (2024).

Gráfico 7 – Coleta de dados no voo n. 2 em 20 de maio de 2024 – Distrito Industrial de Uberlândia (MG)



Fonte: Elaboração do autor (2024).

No gráfico acima, observa-se um aumento significativo na dispersão de CO, o que pode ser justificado pelo horário das medições, com alta concentração de veículos automotores na área. Notavelmente, a velocidade do vento permaneceu constante em relação às outras localidades monitoradas, e o padrão de dispersão de CO é consistente com estudos que demonstram a correlação entre o tráfego veicular intenso e o acréscimo nas emissões de poluentes atmosféricos (Zhong *et al.*, 2020).

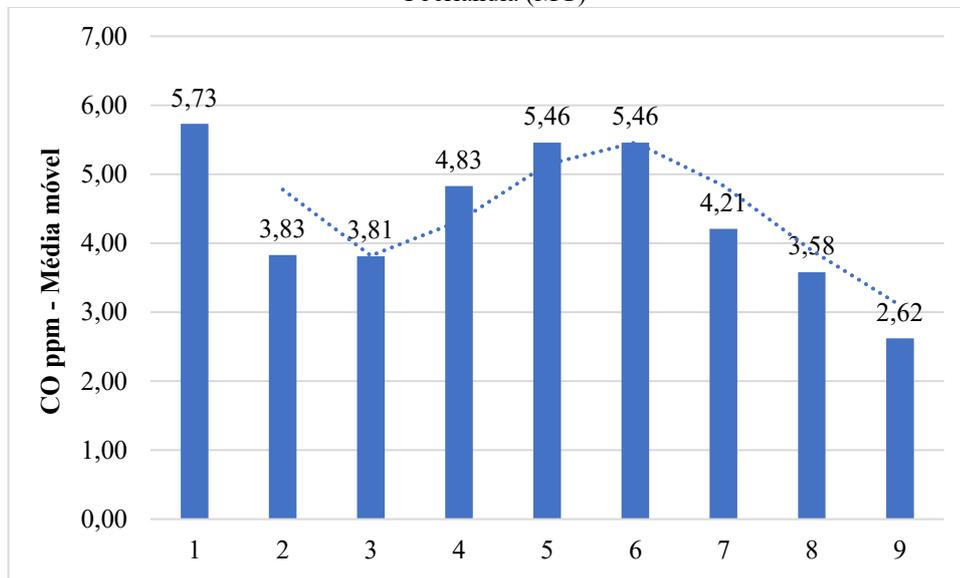
A Tabela 8 sintetiza os registros do voo n. 3 sobre o Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG):

Tabela 8 – Dados do voo n. 3 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)

Tempo	Hora	ppm
16h30 às 16h31	16h30	5,73
16h31 às 16h32	16h31	3,83
16h32 às 16h33	16h32	3,81
16h33 às 16h34	16h33	4,83
16h34 às 16h35	16h34	5,46
16h35 às 16h37	16h35	5,46
16h37 às 16h38	16h37	4,21
16h38 às 16h39	16h38	3,58
16h39 às 16h40	16h39	2,62

Fonte: Elaboração do autor (2024).

Gráfico 8 – Coleta de dados no voo n. 3 em 20 de maio de 2024 – Terminal Central de Ônibus Coletivos de Uberlândia (MG)



Fonte: Elaboração do autor (2024).

O Gráfico 8 demonstra os resultados obtidos em perfil vertical a 80 m de altura e comprova a eficácia do protótipo, com benefícios a médio e longo prazos para pequenas e médias cidades, pois o custo de montagem do equipamento é menor em relação a outros dispositivos apontados neste estudo. Isso ocorre, principalmente, com *drones* que viabilizam a mobilidade em vários locais onde houver necessidade.

Apesar de existirem no mercado sensores para locais fechados, esse equipamento, devido à calibração em laboratório, também se encontra apto ao uso. Além disso o protótipo possui outras funcionalidades, tais como: acesso a redes de fidelidade sem fio (*wireless fidelity* – wi-fi), conexão com a internet via chip M2M, montagem com alimentação por meio de painéis solares, envio de dados em tempo real para um banco de dados especializado e conexão com servidores.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa foi conduzida com o propósito de desenvolver, implementar e testar um sistema de sensores para medição de CO em diferentes ambientes. Para alcançar esses objetivos, foram delineadas três metas específicas: (a) montar, programar e calibrar os sensores de CO utilizados no protótipo em um ambiente controlado; (b) avaliar a medição de CO realizada com os sensores do protótipo em um ambiente não controlado; (c) analisar a medição de CO em perfil vertical em ambiente não controlado, com o uso de um *drone*. Inicialmente, o primeiro objetivo foi crucial para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados. A calibração em um ambiente onde as condições eram rigorosamente controladas permitiu ajustar os sensores para responderem de forma adequada às concentrações de CO, ao minimizar possíveis erros de leitura e garantir a qualidade das medições subsequentes.

Este estudo também se ateve às ODS, que representam um compromisso global para promover a prosperidade humana em harmonia com a natureza. Os ODS visam erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, bem como garantir que todas as pessoas possam desfrutar de paz e prosperidade até 2030. Entre os 17 objetivos definidos, este trabalho contempla os ODS 11 e 13 (Organização das Nações Unidas, 2015b).

No primeiro ODS citado, foca-se na melhoria da qualidade do ar em áreas urbanas (Organização das Nações Unidas, 2015b). A poluição atmosférica é um desafio significativo nas cidades, por impactar a saúde e o bem-estar dos habitantes. Este trabalho, ao desenvolver e implementar tecnologias de monitoramento de poluentes como o CO, auxilia na criação de ambientes urbanos saudáveis e sustentáveis. A coleta de dados precisa sobre a qualidade do ar permite às autoridades municipais adotarem políticas eficazes para reduzir a poluição e promover comunidades resilientes.

Igualmente, o projeto está alinhado ao ODS 13, por focar nos impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas de áreas úmidas e seu papel na regulação do clima (Organização das Nações Unidas, 2015b). Tais áreas atuam como significativos sumidouros de C, ao sequestrarem CO₂ da atmosfera e mitigarem as mudanças climáticas. Ao estudar os efeitos das mudanças climáticas nesses ecossistemas e promover sua conservação, esta dissertação apoia os esforços para combater as mudanças climáticas e aumentar a resiliência aos seus impactos.

De fato, contribuiu-se para os ODS citados, ao promover a gestão sustentável da qualidade do ar urbano, visto que o sensor MQ-135 também pode ser utilizado para medições de CO₂, com a mitigação das mudanças climáticas e o fomento a parcerias para o desenvolvimento sustentável. Com o estudo e a conservação das áreas úmidas e da implementação de tecnologias de monitoramento da poluição, foram abordadas questões ambientais críticas e apoiados os esforços globais para alcançar os ODS até 2030 (Organização das Nações Unidas, 2015b).

Na segunda etapa, a avaliação da medição de CO em um ambiente não controlado forneceu *insights* sobre o desempenho dos sensores em condições reais, aspecto essencial para testar a robustez e adaptabilidade do sistema em cenários onde os níveis de CO podem variar significativamente devido a fatores externos como clima, tráfego e atividade industrial. Os resultados de tal fase permitiram verificar a eficácia do protótipo em condições menos previsíveis, ao ressaltarem a importância de um sistema de medição flexível e resiliente.

Por fim, a análise da medição de CO em perfil vertical com o *drone* ressaltou novas perspectivas para o monitoramento ambiental em 3D. Essa abordagem inovadora permitiu a coleta de dados em diferentes altitudes, ao fornecer uma visão abrangente da distribuição de CO em áreas urbanas ou rurais. O uso de *drones* para a medição vertical não apenas ampliou o escopo do estudo, mas também demonstrou o potencial das tecnologias emergentes para aplicações ambientais complexas.

Em se tratando dos trabalhos futuros, pode-se implementar novos sensores ambientais, sistemas de conexão à internet com a metodologia IoT para gravação em bancos de dados e criar uma placa própria, com leiaute interno e externo para tornar o protótipo comercialmente viável.

Destarte, o presente estudo conseguiu atingir os objetivos específicos, ao demonstrar a viabilidade de um sistema de sensores de CO que pode ser utilizado em diversos contextos ambientais. As etapas de montagem, calibração e testes em campo validaram a funcionalidade e precisão do protótipo, enquanto a utilização de *drones* para medições verticais acrescentou uma dimensão extra ao monitoramento da qualidade do ar. Isso não apenas contribui para o avanço técnico na medição de CO, como também apresenta uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas no monitoramento ambiental e na gestão da qualidade do ar.

REFERÊNCIAS

- ADLER, F. R.; TANNER, C. J. **Ecosistemas urbanos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-015-0186-4>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0186-4>
- ANDREAE, M. O. Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. (Ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications**. Massachusetts: MIT, 1991, p. 39-76. Disponível em: <https://direct.mit.edu/books/edited-volume/4901/chapter-abstract/623492/Biomass-Burning-Its-History-Use-and-Distribution?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/3286.003.0003>
- ACADEMY OF SCIENCE OF SOUTH AFRICA; BRAZILIAN ACADEMY OF SCIENCES; GERMAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES LEOPOLDINA; UNITED STATES NATIONAL ACADEMY OF MEDICINE; UNITED STATES NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. Air pollution and health – a science-policy initiative. **Annals of Global Health**, v. 85, n. 1, p. 140, 2019. Disponível em: <https://annalsofglobalhealth.org/articles/10.5334/aogh.2656>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.5334/aogh.2656>
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.
- BELL, M. L.; DAVIS, D. L. Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. **Environmental Health Perspectives**, [s.l.], v. 109, n. 3, p. 389-394, 2001. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.01109s3389>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1289%2Fehp.01109s3389>
- BELL, M. L.; DOMINICI, F.; SAMET, J. M. A Meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. **Epidemiology**, [s.l.], v. 16, n. 4, p. 436-445, 2005. Disponível em: https://journals.lww.com/epidem/fulltext/2005/07000/a_meta_analysis_of_time_series_studies_of_ozone.4.aspx. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000165817.40152.85>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n. 5, de 15 de junho de 1989. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). **Diário Oficial da União**, Brasília, 30 ago. 1989. Disponível em: <http://amazonia.ibam.org.br/legislacao/download/zCF4hec3hxJEF2N7KuInHzmb4&&7C&&7Cv&&7C&&7Cr5JTp7fLTul3hRY&&3D>. Acesso em: 2 ago. 2024.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n. 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no Pronar. **Diário Oficial da União**, Brasília, 22 ago. 1990. Disponível em: https://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf. Acesso em: 2 ago. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n. 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**, Brasília, 21 nov. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603. Acesso em: 2 ago. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Lei Federal n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%206.938%2C%20DE%2031%20DE%20AGOSTO%20DE%201981&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,aplica%C3%A7%C3%A3o%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias. Acesso em: 2 ago. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Lei Federal n. 10.650, de 16 de abril de 2003. Dispõe sobre o acesso público aos dados e informações existentes nos órgãos e entidades integrantes do Sisnama. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 abr. 2003. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.650.htm. Acesso em: 2 ago. 2024.

CAMPOS VELHO, H. F. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. *In*: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 4., 2001, Nova Friburgo. **Anais...** <http://www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024.

CHEN, D.; WANG, X.; THATCHER, M.; YANG, W.; BARNETT, G.; ZHANG, H. Urban air quality and regional meteorological influences. **Atmospheric Environment**, [s.l.], n. 53, p. 22-29, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223101200180X?via%3Dihub>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.065>

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no estado de São Paulo**. São Paulo: Cetesb, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jul. 2022.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air pollution control: a design approach**. 4. ed. Long Grove: Waveland, 2010.

COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. S. Introdução à cromatografia. 5. ed. Campinas: Ed. Unicamp, 2007. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/524/cromatografia>. Acesso em: 2 ago. 2024.

COSTA, S. S.; HOEK, G.; BRUNEKREEF, B. Air pollution in Brazil: an overview of the current scenario and challenges. **Environmental Research**, [s.l.], v. 167, p. 505-513, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935117315128>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.001>

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. **Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

DOMINICI, F. **Time-series analysis of air pollution and mortality: a statistical review**. Boston: Health Effects Institute, 2004. Disponível em: <https://www.healtheffects.org/system/files/Dominici.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024.

DOCKERY, D. W.; POPE, C. A.; XU, X.; SPENGLER, J. D.; WARE, J. H.; FAY, M. E.; FERRIS JUNIOR, B.; SPEIZER, F. E. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. **The New England Journal of Medicine**, n. 329, p. 1753-1759, 1993. Disponível em: <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJM199312093292401>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Clean Air Act Text**. Washington: EPA, 1990. Disponível em: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text>. Acesso em: 2 ago. 2024.

ERNSTEIN, A. S.; BERNSTEIN, J. A. Air pollution and pediatric asthma: a review of the evidence. **Current Opinion in Pediatrics**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 244-250, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33278107/>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1097/MOP.0b013e328329e368>

MOLINA

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de fontes de emissão de poluentes atmosféricos**. Rio de Janeiro: Feema, 2004.

GODISH, T. **Air quality**. 4. ed. Boca Raton: CRC, 2014.

HOLGATE, S. T.; SAMET, J. M.; KOREN, H. S.; MAYNARD, R. L. **Air pollution and health**. 2. ed. London: Academic Press, 2019.

GUSE, R. Como funciona o sensor de gás MQ-135? **Maker Hero**, Florianópolis, 9 fev. 2022. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/como-funciona-o-sensor-de-gas-mq-135/>. Acesso em: 1º jul. 2022.

HOERL, A. E.; KENNARD, R. W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems. **Technometrics**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 55-67, 1970. Disponível em: <https://homepages.math.uic.edu/~lreyzin/papers/ridge.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2307/1267351>

INSTITUTO AR. **Estações de monitoramento de ar**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://institutoar.org.br/>. Acesso em 1º jul. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 3 ago. 2024.

JOHNSON, M. A.; MORADI, M. **PID control – new identification and design methods**. London: Springer-Verlag, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/1-84628-148-2>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://link.springer.com/book/10.1007/1-84628-148-2>

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1997.

LIMA, E. A. P. **Um estudo sobre a qualidade do ar de Uberlândia: Material Particulado em suspensão**. 2007. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em:

https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15115?locale=pt_BR. Acesso em: 2 ago. 2024.

LISBOA, H. M.; KAWANO, M. Monitoramento de poluentes atmosféricos. *In*: LISBOA, H. M. (org.). **Controle da poluição atmosférica**. Florianópolis: UFSM, 2007. Disponível em:

<http://repositorio.ascses.edu.br/handle/123456789/418>. Acesso em: 2 ago. 2024

LIKENS, G. E.; DRISCOLL, C. T.; BUSO, D. C. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, v. 272, n. 5259, p. 244-246, 1996. DOI:

<https://doi.org/10.1126/science.272.5259.244>.

MAIA, J. L. M.; NETTO, V. M.; COSTA, B. L. G. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 11, p. 1-20, 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/urbe/a/WmjDXbN434KfkdTHKzXkhPt/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.001.e20180145>

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Decreto Estadual n. 28.163, de 6 de junho de 1988. Institui a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), aprova seu estatuto e dá outras providências. **Diário Oficial de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 7 jun. 1988.

Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/28163/1988/>. Acesso em: 2 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Decreto Estadual n. 47.760, de 20 de novembro de 2019. Contém o Estatuto da Fundação Estadual do Meio Ambiente e dá outra providência.

Diário Oficial de Minas Gerais, Belo Horizonte, 21 nov. 2019. Disponível em:

<https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/47760/2019/?cons=1>. Acesso em: 2 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Lei Estadual n. 12.583, de 17 de julho de 1997.

Dispõe sobre a reorganização da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e dá outras providências. **Diário Oficial de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 18 jul. 1997. Disponível em:

<https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/12583/1997/?cons=1>. Acesso em: 2 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Lei Estadual n. 21.972, de 21 de janeiro de 2016.

Dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) e dá outras providências. **Diário Oficial de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 22 jan. 2016.

Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/21972/2016/?cons=1>. Acesso em: 2 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa Copam n. 248, de 23 de novembro de 2023. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar para o Estado de Minas Gerais e dá outras providências. **Diário Oficial de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 8 dez. 2023. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=58282>.

Acesso em: 3 ago. 2024.

MOLINA, A.; CAMPO, C.; JIMÉNEZ, J.; RANGEL, J. Low-cost air quality monitoring using drones. *Sensors*, v. 19, n. 3, p. 1253, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/5/1253>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051253>

NOSSA, V. **Disclosure ambiental**: uma análise do conteúdo dos relatórios ambientais de empresas do setor de papel e celulose em nível internacional. 2002. 249f. Tese (Doutorado em Contabilidade) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12136/tde-21122005-101506/pt-br.php>. Acesso em: 2 ago. 2024.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London; New York: Methuen, 1987.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência de Estocolmo**. Estocolmo: ONU, 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Protocolo de Quioto**. Quioto: ONU, 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-first-commitment-period>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris**. Paris: ONU, 2015a. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/9064>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 4 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Qualidade do ar**. Genebra: OMS, [s.d.]. Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database>. Acesso em: 2 ago. 2024.

POPE, C. A.; DOCKERY, D. W.; SCHWARTZ, J. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhalation Toxicology*, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 1-18, 1995. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/08958379509014267>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3109/08958379509014267>

RIO DE JANEIRO. Instituto Estadual do Meio Ambiente. **Relatório da qualidade do ar do estado do Rio de Janeiro**: ano base 2012. Rio de Janeiro: Inea, 2015. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/documents/91265/3252594/Relatorio+Monitorar++2011-2012.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024.

ROBAA, S. M. Urban-suburban/rural differences over Greater Cairo, Egypt. *Atmósfera*, Ciudad de México, v. 16, n. 3, p. 157-171, 2003. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362003000300003. Acesso em: 2 ago. 2024.

SALDIVA, P. H. N.; POPE, C. A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W.; LICHTENFELS, A. J.; SALGE, J. M.; BARONE, I.; BOHM, G. M. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in Sao Paulo, Brazil. **Archives of Environmental Health**, [s.l.], v. 50, n. 2, p. 159-163, 1995. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00039896.1995.9940893>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00039896.1995.9940893>

SÃO PAULO. Assembleia Legislativa. Decreto Estadual n. 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 24 abr. 2013. Disponível em:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em: 2 ago. 2024.

SCHWARTZ, J. Air Pollution and daily mortality: a review and meta analysis.

Environmental Research, [s.l.], v. 64, n. 1, p. 36-52, 1994. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001393518471005X?via%3Dihub>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1006/enrs.1994.1005>

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

SHIMIZU, Y. SnO₂ Gas Sensor. *In*: KREYSA, G.; OTA, K.; SAVINELL, R. F. (eds.).

Encyclopedia of applied electrochemistry. New York: Springer, 2014. Disponível em:

https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-6996-5_475. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_475

SILVA, C. S. R. Research design – the new perspective of research methodology. **British Journal of Education, Society & Behavioural Science**, London, v. 19, n. 2, p. 1-12, 2017.

Disponível em: <https://journaljesbs.com/index.php/JESBS/article/view/142>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.9734/BJESBS/2017/30274>

SILVA, J. A. Monitoramento de poluentes atmosféricos utilizando sensores de baixo custo.

Atmospheric Environment, [s.l.], [s.n.], [n.p.], 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118258>

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; JAMES, H. F.; CROUCH, S. **Fundamentos de química analítica**. 8. ed. São Paulo: Thomson, 2008.

SMITH, J. A.; BROWN, R. T.; CLARK, H. G. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.5b00089>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>

SMITH, J. R. **Atmospheric dispersion of carbon monoxide: modeling and simulation**. 1. ed. New York: Springer, 2017.

SMITH, J. R. **Consumo de monóxido de carbono por microorganismos: uma revisão abrangente**. 2. ed. Londres: Academic Press, 2018.

TIBSHIRANI, R. Regression shrinkage and selection via the Lasso. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, [s.l.], v. 58, n. 1, p. 267-288, 1996. Disponível em: [https://webdoc.agsci.colostate.edu/koontz/arec-econ535/papers/Tibshirani%20\(JRSS-B%201996\).pdf](https://webdoc.agsci.colostate.edu/koontz/arec-econ535/papers/Tibshirani%20(JRSS-B%201996).pdf). Acesso em: 2 ago. 2024.

UBERLÂNDIA. **Posicionamento dos pontos de coleta de dados com o drone**. Uberlândia: Prefeitura Municipal, 2024.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of air pollution**. 5. ed. London: Academic Press, 2014.

VILLA, T. F.; SALIMI, F.; MORTON, K.; MORAWSKA, L.; GONZALEZ, F. Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements. **Sensors**, [s.l.], v. 16, n. 12, p. 2202, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2202>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16122202>

VORMITTAG, E. M. P. A. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. SANTOS, E. F. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 35, n. 102, p. 7-30, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/fbCFjRbBRhf4M5F6xQVrbfR/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 2 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>

ZHONG, S.; QIAN, Y.; ZHAO, C.; LEUNG, L. R.; YANG, X. A modeling study of the impacts of urbanization on atmospheric circulation and aerosol distributions over East Asia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s.l.], v. 20, n. 5, p. 2919-2936, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-20-2919-2020>.