



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E QUALIDADE AMBIENTAL**

MARCELO LIMA

**PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DO
MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO**

**UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E QUALIDADE AMBIENTAL**

MARCELO LIMA

**PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DO
MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós Pós-Graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração Gestão e Monitoramento Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias para obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Prof.^a Dra. Samara Carbone

Coorientador

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi

**UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

L732p
2024

Lima, Marcelo, 1974-
Protótipo de estação para monitoramento do material particulado atmosférico [recurso eletrônico] / Marcelo Lima. - 2024.

Orientadora: Samara Carbone.
Coorientador: Roberto Terumi Atarassi.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5544>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Qualidade ambiental. 2. Aquecimento global. 3. Tecnologia ambiental. 4. Ar - Poluição - Medição. I. Carbone, Samara, 1982-, (Orient.). II. Atarassi, Roberto Terumi, 1973-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental. IV. Título.

CDU: 574

Rejane Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 04/2025, PPGMQ				
Data:	05 de março de 2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:30
Matrícula do Discente:	12312MQA007				
Nome do Discente:	Marcelo Lima				
Título do Trabalho:	PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DO MATERIAL PARTICULADO MP2,5 ATMOSFÉRICO				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	Processos Ambientais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Monitoramento Ambiental				

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.ª Dr.ª Samara Carbone (Orientadora); Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima (UNIUPE); e Dr. Fábio de Oliveira Jorge (USP).

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa Prof.ª Dr.ª Samara Carbone 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 a senhora 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 da nova defesa, aprovação da candidata e 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 foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Samara Carbone, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/03/2025, às 16:24, 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 07/03/2025, às 08:13, 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 **Fábio de Oliveira Jorge, Usuário Externo**, em 24/03/2025, às 09:07, 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_orcao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6082661** e o código CRC **AA0EF253**.

AGRADECIMENTO

Ao longo desta jornada acadêmica, que culmina na conclusão desta Dissertação de Mestrado, é com profunda gratidão que registro meu reconhecimento às instituições, profissionais e pessoas que contribuíram de forma significativa para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao CLima - Laboratório de Meteorologia e Climatologia Ambiental da UFU, por disponibilizar sua estrutura e recursos, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, ao técnico Glaicon Florisbelo Alves, cuja competência, disponibilidade e apoio técnico foram indispensáveis para a condução dos experimentos e análises realizados.

Agradeço também ao LAETE - Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes, ao LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem e ao LFA - Laboratório de Física Atmosférica da USP, por cederem seus espaços, equipamentos e conhecimentos, permitindo a realização de etapas cruciais deste trabalho.

À comunidade acadêmica que direta ou indiretamente participou deste processo, meu reconhecimento. Em especial, ao Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi, coorientador, cuja *expertise* e orientações foram fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa. E à Prof.^a Dra. Samara Carbone, minha orientadora, a quem devo minha mais profunda gratidão. Sua dedicação, paciência e compromisso com a excelência acadêmica não apenas guiaram este trabalho, mas também inspiraram meu crescimento como pesquisador e profissional.

Por fim, dedico este trabalho à minha esposa, Eulia Rejane Silva, cujo apoio incondicional, compreensão e incentivo foram pilares essenciais durante todos os momentos desta jornada. Seu amor e companheirismo foram a força que me impulsionou a superar os desafios e alcançar este objetivo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta Dissertação, meu mais sincero agradecimento. Que este trabalho possa refletir, ainda que em parte, a dedicação e o esforço coletivo que tornaram sua conclusão possível.

LISTA DE SIGLAS

CE	Carbono elementar
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLiMA	Laboratório de Meteorologia e Climatologia Ambiental - UFU
Corg	Carbono orgânico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Contadores ópticos de partículas
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IoT	Internet das Coisas
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LAETE	Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LFA	Laboratório de Física Atmosférica USP
MP	Material Particulado
MP _{2,5}	Material Particulado de 2,5 micrometros
MP ₁₀	Material particulado de 10 micrometros
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PCI	Placa de Circuito Interno
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SBC	Sensor de Baixo Custo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UR	Umidade relativa
USP	Universidade de São Paulo
VIGIAR	Programa de Vigilância em Saúde Ambiental e Qualidade

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADROS

Quadro 1 – Evolução da legislação que define os padrões de qualidade do ar.....	18
Quadro 2 – Tipos de sensores e especificações técnicas.....	24
Quadro 3 – Especificações técnicas de Microcontroladores.....	28
Quadro 4 – Resumo das entradas e saídas do projeto	38
Quadro 5 – Identificação do artefato, classe de problemas e proposta do artefato.....	40
Quadro 6 – Levantamento Bibliográfico dos principais componentes de estações de monitoramento experimental com equipamentos de baixo custo para MP _{2,5}	41
Quadro 7 – Resultado do teste de normalidade.....	76
Quadro 8 – Resultado do teste de correlação.....	77
Quadro 9 – Resultado do teste de correlação intraclasse.....	78
Quadro 10 – Resultado da análise de Bland-Altman.....	79
Quadro 11 – Erros experimentais, Interpretação dos dados e Sugestões.....	81
Quadro 12 – Custos para a produção do protótipo.....	84

FIGURAS

Figura 1: Efeitos da exposição dos poluentes no sistema respiratório.....	14
Figura 2: Padrões de Qualidade do Ar 2024.....	20
Figura 3: Escoamento em torno de um cilindro circular.....	31
Figura 4: Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico.....	32
Figura 5: Visualização do escoamento passando por um cilindro de base	33
Figura 6: Etapas da metodologia.....	36
Figura 7: Processos metodológicos.....	37
Figura 8: Ficha técnica Sensor Sensirion SPS 30.....	49
Figura 9: Ficha técnica ESP32.....	49
Figura 10: Ficha técnica do painel solar BPSX310M.....	50
Figura 11: Controlador de Carga Solar Knup.....	50
Figura 12: Ilustração da placa de conexão desenvolvida no CliMA-UFU.....	51
Figura 13: Estação fixa de calibração.....	52
Figura 14: Monitor Dust AI.....	53

Figura 15: Estação de baixo custo (EBC).....	54
Figura 16: Protótipo de estação de monitoramento integrada.....	55
Figura 17: Protótipo sensor IOT.....	56
Figura 18: Impressão do modelo em PLA.....	58
Figura 19: Modelo inicial impresso.....	58
Figura 20: Tela de Proteção.....	58
Figura 21: Desenho industrial da estação de monitoramento.....	59
Figura 22: Caixa de proteção do microcontrolador e sensor.....	61
Figura 23: Suporte da tela.....	61
Figura 24: Suporte da estação de monitoramento.....	62
Figura 25: Caixa de proteção do sistema elétrico.....	64
Figura 26: Tampa da caixa de proteção do sistema elétrico.....	64
Figura 27: Suporte para o microcontrolador.....	65
Figura 28: Suporte para o sensor.....	65
Figura 29: Impressão da caixa de proteção do microcontrolador.....	66
Figura 30: Modelo impresso sem acabamento.....	67
Figura 31: Peças da estação em acabamento.....	67
Figura 32: Modelo final da estação de monitoramento.....	67
Figura 33: Sistema de transmissão de dados.....	68
Figura 34: Software desenvolvido.....	69
Figura 35: Testes de bancada.....	70
Figura 36: Instalação dos componentes na estação.....	71
Figura 37: Tomada de dados em laboratório.....	72
Figura 38: Estação instalada em campo.....	73
Figura 39: Gráficos comparativos.....	75
Figura 40: Gráficos de dispersão dos parâmetros analisados.....	76
Figura 41: Representação gráfica de Bland-Altman.....	79
Figura 42: Painel de verificação do sistema.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO.....	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	IMPACTOS DO MATERIAL PARTICULADO NA SAÚDE E CLIMA.....	13
3.2	LEGISLAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR NO BRASIL.....	17
3.3	ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DE MONITORAMENTO DE MP _{2,5}	21
3.4	SENSORES DE BAIXO CUSTO (SBC).....	21
3.4.1	Calibração de sensores de baixo custo	24
3.5	MICROCONTROLADORES	27
3.6	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	29
3.7	GEOMETRIA DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS E AERODINÂMICA DOS CORPOS.....	30
3.8	IMPRESSÃO 3D.....	33
4	METOLOGIA.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	INTEGRAÇÃO DOS OBJETIVOS	38
5.2	COOPERAÇÃO E PESQUISA PARA O DESENVOLVIMENTO	40
5.3	CONEXÃO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	51
5.4	DEFINIÇÃO DO MODELO DA ESTAÇÃO	52
5.5	MODELAGEM INDUSTRIAL DO PROTÓTIPO	56
5.6	PRODUÇÃO DO MODELO	66
5.7	TESTES DE FUNCIONAMENTO.....	68
5.8	CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS E TRATAMENTO DOS DADOS.....	73
5.8.1	Condições ambientais e condições de análise	73
5.8.2	Período Analisado, pré tratamento e número de amostras.	74
5.8.3	Analises estatísticas, verificação do sistema, interpretação dos dados e analise estrutural	75
5.9	QUADRO DE CUSTOS	84
6	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS	87

RESUMO

LIMA, MARCELO. **Protótipo de Estação para monitoramento do Material Particulado Atmosférico**. 2025. 90p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Monitoramento Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG¹

O planeta está aquecendo em uma velocidade alarmante. Dados recentes mostram que 2024 foi o ano mais quente desde o início das medições, em 1850, com temperaturas ultrapassando 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Esse cenário agrava a qualidade do ar, impactando diretamente a saúde humana. A Organização Mundial da Saúde alerta que 99% da população mundial está exposta a níveis perigosos de poluição, responsável por 7 milhões de mortes prematuras anualmente. O material particulado fino (MP_{2,5}) destaca-se como um dos principais agentes causadores dessas mortes. Diante desse problema que se apresenta, governos têm adotado normativas para reduzir os impactos da poluição atmosférica. No entanto, as tecnologias de monitoramento disponíveis são caras, exigem manutenção especializada e não atendem adequadamente às particularidades de países em desenvolvimento, como o Brasil. Com grandes aglomerados urbanos carentes de infraestrutura e áreas remotas sem acesso a serviços básicos, torna-se urgente desenvolver soluções acessíveis e adaptáveis. Este estudo teve como objetivo principal desenvolver uma estação de monitoramento da qualidade do ar, focada na medição de o MP_{2,5}, que fosse autossuficiente em energia, móvel e de baixo custo. Para isso, foram utilizados sensores acessíveis e um microcontrolador, integrados em um protótipo capaz de operar de forma autônoma e transmitir dados em tempo real. A metodologia incluiu a seleção e integração de componentes, testes de bancada e de campo em diferentes condições ambientais, além de uma análise estatística dos dados coletados e uma avaliação de custos. Os resultados demonstraram que a estação é funcional, compacta, de fácil manutenção e resistente às condições climáticas adversas. A coleta de dados ocorreu de forma contínua e confiável, sem falhas aparentes, o que deverá facilitar as etapas de calibração e validação dos dados, além disso, o baixo custo estimado para a sua construção o que permitirá a democratização do equipamento. Conclui-se que o protótipo desenvolvido representa uma solução viável e inovadora para o monitoramento da qualidade do ar, especialmente em locais onde custo e acesso à energia elétrica são fatores críticos, por esta razão foi identificado uma oportunidade de registro de patente, dado ao ineditismo do equipamento; gerou-se assim o registro sob o número BR 20 2025 015021 8 no Instituto Nacional de Propriedade Industrial - INPI. Além de contribuir para a redução dos impactos da poluição atmosférica, essa estação pode ser uma ferramenta valiosa para a proteção da saúde pública e para o avanço de políticas ambientais mais eficazes.

Palavras-Chave: Monitoramento do ar. Material Particulado. Estação de monitoramento. Sensores de baixo custo.

¹ Comitê Orientador: Samara Carbone – UFU e Roberto Terumi Atarassi - UFU

ABSTRACT

LIMA, MARCELO. **Prototype of Station for Monitoring Atmospheric Particulate Matter**. 2025. 90p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Monitoramento Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

The planet is warming at an alarming rate. Recent data show that 2024 was the hottest year since 1850, with temperatures exceeding 1.5°C above pre-industrial levels. This scenario worsens air quality, directly impacting human health. The World Health Organization warns that 99% of the global population is exposed to dangerous levels of pollution, responsible for 7 million premature deaths annually. Fine particulate matter (PM_{2.5}) stands out as one of the main causes of these deaths. In response to this challenge, governments have adopted regulations to mitigate the impacts of air pollution. However, available monitoring technologies are expensive, require specialized maintenance, and do not adequately meet the specific needs of developing countries such as Brazil. With large urban clusters lacking infrastructure and remote areas without access to basic services, it is urgent to develop affordable and adaptable solutions. This study aimed to develop a self-sufficient, mobile, and low-cost air quality monitoring station focused on measuring PM_{2.5}. To achieve this, accessible sensors and a microcontroller were used, integrated into a prototype capable of operating autonomously and transmitting data in real-time. The methodology included the selection and integration of components, bench and field tests in different environmental conditions, as well as statistical analysis of the collected data and a cost assessment. The results demonstrated that the station is functional, compact, easy to maintain, and resistant to adverse weather conditions. Data collection was continuous and reliable, with no apparent failures, facilitating data calibration and validation. Additionally, the estimated low construction cost will allow for the democratization of this equipment. It is concluded that the developed prototype represents a viable and innovative solution for air quality monitoring, especially in locations where cost and access to electricity are critical factors. For this reason, an opportunity to register a patent was identified, given the originality of the equipment; thus, registration was generated under number BR 20 2025 015021 8 at the National Institute of Industrial Property - INPI. Besides contributing to the reduction of air pollution impacts, this station can be a valuable tool for public health protection and the advancement of more effective environmental policies.

Keywords: Air monitoring. Particulate Matter. Monitoring station. Low-cost sensors.

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica atinge níveis alarmantes, trazendo graves consequências à saúde humana, principalmente devido às altas concentrações de Material Particulado (MP), conforme alerta a OMS (2023). Simultaneamente, o aquecimento global se intensifica, com o Copernicus Climate Change Service, programa da União Europeia, indicando que 2024 foi o ano mais quente desde 1850, ultrapassando 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (Buontempo, 2024). As emissões globais de gases de efeito estufa continuam a crescer, impulsionadas pelo uso insustentável de energia, mudanças no uso do solo e padrões de consumo desequilibrados, afetando populações em todo o mundo (IPCC, 2024). O MP, também chamado de aerossóis, influencia o balanço energético do planeta ao refletir e dispersar a radiação solar, além de atuar na formação de nuvens e chuvas, processos ainda não totalmente compreendidos pela ciência (Pivetta, 2021). A redução do MP, embora essencial para a qualidade do ar, pode elevar a temperatura global, já que essas partículas exercem um efeito de resfriamento ao refletir a radiação solar (Pivetta, 2021).

No entanto, a espécie humana está modificando a dinâmica ambiental da Terra e as consequências são a resposta do ambiente à transformação antrópica. A poluição atmosférica está aumentando exponencialmente com emissões veiculares, industriais, queimadas e outras fontes; trazendo implicações para a saúde humana. O material particulado fino, especialmente aquele com diâmetro inferior a 2,5µm (MP_{2,5}), é responsável por uma série de doenças, incluindo problemas respiratórios e cardiovasculares (OMS, 2022).

Deste modo, é de suma importância que o monitoramento da qualidade do ar seja implementado. No Brasil, o Conselho nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução CONAMA 506/2024 estabeleceu padrões de qualidade e normatizou a emissão de diversos gases e partículas, incluindo o MP_{2,5}. Já a resolução 564/2024 é a normativa vigente que estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação (Brasil, 2024). Entretanto, o monitoramento enfrenta desafios econômicos e políticos que levam à negligência das normas.

O monitoramento da qualidade do ar permite caracterizar a qualidade do ar em áreas específicas e verificar o cumprimento de requisitos legais, envolvendo diversas técnicas e equipamentos. Além disso, o monitoramento oferece suporte para

episódios de poluição e avaliar a exposição a essas condições. Também desempenha um papel importante ao notificar a população sobre a qualidade do ar, auxiliar no planejamento do tráfego e uso do solo, e apoiar pesquisas científicas (Warren, 1987; Larssen; Sluyter; Helms, 1999; Blondeau *et al.*, 2005).

As estações de monitoramento da qualidade do ar utilizam métodos de referência que acarretam custos significativos de investimento e operação. Diante desse cenário, esses custos inviabilizam a cobertura de todo o território, o que representa uma limitação na avaliação da qualidade do ar (Amorim, 2015).

Por outro lado, a tecnologia atual oferece alternativas. Sensores de baixo custo (SBC) são uma realidade no mercado internacional, com marcas e modelos já consolidados em todo o mundo. Nesse contexto, embora os métodos utilizados pelos SBC apresentem maior incerteza em comparação com os métodos de referência, eles têm a vantagem de serem usados simultaneamente em muitos locais, permitindo a caracterização da qualidade do ar com maior resolução espacial (Amorim, 2015).

A implementação de um conjunto abrangente de microssensores em diferentes locais pode auxiliar na detecção de pontos críticos de poluição atmosférica e possibilitar a avaliação da exposição em tempo real, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de mitigação (Chong; Kumar, 2003).

Assim sendo, torna-se necessário ampliar o monitoramento da qualidade do ar abrangendo diversas áreas, especialmente devido aos impactos negativos para a saúde para o ambiente. Essa abordagem permitirá obter dados essenciais para a criação de medidas que visam reduzir os riscos associados à saúde humana e aos impactos ambientais (Galletti *et al.*, 2020). Outrossim, é fundamental considerar essa tecnologia no contexto brasileiro, um país em desenvolvimento, de vastas dimensões e com uma ampla camada de população de baixa renda. Nesse cenário, o monitoramento da atmosfera, especialmente em relação ao $MP_{2,5}$, causador de diversos efeitos adversos, é crucial para o planejamento de ações preventivas.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de estação de monitoramento de $MP_{2,5}$. Essa estação será autônoma, autossuficiente em energia elétrica e será de fácil transporte e manuseio. A implementação desse tipo de estação pode viabilizar a criação de redes de monitoramento da qualidade do ar, permitindo acompanhar as concentrações de diversos poluentes a um custo mais acessível. Dessa forma, os dados coletados poderão ser disponibilizados tanto para os cidadãos quanto

para os tomadores de decisão, contribuindo para a melhoria do ambiente em que vivemos. No entanto, o presente estudo será focado nos aspectos físicos como escolha e uso de materiais da estação, deixando para uma etapa futura a calibração e validação das medidas ambientais por ela realizadas.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de estação de monitoramento do ar, isto é, projetar uma estação de monitoramento para $MP_{2,5}$ com auto suficiência energética, de fácil operação e transporte utilizando componentes eletrônicos de baixo custo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Investigar e propor os componentes eletrônicos necessários para o projeto de uma estação de monitoramento de $MP_{2,5}$ utilizando sensores e materiais de baixo custo;

Projetar uma caixa de armazenamento para os componentes eletrônicos da estação;

Estimar o custo e a viabilidade operacional da estação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 IMPACTOS DO MATERIAL PARTICULADO NA SAÚDE E CLIMA

O governo Federal, por meio da lei 14850/2024, define poluente atmosférico como qualquer forma de matéria que, em quantidade, concentração, tempo ou outras características, torne ou possa tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (Brasil, CONAMA, 2024).

Segundo Seinfeld e Pandis (2006), o termo Material Particulado (MP) refere-se a quaisquer substâncias existentes nas fases líquida (exceto a água pura) ou sólida em condições normais na atmosfera, que possuem tamanho microscópico ou submicroscópico e são maiores que as dimensões moleculares. Portanto, aerossol ou MP é uma solução bifásica com diminutas partículas (diâmetro de 0,002 a 100 μm) líquidas e/ou sólidas dispersas no ar (Ruzer e Harley, 2012).

Seinfeld e Pandis (2006) afirmam que os MPs podem ser emitidos diretamente na atmosfera (primários) ou formados na atmosfera através da conversão de gás em partícula (secundários). Tanto os MPs primários quanto os secundários passam por transformações químicas e físicas e estão sujeitos a transporte, processamento em nuvens e remoção da atmosfera. Componentes químicos como carbono orgânico (Corg), sulfato, nitrato, amônio, metais vestigiais e carbono elementar (CE) são comumente identificados em MPs finos urbanos, refletindo diversas fontes primárias e secundárias provenientes do tráfego, indústria, e outras atividades humanas, juntamente com componentes regionais de queima de biomassa e atividades agrícolas (Guo et al., 2014).

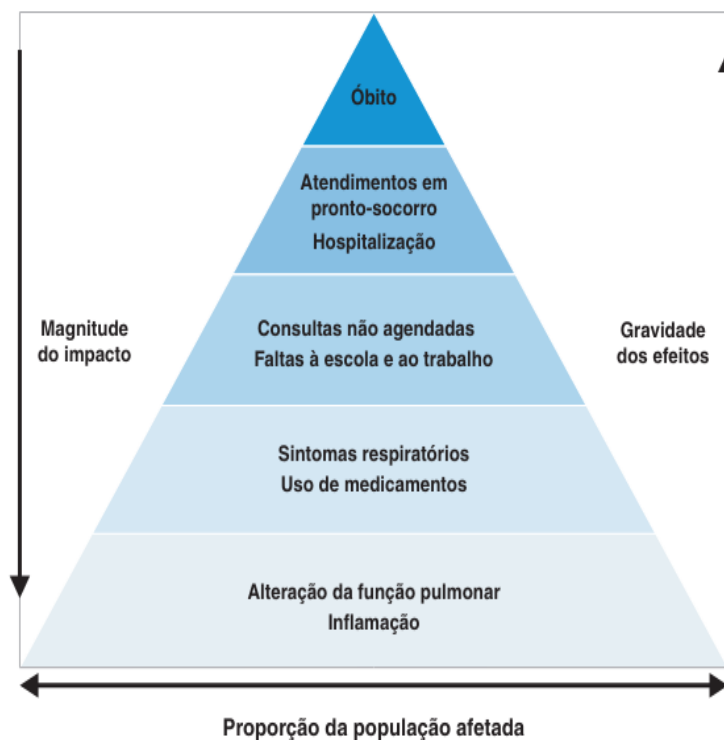
Alam *et al.* (2015) salientam que existe uma associação clara entre a concentração de MPs e os efeitos na saúde. Youn *et al.* (2016) observam que, particularmente, a fração fina de MPs pode penetrar mais facilmente nos pulmões e causar doenças respiratórias. Baan (2007) esclarece que o carbono negro, em particular, pode danificar as células do corpo humano e ser possivelmente cancerígeno para os seres humanos.

Considerando o tamanho, as partículas que podem entrar pelo nariz e boca e que não possuem limite superior de tamanho definido são classificadas como fração inalável (Nascimento, 2022). Nessa categoria, temos a fração torácica, relacionada às partículas mais grossas da fração inalável, que podem alcançar o tórax. Essas partículas têm diâmetro aerodinâmico ($\emptyset$) menor que 10 μm e fazem parte do modo de sedimentação. Há ainda, a fração respirável, relacionada às partículas mais finas da fração inalável, conhecida como MP_{2,5}. Essa fração é capaz de alcançar a região alveolar, depositando-se nela ou ultrapassando-a e transportando-se até outros órgãos. As partículas com $\emptyset \geq 10 \mu\text{m}$ da fração inalável geralmente ficam depositadas nas cavidades oral e nasal (Nascimento, 2022; Ruzer e Harley, 2012).

Ademais, a poluição do ar afeta o ser humano em todas as fases da vida, desde a concepção até a velhice. Estudos realizados desde os relatos iniciais sobre os efeitos da

poluição na saúde, ocorridos em 1930 (Vale do Meuse, Bélgica) e em 1952 (Londres, Inglaterra), buscaram elucidar o verdadeiro impacto dessa poluição sobre nossa saúde (Santos *et al.*, 2021; Serpa *et al.*, 2022). Esses efeitos variam desde alterações fisiológicas (que não resultam em manifestações clínicas relevantes, mas afetam uma proporção maior de pessoas) até desfechos mais graves, como óbitos, que afetam uma parcela menor da população exposta. Essa relação é ilustrada na Figura 1, representando uma pirâmide que considera a magnitude e a gravidade dos efeitos da exposição aos poluentes atmosféricos (OMS, 2017).

Figura 1 - Efeitos da exposição dos poluentes no sistema respiratório



Fonte: OMS (2017)

Em uma análise preocupante, a Organização das Nações Unidas – ONU, (2024), durante o encerramento da 6ª Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente, informou que mais de 99% da população mundial está exposta a níveis de poluição do ar que excedem as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). Doenças como câncer de pulmão, asma e outras condições respiratórias crônicas estão diretamente relacionadas a essa qualidade inadequada do ar que respiramos, e esse é um

desafio global que exige a colaboração entre a OMS e outras entidades ambientais. A ONU (2024) observou que os estudos apontam que anualmente ocorrem cerca de 7 milhões de mortes prematuras devido à má qualidade do ar. Essas estatísticas são um alerta urgente para a necessidade de ações concretas visando à melhoria da qualidade do ar em todo o mundo.

Ademais, a OMS esclarece que os poluentes não apenas impactam severamente a saúde pública, mas também afetam o clima da Terra e os ecossistemas globalmente afirmando que muitas das políticas que visam reduzir a poluição do ar oferecem uma estratégia "ganha-ganha" tanto para a saúde quanto para o clima. Reduções nos níveis de poluição do ar resultam em melhorias na saúde cardiovascular e respiratória das populações, a curto e longo prazo. (OMS 2023).

Além disso, diminuir a poluição do ar ambiente e doméstico também pode reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e poluentes climáticos de curta duração, como partículas de carbono preto e metano, contribuindo, assim, para a mitigação das mudanças climáticas em ambos os prazos (OMS, 2023), por exemplo, as partículas em suspensão (MP) não estão apenas associadas a impactos adversos à saúde (Heal *et al.*, 2012), mas também influenciam o clima, pois podem servir como núcleos de condensação de nuvens, afetando a forçagem radiativa e fenômenos meteorológicos, como a dissipação ou captura de radiação interna (Williams, 2012; Von Schneidemesser *et al.*, 2015; Maione *et al.*, 2016).

No geral, pode-se concluir que há uma tendência para o aumento das concentrações de poluentes atmosféricos em um contexto de mudança climática. A magnitude e a natureza dos efeitos das mudanças climáticas estão relacionadas a duas características principais. Primeiramente, os parâmetros meteorológicos estão intrinsecamente ligados, resultando em fortes interdependências, o que torna a separação dos efeitos de parâmetros individuais uma tarefa altamente complexa. Em segundo lugar, os parâmetros meteorológicos podem afetar os poluentes através de mecanismos físicos e químicos diretos ou indiretamente, influenciando outros parâmetros meteorológicos, como a associação entre altas temperaturas e baixa velocidade do vento (Ordóñez *et al.*, 2005; Jacob e Winner, 2009).

Não Obstante, o aumento da temperatura global, a seca, o declínio dos recursos hídricos, o encolhimento das camadas de gelo, as inundações e a erosão nas áreas costeiras, a acidificação dos oceanos, a elevação do nível do mar e a intensificação de

eventos climáticos extremos fornecem evidências irrefutáveis do aquecimento global. Embora essas questões globais sejam vistas como problemas distintos em vários campos de pesquisa e política, elas estão inevitavelmente conectadas, e qualquer política de mitigação em uma área pode afetar as circunstâncias em outra, exigindo uma abordagem integrada para soluções (Von Schneidemesser *et al.*, 2015).

Meirelles (1966) já afirmava que o combate à poluição do ar requer medidas de duas naturezas: técnicas e legais. De fato, não se pode discutir a melhoria dos padrões de qualidade do ar sem estabelecer marcos legais sólidos, alinhados com as tecnologias disponíveis no mercado nacional. Ademais, é essencial que essas normas reflitam as abordagens tecnológicas adotadas globalmente, adaptando-as à realidade do país (Breder, *et al.*, 2020).

3.2 LEGISLAÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR NO BRASIL

Em uma análise realizada por Raposo, De Assis e Norton (2021), observou-se que o monitoramento e seus parâmetros desempenham um papel fundamental na prevenção da poluição do ar. Ao longo do tempo, as legislações têm passado por modificações à medida que o conhecimento técnico sobre os efeitos nocivos dos poluentes avança. Em 2022, a OMS informou que a República Federativa do Brasil e a Organização Pan-Americana da Saúde/Organização Mundial da Saúde (OPAS/OMS) assinaram a Estratégia de Cooperação de Países para o período de 2022 a 2027. Esse documento define a visão estratégica, as prioridades de saúde pública e o compromisso compartilhado entre o Estado brasileiro e o organismo internacional. Nesse contexto, os parâmetros, nos tempos presentes, são observados conforme as diretrizes estabelecidas pelo organismo internacional.

Contudo, nem sempre foi assim e episódios de poluição extrema levaram o Brasil a se preocupar com a poluição do ar. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) informou que a relação entre efeitos à saúde e poluição atmosférica foi estabelecida com base em episódios agudos de contaminação do ar e estudos sobre a ocorrência de milhares de mortes registradas em Londres, em 1948 e 1952. No caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o crescimento desordenado verificado na Capital e nos municípios vizinhos, especialmente da região do ABC, a partir da 2ª Guerra Mundial, levou à instalação de indústrias de grande porte, sem a preocupação

com o controle de emissão de poluentes atmosféricos que possibilitavam a visualização de chaminés emitindo enormes quantidades de fumaça.

Há registros em jornais da década de 1960 e especialmente de 1970 de episódios agudos de poluição do ar que levaram a população ao pânico devido aos fortes odores, decorrentes do excesso de poluentes lançados pelas indústrias na atmosfera, causando mal-estar e lotando os serviços médicos de emergência (CETESB; 2022). O marco inicial das legislações foi a Portaria nº 0231, de 27/4/76, do antigo Ministério do Interior (Marques; Dos Santos, 2012), conforme observado no quadro 1, evolução da legislação que define os padrões de qualidade do ar.

Quadro 1 - Evolução da legislação que define os padrões de qualidade do ar

Tipo	Nº da Norma	Órgão Expedidor	Definição	Data da Publicação
Portaria	231	Ministério do Interior	Padrões de Qualidade do AR	27/04/1976
Lei	6938	Congresso Nacional	Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA)	31/08/1981
Decreto	88351	Executivo	Regulamentação da PNMA	01/06/1983
Resolução	5	CONAMA	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR	15/06/1989
Portaria	348	IBAMA	Padrões de qualidade e concentração de poluentes	14/03/1990
Resolução	3	CONAMA	Padrões de qualidade e concentração de poluentes	28/06/1990
Resolução	491	CONAMA	Padrões de qualidade e concentração de poluentes	18/11/2018
Resolução	506	CONAMA	Padrões de qualidade e concentração de poluentes	05/07/2024

Fonte: O autor (2024)

Outrossim, em 1989, o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (Pronar) foi criado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental (Brasil; 1989). No ano seguinte, o CONAMA publicou a Resolução 03/1990 que fixa os Padrões de qualidade e concentração de poluentes permitidos. Os padrões e concentrações observados indicam que foram modificados à medida que novas descobertas sobre os efeitos da poluição atmosférica surgiram.

A Resolução CONAMA 491/2018 trouxe os novos valores dos parâmetros, alinhados com a Organização da Saúde; além disso, esta norma gerou a inovação da parametrização do MP_{2,5}, poluente até então ignorado em normas passadas, além de instituir normativas para a obrigatoriedade do seu monitoramento (De Amaral; Rego; Northcross, 2023).

Beringui *et al.* (2021) explicam que a implementação ocorreria em quatro etapas: a primeira (PI) entra em vigor na publicação da Resolução 491/2018. Os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários e Final (PI-2, PI-3 e PF) serão adotados de forma subsequente, considerando os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente, sem estabelecimento de prazos, sendo que somente o padrão final corresponde ao parâmetro máximo preconizado pela OMS.

Entretanto, em 5 de julho de 2024, foi estabelecida a resolução 506 pelo CONAMA que apresenta os padrões de monitoramento de qualidade do ar, figura 2. Esta norma observou a nova referência da OMS (2021) e estabeleceu os prazos para as etapas, sendo: PI-1 até 31/12/2024; PI-2 até 01/01/2025; PI-3 até 01/01/2033; PI-4 até 01/01/2044; PF data a ser definida, Figura 4 (CONAMA, 2024), onde os valores adotados em PF são referentes às recomendações da OMS de 2021.

Figura 2 – Padrões de qualidade do ar 2024

Poluente Atmosférico	Sigla	Período de Referência	PI - 1	PI - 2	PI - 3	PI - 4	PF	ppm
			µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	
Material Particulado	MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	45	-
		Anual	40	35	30	20	15	
Material Particulado	MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	15	-
		Anual	20	17	15	10	5	
Dióxido de Enxofre	SO ₂	24 horas	125	50	30	20	40	-
		Anual	40	30	20		20	
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	1 hora	260	240	220	200	200	-
		Anual	60	50	45	40	10	
Partículas Totais em Suspensão	PTS	24 horas	-	-	-	240	240	-
		Anual	-	-	-	80	80	
Fumaça	-	24 horas	120	100	75	50	45	-
		Anual	40	35	30	20	15	
Ozônio	O ₃	8 Horas	140	130	120	100	100	-
Monóxido de Carbono	CO	8 horas	-	-	-	-		9
Chumbo	Pb ⁵	Anual	-	-	-	0,5	0,5	-

Fonte: CONAMA 506/2024

No Brasil, o monitoramento da qualidade do ar, especialmente em relação às partículas finas (MP_{2,5}), tem avançado de forma gradual e em 27 de junho de 2024 foi lançada a plataforma Vigiar pelo Ministério da Saúde. O Programa de Vigilância em Saúde Ambiental e Qualidade do Ar, conhecido como VIGIAR, identifica e prioriza áreas no Brasil onde atividades econômicas ou sociais podem expor a população a poluentes atmosféricos. Seu principal objetivo é proteger a saúde das pessoas expostas a esses poluentes (BRASIL. Ministério da Saúde, 2024).

A avaliação do impacto da poluição atmosférica é recomendada ao avaliar as consequências de políticas, intervenções ou cenários hipotéticos (OMS, 2016). No entanto, o uso exclusivo do software não substitui a necessidade de instalação de estações de monitoramento do ar, conforme observado na Resolução CONAMA 506/24.

3.3 ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DE MONITORAMENTO DE MP_{2,5}

As estações experimentais de monitoramento de MP_{2,5} são equipadas com instrumentos que utilizam métodos de referência padrão, como monitores de atenuação beta (BAM), micro balanças oscilantes de elemento cônico (TEOM) e amostradores gravimétricos baseados em filtro. Esses dispositivos científicos são caracterizados por sua precisão e confiabilidade, mas também por serem grandes, caros e de difícil operação e manutenção. Essa complexidade e custo elevado dificultam a expansão das redes de monitoramento da qualidade do ar, limitando a capacidade de monitorar de forma contínua em todas as áreas urbanas e rurais (Borrego *et al.*, 2015).

Borrego *et al.* (2015) explica que, além disso, a instalação e manutenção dessas estações requerem infraestrutura e recursos significativos, o que pode ser um desafio para muitas regiões, especialmente em países em desenvolvimento. A falta de cobertura adequada pode resultar em lacunas significativas nos dados de qualidade do ar, dificultando a implementação de políticas eficazes de controle da poluição e proteção da saúde pública.

Tagle *et al.* (2020) afirmam que enquanto as estações de monitoramento tradicionais desempenham um papel crucial na avaliação da qualidade do ar a integração de novas tecnologias pode ampliar significativamente a capacidade de monitoramento e contribuir para a melhoria da saúde pública e do meio ambiente. As estações experimentais são, em sua maioria, construídas de modo simples, e compostas, geralmente, com um microcontrolador, placa de ligação, bateria e sensor (Giusto *et al.*, 2021).

3.4 SENSORES DE BAIXO CUSTO (SBC)

Kumar *et al.* (2015) afirmam que os avanços em sensores, eletrônica digital e tecnologia de comunicação sem fio resultaram em um novo paradigma para o monitoramento da poluição do ar. Rai *et al.* (2017) informam que esse paradigma visa a coletar dados espaço-temporais de alta resolução sobre a poluição do ar utilizando uma rede onipresente de SBC para monitorar, em tempo real, as concentrações de diversos poluentes atmosféricos. Esses dados podem ser utilizados para várias tarefas de gerenciamento da poluição do ar, tais como: (i) complementar o monitoramento

convencional da poluição do ar; (ii) melhorar a correlação entre a exposição a poluentes e a saúde humana; (iii) gerenciar respostas a emergências, detectar vazamentos perigosos e monitorar a conformidade das fontes de poluição; e (iv) aumentar a conscientização e o engajamento da comunidade em relação às questões de qualidade do ar.

Rai *et al.* (2017) ainda pontuam que embora não exista uma definição universalmente aceita para um SBC, considera-se que qualquer dispositivo que custe menos do que a instrumentação necessária para demonstrar conformidade com os regulamentos de qualidade do ar pode ser classificado como tal. No entanto, o custo deve ser o mais baixo possível para atingir os objetivos mencionados, de modo que a implantação generalizada desses sistemas de monitoramento da poluição do ar seja comercialmente viável.

Sensores de leitura direta e baixo custo geralmente se enquadram em dois princípios de funcionamento: contadores ópticos de partículas (COP) e fotômetros, ambos operam com base no princípio da dispersão de radiação, onde as partículas de aerossol passam por um feixe de radiação. Os sensores COP medem a intensidade da radiação dispersa por cada partícula individualmente, calculando a distribuição do tamanho das partículas. Por outro lado, os fotômetros medem a quantidade total de radiação dispersa pelas partículas de aerossol presentes no sensor, determinando a concentração de partículas no ar (Rai *et al.*, 2017; Alfano *et al.*, 2020).

Apesar dos avanços no desenvolvimento de sensores, as pesquisas sistemáticas sobre a confiabilidade e precisão das medições obtidas com novos dispositivos ainda estão em estágio inicial. Diversos experimentos têm examinado o desempenho de sensores de baixo custo disponíveis comercialmente, incluindo testes de laboratório (Wang *et al.*, 2015) e comparações de campo com métodos de referência em estações regulatórias de monitoramento da qualidade do ar (Kuula *et al.*, 2019).

Embora alguns modelos tenham mostrado correlações adequadas entre os sensores e os instrumentos de referência, há um consenso de que a geração atual de sensores de baixo custo precisa de melhorias adicionais para alcançar a precisão dos monitores de referência (Clements *et al.*, 2017). Como a maioria dos sensores de MP de baixo custo calcula concentrações com base no princípio de dispersão de radiação, variáveis ambientais como temperatura e umidade relativa (UR) podem distorcer significativamente suas medições. Pesquisas realizadas até o momento sugerem que o

desempenho dos sensores diminui em ambientes com $UR \geq 75\%$, principalmente devido ao crescimento higroscópico das partículas após a condensação de gotículas de água (Zheng *et al.*, 2018).

Baginski (2019) afirma que no contexto do monitoramento de partículas, a falta de precisão decorre da dificuldade na medição de partículas extremamente pequenas. Sensores de baixo custo (SBCs) não conseguem detectar partículas menores que 0,03 micrômetros (μm), além disso, o material particulado (MP) apresenta variações em suas formas, e os sensores utilizam métodos de aferição que dependem da tecnologia desenvolvida. Esses métodos nem sempre são projetados para privilegiar a precisão do equipamento. Adicionalmente, os sensores são influenciados pelas condições atmosféricas, o que pode reduzir sua precisão.

As condições atmosféricas, tais como umidade e temperatura, impactam diretamente os sensores de baixo custo, levando a variações significativas nas leituras e a influência dessas condições pode diminuir a acurácia dos dados coletados. Outro ponto crítico é a necessidade de calibração frequente para assegurar a confiabilidade das medições, o que pode ser inviável em grandes redes de monitoramento. Finalmente, a tecnologia utilizada nesses sensores muitas vezes não é suficientemente avançada para detectar partículas ultrafinas, exigindo a utilização de equipamentos mais sofisticados e caros para obter medições precisas. Sensores mais avançados são necessários para capturar partículas ultrafinas, que podem passar despercebidas pelos SBCs devido às suas limitações intrínsecas. (Baginsk, 2019).

Ademais, os sensores antes restritos a governos ou organizações de pesquisa no Norte Global, por custar na casa dos 10.000 dólares estadunidense, o que impulsiona o surgimento de sensores de qualidade do ar de baixo custo, incluindo monitores de PM. SBC têm sido utilizados em (ou comercializados para) projetos de várias escalas: desde projetos de ciência cidadã e redes de monitoramento em cidades (Giordano *et al.*, 2021).

Os SBCs de MP tornaram-se populares e atualmente existem várias empresas que fabricam esses equipamentos. São usados nas indústrias, governos, empresas de monitoramento e os dados são ferramentas fundamentais para a gestão de qualidade do ar. No Quadro 2 pode-se observar alguns fabricantes e características técnicas.

Quadro 2 – Tipos de sensores e especificações técnicas

Sensor	Modelo	Comprimento da onda	Ângulo de espalhamento	Aspiração	Tamanho da Partícula	Saída
Plantower	PMS 1003	650 nm	90	0,11 l/min	0,3 μ	Concentração de Massa de Partícula
Sensirion	Sps30	660 nm	90	0,11 l/min	0,3 μ	MP ₁ , MP _{2,5} MP ₄ , MP ₁₀
Honeywell	HPMA 115CD	650 nm	Frente	Não informado	Não informado	MP ₁ , MP _{2,5} MP ₄ , MP ₁₀
Meet One	NPM2	670 nm	Frente	2 l/min	0,1 μ	Concentração de Massa de Partícula
Alphasense	PPC-N2	658 nm	30	5,5 l/min	0,3 μ	Número de Partículas

Fonte: Giordano *et. al*, 2021. (Tradução livre)

3.4.1 Calibração de sensores de baixo custo

Os SBC podem auxiliar o monitoramento oficial, para isso existe a necessidade de normativas que estabeleça que medições indicativas podem ser usadas para complementar os níveis de poluição do ar medidos por estações fixas de monitoramento. A importância legislativa dessas medições indicativas deve ser enfatizada, pois os resultados de medições indicativas devem ser considerados na avaliação da qualidade do ar em relação aos valores-limite (Chong *et al.*, 2003)

No entanto, Clements *et al.*, (2017) expõem algumas desvantagens dos SBC que devem ser levadas em consideração. Além de terem menor precisão de detecção em comparação com as estações de monitoramento tradicionais, esses sensores apresentam sensibilidade a fatores ambientais como temperatura, umidade e pressão; degradação da precisão de detecção com o tempo; desvios no sensor, exigindo recalibração frequente; lentidão para responder a mudanças nos níveis de poluentes, o que pode levar à subestimação de picos de poluição em implantações móveis.

Venkatraman *et al.* (2021) destacam que, como parte de um projeto para desenvolver uma estratégia de comunicação sobre o uso de SBC para a Agência Ambiental Alemã (Umweltbundesamt, UBA), foram realizadas 18 entrevistas entre outubro de 2019 e agosto de 2020 com pesquisadores que trabalham com SBC, e revelaram uma falta de unidade nos testes de sensores, e destacaram a necessidade de novas diretrizes para padronizar esses procedimentos. É crucial esclarecer o objetivo do uso dos sensores, seja para aumentar a conscientização ambiental ou testar a qualidade do ar.

Além disso Venkatraman *et al.*, (2021) destacam que muitos grupos de pesquisa utilizam sensores sem calibração adequada, e o número de calibrações necessárias durante uma campanha de medição ainda não está claro. A maioria realiza calibrações comparativas com instrumentos padrão no início e no final das campanhas. Os dados fornecidos pelos fabricantes são insuficientes, tornando a calibração impreterível, pois cada sensor possui atributos únicos. Os SBCs são frequentemente operados fora de suas especificações, falhando em fornecer dados utilizáveis. Experimentos de laboratório único ou de co-localização são insuficientes para determinar os valores medidos e a idade dos sensores deve ser considerada.

O método de calibração dos sensores é indireto, ou seja, é um método em que a medição não é feita diretamente sobre o instrumento, mas sim através de um sistema auxiliar que compara o instrumento em calibração com um padrão de referência, Albertazzi (2008). Liang (2021) descreve três categorias principais de métodos de calibração para SBCs: modelos baseados em mecanismos físicos, modelos paramétricos, como os de regressão, que capturam interações lineares e não lineares, e abordagens não paramétricas, incluindo algoritmos avançados de aprendizado de máquina (ML). Embora não exista uma solução universal para calibrar todos os tipos de SBCs, uma comparação abrangente dos diferentes modelos pode orientar sobre quais métodos de calibração são mais adequados para cada sensor.

Para a realização da calibração, é essencial conduzir testes que comprovem a acurácia do equipamento dentro dos limites estabelecidos, comparando-o com um padrão de referência. Esse processo envolve análises estatísticas, como testes de correlação e intervalos de confiança, além da avaliação detalhada das incertezas de medição. No entanto, atualmente, ainda não existem laboratórios acreditados para esse fim específico, conforme, as diretrizes da norma NIT-DICLA-021/07, que estabelece os

princípios e requisitos para a avaliação da incerteza de medição em processos de calibração, bem como para a declaração dessa incerteza em certificados de calibração e serve como guia para a avaliação do cumprimento da ISO/IEC 17025 no âmbito da acreditação nacional.

A abordagem adotada é mantida em um nível geral, de modo a ser aplicável a todos os campos da calibração. A norma ainda explica que a incerteza de medição associada às estimativas de entrada é avaliada por meio de dois métodos: Tipo A ou Tipo B. A avaliação do Tipo A determina a incerteza padrão por meio de análise estatística de uma série de observações, sendo a incerteza padrão representada pelo desvio padrão experimental da média, obtido por cálculos de média aritmética ou análise de regressão. Já a avaliação do Tipo B calcula a incerteza padrão sem o uso de análise estatística, baseando-se em outros conhecimentos científicos disponíveis. INMETRO (2017)

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando várias observações independentes de uma grandeza de entrada são realizadas sob as mesmas condições de medição. Para isso, é essencial que as condições ambientais sejam monitoradas e controladas. Além disso, se o processo de medição possuir resolução suficiente, será possível observar uma dispersão ou variação nos valores obtidos, o que permite a análise estatística necessária para calcular a incerteza. Já a avaliação do Tipo B da incerteza padrão determina a incerteza associada a uma grandeza de entrada, com base em informações científicas disponíveis, como dados de medições, especificações do fabricante, certificados de calibração e referências técnicas, sem utilizar análise estatística de observações repetidas, INMETRO (2017).

Venkatraman *et al.*, (2021) destacam que os SBCs geralmente não funcionam de forma autônoma, necessitando de componentes eletrônicos adicionais para fornecimento de energia, configuração e armazenamento de dados. Assim, os sensores selecionados devem ser conectados a um microcontrolador (MCU) para processamento antes da transmissão dos dados (Narayana; Nagendra; Jaliha, 2022).

3.5 MICROCONTROLADORES

Giusto (2021) salienta que os módulos eletrônicos multifuncionais, também conhecidos como microcontroladores, são dispositivos versáteis que podem ser adaptados para uma ampla gama de aplicações. Eles possuem uma configuração simples e modular que facilita a construção de diversos sistemas integrados. Muitos modelos de microcontroladores utilizam tecnologia de código aberto, permitindo fácil acesso aos projetos e, conseqüentemente, reduzindo os custos de fabricação. Os microcontroladores podem ser empregados em diversas áreas, desde estudos comportamentais até nanotecnologia.

A flexibilidade e acessibilidade dos microcontroladores de código aberto têm impulsionado a inovação em várias disciplinas, permitindo que pesquisadores e desenvolvedores criem soluções personalizadas e eficientes para problemas complexos. Essa democratização da tecnologia tem o potencial de transformar setores inteiros, promovendo avanços significativos em áreas como a Internet das Coisas (IoT), robótica e inteligência artificial (AI) (Atzori; Iera; Morabito, 2010).

No que se refere à utilização como componentes de estações experimentais, Araújo *et al.* (2023) relatam o uso de diversos modelos do microcontrolador Arduino, que se mostrou versátil na adaptação de sensores para medir diversos poluentes. O baixo custo e a facilidade de obtenção e uso tanto do microcontrolador quanto dos sensores tornam o Arduino uma escolha ideal para o desenvolvimento de equipamentos de monitoramento da qualidade do ar.

Porém, Pagliarini *et al.* (2022) destacam que o ESP32 supera o Arduino em termos de memória e frequência de operação. Além disso, o Raspberry Pi, conforme Lemos *et al.* (2016), é um computador compacto e acessível, utilizado como servidor web, estação de monitoramento e também para fins educacionais. Sua capacidade de executar um sistema operacional facilita a implementação de algoritmos. No entanto, o uso de sistemas operacionais baseados em Linux, como o Debian, pode resultar em maior consumo de energia.

Santos e Lara Junior (2019) afirmam que os microcontroladores são equipamentos programáveis, de baixo custo e pequeno porte, que possuem uma unidade de processamento, memória, entrada e saída, e têm como função realizar ações de controle de forma remota. Um microcontrolador possui um microprocessador e

periféricos, tais como dispositivos de entrada e saída (E/S), temporizadores, memória de dados e programa, conversores analógicos-digitais (A/D) e digitais-analógicos (D/A), geração PWM, entre outros, integrando tudo em um único circuito. Com o auxílio de um software de ambiente para desenvolvimento integrado (IDE), é possível desenvolver um programa (algoritmo) para o controle dos periféricos do microcontrolador e, consequentemente, atuar sobre os dispositivos externos (Ibrahim, 2017).

Dentre os muitos disponíveis no mercado, o Raspberry Pi, ESP32 e o Arduino UNO se destacam por suas funcionalidades e flexibilidade. O Raspberry Pi foi concebido por Eben Upton, em 2006, para estimular a criação e possui baixo custo (Garfinkel, 2012). Já o ESP32 foi criado pela Espressif Systems para fins comerciais, oferecendo ótimo custo-benefício e baixo consumo de energia. Por fim, o Arduino UNO é definido como uma plataforma de prototipagem *open source* baseada em componentes de software e hardware de fácil uso (Projeto Arduino, 2016). Algumas especificações técnicas, conforme os fabricantes, são representadas na Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações técnicas de Microcontroladores

Nome	Memória	Pinos	Conectividade	Temperatura	Consumo (W)
 Raspberry Pi	256MB 512MB	26	HDMI, 2 × USB 2.0, CSI camera port, DSI display port, 3.5mm audio jack, RCA composite video, Ethernet (100Mb/s), SD card slot, micro USB power	-40° a +80° C	6,9
 ESP32	Flash 4MB (padrão)	30	Wifi, Bluetooth, Ethernet, USB	-45° a +80° C	4

Arduino UNO 	32 KB	6	USB	-25° + 70° C	0,2
---	-------	---	-----	--------------	-----

Fonte: O autor (2024)

3.6 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um dos grandes gargalos no desenvolvimento de equipamentos de monitoramento no Brasil é a indisponibilidade de energia elétrica, pois, com proporções continentais o país possui grandes territórios com distribuição energia deficitária que envolve desde aglomerados de moradias urbanas precárias, sem serviços de distribuição de energia, até locais remotos pouco habitados. De acordo com Junior; Pereira; De Lima Lira; (2021), a utilização de módulos fotovoltaicos para gerar eletricidade em áreas isoladas tem se mostrado uma alternativa promissora nos últimos anos. Essa opção é especialmente vantajosa quando comparada a outras fontes de geração, como motores a *diesel*, devido à disponibilidade local e às características que permitem a individualização da geração. Isso facilita o atendimento de consumidores dispersos e simplifica o aproveitamento dos recursos de geração de energia de forma individualizada.

A teoria ondulatória explica parte dos fenômenos ópticos, mas para entender a relação entre a radiação incidente em um material e a energia transmitida a ele, é necessário considerar a luz como partícula. Esse comportamento dual da luz, postulado por Albert Einstein em 1905, permite explicar o efeito fotoelétrico, amplamente aplicado na engenharia e base para o estudo do efeito fotovoltaico. O efeito fotoelétrico ocorre quando a luz incide em uma placa metálica e extrai elétrons dela, exigindo que os fótons incidentes possuam uma energia mínima. Diferente do efeito fotoelétrico, o efeito fotovoltaico, base dos sistemas de energia solar fotovoltaica, transforma a radiação solar em energia elétrica por meio de uma célula formada por materiais semicondutores (Ferreira, 2005; Villalva, 2017; Carneiro, 2010).

A energia solar fotovoltaica é gerada pela conversão direta da radiação solar em eletricidade através de células fotovoltaicas, que não armazenam energia, mas mantêm um fluxo de elétrons enquanto há luz. As células fotovoltaicas podem ser de silício cristalino, policristalino ou amorfo, com três gerações de tecnologias: silício cristalino, filmes finos e células de terceira geração, que são mais eficientes e utilizam materiais de baixa toxicidade. Os painéis solares, ou módulos fotovoltaicos, são os principais componentes desses sistemas de geração de energia (Villalva, 2017; Imhoff, 2007; Nascimento, 2004).

Os painéis solares, também chamados de módulos fotovoltaicos, são os principais componentes dos sistemas de geração de energia fotovoltaica. Eles consistem em um conjunto de células fotovoltaicas associadas eletricamente em série e/ou paralelo, dependendo das tensões e correntes especificadas no projeto. Esse conjunto de módulos forma o gerador fotovoltaico, responsável por captar a irradiação solar e transformá-la em energia elétrica (Pereira; Oliveira, 2011).

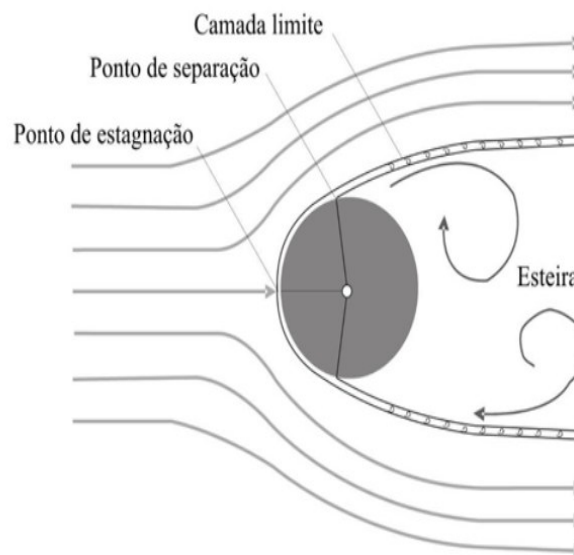
Existem basicamente três tipos de sistemas fotovoltaicos: sistemas autônomos e isolados: não dependem da rede elétrica convencional; sistemas conectados à rede (*On Grid*): ligados à rede de distribuição de energia; sistemas híbridos: possuem ligação à rede e armazenamento. No caso dos sistemas autônomos, há opções com e sem armazenamento. Os sistemas com armazenamento podem ser utilizados para carregar baterias de veículos elétricos, iluminação pública e até pequenos aparelhos portáteis (Villalva; Gazoli, 2012).

3.7 GEOMETRIA DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS E AERODINÂMICA DOS CORPOS

A eficácia desse sistema está relacionada à quantidade de equipamentos que funcionam sob sua gestão e ao consumo de energia elétrica. Observa-se que, à medida que o número de dispositivos aumenta, o consumo de energia cresce proporcionalmente. Nesse contexto, a ventilação, realizada por coolers que insuflam ar para resfriamento, pode comprometer a autonomia do sistema devido ao alto consumo energético desses componentes. Isso destaca desafios no design das estações, que geralmente possuem formatos retangulares e incluem um ou mais sistemas de ventilação, conforme evidenciado no quadro de revisão bibliográfica, Quadro 5.

Diante disso, é necessário entender a dinâmica dos fluidos em torno das superfícies das geometrias das estações, a fim de observar a necessidade real de se instalar ou não um sistema de ventilação. Blesmman (1990) afirma que quando o fluido escoar por um corpo imerso uma fina camada forma-se perto de sua superfície, devido à influência da viscosidade. Prandtl, em 1904, chamou essa camada de camada limite. Conforme Machado (2008), pode-se observar na imagem (Figura 3) a camada limite, o ponto de separação, ponto de estagnação e a esteira com seus córtices conforme o fluido é aplicado.

Figura 3 - Escoamento em torno de um cilindro circular



Fonte: Machado (2008)

Na região da esteira, ocorrem pressões negativas que são parcialmente responsáveis pelas forças de arrasto no cilindro. Além disso, as forças transversais ao escoamento são provocadas pelo desprendimento de um par de vórtices que geram forças periódicas laterais com sinal alternado e mesma frequência dos desprendimentos dos vórtices (Blesmamm, 1998).

Em relação ao escoamento, um cilindro apresenta distribuição de pressão ao longo de sua circunferência (Machado, 2008). Essa distribuição de pressões externas em torno do cilindro ocorre nos regimes ultracrítico, crítico e subcrítico (Nuñez, 2001). Almeida (2001) apresenta uma definição clara e concisa desse tipo de escoamento, conforme a imagem da Figura 4. Em termos gerais, esse fenômeno é caracterizado pela presença de uma região de recirculação e pela formação de uma esteira de vórtices

ou turbilhões à jusante do obstáculo. O movimento relativo entre o fluido e o sólido resulta em perfis de velocidade inflexionais, gerando fenômenos complexos devido à interação simultânea entre três regiões de forte cisalhamento: a camada limite, a zona de separação e a esteira turbilhonar.

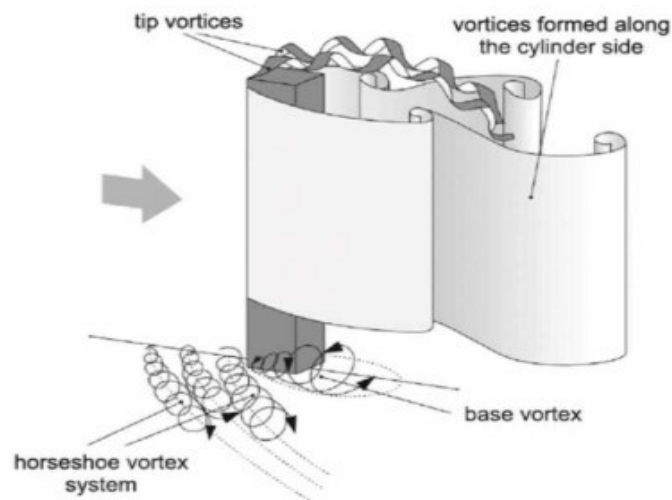
Figura 4 - Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico



Fonte: Almeida (2001)

Analisando o caso de cilindros com base quadrada, figura 5, podemos aplicar o conhecimento adquirido sobre cilindros circulares e suas características. Nota-se que a substituição das laterais arredondadas por arestas perpendiculares torna o escoamento ainda mais complexo. Almeida (2001) também destaca essa característica afirmando que em cilindros com base quadrada e retangular, a presença de arestas vivas acrescenta uma complexidade adicional ao escoamento. Esses cilindros sofrem descolamento logo na borda de ataque, com possíveis recolamentos nas faces laterais. Portanto, observa-se que os cilindros de base redonda são mais eficientes em ventos laterais, neste sentido, torna-se um desafio o projeto de um modelo de estação.

Figura 5 - Visualização do escoamento passando por um cilindro de base retangular



Fonte: Wang (2004)

3.8 IMPRESSÃO 3D

Observando uma forma cilíndrica o uso da tecnologia de impressão 3D se torna ideal, pois, é importante reconhecer que o custo e o tempo dedicados à criação e fabricação das ferramentas de suporte à produção em massa representam uma parcela significativa do custo total do produto. Além disso, o ferramental de produção, em processos desse tipo, não apenas é caro, mas também impõe limitações ao design com base nas restrições dos diferentes métodos de produção em massa (Horn; Harrysson, 2012).

A impressão tridimensional, também conhecida como manufatura aditiva, existe há décadas. A primeira impressora 3D funcional (*Sterolithography Apparatus*) foi criada em 1984 por Charles W. Hull, da 3-D Systems CORP. Essa tecnologia consiste na deposição camada por camada do material até que a peça final seja obtida, diferentemente de outros processos de fabricação que envolvem subtração de material, como perfuração, forjamento e soldagem (Conner *et al*, 2014).

A impressão 3D é uma das tecnologias mais importantes dos últimos anos, pois permite um novo paradigma de produção (adição de material em vez de subtração) e, ao mesmo tempo, oferece alto nível de personalização dos objetos (Conner *et al*, 2014). Segundo Weller; Kleer; Piller, (2015), quatro características principais podem ser identificados: (1) tecnologia com processo de fabricação universal baseado em modelos,

(2) ausência de custos adicionais relacionados à complexidade do design, (3) customização e flexibilidade gratuitas e (4) potencial para reduzir o trabalho de montagem em produtos funcionalmente integrados.

Berman (2012) destaca que a aplicação da impressão 3D é tecnicamente viável e economicamente vantajosa, considerando o volume de produção, o tamanho da peça, a complexidade e o custo do material. Ela é amplamente utilizada em aplicações com baixos volumes de produção, peças pequenas e projetos complexos, como prototipagem rápida na indústria automotiva e no setor médico.

Porém, o seu uso produz impactos ambientais e estudos sobre eles nos processos de manufatura aditiva deve considerar vários fatores, como consumo de energia, ciclo de vida do produto, geração de resíduos, pegada hídrica, potencial de aquecimento global e poluição do ar. Esses impactos dependem de diferentes parâmetros, como o processo específico e os materiais utilizados, Khosravai *et al* (2020). Silva *et al* (2020) esclarecem que A impressão 3D pode gerar resíduos plásticos, especialmente em casos de falhas de impressão ou suportes descartáveis. Embora alguns materiais, como o PLA, sejam biodegradáveis, muitos plásticos usados na impressão 3D não são facilmente recicláveis. Ademais, a produção de filamento plástico ou resina usada na impressão 3D requer a extração e processamento de matérias-primas, como plásticos à base de petróleo. O processo de extração pode levar à destruição de habitats, poluição da água e liberação de gases de efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas e degradação ambiental, Kreiger & Pearce (2013).

Além disso, o aquecimento e o derretimento de materiais plásticos durante o processo de impressão 3D podem liberar compostos orgânicos voláteis (VOCs) e material particulado no ar, especialmente se a impressora não for ventilada adequadamente. Essas emissões podem ter efeitos prejudiciais na qualidade do ar e na saúde humana, particularmente em espaços mal ventilados. Kreiger & Pearce (2013)

Por fim, diante dos aspectos identificados nos problemas, propõe-se o desenvolvimento de uma estação de monitoramento, inicialmente voltada para a medição de Material Particulado 2,5 μm . A proposta inclui um design compacto e eficiente, com componentes adequados para suportar sensores de baixo custo, microcontroladores e um sistema que assegure autonomia energética. Além disso, o design será projetado para proteger os equipamentos eletrônicos contra intempéries

climáticas, garantindo durabilidade. A estação será inovadora e versátil, com possibilidade de instalação tanto em ambientes internos quanto externos.

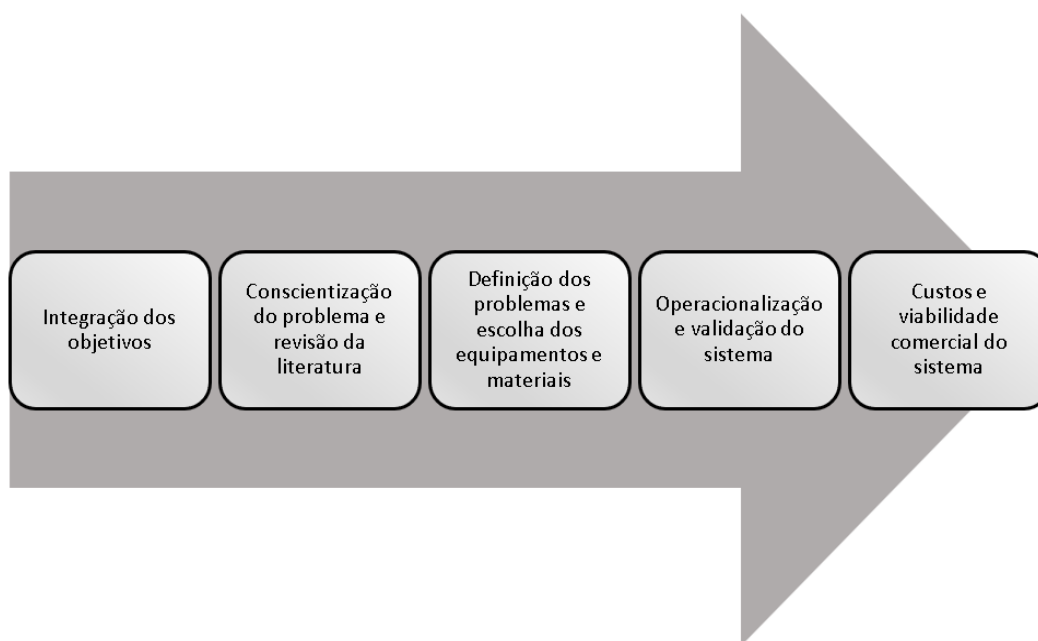
4 METOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi necessário desenvolver um método específico. Inicialmente, foi conduzida uma sessão de *brainstorming* com todos os integrantes do Laboratório de Meteorologia e Climatologia Ambiental da UFU-CLiMA. Durante essa reunião, identificou-se a necessidade de obter dados sobre a poluição atmosférica, discutiram-se os desafios associados a esse monitoramento e analisaram-se as alternativas atualmente utilizadas.

A partir dessa análise, constatou-se que o tema era relevante e que havia uma demanda por avanços na área, uma vez que as normas que estabelecem padrões de qualidade ainda não estavam sendo plenamente atendidas. Esse cenário se devia, em grande parte, ao alto custo dos equipamentos de referência. Diante desse desafio, tornou-se essencial a aplicação de conhecimentos tecnológicos, incluindo cooperação técnica e revisão bibliográfica, para o desenvolvimento de uma solução viável.

Nesse contexto, a identificação dos componentes mais adequados e a compreensão de suas limitações técnicas foram etapas fundamentais, pois permitiram minimizar problemas previamente conhecidos. Além disso, esses fatores orientaram a otimização do funcionamento do produto, garantindo que ele atendesse às expectativas dos usuários. Por fim, considerando a necessidade de um equipamento eficiente e acessível, foi necessário realizar um levantamento de custos e avaliar sua viabilidade comercial, essas etapas foram realizadas conforme Figura 6, o processo foi segmentado em fases específicas, garantindo a organização e o acompanhamento sistemático do desenvolvimento do trabalho.

Figura 6 – Etapas da metodologia



Fonte: O autor (2024)

Outro aspecto fundamental dessa metodologia é a previsibilidade de suporte técnico. Caso fosse necessário fornecer assistência ao pesquisador/mestrando, o histórico das etapas concluídas possibilita um rápido entendimento da situação, reduzindo o tempo de resposta e evitando retrabalho. Esse é um aspecto corriqueiro no CLIMA, pois, o laboratório possui grupos de trabalho em aplicativo de comunicação, todo projeto realizado é compartilhado com todos e as contribuições partem do conhecimento diversificado de seus componentes

Assim, foram identificados os principais desafios para a construção de uma estação de monitoramento, bem como os passos necessários para garantir sua funcionalidade, confiabilidade dos dados e acessibilidade comercial. A investigação preliminar definiu a arquitetura do sistema, composta basicamente por uma fonte de energia, um microcontrolador com conectividade sem fio e um sensor. Esses componentes devem ser compatíveis com a estrutura da estação, operar sem interferências internas ou externas e apresentar baixo custo.

Além disso, o desenvolvimento do projeto estrutural da estação requereu modelagem em software, considerando uma geometria adequada, espaços para acomodação dos dispositivos e a seleção de materiais duráveis, capazes de resistir a

condições extremas de temperatura. Os materiais também deviam oferecer proteção contra insetos e não comprometer a coleta de dados.

Por fim, foi essencial realizar a estimativa de custos e a análise de viabilidade técnica e econômica, pois o sistema deve ser financeiramente acessível, operar com precisão, apresentar baixa margem de erro na coleta de dados e exigir manutenção simplificada. Adicionalmente, deve ser autossustentável em termos energéticos, possuir capacidade suficiente de armazenamento de informações e permitir a extração fácil dos dados para análise futura.

O processo (Figura 7) iniciou-se com a identificação da tarefa a ser realizada, denominada "entrada" (o que será feito?), correspondendo às etapas da metodologia. Em seguida, definiu-se uma estratégia para alcançar a solução (como será feito?), ajustada conforme a especificidade da entrada. Além disso, foi necessário determinar os responsáveis pela execução da tarefa (quem a realizará?) etapa foi realizada pelo mestrando com auxílio ou consultoria dos integrantes do CLIMA conforme demanda. Por fim, obteve-se o resultado da estratégia (o que foi feito?), que pode ser uma solução técnica ou um produto desenvolvido para aquela etapa.

Figura 7 – Processos metodológicos



Fonte: O autor (2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTEGRAÇÃO DOS OBJETIVOS

No Laboratório de Climatologia e Meteorologia Ambiental (CLiMA) da Universidade Federal de Uberlândia, foi realizada uma reunião inicial com os integrantes da equipe de desenvolvimento. Durante o encontro, foram definidos os objetivos do projeto e identificada a problemática relacionada à necessidade de dados sobre poluição atmosférica, com destaque para o monitoramento das partículas PM_{2,5}. Como resultado dessa análise, determinou-se que seria viável desenvolver uma estação de monitoramento de baixo custo para atender a essa demanda.

Para uma melhor compreensão dos resultados, foi elaborado um resumo das atividades, conforme apresentado no Quadro 3. Após a definição dos objetivos, foram identificados os desafios e dificuldades potenciais, marcando a primeira etapa da metodologia.

Assim, foram estabelecidas uma série de etapas, Quadro 4, representadas pelas entradas do projeto, que englobam os passos necessários para alcançar o objetivo principal. Essas etapas incluem a definição das estratégias para solucionar os problemas identificados. Os resultados dessas etapas, denominados saídas, foram apresentados na forma de soluções ou produtos representando o alcance dos objetivos estabelecidos no projeto.

Quadro 4 – Resumo das entradas e saídas do projeto

Entrada – Tarefa	Estratégia para alcance da solução	Stakeholders	Saída – Solução/Produto
Integração dos objetivos	Brainstorming	Técnicos do CLiMA, professores e mestrando	Foi observado os principais problemas, tipos de equipamentos, vedações, designer e autonomia
Conscientização do problema	Cooperação técnica entre institutos, pesquisa científica de artigos, teses e dissertações	Professores orientadores, técnicos do LFA – USP, mestrando	Testes em microcontroladores acoplados a sensores em laboratório, revisão bibliográfica
Definição dos	Revisão	Mestrando,	Equipamentos adequados, desenho

problemas e escolha dos equipamentos, materiais e designer	bibliográfica, testes técnicos em laboratório, softwares e brainstorming	técnicos e professores orientadores	industrial com designer versátil e de fácil operação/manutenção e modelos para teste
Operação e validação do sistema	Protótipo impresso em 3 D	Mestrando, técnicos e professores orientadores	Modelo industrial, Teste de operação com 15 dias corridos e tomada de dados
Custo e viabilidade comercial	Orçamentos e tomadas de preço	Mestrando	Tabela de custos

Fonte: O autor (2024)

Na integração dos objetivos, foram avaliados os aspectos técnicos pelo grupo de especialistas do CLIMA, com o intuito de definir a viabilidade e a dificuldade de obtenção de um artefato. O mestrando responsável pelo projeto foi informado de que a proposta demandaria um tempo considerável e que sua execução seria de difícil conclusão, uma vez que seria necessário buscar outros laboratórios para a produção, já que o CLIMA não dispõe de equipamentos de impressão 3D. Além disso, foi esclarecido que os equipamentos são sensíveis a intempéries, sendo fundamental que a estação contasse com proteção adequada para esses eventos.

Também foram definidas as etapas para a escolha dos equipamentos. O mestrando deveria realizar uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de identificar os principais artefatos necessários para a concepção do projeto, levantando os problemas mais comuns associados a eles, tais como custo, consumo de energia, interferências externas, maior ou menor sensibilidade as intempéries, armazenamento de energia, geometria da estação e possíveis manutenções, o que foi denominado "classe de problemas". Em seguida, caberia a ele apresentar uma proposta com os melhores equipamentos para testes no CLIMA, onde os técnicos prestariam assessoria para a escolha adequada.

Para esclarecer as características do produto, foram identificados os artefatos indispensáveis, os problemas que precisavam ser resolvidos e elaborada uma proposta detalhada para a produção ou aquisição de cada artefato. Neste contexto, foram identificados como artefatos, o sensor para MP, o microcontrolador, o sistema fotovoltaico e a caixa de proteção. A escolha de cada um destes artefatos apresenta vantagens e desvantagens. As desvantagens ou problemas mais diretos encontrados foram listados como classe de problemas e com base nesta combinação foi definida uma

proposta com as características ideais para cada artefato. O resultado desse processo está ilustrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Identificação do artefato, classe de problemas e proposta do artefato

Identificação do artefato	Classe de problemas	Proposta do artefato
Sensor para material particulado	Custo do sensor	Um sensor de baixo custo com capacidade de calibração por meio de inserção de equações e com baixo custo computacional e consumo de energia.
	Necessidade de controlador	
	Necessidade de correção de Dados	
	Interferência externa do meio	
Microcontrolador	Custo computacional	Observar um microcontrolador de baixo custo, que atenda as demandas de energia e dados.
	Consumo alto de energia	
	Sensibilidade à UR e Temperatura	
	Custo do microcontrolador	
Sistema fotovoltaico	Custo do equipamento	Equipamento de baixo custo, com dimensões de se adequem à necessidade do projeto, com geração de energia intermitente e com bateria para no mínimo 15 dias de operação com nuvens.
	Dimensões adequadas	
	Geração de energia em suficiência	
	Armazenamento de energia	
Caixa de proteção dos equipamentos e com acoplamento para sistema fotovoltaico	Necessidade de vedação para proteção de intempéries	Criar um modelo com software para o projeto industrial, focando nas vedações necessárias para proteger os eletrônicos das intempéries, garantindo o espaço para dissipação de calor interno e utilizando materiais que suportem calor externo. A geometria deve acomodar os equipamentos, ser dividida em partes para facilitar a manutenção e incluir suporte para coleta de dados sem fio.
	Temperatura interna e externa	
	Geometria que comporte os equipamentos	
	Manutenção	
	Tomada de dados	

Fonte: O autor (2024)

5.2 COOPERAÇÃO E PESQUISA PARA O DESENVOLVIMENTO

Apesar da simplicidade da arquitetura proposta, a estação deve possuir diversos atributos técnicos, o que exige conhecimento científico e experiência prática com os equipamentos selecionados. Por isso, foi estabelecido contato com o Laboratório de Física Atmosférica (LFA) da Universidade de São Paulo (USP) que resultou em uma visita técnica de quatro dias, de 30 de maio a 02 de junho de 2023.

Durante a visita ao LFA, foram apresentadas as possibilidades de funcionamento de diferentes tipos de sensores que utilizam os microcontroladores Raspberry Pi 3 e Arduino UNO. Além disso, foram disponibilizados códigos de programação obtidos por meio da plataforma colaborativa GitHub. Esses componentes demonstraram ser adequados tanto para ambientes internos quanto externos. Em ambos os casos, os testes realizados indicaram um desempenho satisfatório e de qualidade. A decisão sobre o equipamento mais apropriado ficou sob a responsabilidade da equipe de desenvolvimento do (CliMA) - UFU que consideraram as especificidades e demandas do projeto.

Para nortear a escolha do equipamento, foi realizada uma revisão bibliográfica e um levantamento de artigos científicos, dissertações e teses publicados no período entre 2020 e 2024, que abordavam o problema em estudo e desenvolveram estações experimentais, com intuito de monitorar a MP_{2,5} com seus equipamentos, acessórios e design, conforme Quadro 6. Esse levantamento foi realizado por buscas nas plataformas científicas Scopus e Web of Science e Google acadêmico por meio das palavras chaves material particulado, MP_{2,5}, monitoramento do Ar, sensores de baixo custo, *particulate matter*, *low cost sensor* e PM_{2,5}.

Quadro 6 –Levantamento bibliográfico dos principais componentes de estações de monitoramento experimental com equipamentos de baixo custo para MP_{2,5}

Autor	Sensor	Controlador	Fixo ou Móvel	Ventilação	Geometria	Material
AGUIAR (2022)	PMS 7003 Plantower	ESP32	Fixo	SIM	Retangular	ASA
PASTÓRIO (2023)	SDS011, SDS018 NovaFitness; HPMA115S0 Honeywell; PMS7003 Plantower e MIX6070 Mixsen	ESP32	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMADO
GALETTI et. al (2020)	Shinyei PPD42NS	UNO	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMADO

						DO
SACHETTI et. al (2021)	Samyoung DSM501	ESP8266	Fixo	NÃO	Retangular	PVC
GURJÃO et. al (2023)	Sensenet UFC	NÃO INFORMA DO	Móvel	NÃO	Retangular	NÃO INFORMA DO
DE MELO et. al (2023)	PurpleAir PA-II-SD	NÃO INFORMA DO	Fixo	NÃO INFORMA DO	NÃO INFORMA DO	NÃO INFORMA DO
GIUSTO et. al (2021)	Honeywell HPMA115S0 -XXX	ESP32	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
AIX et. al (2023)	Plantower 7003	ESP8266	Fixo	NÃO INFORMA DO	Retangular	NÃO INFORMA DO
TAGLE et. al (2020)	SDS 011 Nova Fitness	ESP8266	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
SCHILT et. al (2023)	Cubic PM3015SN	FiPy e ESP32	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
LEE et. al (2020)	Plantower 7003	Raspberry Pi	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
MEI et. al (2020)	Plantower PMSA003	Raspberry Pi	Fixo	SIM	Retangular	PVC

BAI et. al (2020)	Shinyei PPD42NS	Arduino Mega 2560	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
ROGULSK I et. al. (2020)	PM SEN0177 DFRobot	NÃO INFORMA DO	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
TÉKOUAB OU et. al. (2022)	SDS 011 Nova Fitness	NodeMCU	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
GÄBEL et. al (2022)	SPS30 Sensirion	MEGA 2560; ESP32	Fixo	SIM	Retangular	ABS
PARK et. al. (2021)	SPS30 Sensirion	NÃO INFORMA DO	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
ARASAKI (2024)	SPS30 Sensirion	NÃO INFORMA DO	Móvel	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO
MAHAJAN (2022)	SPS30 Sensirion	Raspberry Pi	Fixo	SIM	Retangular	NÃO INFORMA DO

Fonte: O autor (2024)

Assim, foram identificados 19 trabalhos que utilizam componentes básicos para a montagem de tomadores de dados, sejam estações ou monitores, voltados à medição de MP. O sensor mais utilizado foi o da marca Plantower, presente em vários estudos. Os trabalhos analisados demonstraram que é possível realizar monitoramento auxiliar com esse equipamento. Lee, em seu estudo, avaliou o sensor com diferentes métodos de

calibração, obtendo uma correlação que variou de 0,985 a 0,997 ao utilizar técnicas como métodos computacionais e redes neurais.

No entanto, o sensor que apresentou os melhores resultados foi o Sensirion SPS30. No trabalho de Mahajan (2022), o sensor foi testado em conjunto com o equipamento de referência da National Air Pollution Monitoring Network (NABEL), sediada em Zurique, Suíça. Os resultados revelaram um erro médio de apenas 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em tempo real, demonstrando que o SPS30 possui alta precisão para o ambiente analisado.

Já os demais sensores apresentaram desempenho mediano em relação à comparação com equipamentos de referência. Contudo, na maioria dos casos, não foram realizados testes que demonstrassem os erros médios propagados. Uma exceção foi o estudo de Tagle (2020), que analisou o sensor SDS011. Em seus testes, o autor observou uma variabilidade moderada entre unidades de sensores para $\text{MP}_{2,5}$ (com erro quadrático médio normalizado de 9–24%) e MP_{10} (10–37%). As correlações entre as concentrações médias de 1 hora relatadas pelos sensores e pelos monitores contínuos foram maiores para $\text{MP}_{2,5}$ (R^2 de 0,47–0,86) do que para MP_{10} (R^2 de 0,24–0,56). Isso demonstra a necessidade de estudos mais aprofundados para melhorar a calibração do equipamento. Além disso, Tagle identificou que o SDS011 tende a superestimar as concentrações de MP em condições de alta umidade relativa do ar.

No que diz respeito aos microcontroladores, houve uma variedade de escolhas entre os trabalhos analisados, com destaque para o Raspberry Pi, ESP32, ESP8266 e Arduino Uno. No estudo de Galleti et al. (2020), por exemplo, foi utilizada uma arquitetura de hardware baseada no microcontrolador Arduino Uno para a construção de uma estação experimental. Os autores justificaram a escolha pela familiaridade com a plataforma e pela capacidade de executar todas as funções necessárias para a leitura do sensor Shinyei PPD42NJ.

Por sua vez, Tagle (2020) optou pelo ESP8266, integrado a uma placa IoT de hardware aberto, a NodeMCU LoLin V3. Essa combinação permitiu a coleta, correção e distribuição dos dados de forma eficiente, com a transmissão em tempo real para uma plataforma de armazenamento em nuvem. Outro microcontrolador bastante utilizado foi o Raspberry Pi. No trabalho de Mahajan (2022), o Raspberry Pi foi escolhido devido à necessidade de alto desempenho no processamento de dados. O módulo Wi-Fi do

Raspberry Pi Zero foi utilizado para criar um ponto de acesso, permitindo o fluxo contínuo de dados para a camada de armazenamento.

O microcontrolador ESP32 também se destacou em estudos que demandavam equipamentos compactos e de baixo consumo energético. No trabalho de Aguiar (2022), a escolha pelo ESP32 foi justificada pelo seu baixo consumo de energia e pela presença de dois núcleos de CPU, o que o torna ideal para prototipagem rápida. Nesse estudo, o autor desenvolveu um equipamento para coleta de dados de qualidade do ar, acoplado a uma bicicleta. Os testes realizados indicaram que o dispositivo foi eficiente na análise de microambientes de poluição ao longo dos percursos voluntários, sem interferências causadas pelas vibrações da bicicleta.

Em relação à geometria dos equipamentos, observou-se que a maioria dos trabalhos adotou formatos retangulares ou quadrados. Os dispositivos foram geralmente dispostos em caixas comerciais ou construídas em impressão 3D, já no que se refere a ventilação, com exceção de Gurjão (2023) e Sachetti (2021), que instalaram os sensores externamente à caixa, todos os experimentos utilizaram um cooler para forçar a entrada de ar nos sensores.

Na revisão da literatura, foram analisadas a arquitetura de hardware e os componentes presentes em estações experimentais. Esse estudo incluiu a identificação das principais classes de problemas enfrentadas por essas estações, abrangendo questões técnicas, ambientais e operacionais. Entre os aspectos técnicos, destacam-se limitações na precisão dos sensores, integração entre componentes e compatibilidade com diferentes sistemas. No âmbito ambiental, foram considerados fatores como resistência a condições climáticas extremas e interferências externas. Por fim, no aspecto operacional, foram analisados desafios relacionados à manutenção, calibração e custo de implementação.

Com base nessa análise, foi possível identificar os desafios específicos associados aos equipamentos e propor melhorias no design do artefato. Essas sugestões foram direcionadas no sentido de otimizar o desempenho e ampliar a funcionalidade da estação, e garantir maior confiabilidade e eficiência no seu monitoramento.

Para o desenvolvimento do protótipo, foi selecionado o sensor SPS30 fabricado pela empresa suíça *Sensirion*, ilustrado na Figura 8. A escolha desse sensor foi motivada pela disponibilidade de duas unidades no acervo do CliMA – UFU, facilitando sua integração ao projeto sem a necessidade de aquisição adicional.

O sensor SPS30 apresenta características técnicas que favorecem sua aplicação em monitoramento ambiental. Ele é fornecido com um cabo de conexão, conta com software licenciado para integração e permite medições precisas de material particulado fino (PM_{2,5}) e grosso (PM₁₀). Estudos indicam que esse modelo se destaca em relação a outros sensores de baixo custo. Park *et al.* afirmam que o SPS30 possui maior precisão e alta correlação nos dados obtidos, tornando-se uma opção viável para redes de monitoramento atmosférico.

No âmbito experimental, testes conduzidos pelo grupo técnico do CLiMA incluíram a análise do consumo energético e a coleta preliminar de dados. Os resultados indicaram um desempenho satisfatório, com um consumo médio de aproximadamente 0,144 W por hora sob uma alimentação de 5V.

Além dos aspectos técnicos e do desempenho validado em pesquisas, o SPS30 possui certificações da União Europeia e Estados Unidos atendendo aos requisitos de normas regulatórias, como a EPA 40 CFR Parte 50 dos Estados Unidos e a UNI EN 12341:2014 da União Europeia. Essas certificações atestam sua conformidade com padrões rigorosos de qualidade e segurança, reforçando sua importância nos estudos de qualidade do ar. Diante dessas características, o sensor SPS30 se consolida como uma escolha adequada para a implementação do protótipo da estação experimental.

A escolha do microcontrolador foi realizada em laboratório com base nos critérios estabelecidos pela revisão bibliográfica e nos requisitos específicos do projeto. Durante a visita técnica e na análise da literatura, verificou-se que os microcontroladores mais comumente utilizados em estações experimentais são o Arduino UNO, o Raspberry Pi e o ESP32. A seleção do dispositivo adequado considerou aspectos essenciais, como consumo de energia, capacidade de armazenamento de dados e custo computacional, fatores fundamentais para garantir a operação eficiente e sustentável do protótipo.

No CLiMA foram conduzidos testes de acoplamento utilizando as três opções mencionadas, avaliando o desempenho de cada dispositivo em relação ao consumo energético, à capacidade de processamento e à disponibilidade de memória. Esses testes permitiram uma análise comparativa criteriosa que possibilitou a escolha da solução mais adequada para o desenvolvimento do protótipo.

Os resultados indicaram que o Raspberry Pi, embora seja uma plataforma robusta em termos de processamento e conectividade, apresenta um consumo energético

significativamente elevado. Esse alto consumo decorre da presença de módulos adicionais e de um chip *quad-core*, tornando-o mais apropriado para aplicações que exigem alto desempenho computacional; porém, menos eficiente para projetos onde a autonomia energética é uma prioridade.

Por outro lado, o Arduino UNO demonstrou ser uma opção de baixo consumo energético e fácil integração. No entanto, sua capacidade limitada de processamento e armazenamento de dados mostrou-se insuficiente para atender plenamente às necessidades do protótipo, especialmente no que diz respeito à operação contínua e ao gerenciamento dos dados provenientes do sensor SPS30.

Dentre as opções avaliadas, o ESP32 (Figura 9) destacou-se como a escolha ideal, pois equilibra eficiência energética, desempenho computacional e custo-benefício. Esse microcontrolador oferece diversas funcionalidades integradas, como conectividade Wi-Fi e *Bluetooth*, capacidade de processamento satisfatória e um consumo de energia consideravelmente reduzido em comparação ao Raspberry Pi. Esses atributos são corroborados por Giusto (2021), que destaca a eficiência energética do ESP32, evidenciada por seu consumo de apenas 25 μA no modo de energia ultrabaixo. Além disso, o dispositivo incorpora suporte a comunicações Wi-Fi (802.11 b/g/n em 2,4 GHz) e Bluetooth (v4.2 e BLE), tornando-se uma solução versátil para aplicações que exigem conectividade sem comprometer a autonomia energética.

Adicionalmente, Aguiar (2022) afirma que o ESP32 apresenta baixo consumo de energia quando operado em 5 volts, e conta com dois núcleos de CPU (Dual-Core); características que o tornam um módulo ideal para prototipagem. Nesse sentido, Pastório (2023) enfatiza que o ESP32 possui capacidade para lidar com os protocolos de comunicação dos sensores, além de oferecer um número adequado de pinos para integração com diversos componentes.

Com base nessas evidências, conclui-se que o ESP32 é a solução mais apropriada para o desenvolvimento do protótipo, proporcionando um equilíbrio entre eficiência energética, capacidade de processamento e viabilidade econômica. O consumo energético foi especialmente considerado neste estudo em função da necessidade de operação destas estações junto às estações meteorológicas do CLIMA que se localizam nas fazendas experimentais da UFU, locais estes onde a disponibilidade de energia elétrica é bastante limitada por se tratarem de áreas rurais.

Na definição dos componentes de energia, diversos fatores foram avaliados, incluindo aspectos econômicos e sociais do Brasil. O país, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), possui uma extensão territorial de aproximadamente 8.510.000 km², com a maior parte de sua população concentrada em áreas urbanas. Além disso, apresenta vastas regiões dedicadas à agricultura e pecuária, bem como ecossistemas fundamentais para a preservação ambiental global, como a Floresta Amazônica.

Diante desse contexto, tornou-se essencial que o sistema desenvolvido contasse com uma fonte de energia autônoma, garantindo seu funcionamento mesmo em locais sem acesso à rede elétrica convencional. Para isso, foram realizados testes no CLiMA – UFU a fim de analisar o consumo energético do equipamento e o impacto do envio e recebimento de dados. Os resultados indicaram um consumo médio de aproximadamente 0,44 W por hora, evidenciando a necessidade de um sistema de fornecimento energético eficiente e sustentável.

Além da análise do consumo energético, foi conduzida uma avaliação do desempenho do sistema fotovoltaico. Esse sistema é composto por uma bateria de 12V, um painel solar BP SX310M (figura 10) e um controlador de carga solar (figura 11). A escolha desses componentes foi baseada na disponibilidade no laboratório e na capacidade de atender aos requisitos operacionais do protótipo, garantindo funcionamento contínuo por até 15 dias, mesmo em condições de baixa incidência solar.

É importante destacar que esses equipamentos são empregados pelo CLiMA em estações de monitoramento meteorológico, demonstrando sua eficiência e adequação para aplicações de longa duração. A utilização de um sistema de energia renovável contribui para a viabilidade do projeto, assegurando autonomia operacional e reduzindo a dependência da rede elétrica convencional. Maiores detalhes dos componentes utilizados descritos nas Figuras 8, 9, 10 e 11 seguintes.

Figura 8 – Ficha técnica Sensor Sensirion SPS 30

Ficha Técnica Sensor Sensirion SEK -SPS 30		
	Mass concentration precision	±10 %
	Mass concentration range	0 - 1000 µg/m³
	Lifetime	> 10 years
	Particle size range	PM1.0, PM2.5, PM4 and PM10
	Supply voltage	4.5 - 5.5 V
	Average supply current	55000 uA
	Max. supply current	80000 uA
	Interfaces	I²C,UART
	Size (LxWxH)	41 x 41 x 12 mm³

Fonte: SENSIRION (2024)

Figura 9 – Ficha técnica ESP32

Ficha Técnica ESP32		
	Corrente	220 mA
	Núcleo	2
	Arquitetura	32 bits
	Clock	160-240 MHz
	Bluetooth	Clássico e BLE
	Wi-Fi	SIM
	RAM	520 KB
	Flash	16 Mb
	GPIO	34
	DAC	2
	ADC	18
	Interfaces	SPI, I2C, UART, I2S e CAN

Fonte: ESPRESSIF (2024)

Figura 10 – Ficha técnica do painel solar BP SX310M

Painel solar SX310 M BP Solar	
	Modelo:SPM010P-F
	Serie:F Series
	Manufacturer Solartech Power
	Electrica
	Watts (STC): 10W
	Maior Voltagem (VMPP): 17.3V
	Maior Corrente (IMPP): 0.59A
	Circuito aberto de Voltagem (VOC): 21.8V
	Corrente de curto-circuito (ISC): 0.64A
	Tensão máxima do sistema (UL): DC 600V
	Mecanica
	Tipo: Policristalino
	Dimensions: 351mm x 300mm x 35mm
	Peso: 7.00kg
	Estrutura: alumínio anodizado
	Conector IP65, UL94-5VA caixa de junção de material com aberturas

Fonte: BP Brasil (2024)

Figura 11 - Controlador de Carga Solar Knup

Controlador de carga solar Knup	
	Display LCD, parâmetro de carga e descarga ajustáveis
	Proteção contra sobre corrente, curto-circuito, circuito aberto e proteção de conexão invertida
	2 portas USB disponíveis
	Tensão 12/24V
	Tensão solar Máxima: 12V ~23V; 24V ~ 46V

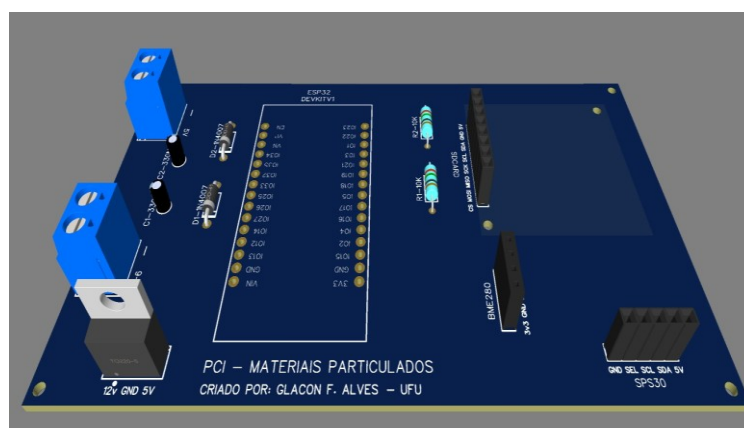
Fonte: Knup (2024)

5.3 CONEXÃO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

Com os equipamentos selecionados, foi desenvolvido um projeto de placa de circuito impresso (PCI), envolvendo todas as ligações necessárias para o correto funcionamento dos sensores e demais componentes, com o propósito de interconectar o sensor e os demais equipamentos essenciais, para melhor compreensão foi concebido imagem, conforme Figura12, da PCI através do software SolidWorks. Este projeto em forma de desenho industrial foi encaminhado para a empresa JLCPCB, sediada na Republica Popular da China, que produziu conforme demanda. Dentre esses componentes, destacam-se um relógio para contagem de tempo, um sensor de umidade, temperatura, pressão e altitude e uma bateria integrada ao sistema fotovoltaico.

Essa placa desempenha um papel de suma importância, não apenas como ponto de conexão entre o sensor, o microcontrolador e o sistema fotovoltaico, mas também por estar alinhada à geometria necessária para o acoplamento no suporte da caixa da estação de monitoramento. Para conectar o sensor SPS30 ao microcontrolador ESP32, foi necessário realizar a programação. A linguagem escolhida foi C++, amplamente conhecida pelos desenvolvedores e com código colaborativo disponível na biblioteca do GitHub (2024). Esse código foi copiado, adaptado e inserido no ESP32. A conexão foi realizada utilizando um cabo JST-ZH de 1,5 mm com fio de 5 vias.

Figura 12 – Ilustração da placa de conexão desenvolvida no CliMA-UFU



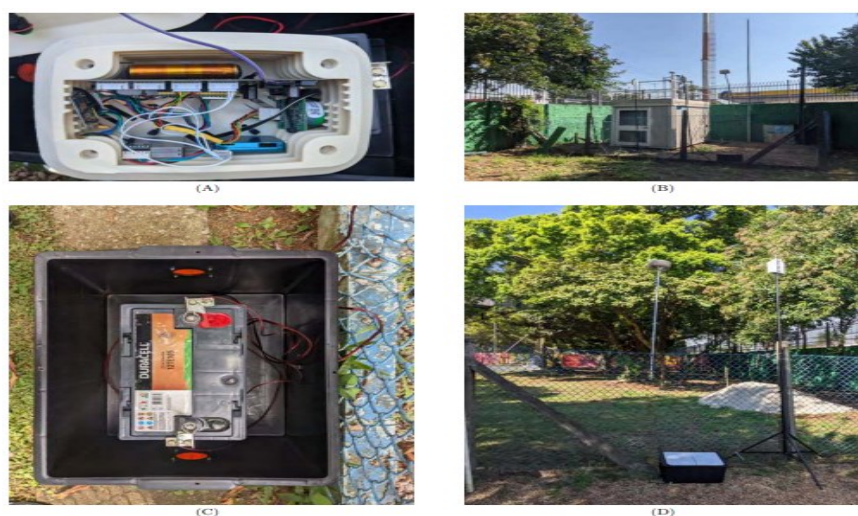
Fonte: Alves (2023)

5.4 DEFINIÇÃO DO MODELO DA ESTAÇÃO

Um exemplo relevante foi o trabalho de Aguiar (2022), que desenvolveu um sistema móvel para monitoramento de material particulado (MP) utilizando uma arquitetura similar à proposta neste estudo. Para calibrar e validar o dispositivo, o autor construiu uma estação fixa (Figura 13) destinada ao monitoramento em ambiente externo. O processo de calibração consistiu na comparação entre os dados coletados pelo sistema desenvolvido e os registros da estação de monitoramento de Congonhas, operada pela CETESB no estado de São Paulo. A escolha dessa estação de referência foi baseada na confiabilidade e consistência de seus dados históricos.

No sistema de Aguiar (2022), a estrutura da estação fixa é hermética e dividida em duas seções conforme, Figura 13. A primeira seção abriga o SBC, o microcontrolador ESP32 e os demais circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle do sistema. A segunda seção comporta a bateria de alimentação. Embora essa configuração tenha se mostrado eficiente, ela apresenta limitações que não atendem plenamente às exigências deste trabalho. A separação dos módulos, por exemplo, dificulta a manutenção e torna a instalação mais trabalhosa. Além disso, compromete a sustentabilidade do sistema, já que a bateria não pode ser recarregada sem o acesso a uma fonte de energia convencional. Outro ponto crítico identificado foi o uso de um cooler, que aumenta a demanda energética e pode interferir no funcionamento adequado do sensor.

Figura 13 – Estação fixa de calibração



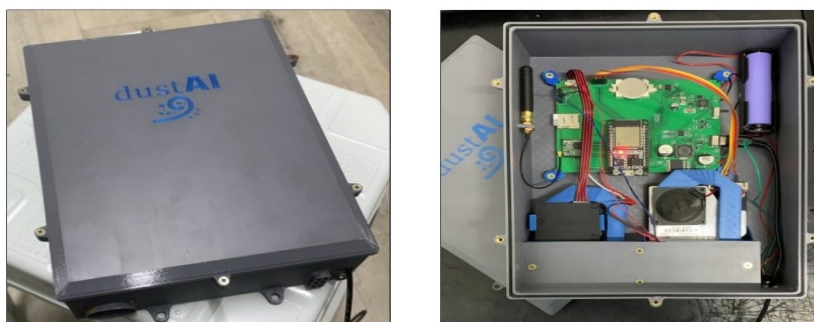
A) Vista superior da caixa com a PCB e os sensores; B) Caixa fixada na grade interna da estação Congonhas; C) Bateria de alimentação; D) Vista lateral da grade com os equipamentos instalados.

Fonte: Aguiar (2022)

No estudo de Pastório (2023) foi desenvolvido um monitor de material particulado baseado em uma arquitetura projetada para calibração por meio de aprendizado de máquina (Figura 14). O sistema é composto por um sensor, um microcontrolador e uma fonte de energia que inclui uma bateria de íons de lítio com capacidade de 2600 mAh e um painel fotovoltaico de 10 W. Além disso, conta com uma placa de circuito impresso (PCI) para suporte e integração dos componentes.

Os testes realizados indicaram resultados promissores, contudo, o dispositivo apresenta limitações que não atendem aos requisitos desta pesquisa. Entre os principais desafios, destaca-se a autonomia reduzida da bateria, que suporta apenas 24 horas de operação. Esse tempo restrito deve-se ao elevado consumo energético do sistema, impulsionado pelo uso de coolers para resfriamento e pelo maior custo computacional do processamento de dados.

Figura 14 – Monitor Dust AI



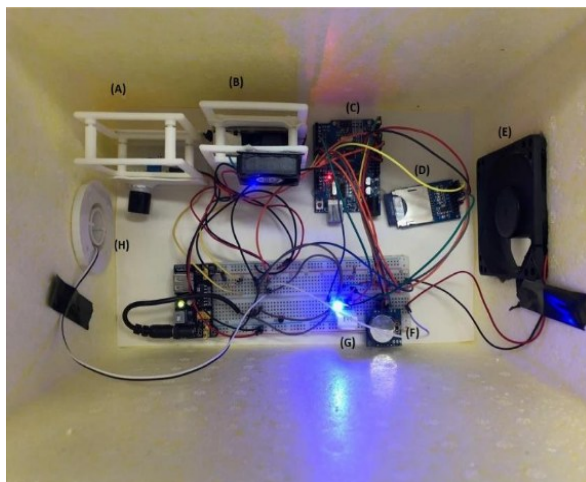
Fonte: Pastório (2023)

Galetti *et al.* (2020) desenvolveram e aplicaram uma estação de monitoramento da qualidade do ar equipada com um sensor de baixo custo para medir a concentração de MP, conforme ilustrado na Figura 15. O processo de calibração e validação da estação foi realizado com base nos dados fornecidos por um equipamento de referência, o BAM-1020 (Met One Instruments, Inc.).

A calibração revelou uma boa correspondência entre os dados obtidos pelo SBC e os registrados pela estação de referência, apresentando um coeficiente de correlação superior a 0,9 quando calibrado com o método de Redes Neurais. O objetivo do estudo foi demonstrar a viabilidade do monitoramento de MP utilizando uma arquitetura simplificada e de baixo custo, Galetti *et al.* (2020).

Diferentemente desse modelo, a presente pesquisa busca desenvolver uma solução que não apenas opere em ambientes controlados, mas que também possa ser aplicada em campo, abrangendo tanto áreas rurais quanto urbanas, além de contar com um sistema de energia autônomo para garantir sua funcionalidade em diferentes condições.

Figura 15 – Estação de baixo custo (EBC)



Fonte: Galetti et. al (2020)

Sachetti *et al.* (2021) desenvolveram uma estação para monitoramento de MP (Figura 16) com o objetivo de integrar uma rede de monitoramento participativo, utilizando dispositivos IoT projetados especificamente para sensoriamento e previsão da qualidade do ar. A estação foi construída com a mesma arquitetura de hardware empregada em outros estudos; no entanto, sua estrutura física consiste em uma caixa comercial destinada originalmente a aplicações elétricas, e o SBC foi colocado do lado de fora desta caixa.

Essa abordagem evidencia a ausência de produtos especializados no mercado voltados para sistemas baseados em SBCs, um segmento em crescimento, caracterizado pela ampla disponibilidade de sensores compactos e adaptáveis a arquiteturas simplificadas. Diante desse cenário, torna-se necessário considerar a viabilidade comercial desse tipo de dispositivo na concepção do presente estudo. A proposta inclui a possibilidade de desenvolver um artefato projetado especificamente para sensores de baixo custo ou outros dispositivos que utilizem a configuração básica composta por sensor, microcontrolador e fonte de energia, contribuindo para suprir essa lacuna no mercado.

Figura 16 – Protótipo de estação de monitoramento integrada



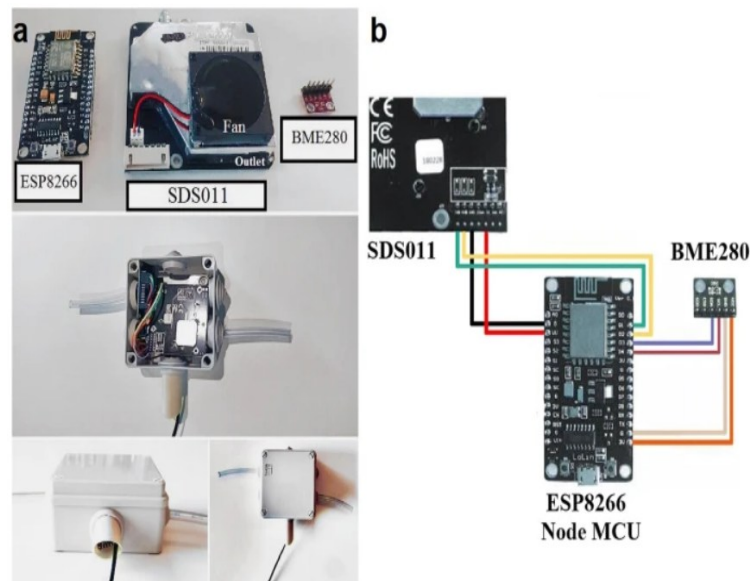
Fonte: Sachetti et. al (2021)

Tagle (2020) desenvolveu um sistema (Figura 17) para avaliar o desempenho de um sensor de partículas de baixo custo (PM10 e PM2,5) integrado a uma rede IoT no ambiente urbano de Santiago no Chile. A operação do sistema foi realizada em paralelo com monitores de qualidade do ar de referência contínua, como o BAM-1020 e o TEOM-1400, além de um amostrador baseado em filtro (Partisol 2000i).

O estudo comparou os dados obtidos pelos sensores de baixo custo com aqueles registrados pelas estações de referência, concluindo que os testes de campo indicaram baixa variabilidade entre as unidades e boa linearidade em relação aos dados oficiais. De maneira geral, o desempenho do sensor foi satisfatório para medições de PM2,5, demonstrando que a solução baseada em SBC é viável para projetos de ciência cidadã, embora ainda demande estudos adicionais para calibração e validação dos dados.

A arquitetura de hardware adotada por Tagle (2020) seguiu um modelo semelhante ao de outros trabalhos, diferenciando-se pelo uso de uma caixa de junção comercial IP55, equipada com orifícios laterais de borracha, cabos USB para alimentação e um sistema de resfriamento com cooler. Embora as caixas IP55 sejam resistentes à água e amplamente empregadas em instalações elétricas, redes lógicas e comunicação, elas não foram projetadas especificamente para SBCs. Além disso, suas dimensões reduzidas dificultam a integração de um sistema fotovoltaico, tornando necessária a utilização de um componente externo para garantir a alimentação energética do dispositivo.

Figura 17 – Protótipo sensor IOT



Fonte: Tagle (2020)

Neste contexto, após diversas análises, concebeu-se um modelo que integra uma aerodinâmica circular, otimizando o desempenho na coleta de partículas ao evitar a formação de vórtices. A estação foi projetada para acomodar todos os equipamentos de forma compartimentada, com um *inlet* de formato circular para melhor eficiência aerodinâmica, enquanto o compartimento do sistema elétrico foi desenhado em formato quadrado, facilitando o acoplamento de baterias retangulares disponíveis no mercado.

Quanto aos equipamentos eletrônicos, seguiram-se as especificações do projeto: o sensor de Material Particulado (MP) escolhido foi o Sensirion SPS30, já disponível, e o microcontrolador definido foi o ESP32, após testes que comprovaram sua eficácia. O sistema elétrico foi integrado com o controlador de cargas Knup e placas BP Solar, também disponibilizados pelo CLiMA, garantindo compatibilidade e funcionalidade ao conjunto.

5.5 MODELAGEM INDUSTRIAL DO PROTÓTIPO

Neste cenário, devido ao ineditismo, identificou-se uma oportunidade de patenteamento para o produto desenvolvido. O primeiro passo consistiu em verificar a originalidade do conceito. Para isso, foi realizada uma consulta à Agência Intelecto – UFU que orientou a condução de uma busca por patentes. Os resultados indicaram a inexistência de estações com as características propostas neste estudo. Atualmente, o

processo encontra-se em fase de redação para submissão ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

A estação projetada deve atender a requisitos essenciais, incluindo espaço suficiente para acomodar a arquitetura básica composta por sensor, microcontrolador e sistema fotovoltaico. Além disso, a região onde o microcontrolador está localizado deve ser completamente à prova d'água, enquanto o sensor precisa ter seu *inlet* exposto à atmosfera em todas as direções. Ademais, foi definido pela equipe do CLiMA, que o sistema deve ser capaz de operar por até 15 dias sob condições de céu nublado, sem perda de energia que comprometa seu funcionamento. Também é necessário que a estrutura seja versátil, adequada tanto para ambientes internos quanto externos e de baixo custo.

Diante desse desafio, foram desenvolvidos diversos modelos iniciais, primeiramente em papelão, com o objetivo de avaliar o posicionamento dos componentes. Posteriormente, os protótipos foram impressos em 3D utilizando PLA (figuras 18 e 19) e serviram como base para as etapas seguintes do projeto, sempre sob a supervisão dos técnicos do CLiMA. Durante essa fase, foram analisadas a geometria dos componentes, a disposição dos equipamentos, as conexões entre as partes e o acabamento preliminar. O processo foi conduzido no Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes (LAETE) da UFU.

A modelagem tridimensional do protótipo foi realizada no software Fusion 3D da Autodesk versão para estudantes. O dispositivo final é composto por três partes principais:

1. **Caixa de Proteção dos Eletrônicos em Formato Cilíndrico** – Responsável por abrigar o sensor e o microcontrolador, garantindo suporte e proteção adequados.
2. **Suporte de Instalação** – Elemento de conexão entre a caixa de proteção dos eletrônicos e a estrutura que abriga a bateria, assegurando a vedação do sistema.
3. **Caixa de Proteção da Bateria e dos Equipamentos Fotovoltaicos** – Compartimento destinado ao armazenamento da bateria e dos componentes associados ao sistema de energia solar.

Figura 18 – Impressão do modelo em PLA



Fonte: O autor (2024)

Figura 19 – Modelo inicial impresso



Fonte: O autor (2024)

Além disso, o equipamento possui uma proteção de tela em aço inoxidável na entrada de ar (*inlet*) da caixa do sensor (Figura 20), evitando a entrada de insetos que possam comprometer o funcionamento adequado da estação.

Figura 20 – Tela de Proteção da entrada de ar da estação



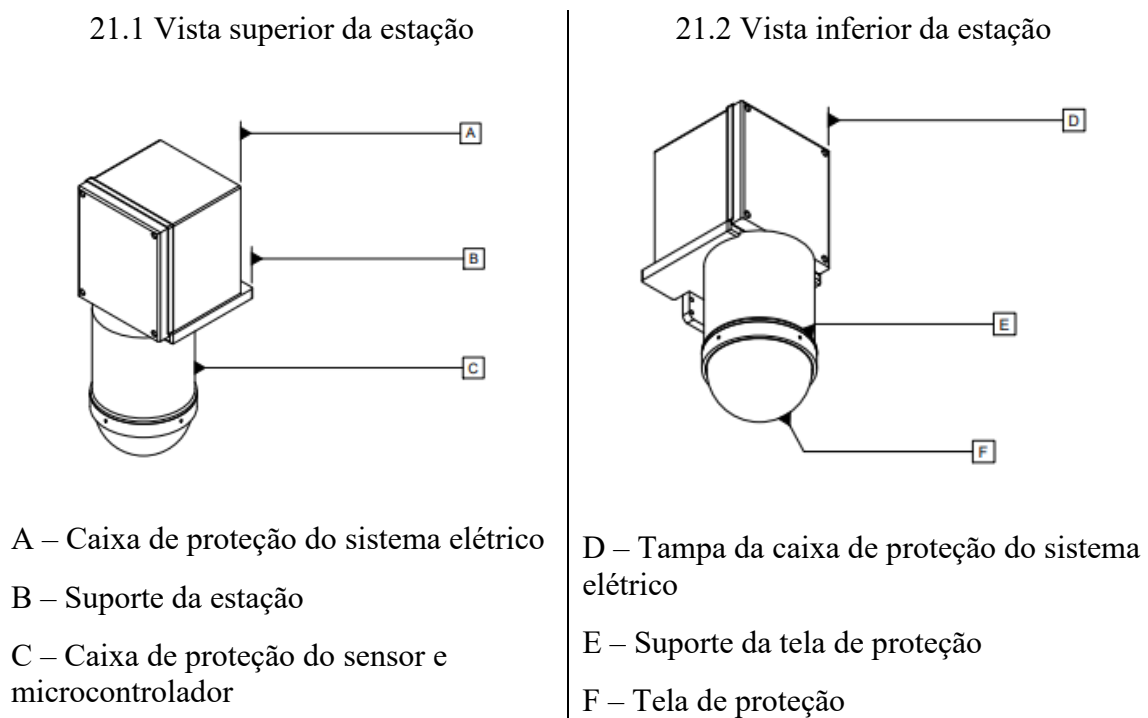
Fonte: O autor (2024)

Durante o processo de prototipagem, foram identificados alguns desafios a serem solucionados na versão final. A impressão inicial apresentou um resultado satisfatório em termos estruturais, porém o acabamento ficou irregular, e os encaixes

não se ajustaram corretamente. Esse problema foi atribuído às limitações da impressora utilizada no LAETE, uma *Creality* sem gabinete. Devido ao tamanho do artefato, algumas partes apresentaram rebarbas e imperfeições. Além disso, verificou-se a necessidade de utilizar filamento PETG, que oferece maior resistência mecânica e melhor adequação ao propósito do projeto.

A modelagem também passou por ajustes que permitiram a obtenção de dimensões mais precisas e compatíveis com os componentes do sistema. Com essas melhorias, foi possível desenvolver a versão final do modelo, cujos desenhos industriais (Figura 20) foram elaborados para compor o pedido de patente e a concepção do produto final.

Figura 21 – Desenho industrial da estação de monitoramento



Fonte: O autor (2024)

A caixa de proteção do microcontrolador e do sensor (Figura 21.1 C) possui um formato cilíndrico e é mecanicamente conectada ao suporte da estação de monitoramento (Figura 21.1 B) e à caixa de proteção do sistema fotovoltaico (Figura

21.1 A) por meio de um plug vazado de 21 mm. Esse sistema de conexão permite a passagem segura de cabos e facilita a integração dos componentes eletrônicos.

O interior da caixa foi projetado para acomodar até dois microcontroladores e sensores, proporcionando flexibilidade para aplicações que demandam maior capacidade de processamento ou múltiplos parâmetros de coleta de dados. A estrutura do compartimento conta com um único orifício de 21 mm na parte superior que serve para a passagem de cabos e conexão com os demais componentes do sistema. Na parte inferior, um suporte específico para o microcontrolador (Figura 27) acomoda a placa desenvolvida para o acoplamento do ESP 32 e garante a vedação completa do compartimento ao qual foi destinado, protegendo-o contra exposição a agentes externos.

O projeto desta caixa foi desenvolvido com ênfase na proteção contra umidade, sendo realizado teste de campo para averiguar possíveis infiltrações que pudessem comprometer o desempenho dos componentes eletrônicos, para isso a estação ficou exposta durante 2 semanas sob influência das intempéries, onde foi registrado 68mm de chuva acumulados neste período. Foram analisados potenciais vias de entrada de água da chuva, como frestas, furos e até mesmo a possível absorção de umidade pelo material de fabricação. No caso do PETG, não foram encontrados registros de artigos científicos ou mesmo do fabricante de infiltração ou degradação relacionadas à exposição prolongada à umidade, garantindo sua adequação para a aplicação, após a realização do teste de campo não foi constatado nenhuma entrada de água, e todos os compartimentos estavam sem nenhuma umidade aparente.

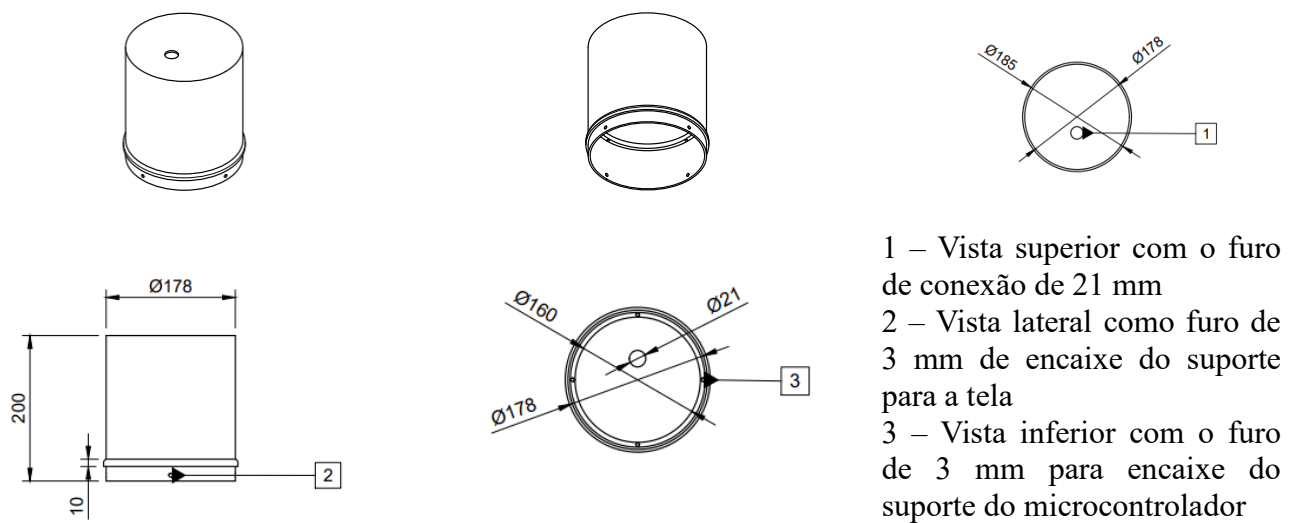
Desta feita ela foi isolada em duas partes principais, a caixa do sistema elétrico, Figura 21.1 A, que possui uma tampa e vedação de borracha com 2mm, fechadas com parafuso de 8mm, e a caixa de proteção do sensor e microcontrolador Figura 21.1 C, que possui somente uma entrada superior, fechada com um plug vasado de 21mm e anéis de borracha que deixam a caixa completamente vedada a chuvas. Além disso, a disposição interna dos sensores e microcontroladores foi planejada para otimizar o fluxo de ar e minimizar interferências que possam afetar as medições, o que resultou em uma caixa de proteção do microcontrolador em formato cilíndrico para melhorar a aerodinâmica do vento nas bordas da entrada inferior, *inlet* do sistema.

Para proteção adicional, a caixa é equipada com uma tela de proteção (Figura 21.2 F), confeccionada em aço inoxidável com malha de 1 mm. Essa atua como uma barreira física contra insetos e partículas externas que possam comprometer o

funcionamento interno do dispositivo. O aço inoxidável foi escolhido por dois motivos principais, i) alta resistência à corrosão, já que é um material que ficará exposto à ação do intemperismo e ii) material condutor de eletricidade, isto é importante para garantir a fluidez das partículas de MP.

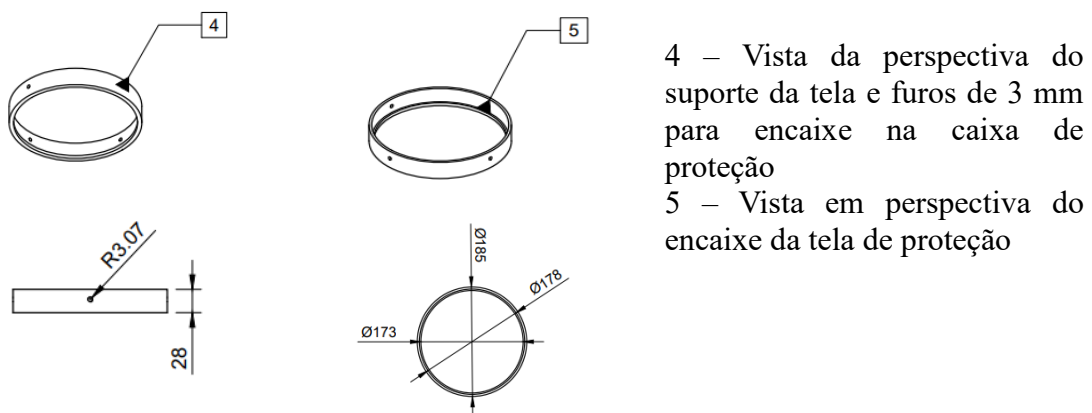
Para a colocação desta tela foi adicionado um suporte (Figura 21.2. E) que fixa a tela no *inlet* de forma modular facilitando as manutenções.

Figura 22 – Caixa de proteção do microcontrolador e sensor



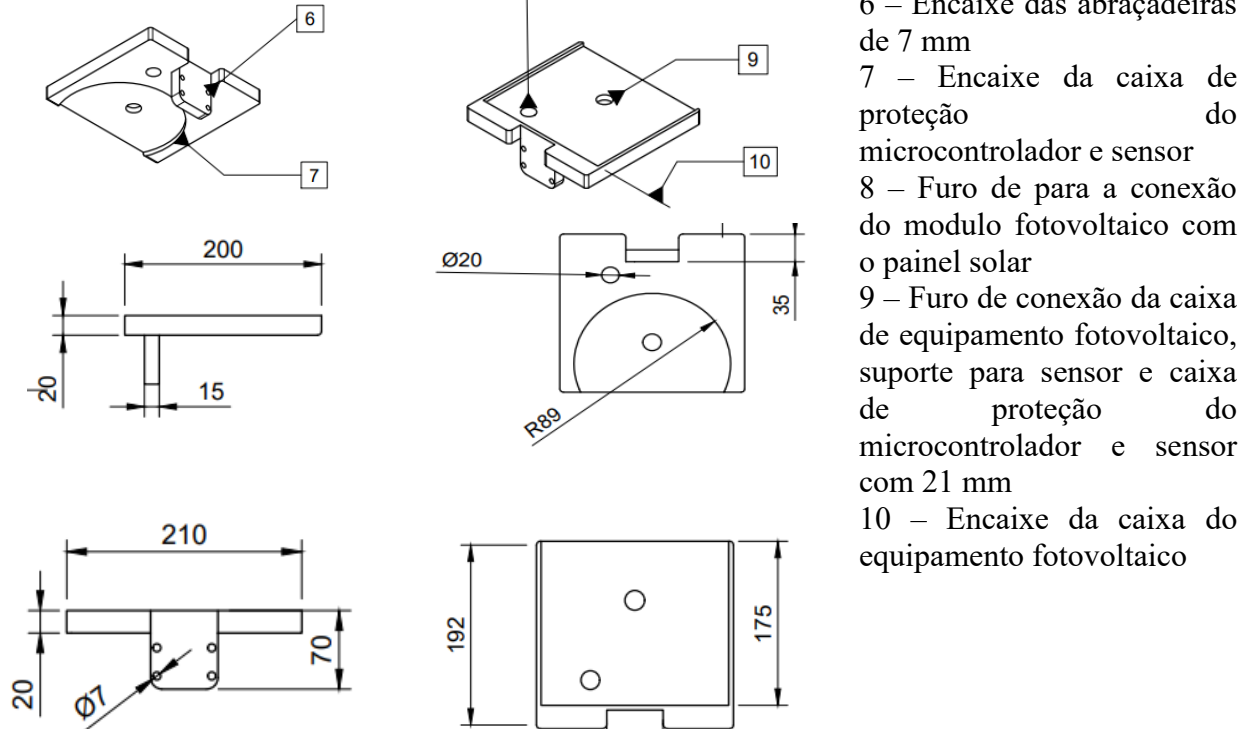
Fonte: O autor (2024)

Figura 23 – Suporte da tela



Fonte: O autor (2024)

8



stema fotovoltaico

A parte inferior da caixa (Figura 25.13) desempenha um papel fundamental na

62

principais: a própria caixa de proteção do sistema fotovoltaico, o suporte da estação e a caixa de proteção para o microcontrolador e o sensor. Essa configuração garante estabilidade estrutural e facilita a instalação dos componentes eletrônicos.

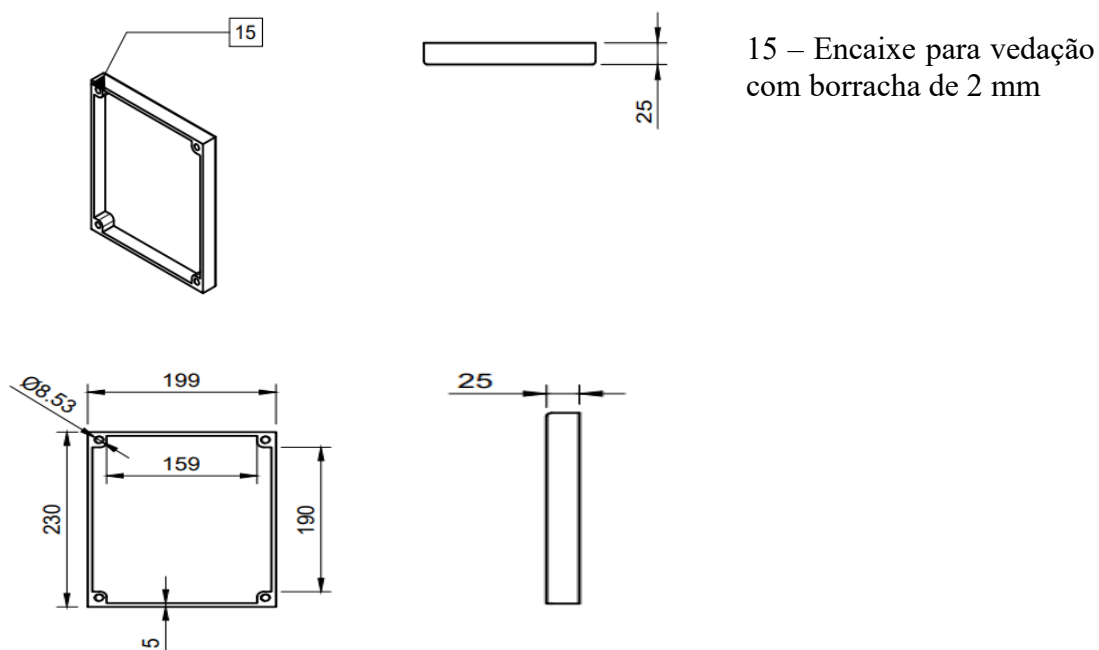
Para assegurar a resistência às condições ambientais adversas, a caixa foi projetada com um sistema de vedação eficiente. Sua estrutura é à prova d'água e conta com borrachas de 2 mm distribuídas ao longo de todo o seu perímetro, evitando a entrada de umidade e poeira. Além disso, os furos dos parafusos são vedados com anéis de vedação, evitando infiltrações e garantindo a integridade dos componentes internos mesmo em ambientes externos sujeitos a variações climáticas.

Outro aspecto importante do design é a tampa (figura 26) que possui um encaixe preciso e proporciona um fechamento seguro e hermético. Esse detalhe contribui para a durabilidade do equipamento e para a proteção dos circuitos internos contra exposição a fatores externos como chuva e poeira.

A concepção desse compartimento seguiu critérios rigorosos e considerou a necessidade de isolamento adequado dos componentes elétricos e a facilidade de acesso para manutenção e futuras expansões do sistema. A escolha dos materiais e das técnicas de vedação reforça a confiabilidade e a longevidade do equipamento, assegurando sua funcionalidade em diversas condições operacionais.

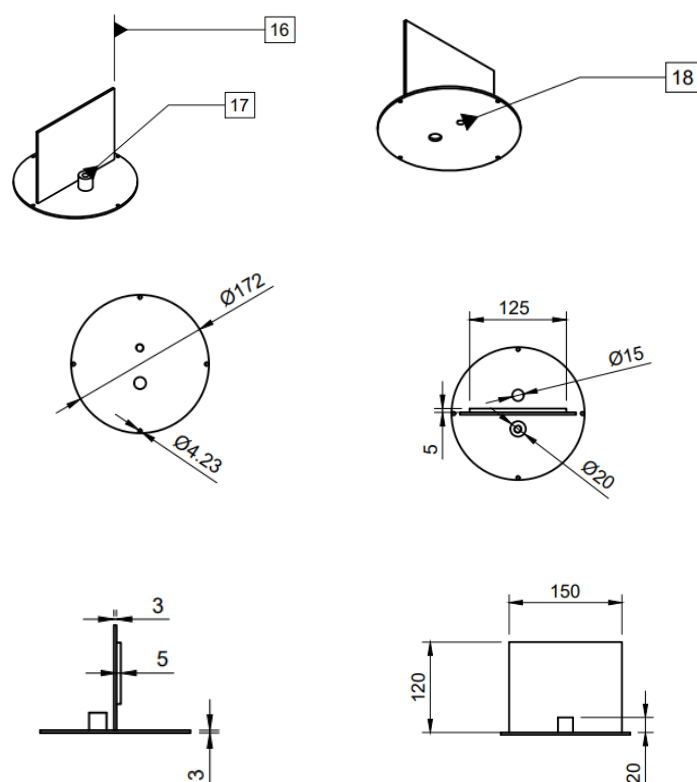
11 – Furos de comunicação de 15 mm
 12 – Compartimento das baterias
 13 – Furo do encaixe com o suporte com 21 mm
 14 – Furo de comunicação com placas solares com 20 mm

Figura 26 – Tapa da caixa de proteção do sistema elétrico



64

Figura 27 – Suporte para o microcontrolador



16 – Parede de fixação do microcontrolador do suporte

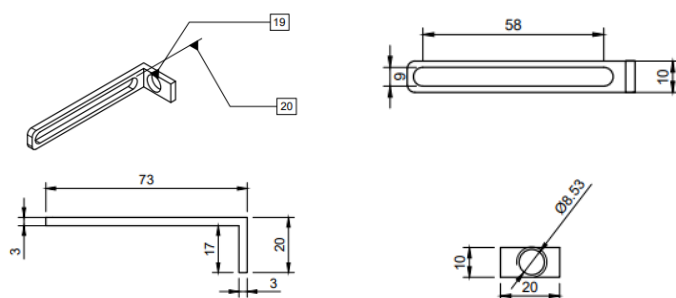
17 – Furo para fixação do suporte do sensor

18 – Furo para comunicação entre o microcontrolador e sensor

Fonte: O autor (2024)

Por fim, o suporte para sensores (Figura 28) aprimora o sistema ao fornecer um mecanismo de ajuste de altura e posicionamento (Figura 28.20). Esse recurso permite a regulagem da altura do sensor em relação ao *inlet* da caixa do microcontrolador, garantindo compatibilidade com diferentes tipos de sensores.

Figura 28 – Suporte para o sensor



19 – Furo de fixação do suporte de 20 mm

20 – Hachura para porca borboleta para regulação de altura

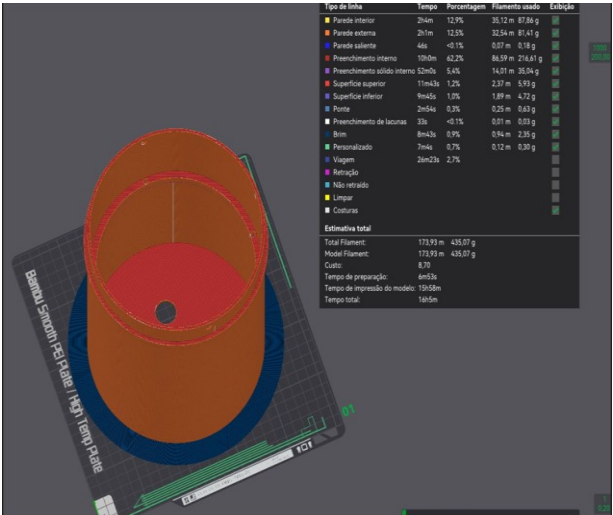
Fonte: O autor (2024)

5.6 PRODUÇÃO DO MODELO

Para a concepção da estação, foi necessária uma impressora 3D capaz de realizar a impressão em plástico PETG, material que atende às especificações ideais do projeto. Esse processo foi conduzido pelos técnicos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU – UFU) utilizando uma impressora Bambu Lab X1E.

A produção foi dividida em etapas e teve um tempo total de 41 horas, garantindo alta qualidade de impressão. O componente com o maior tempo de fabricação foi a caixa de proteção do microcontrolador (Figura 29), que demandou 16 horas para ser concluído. No total, foram utilizados 3,4 quilogramas de filamento na cor preta.

Figura 29 – Impressão da caixa de proteção do microcontrolador



Fonte: O autor (2024)

O modelo (Figura 30), em seu estado inicial, apresentou um acabamento bruto com pequenas imperfeições inerentes ao processo de impressão 3D. Para atender aos requisitos do projeto, definiu-se que o interior da estação, responsável por abrigar os componentes eletrônicos, permaneceria na cor preta, correspondente à tonalidade original do filamento utilizado. Já o exterior foi finalizado em branco fosco, com o objetivo de otimizar a dissipação térmica e minimizar a absorção de calor, contribuindo para a estabilidade da temperatura interna.

Figura 30 – Modelo impresso sem acabamento



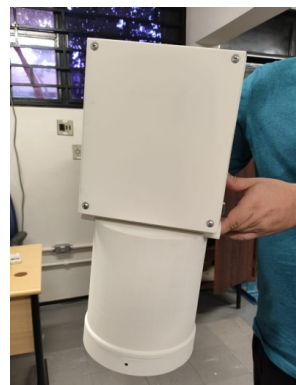
Fonte: O autor (2024)

Para o acabamento final, as peças (Figura 31) passaram por um processo de lixamento úmido, no qual foram utilizadas lixas d'água de diferentes granulometrias (220, 400, 600 e 800), garantindo a preparação adequada da superfície para a aplicação do revestimento. Em seguida, aplicou-se um primer de uso geral para promover a aderência da tinta, seguido de uma camada de tinta branca fosca em spray com proteção UV, assegurando maior durabilidade e resistência às condições ambientais. O resultado final (Figura 33) foi uma estação que atendeu plenamente a todas as especificações do projeto.

Figura 31 – Peças da estação em acabamento



Figura 32 – Modelo final da estação de monitoramento

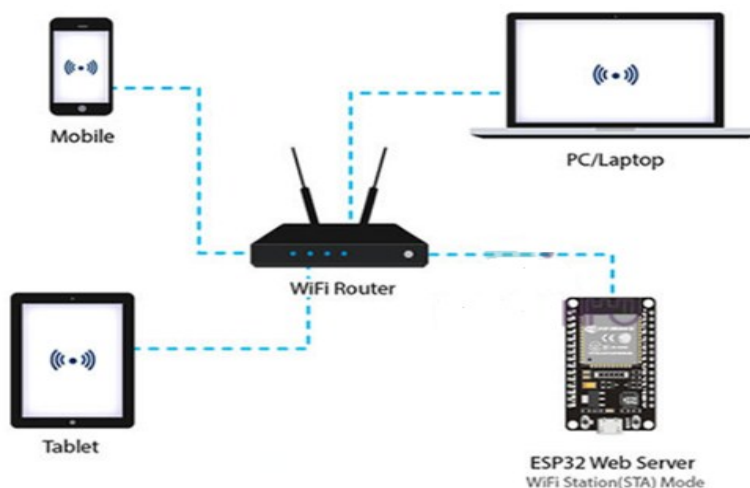


Fonte: O autor (2024)

5.7 TESTES DE FUNCIONAMENTO

A montagem do hardware foi estruturada com base em uma arquitetura composta por três elementos principais: fonte de energia, microcontrolador e sensor. Esse arranjo permitiu a criação de um sistema eficiente de transmissão de dados, conforme ilustrado na Figura 33. Nesse sistema, o microcontrolador desempenha um papel central, recebendo os dados coletados pelo sensor e, em seguida, transmitindo-os para um servidor por meio de uma conexão sem fio. Uma vez no servidor, as informações são processadas e enviadas aos usuários finais, garantindo que os dados estejam disponíveis de forma rápida e acessível. Essa estrutura não apenas assegura a integridade e a confiabilidade dos dados, mas também facilita a comunicação entre os dispositivos, tornando o sistema funcional e eficaz para as aplicações pretendidas.

Figura 33 – Sistema de transmissão de dados



Fonte: Imagem da Internet (2024)

Para facilitar o entendimento do usuário, foi desenvolvido um software que recebe os dados da estação e os apresenta de forma clara, simples e intuitiva, conforme ilustrado nas Figuras 34A e 34B. Além disso, para análises mais detalhadas, o programa oferece a funcionalidade de extração desses dados, convertendo-os em uma tabela que pode ser exportada nos formatos .txt ou .xlsx, como mostra a Figura 35C. Dessa forma, qualquer usuário, mediante autorização, que requer um cadastro prévio e uma senha de segurança, pode acessar os dados em tempo real a partir de qualquer dispositivo, seja fixo ou móvel. O sistema também permite a extração dos dados de acordo com a data

solicitada, garantindo flexibilidade e praticidade para o usuário. Essa abordagem assegura que as informações estejam sempre disponíveis de maneira organizada e acessível, atendendo às necessidades de diferentes tipos de análise.

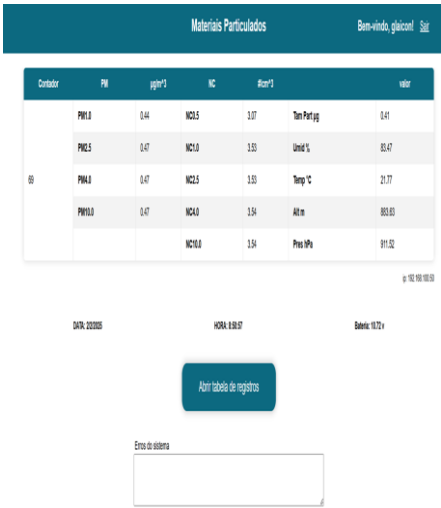
Figura 34 – Software desenvolvido

A – Painel principal



Fonte: O autor (2024)

B – Painel auxiliar



Fonte: O autor (2024)

C – Tabela de Dados

Dados Particulados

Data	Hora	PM1.0 µg/m³	PM2.5 µg/m³	PM4.0 µg/m³	PM10.0 µg/m³	NC0.5 #con't	NC1.0 #con't	NC2.5 #con't	NC4.0 #con't	NC10.0 #con't	Tam Part µg	Umid %	Temp °C	Pres hPa	Alt m	Bat V	Cont
2/2/2025	8:50:57	0.44	0.47	0.47	0.47	3.07	3.53	3.53	3.54	3.54	0.41	83.47	21.77	911.52	883.63	10.72	69
2/2/2025	8:45:50	0.47	0.5	0.5	0.5	3.28	3.77	3.78	3.78	3.78	0.4	83.15	21.75	911.5	883.84	10.77	68
2/2/2025	8:40:44	0.73	0.77	0.77	0.77	5.04	5.79	5.8	5.81	5.81	0.41	83.03	21.75	911.49	883.92	10.76	67
2/2/2025	8:35:6	0.82	0.86	0.86	0.86	5.65	6.49	6.51	6.51	6.51	0.4	83	21.98	911.42	884.59	10.75	66
2/2/2025	8:30:0	0.75	0.79	0.79	0.79	5.2	5.97	5.98	5.99	5.99	0.4	83.19	22.1	911.32	885.46	10.74	65
2/2/2025	8:24:22	0.41	0.43	0.43	0.43	2.81	3.23	3.24	3.24	3.24	0.39	83.6	22.06	911.24	886.18	10.76	64
2/2/2025	8:19:14	0.88	0.93	0.93	0.93	6.09	6.99	7.01	7.01	7.02	0.39	84.08	21.99	911.15	886.96	10.81	63
2/2/2025	8:14:7	0.9	0.95	0.95	0.95	6.21	7.13	7.15	7.15	7.15	0.38	84.84	21.89	911.13	887.22	10.72	62
2/2/2025	8:9:1	0.82	0.87	0.87	0.87	5.7	6.55	6.57	6.57	6.57	0.39	84.87	21.84	910.98	888.59	10.76	61
2/2/2025	8:3:4	0.75	0.79	0.79	0.79	5.19	5.95	5.97	5.97	5.97	0.4	85.7	21.65	910.9	889.27	10.79	60

Deletar Todos os Dados

Exportar para TXT

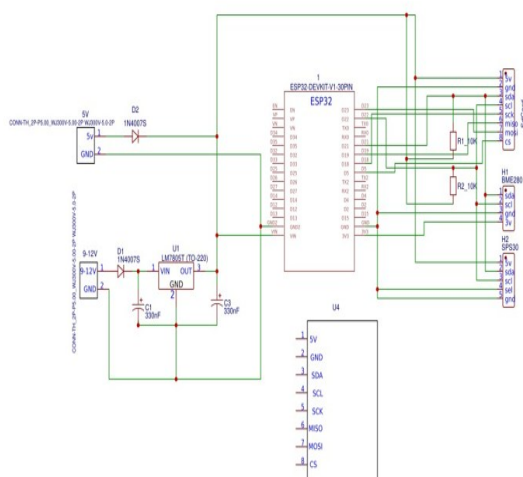
Fonte: O autor (2024)

Para os testes iniciais, os componentes eletrônicos foram montados em uma bancada, onde foram realizadas medições de voltagem, testes de captura de dados e verificações das conexões, conforme ilustrado na Figura 35 A e B. A montagem seguiu rigorosamente as especificações do projeto da PCI (Placa de Circuito Impresso), como pode ser observado na Figura 35A. Além da conexão do sensor de MP (material particulado), identificou-se a necessidade de integrar um sensor adicional para coletar dados atmosféricos, essenciais para subsidiar o processo de calibração do sensor SPS30. Para isso, foi instalado um sensor BME280, responsável por medir pressão atmosférica (hPa), temperatura (°C) e umidade relativa (%), garantindo maior precisão e confiabilidade nos dados coletados.

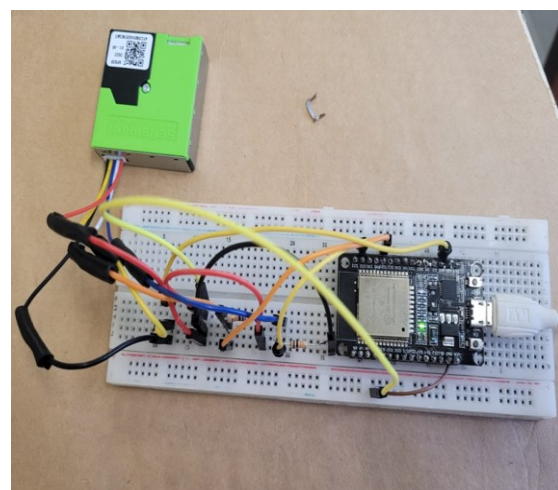
O microcontrolador foi posicionado na placa junto com o relógio contador, e, em seguida, o sensor SPS30 foi conectado, conforme detalhado na Figura 35B. Após ajustes simples nas conexões, o sistema passou a operar de maneira eficiente e estável. O resultado final da montagem, apresentado na Figura 35C, mostrou-se compacto e robusto, características que garantem uma captura e transmissão de dados confiáveis e precisos. Essa configuração não apenas facilita a instalação na estação, mas também assegura que o sistema seja prático e eficaz no desempenho de suas funções, atendendo às necessidades do projeto.

Figura 35 – Testes de bancada

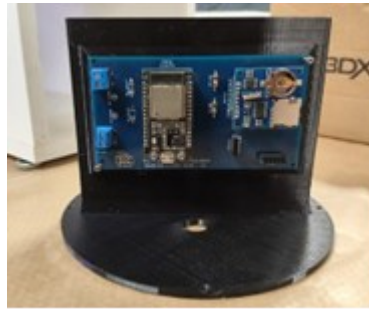
A – Projeto da PCI



B – Teste de conexão do sensor com o microcontrolador



C – Montagem final da PCI no suporte da estação



Fonte: O autor (2024)

A fixação dos componentes foi realizada de acordo com o projeto, assegurando a estabilidade e a segurança de cada elemento. Essa organização não apenas facilita o processo de montagem, mas também simplifica eventuais manutenções, conforme ilustrado na Figura 36. O controlador de carga foi posicionado na parte superior da caixa de proteção, como mostra a Figura 36A, deixando espaço suficiente para acomodar até duas baterias de 12 volts. Já o sensor foi instalado em um suporte específico e conectado ao microcontrolador. A conexão entre os dispositivos foi projetada de forma eficiente, utilizando o mínimo de fiação possível, o que reduz o risco de problemas de conexão e contribui para a facilidade de manutenção. Essa configuração compacta e bem estruturada garante um sistema funcional, durável e de fácil acesso para ajustes ou reparos, quando necessários.

Figura 36 – Instalação dos componentes na estação

A – Conexão do controlador de carga



Fonte: O autor (2024)

B – Conexão microcontrolador/sensor

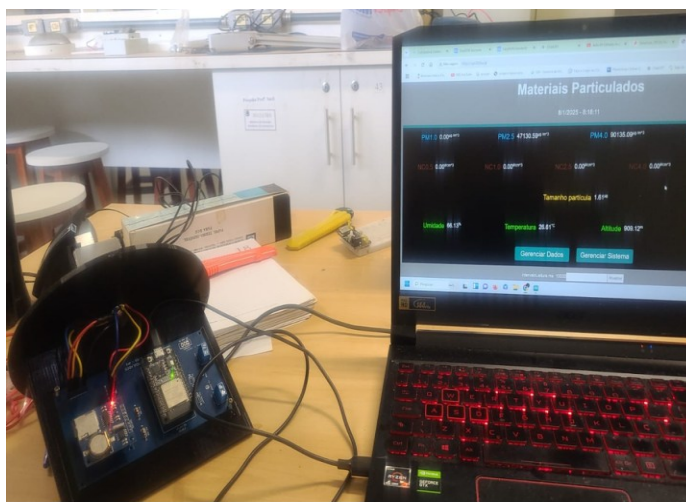


Fonte: O autor (2024)

Em seguida, os componentes foram instalados e conectados na estação, em um ambiente controlado de laboratório, conforme ilustrado na Figura 37, para a realização

da primeira coleta de dados. Durante esse teste inicial, os sensores demonstraram um funcionamento adequado e eficiente, registrando as medições de $MP_{2,5}$, MP_4 , MP_{10} , umidade do ar, temperatura e altitude referenciada. Essa etapa foi crucial para validar o desempenho do sistema, confirmando que todos os sensores estavam operando conforme o esperado e que os dados coletados eram consistentes.

Figura 37 – Tomada de dados em laboratório.



Fonte: O autor (2024)

Por fim, a estação foi instalada em campo sobre um suporte de tripé, conforme a Figura 38A, em local descoberto e exposto às intempéries, visando testar sua resistência a chuvas, ventos e variações de temperatura. O sistema elétrico foi conectado de maneira organizada e funcional, como ilustrado na Figura 38B, com sobra de cabos para facilitar ajustes e manutenções futuras. A instalação permitiu avaliar o desempenho do sistema em condições reais, comparando os dados dos sensores da estação com os de referência: a estação meteorológica automática do INMET, no campus Santa Mônica da UFU, para pressão (hPa), temperatura (°C) e umidade relativa (%), e o monitor EVM Series, da 3M (EUA), para medidas de $MP_{2,5}$

Figura 38 – Estação instalada em campo

A – Estação instalada



Fonte: O autor (2024)

B – Conexão do sistema elétrico



Fonte: O autor (2024)

5.8 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS E TRATAMENTO DOS DADOS

5.8.1 Condições ambientais e condições de análise

A estação de monitoramento foi posicionada nas coordenadas 18° 52' 42" S e 48° 12' 37.9" W, montada sobre um tripé, com o *intlet* a 1,15 metros do solo, em um terreno aberto de aproximadamente 80 m². Os testes iniciais tiveram início em 12 de janeiro de 2025, e a coleta de dados permanece em andamento. O período de experimentação considerado para este estudo abrangeu de 12 a 18 de janeiro de 2025, sendo que as primeiras 48 horas foram destinadas à estabilização dos sensores. Para fins de comparação, foram obtidas informações meteorológicas do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), provenientes da estação automática localizada no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Adicionalmente, dados sobre material particulado foram coletados utilizando o monitor EVM Series, da 3M (EUA).

O objetivo destes testes não se limitou a correlacionar esses dados para avaliar o desempenho e a precisão das medições, pois, a confiabilidade dos resultados depende das condições ambientais, do aparelhamento dos sensores e de dinâmicas experimentais consagradas como instalação em altura determinada ou área mínima para captação correta dos parâmetros aferidos, além da calibração dos sensores que exige equipamentos de referência e validação conforme normas específicas. A intenção

principal foi analisar o comportamento de um equipamento em relação a outro, verificando se os parâmetros analisados apresentam funcionamento estável e consistente ao longo do tempo.

Neste sentido a proposta da análise dos dados parte do pré tratamento e retirada de outliers, a averiguação do pré suposto de normalidade, utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, a observação da dispersão por meios gráficos, teste de correlação, um teste de confiança para correlação utilizando correlação intraclass e, por fim, analisar se existe viés sistemático e limites de concordância utilizando Bland-Altman.

5.8.2 Período Analisado, pré tratamento e número de amostras.

O período de análise para o pré-tratamento compreendeu os dias 14 a 18 de janeiro de 2025. Para os sensores de pressão, temperatura e umidade, os dados foram colocados lado a lado por hora e coletados em ambientes distintos: o protótipo foi instalado na coordenada especificada, enquanto a estação de referência para dados meteorológicos localizava-se no campus Santa Mônica da UFU. Embora essa configuração não seja ideal para este tipo de teste, optou-se por realizá-la devido ao tempo limitado da pesquisa, com o objetivo de comparar métodos de coleta de dados e fornecer informações preliminares para futuros estudos com esses equipamentos.

Os dados do INMET são coletados a cada 5 segundos, com cada ponto de referência correspondendo à média dos últimos 60 segundos da hora analisada, processo que serve como amortecimento dos dados no ponto em questão. Já os dados da estação foram registrados a cada 5 minutos, sendo cada ponto analisado representado pela média entre a leitura do instante, do momento anterior e do seguinte. Como resultado, foram obtidos 91 pares de dados para cada parâmetro analisado.

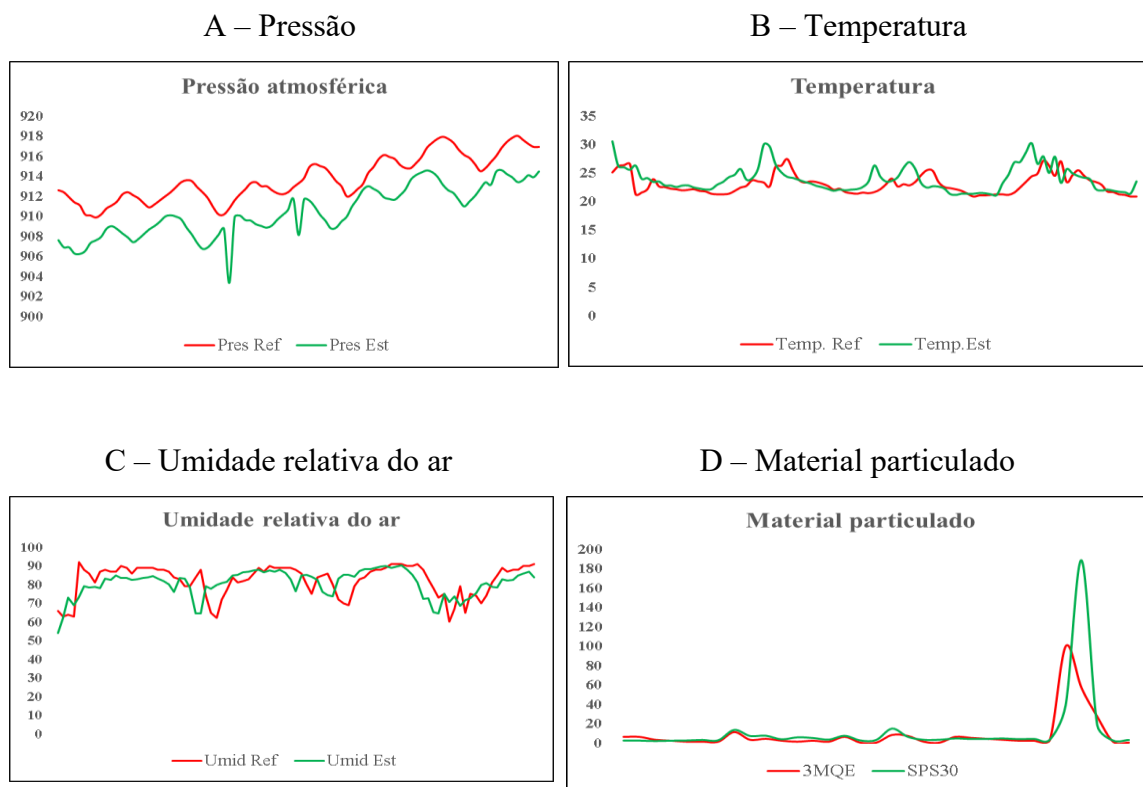
Para o parâmetro MP, os sensores foram emparelhados no mesmo local, sob as mesmas condições de altura e ambiente. O sensor SPS30, conectado à estação, possui autonomia energética, enquanto o monitor EVM Series tem limitações de energia. Por isso, os dados foram coletados a cada 5 minutos durante um período de aproximadamente 3 horas, resultando em 32 pares de dados.

5.8.3 Análises estatísticas, verificação do sistema, interpretação dos dados e análise estrutural

5.8.3.1 Análise estatística

Para o delineamento estatístico, os dados de material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), umidade relativa (%), pressão (hPa) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) foram inicialmente analisados com o objetivo de identificar falhas e *outliers* visíveis. Nessa etapa, foram plotados gráficos comparativos de cada parâmetro (Figura 39), utilizando o Microsoft Excel para a criação de uma tabela (Apêndice 1) e a construção das visualizações. Em seguida, os testes estatísticos foram realizados com o auxílio dos softwares JAMOVI, um programa de código aberto e gratuito baseado na plataforma R, e o RStudio, amplamente utilizado no meio acadêmico por sua natureza colaborativa e gratuita.

Figura 39 – Gráficos comparativos



Fonte: O autor (2024)

O primeiro passo foi verificar a normalidade dos dados, utilizando o RStudio, através do teste de Shapiro-Wilk, vastamente utilizado em análises estatísticas para validar a premissa de normalidade. Este teste, segundo Field (2018), tem como objetivo

principal avaliar a hipótese de que uma amostra de dados foi extraída de uma população com distribuição normal, um requisito para definir a parametrização ou não do conjunto de dados. A hipótese é que, se o valor-p for maior que o nível de significância (neste caso, 0,05), não se rejeita H_0 , ou seja, não há evidências suficientes para afirmar que os dados não são normais. Entretanto, se o valor-p for menor que o nível de significância, rejeita-se H_0 , indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. Após essa avaliação, os testes foram realizados, conforme Quadro 7, onde se constatou que todos os conjuntos de dados analisados não possuem distribuição normal.

Quadro 7 – Resultado do teste de normalidade

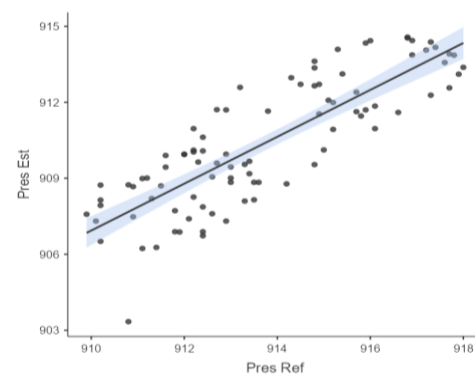
Teste para Normalidade de Shapiro-Wilk			
Parâmetro	W	P-valor	Resultado
Pressão de Referência	0,95	0,002	Não Normal
Temperatura de Referência	0,90	5,38 e ⁻⁶	Não Normal
Umidade Relativa de Referência	0,85	5,02 e ⁻⁸	Não Normal
Material Particulado de Referência	0,42	2,77 e ⁻¹⁰	Não Normal

Fonte: O autor (2024)

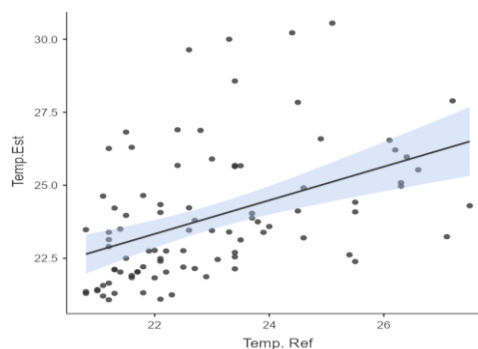
Para o conjunto de dados deste estudo, foram observados os gráficos de dispersão (Figura 40), realizado no JAMOV, onde os equipamentos de referência estão no eixo X e os testados no eixo Y. O gráfico de correlação observa a relação entre duas variáveis, identificando tendências (positiva, negativa ou nula), intensidade (forte, moderada ou fraca), formato (linear ou não linear), presença de outliers e agrupamentos de dados.

Figura 40 – Gráficos de dispersão dos parâmetros analisados

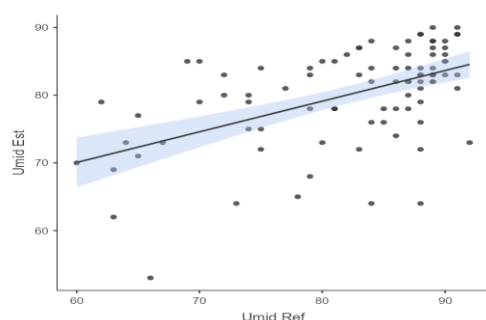
A – Dispersão da Pressão



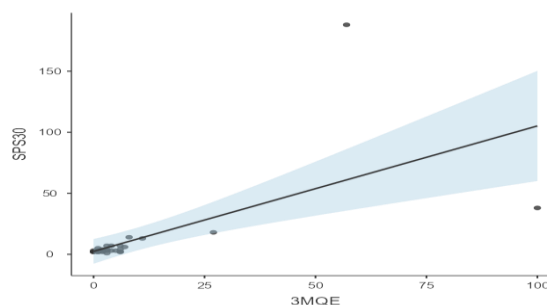
B – Dispersão da Temperatura



C – Dispersão da Umidade Relativa



D – Dispersão do Material Particulado



Fonte: O autor (2024)

Como os dados não apresentaram distribuição normal, procedeu-se com o teste de correlação de Spearman (Quadro 8), por meio do RStudio, também conhecido como coeficiente de correlação de postos de Spearman. Essa é uma medida não paramétrica da associação entre duas variáveis, particularmente útil quando os dados não seguem uma distribuição normal ou quando a relação entre as variáveis não é linear, ou seja, em relações monotônicas (não necessariamente lineares) (Field, 2018). O coeficiente de Spearman (ρ ou r_s) mede a correlação entre duas variáveis com base nos postos (ordens) dos dados. Ele varia entre -1 e 1, onde $\rho = 1$ indica uma correlação positiva perfeita, $\rho = -1$ indica uma correlação negativa perfeita e $\rho = 0$ indica ausência de correlação. Além disso, a magnitude do coeficiente ρ indica a força da correlação, podendo ser muito fraca (0,00 a 0,19), fraca (0,20 a 0,39), moderada (0,40 a 0,59), forte (0,60 a 0,79) ou muito forte (0,80 a 1,00), Dancey et al., (2017).

Quadro 8 – Resultado do teste de correlação

Teste para correlação de Sperman			
Parâmetro	P-Valor	ρ	Resultado
Pressão de Referência	$2,25 \text{ e}^{-16}$	0,82	Muito Forte
Temperatura de Referência	$7,43 \text{ e}^{-8}$	0,53	Moderada
Umidade Relativa de Referência	$1,63 \text{ e}^{-7}$	0,52	Moderada
Material Particulado de Referência	$1,70 \text{ e}^{-4}$	0,61	Forte

Fonte: O autor (2024)

Já o Coeficiente de Correlação Intraclass (ICC, do inglês Intraclass Correlation Coefficient), segundo Koo et al. (2016), é uma medida estatística utilizada para avaliar a

confiabilidade ou a concordância entre medidas repetidas ou múltiplos observadores. Ele quantifica a proporção da variância total dos dados que é atribuída à variabilidade entre os sujeitos ou itens, em relação à variabilidade total (incluindo erros de medição), sendo muito utilizado em estudos de validação de instrumentos.

O valor do ICC varia de 0 a 1 e indica o nível de concordância ou confiabilidade. Para $ICC < 0,50$, temos uma concordância pobre; para $0,50 \leq ICC < 0,75$, uma concordância moderada; para $0,75 \leq ICC < 0,90$, uma concordância boa; e, para $ICC \geq 0,90$, uma concordância excelente. Existem diferentes tipos de ICCs, que dependem basicamente da quantidade de tipos de medidas e do número de equipamentos ou avaliadores. No nosso caso, o ICC (2,1) foi escolhido (Quadro 9), pois o experimento observa um parâmetro para dois equipamentos diferentes, este teste indica a confiança da correlação e detecta possíveis vieses no conjunto de dados.

Quadro 9 – Resultado do teste de correlação intraclass

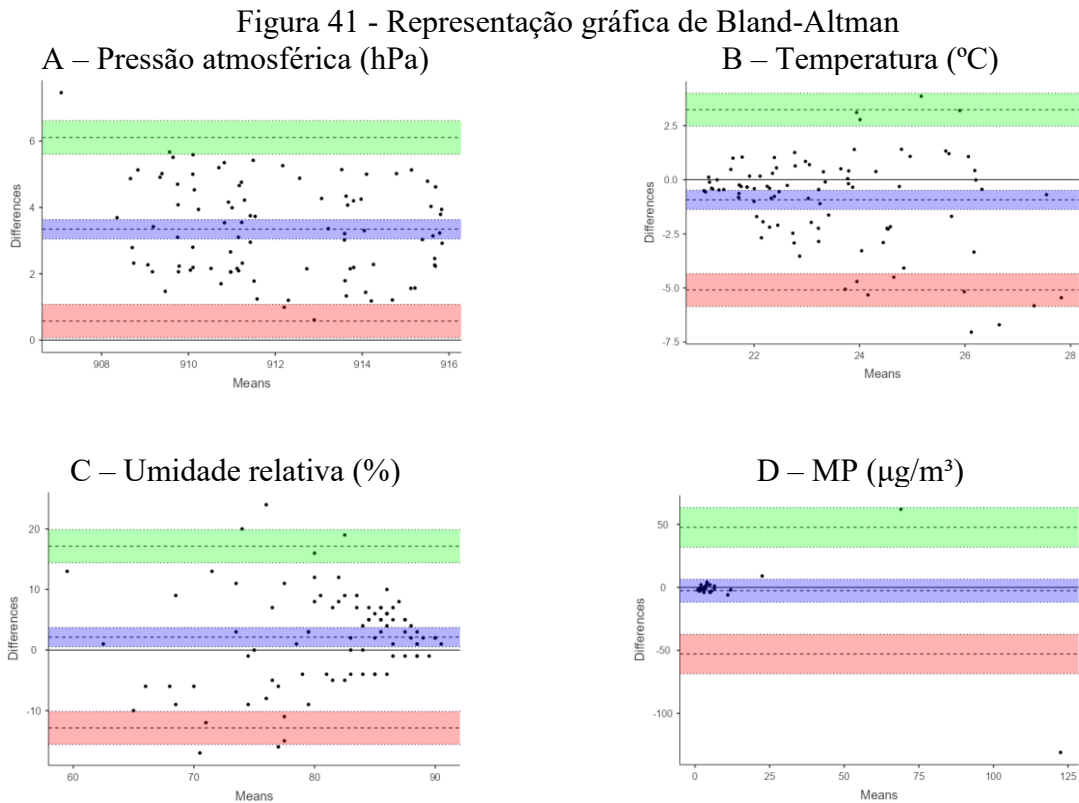
Teste para correlação Intraclass - ICC				
Parâmetro	ICC	p	IC	Resultado
Pressão	0,42	0,12	$-0,069 < ICC < 0,763$	Pobre
Temperatura	0,39	0,0001	$0,186 < ICC < 0,563$	Pobre
Umidade Relativa	0,51	$7,12 \times 10^{-8}$	$0,343 < ICC < 0,648$	Moderado
Material Particulado	0,55	0,0004	$0,256 < ICC < 0,748$	Moderado

Fonte: O autor (2024)

Após a análise foi necessário avaliar o viés sistemático, já que o ICC não possui as melhores condições para avaliá-lo. Assim, foi construído gráfico de Bland-Altman, utilizando o Jamovi, para completar essa análise, conforme Figura 41. O teste de Bland-Altman é uma ferramenta utilizada para avaliar a concordância entre dois métodos ou equipamentos de medição; ele se diferencia de outros métodos de correlação como o de Spearman que avalia a relação entre variáveis, focando na diferença absoluta entre as medidas e permitindo identificar viés sistemático e limites de concordância. (Blend & Altman, 1986).

O gráfico de Bland-Altman possui em seu eixo central os valores das médias das diferenças, que é a média aritmética das diferenças entre as medidas obtidas pelos dois equipamentos. Ela representa o viés sistemático, ou seja, se um método tende a medir

valores consistentemente maiores ou menores que o outro. Em seu eixo X estão as médias, já em seu eixo Y temos as diferenças entre as medidas e por fim os limites de concordância, que é a média $\pm 1,96 \times$ desvio padrão que indicam o intervalo dentro do qual 95% das diferenças estão contidas. Estes dados foram calculados pelo Jamovi e são apresentados no Quadro 10.



Fonte: O autor (2024)

Quadro 10 – Resultado da análise de Bland-Altman

Análise de Bland-Altman			
Parâmetro	Central	Limite Inferior	Limite superior
Pressão	3,341	0,575	6,108
Temperatura	-0,928	-5,095	3,239
Umidade Relativa	2,13	-12,87	17,13
Material Particulado	-2,64	-52,88	47,60

Fonte: O autor (2024)

5.8.3.2 Verificação do sistema

Após a realização dos testes de campo, foi possível analisar o comportamento da coleta de dados, constatando que, embora algumas correlações não tenham apresentado conformidade esperada, a captação de dados pela estação ocorreu de maneira fluida e contínua, sem interrupções ou problemas de incompatibilidade. O software desenvolvido, que inclui um analisador de sistema para detecção de possíveis falhas (Figura 42), não registrou nenhuma anomalia durante o período de operação, confirmando a eficiência e a confiabilidade do sistema implementado.

Figura 42 – Painel de verificação do sistema



Fonte: O autor (2024)

5.8.3.3 Interpretação dos dados

Além disso, a interpretação dos dados apresentados no Quadro 11 teve como principal objetivo subsidiar informações que possam ser relevantes para futuros experimentos com esses equipamentos. Durante a análise, foram observados não apenas os padrões e resultados obtidos, mas também possíveis erros experimentais que podem ter influenciado os dados, como variações ambientais, limitações dos equipamentos ou falhas metodológicas. Com base nessa avaliação, foram propostas sugestões para otimizar a realização de testes futuros, incluindo ajustes nos procedimentos de coleta, calibração dos instrumentos e controle mais rigoroso das variáveis envolvidas. Dessa forma, busca-se aprimorar a confiabilidade e a precisão dos resultados em pesquisas subsequentes.

Quadro 11 – Erros experimentais, Interpretação dos dados e sugestões.

Parâmetro	Erros Experimentais	Interpretação dos testes	Sugestões
Pressão	Sensores em locais distintos, estação em local com pouca circulação de ar	Os dados não seguem uma distribuição normal, e o gráfico de dispersão revelou uma relação positiva com padrão crescente e intensidade moderada. Embora os pontos estejam dispersos, é possível identificar uma tendência clara. O teste de correlação de Spearman confirmou uma relação muito forte para a pressão, com $\rho = 0,82$ e $p\text{-valor} = 2,2e-16$ ($< 0,05$), indicando que a correlação é estatisticamente significativa. Isso sugere que há evidências suficientes para afirmar que a correlação observada não ocorre por acaso. No entanto, ao analisar o teste de confiança, o coeficiente de correlação intraclasse (ICC) apresentou um valor baixo (0,42), o que indica uma concordância pobre entre os métodos. Apesar do índice de Spearman elevado (0,82), o ICC reduzido sugere uma forte relação monotônica, com a possível presença de um viés sistemático (bias). No gráfico de Bland-Altman, linha central está posicionada em 3,34, acima de zero. Isso indica que um dos métodos (a estação de referência) mede valores consistentemente maiores que o outro (a estação experimental), confirmando a presença de um viés sistemático. Portanto, conclui-se que os métodos de medição não são concordantes.	Emparelhar os equipamentos, realizar uma ambientação adequada e assegurar que não haja diferenças na área de medição que possam distinguir os equipamentos de qualquer forma. Além disso, é recomendável realizar uma análise matemática detalhada e uma calibração pelo método indireto. Uma observação relevante é que sensores que apresentam um viés elevado, como no caso em questão, geralmente possuem erros sistemáticos. Portanto, é essencial investigar se o sensor utilizado atende às demandas do projeto, considerando a precisão e a confiabilidade necessárias para os objetivos propostos.
Temperatura	Sensores em locais distintos, estação em local com pouca circulação de ar	Os dados não seguem uma distribuição normal. No gráfico de correlação, observou-se que os dados apresentaram comportamento disperso, sem uma tendência evidente, indicando ausência de associação clara entre as variáveis. Essa observação foi confirmada pelo teste de correlação de Spearman, que apresentou $\rho = 0,53$, indicando uma relação moderada. No teste de confiança, o coeficiente de correlação intraclasse (ICC) foi muito baixo (0,39), sugerindo que a maior parte da variabilidade dos dados se deve a erros de medição ou diferenças entre os equipamentos. Além disso, no gráfico de Bland-Altman, a linha central está próxima de zero (-0,928), indicando a ausência de viés sistemático. Além disso, os limites de concordância, que variam de -5,095 a 3,239, são amplos para o parâmetro analisado, o que reforça a falta de concordância entre os métodos de medição.	Emparelhar os equipamentos, realizar uma ambientação adequada e assegurar que não haja diferenças na área de medição que possam distinguir os equipamentos de qualquer forma. Além disso, é recomendável realizar uma análise matemática detalhada e uma calibração pelo método indireto. Uma observação pertinente é que a temperatura pode ser influenciada por fatores externos, como a cobertura de nuvens, o que reforça a importância de emparelhar os equipamentos para minimizar variações.

			indesejadas e garantir a consistência das medições.
UR	Sensores em locais distintos, estação em local com pouca circulação de ar	Os dados não seguem uma distribuição normal. No gráfico de distribuição, o parâmetro apresentou comportamento semelhante ao da temperatura, com uma intensidade de relação fraca e pontos muito dispersos. Na correlação de Spearman, foi observado um $\rho = 0,52$, indicando uma correlação moderada. Já no teste de confiança, o coeficiente de correlação intraclass (ICC) para a umidade relativa variou de moderado a baixo (0,51), com um intervalo de confiança de amplitude reduzida ($0,343 < ICC < 0,648$), o que sugere a necessidade de melhorias no sistema ou na metodologia experimental. Por fim, no gráfico de Bland-Altman, a linha central da umidade relativa está deslocada positivamente em 2,13, indicando que o equipamento de referência mede valores consistentemente maiores. Além disso, os limites de concordância, que variam de -12,87 a 17,13, são muito amplos, confirmando a falta de concordância entre os equipamentos.	Emparelhar os equipamentos, realizar uma ambientação adequada e assegurar que não haja diferenças na área de medição que possam distinguir os equipamentos de qualquer forma. Além disso, é recomendável realizar uma análise matemática detalhada e uma calibração pelo método indireto. Os dados mostraram uma uniformidade correlações, Spearman e ICC, portanto provavelmente uma boa prática de experimentação pode melhorar muito a correlação
MP	Nenhum dos dois sensores são de referência laboratorial	Os dados não seguem uma distribuição normal. No gráfico de dispersão, observaram-se agrupamentos e possíveis <i>clusters</i> , Figura 40D, indicando dados com características semelhantes. A correlação de Spearman mostrou $\rho = 0,61$ (relação forte) e p-valor = 0,0001697, confirmando que os dados não são aleatórios. No reteste, o material particulado (MP) apresentou ICC = 0,55 (moderado). No gráfico de Bland-Altman, a linha central está em -2,64, indicando que o Sensirion SPS30 mede valores maiores que o EVM. Em situações de maior concentração de MP, o SPS30 registra valores superiores ao EVM, mostrando divergência. Os limites de concordância (-52,88 a 47,60) são amplos, refletindo concordância insatisfatória entre os equipamentos.	É necessário calibrar o instrumento junto a um outro de referência, esse processo deve ser feito na mesma altura e não mais que 1 metro de distância um do outro. Além disso, é necessário realizar uma correção dos dados, realizar uma ambientação adequada e assegurar que não haja diferenças na área de medição que possam distinguir os equipamentos de qualquer forma.

Fonte: O autor (2024)

5.8.3.4 Avaliação da estrutura física da estação

Após verificar a operacionalidade do sistema e a coleta de dados em situação regular, foi realizada uma inspeção no equipamento para garantir que a estação estivesse de acordo com as especificações do projeto. O suporte da estação (Figura 21.1B) encaixou perfeitamente na tubulação de fixação, não apresentando sinais de deformação, trincas ou rachaduras. Os furos dos parafusos não se deformaram e os demais componentes tiveram um encaixe adequado no suporte, garantindo a integridade da estrutura.

A caixa do sistema elétrico (Figura 21.1A) manteve sua integridade, sem vestígios de umidade nos equipamentos. Durante o período avaliado, houve 68 mm de precipitação acumulada, segundo a estação automática do INMET. Tanto o controlador de carga quanto a bateria permaneceram secos, com encaixes adequados, e o espaço interno permite acomodar mais uma bateria, aumentando a autonomia de energia. Inicialmente, houve um problema com os furos, pois a impressão não foi precisa no delineamento das roscas. No entanto, esse problema foi resolvido com a colocação de buchas para parafusos, garantindo uma boa conexão com a tampa.

A caixa de proteção do sensor e microcontrolador (Figura 21.1C) permaneceu hermética, sem sinais de umidade. O microcontrolador manteve-se na temperatura adequada, os furos de encaixe não se deformaram e a integridade física não foi afetada por trincas ou rachaduras.

A tampa da caixa de proteção do sistema elétrico (Figura 21.2D) vedou perfeitamente, encaixando-se na caixa e os parafusos produziram um ótimo engaste. Não houve sinais de infiltração de água nas frestas ou furos. O suporte da tela (Figura 21.2 F) proporcionou um encaixe justo, segurando a tela de proteção (Figura 21.2 E) de maneira eficaz. A tela cumpriu seu papel de proteção contra insetos e, na análise inicial, não se notou nenhuma influência nos sensores. Contudo, essa análise é preliminar e testes mais robustos devem ser realizados para garantir que não houve interferência na coleta de dados.

Quanto aos suportes, o do microcontrolador (Figura 27) teve encaixes bem justos, mas houve alguma dificuldade ao retirar e colocar os parafusos. Foi proposto, para futuras estações, mudar o engaste, substituindo os parafusos por um sistema de rosqueamento ou outro mecanismo que ofereça mais comodidade ao usuário. O sistema

atual funcionou perfeitamente, mas essa adequação pode facilitar a manutenção. O suporte do sensor não teve um bom encaixe inicial; a espessura do suporte não garantiu segurança suficiente. Com adequações, foi possível realizar o encaixe correto, mas sugeriu-se aumentar a espessura e diminuir o comprimento do suporte. Assim, concluímos que a estação não sofreu danos estruturais, infiltrações ou deformações significativas funcionando conforme foi idealizada.

5.9 QUADRO DE CUSTOS

Para fins da análise de custos, consideramos apenas o material e os equipamentos necessários para a construção da estação. Isso inclui o filamento utilizado (PETG), microcontrolador (ESP32), controlador de carga, placa solar, fiação, ferragens (parafusos), conexões e vedação. Ressalto ainda que os gastos do desenvolvimento foram mais elevados, pois foram criados modelos que envolveram custos adicionais. Além disso, os custos subsidiários, que abrangem energia, utilização de equipamentos, tempo de trabalho e outros gastos não previstos, não estão incluídos no escopo dos custos apresentados no Quadro 12. Os valores estão apresentados em reais cotados na data de 07 de fevereiro de 2025.

Quadro 12 – Custos para a produção do protótipo

Equipamento/ Material	Marca	Uni.	Valor Unit	Valor
Filamento PETG	3D Fila	4 Kg	107,89	431,89
Microcontrolador	Espressif	1	34,99	34,99
Relógio contador	DIY-Victor	1	15,59	15,59
Controlador de Carga	Knup	1	39,99	39,99
Bateria Lítio 12v	Pack	1	149,90	149,90
Painel solar	BP Solar	1	159,00	159,00
Sensor UR/Pressão/Temp	BME280	1	60,90	60,90

Sensor MP	Sensirion SPS30	1	237,00	237,00
Ferragens	Diversos			46,00
Tinta Spray	Colorgin	2	42,90	85,8
Lixas	3M	18	2,00	36,00
Vedações	Sem marca	100 cm	10,00	10,00
Fiação	Sem marca	5 uni	2,5	12,50
Total			1319,96	

Fonte: O autor (2024)

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal desenvolver um protótipo de estação de monitoramento da qualidade do ar, projetado para medir material particulado fino (MP_{2,5}), com autossuficiência energética, mobilidade e baixo custo, utilizando sensores acessíveis e um microcontrolador. Os resultados obtidos demonstram que o propósito foi alcançado, uma vez que a estação desenvolvida apresenta funcionalidade plena, é compacta, de fácil manutenção, totalmente autônoma em termos de energia, capaz de transmitir dados em tempo real e de baixo custo. Essas características a tornam uma solução viável e promissora para o monitoramento ambiental em diferentes contextos, desta forma, observado o ineditismo do equipamento foi realizado o pedido de patente que gerou o número BR 20 2025 015021 8 no Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI.

A partir da referência bibliográfica que embasou a idealização do protótipo, foi possível desenvolver um modelo industrial que integrou os equipamentos selecionados para os testes. A análise estatística comparativa dos dados coletados demonstrou que, embora não haja uma forte correlação entre os equipamentos testados, a tomada de dados é segura e sem falhas aparentes, o que viabiliza a calibração adequada dos sensores estudados. Além disso, a estrutura da estação mostrou excelente desempenho frente às condições climáticas adversas, mantendo-se intacta e preservando o interior livre de umidade, o que garante segurança operacional e facilita eventuais manutenções.

É importante lembrar que as medidas realizadas carecem de calibração e validação, o que deverá melhorar os resultados quando comparados a um equipamento de referência. No entanto, o equipamento apresenta sensibilidade a variações da concentração de MP na atmosfera e às variáveis meteorológicas. Além destas etapas também uma caracterização das medidas da estação precisará ser realizada, estabelecendo os ranges de medidas, bem como limites de detecção dos instrumentos.

Neste contexto, o estudo representa um avanço no campo do monitoramento ambiental, especialmente no que se refere à utilização de sensores de baixo custo. Diante do acelerado desenvolvimento tecnológico observado atualmente no mundo, torna-se fundamental propor soluções inovadoras e acessíveis que incorporem a automatização de processos, contribuindo para a preservação da biodiversidade e a mitigação dos impactos ambientais.

Portanto, este trabalho reforça a importância de desenvolver tecnologias acessíveis e eficientes para enfrentar os desafios globais relacionados à qualidade do ar. A estação desenvolvida, com sua capacidade de monitorar o material particulado fino (MP_{2,5}) de forma autônoma e em tempo real, pode se tornar uma ferramenta importante para a tomada de decisões informadas e a implementação de políticas públicas mais eficazes.

Ao garantir a proteção da atmosfera, estamos não apenas preservando a saúde humana e o equilíbrio dos ecossistemas, mas também construindo um legado de responsabilidade e cuidado com o planeta. A inovação e a sustentabilidade caminham juntas, e este projeto pode ser um passo importante em direção a um futuro onde a tecnologia e a natureza coexistem em harmonia, protegendo a vida em todas as suas formas.

REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H. **Política Ambiental e Discurso Democrático: o caso do CONAMA**. ANPOCS. 1996. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6800/1/Governan%C3%A7a%20ambiental%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 22/07/2024.

AGUIAR, E. F. K. **Monitoramento da poluição do ar relacionado ao tráfego com o uso de sensores de baixo custo e estimativa da carga de poluentes inalada por ciclistas na cidade de São Paulo**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-19012023-162234/publico/ErickFredericoKillAguiarc.pdf>> Acesso em: 02/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.5.2022.tde-19012023-162234>.

AIX, M. L. et al. **Protocole d'évaluation et d'utilisation d'une station low-cost de mesure des particules fines**. 2023 Disponível em: <https://www.asfera.org/medias/files/articles/2023/32891.pdf>>. Acesso em 01/07/2024.

ALAM, K. et al. **Particulate matter and its source apportionment in Peshawar, Northern Pakistan**. Aerosol and Air Quality Research, v. 15, n. 2, p. 634-647, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.10.0250>.

ALBERTAZZI, A. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Editora Manole, 2008.

ALFANO, B. et al. **A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives**. Sensors, v. 20, n. 23, p. 6819, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6819> Acesso em: 14/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20236819>.

ALMEIDA, O. **Simulação numérica de grandes escalas do escoamento transicional ao redor de cilindros de base quadrada e retangular**. Dissertação de Mestrado. UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira. São Paulo. Brasil. 2001.

AMORIM, M. T. **Avaliação de Sensores de Baixo Custo e de Métodos de Referência para a Monitorização da Qualidade do Ar** (Master's thesis, Universidade de Aveiro (Portugal)). Disponível em: <https://ria.ua.pt/handle/10773/15876>. Acesso em: 07/07/2024.

ANENBERG, S. C. et al. **Estimates of the global burden of ambient PM 2.5, ozone, and NO 2 on asthma incidence and emergency room visits**. Environmental health perspectives. v. 126, n. 10, p. 107004, 2018. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP3766>. Acesso em: 23/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1289/EHP3766>.

ARAÚJO, A. M. et al. **Equipamentos de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar: uma revisão.** Revista Maestria, v. 18, n. 1-135), p. 106-120, 2023. Disponível em: <<https://revista.unifemm.edu.br/index.php/Maestria/article/view/85>> Acesso em: 28/06/2024.

ARASAKI, K. **Validation of low-cost sensors in field tests at Hyltemossa research station.** Faculty of Engineering LTH | Lund University. 2024. Disponível em:<<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9150571&fileId=9150572>>. Pdf. Acesso em: 01/07/2024.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The internet of things: A survey.** Computer networks. v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128610001568>>. Acesso em: 24/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

BAAN, R. A. **Carcinogenic hazards from inhaled carbon black, titanium dioxide, and talc not containing asbestos or asbestiform fibers: recent evaluations by an IARC Monographs Working Group.** Inhalation toxicology, v. 19, n. sup1, p. 213-228, 2007. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08958370701497903>>. Acesso em: 26/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/08958370701497903>.

BAGINSKI, L. C. **Análise de consistência de dados de monitoramento de material particulado obtidos por sensores de baixo custo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: < <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/65692>> Acesso em: 04/02/2025. URI: <https://hdl.handle.net/1884/65692>.

BAI, L. et al. **Long-term field evaluation of low-cost particulate matter sensors in Nanjing.** Aerosol and Air Quality Research. v. 20, n. 2, p. 242-253, 2020. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-18-11-lcs-0424> Acesso em: 30/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.11.0424>.

BERINGUI, K. et al. **Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro.** Química Nova, v. 44, p. 737-754, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/RtWJjTcdjBDHGVRh97Ns5mj/?format=html&lang=pt> Acesso em: 30/07/2024. DOI: doi.org/10.21577/0100-4042.20170717.

BERMAN, B. **3-D printing: The new industrial revolution.** Bus. Horiz. vol. 55, no. 2, pp. 155-162, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681311001790> Acesso em: 18/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.

BLESMMAN, J. **Aerodinâmica das Construções.** 2ª Ed., Porto Alegre, UFRGS, 1990.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Editora da Universidade/UFRGS, 1998.

BLONDEAU, P.; IORDACHE, V.; POUPARD, O.; GENIN, D.; ALLARD, F. **Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools**.

Indoor Air. Feb;15(1):2-12. 2005. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15660564/>. Acesso em: 04/07/2024. DOI:

DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x.

BORREGO, Carlos et al. **Challenges for a new air quality directive: the role of monitoring and modelling techniques**. Urban Climate, v. 14, p. 328-341, 2015.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095514000479?VIA%3Dihub>>. Acesso em: 24/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.007>.

BRASIL. **Decreto nº 88.351**, de 1º de Junho de 1983. Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d88351.htm Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

NIT-DICLA-021: requisitos para acreditação de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: INMETRO, 2017. Disponível em:

http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio. Acesso em: 01/02/2025.

BRASIL. **Lei nº 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. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 05**, 15 de junho de 1989.

Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0005-150689.PDF> Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA) **PORTARIA NORMATIVA nº 348**, de 14 de março de 1990 - Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar e as concentrações de poluentes atmosféricos Disponível em:

<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/PT0348-140390.PDF>> Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 03**, 28 de junho de 1990.

Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0003-280690.PDF> Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 491**, de 19 de Novembro de 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: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 506**, de 5 de Julho de 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-506-de-5-de-julho-de-2024-570885907>. Acesso em: 02/07/2024.

BRASIL. Ministério da Saúde - MS. **Vigilância em Saúde Ambiental e Qualidade do Ar - VIGIAR** (2024). Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiar>>. Acesso em: 28/06/2024.

BREDER, L. A. et al. **A evolução do monitoramento da qualidade do ar e desafios para atendimento dos padrões da Organização Mundial de Saúde (OMS)**. Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v. 3, n. 1, p. 128-146, 2020. Disponível em: <https://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/1197/886>. Acesso em 04/07/2024.

BUONTEMPO, Carlo. **2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level**. Copernicus Climate Change Service. Disponível em: <<https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>>. Acesso em: 04 fev. 2025.

CARNEIRO, J. **Electromagnetismo B: semicondutores - modelo matemático da célula fotovoltaica**. Notas de aula - Universidade do Minho. Braga, 2010. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/55618426.pdf>>. Acesso em: 12/07/2024. URI: <https://hdl.handle.net/1822/16960>.

CHONG, C.; KUMAR, S. P. **Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges**. Proceedings of the IEEE, v. 91, n. 8, p. 1247-1256, 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1219475>>. Acesso em 12/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.814918>.

CLEMENTS, A. L. et al. **Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary)**. Sensors, v. 17, n. 11, p. 2478, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17112478>.

CONNER, B. P. et al. **Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services**. Additive manufacturing, v. 1, p. 64-76, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.

DE MELO, A. W. F. et al. **PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO ESTADO DO ACRE, BRASIL**. 2023. In: ANAIS DO XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos...**, INPE, 2023. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/padroes-de-qualidade-do-ar-no-estado-do-acre-brasil?lang=pt-br>> Acesso em: 02/07/2024.

DOS SANTOS PEIXOTO, D. R.; DE SOUZA, S. L. Q.; DE OLIVEIRA C. P. S. **Análise da concentração de material particulado (MP2, 5) na instalação e operação do corredor viário transolímpica**. Revista Internacional de Ciências, v. 10, n. 1, p. 124-138, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12957/ric.2020.49506>.

DRESCH, A; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A.V.J. **Design Science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3>.

ESPRESSIF. **ESP32**, 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 08/07/2024.

FERREIRA, N. O. **Utilizando o ciclo da experiência de Kelly para investigar a compreensão do comportamento dual da luz**. Dissertação de Mestrado 2005. PDF. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/5946> Acesso em: 28/07/2024.

GÄBEL, P. et. al. **Development of air quality boxes based on low-cost sensor technology for ambient air quality monitoring**. Sensors, v. 22, n. 10, p. 3830, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3830>. Acesso em: 30/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22103830>.

GALETTI, G. D. et al. **Desenvolvimento e aplicação de uma estação de qualidade do ar de baixo custo para monitorar a concentração de material particulado**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 12, 2020. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/22057/17611>> Acesso em: 01/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-573>.

GARFINKEL, S. **Avaliação: Raspberry pi**. 2012 Disponível em: www.technologyreview.com.br. Published by MIT. Acesso em: 26/06/2024.

GIORDANO, M. R. et al. **From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors**. Journal of Aerosol Science, v. 158, p. 105833, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105833>.

GIUSTO, E. et al. **Sensor-based ICT Systems for Smart Societies 2021**. Dissertação de Mestrado. PDF. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/524611669>>. Acesso em: 02/07/2024.

GUO, S. et al. **Elucidating severe urban haze formation in China**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 111, n. 49, p. 17373-17378, 2014. Disponível

em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1419604111>. Acesso em: 24/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1419604111>.

GURJÃO, N. O. et al. **Avaliação da poluição atmosférica proveniente do tráfego de veículos em fortaleza/CE**. Artigo Científico, v. 2, 2023. In: ANAIS DO CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2023, Santos. Anais eletrônicos, Galoá, 2023. Disponível em: <<https://proceedings.science/anpet-2023/trabalhos/avaliacao-da-poluicao-atmosferica-proveniente-do-trafego-de-veiculos-em-fortalez?lang=pt-br>>. Acesso em: 02/07/2024.

HEAL, M. R.; KUMAR, P.; HARRISON, R. M. **Particles, air quality, policy and health**. *Chemical Society Reviews*, v. 41, n. 19, p. 6606-6630, 2012. Disponível em: <<https://colab.ws/articles/10.1039%2Fc2cs35076a>>. Acesso em: 04/02/2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2cs35076a>.

HEVNER, A.; MARCH, S.; PARK, J. **Design Science in Information Systems Research**. *MIS Quarterly*, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 75-105, Mar. 2004. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/25148625>>. Acesso em: 12/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.2307/25148625>.

HORN, T. J.; HARRYSSON, O. LA. **Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications**. *Science progress*. v. 95, n. 3, p. 255-282, 2012. Disponível em: <<https://journal.sagepub.com/doi/abs/10.3184/003685012X13420984463047>>. Acesso em: 18/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3184/003685012X13420984463047>.

IBRAHIM, D. **The Complete ESP32 Projects Guide**. [S.l.]. Elektor Digital, pag 23, 2017. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/news/complete-esp32-projects-guide> Acesso em 14/03/2024.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2007. 146 f. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8608> Acesso em: 24/07/2024. URI: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8608>.

JUNIOR, J. C. S. F. et al. **Design Research: aplicações práticas e lições aprendidas**. *Revista de Administração FACES Journal*, 2015. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/1940/194038300006>>. pdf. Acesso em: 08/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.21714/1984-6975FACES2015V14N1ART1999>.

JUNIOR, J. D. S. L.; PEREIRA, J. I. M.; DE LIMA LIRA, R. **Sistema individual de Energia Elétrica com fonte intermitente fotovoltaico off grid implantada em uma habitação ribeirinha no Município de Manacapuru-AM**. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 12, p. 118458-118475, 2021. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/majmmy3zqbavfmetfvysrqofhe/access/wayback/https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/download/41562/pdf>. Acesso em:

20/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n12-553>.

KREIGER, M.; PEARCE, J. M. **Impactos ambientais da fabricação distribuída a partir da impressão 3-D de componentes e produtos poliméricos**. Materials Research Society, 2013. Disponível em: <https://www.appropedia.org/Environmental_impacts_of_distributed_manufacturing_from_3-D_printing_of_polymer_components_and_products/pt>. Acesso em: 5/02/2025. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3332788>.

KUULA, J. et al. **Applicability of optical and diffusion charging-based particulate matter sensors to urban air quality measurements**. Aerosol and Air Quality Research. v. 19, n. 5, p. 1024-1039, 2019. Disponível em: <<https://aaqr.org/articles/aaqr-18-04-oa-0143>>. Acesso em: 21/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.04.0143>.

LACERDA, D. P. et al. **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção**. Gestão & produção, v. 20, p. 741-761, 2013. Disponível em <: <https://www.scielo.br/j/gp/a/3CZmL4JJxLmxCv6b3pnQ8pq/#>>. Acesso em: 07/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014>.

LARSEN, S.; SLUYTER, R.; HELMIS, C. **Criteria for EUROAIRNET - The EEA Air Quality Monitoring and Information Network**. Copenhagen: European Environmental Agency, 1999.

LEANDRO, D. S.; ANGEOLETTO, F. **Poluição atmosférica em cidades médias: uma proposta de avaliação para Rondonópolis-MT**. Revista Espaço Acadêmico, v. 17, n. 198, p. 122-130, 2017. Disponível em: < <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/view/35362>>. Acesso em: 31/07/2024.

LEE, H. et al. **Long-term evaluation and calibration of low-cost particulate matter (PM) sensor**. Sensors, v. 20, n. 13, p. 3617, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3617>. Acesso em: 01/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20133617>.

LEMOS, B. S. et al. **Estudo Comparativo de Middlewares para Internet das Coisas usando Plataformas Livres no Monitoramento de Ambientes**. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55505/1/2016_eve_bslemos.pdf> Acesso em: 28/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.14209/sbirt.2016.80>.

LIANG, L. **Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges**. Environmental Research, v. 197, p. 111163, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935121004576> Acesso em: 20/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111163>.

MACHADO, D. S. **Caracterização aerodinâmica de cabos de pontes estaiadas**

submetidos à ação combinada de chuva e vento. 2008. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/13512>>. Acesso em 29/07/2024.

MAHAJAN, S. **Design and development of an open-source framework for citizen-centric environmental monitoring and data analysis.** 2022. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-022-18700-z>>. Acesso em: 02/07/2024. DOI: 10.1038/s41598-022-18700-z.

MAIONE, M. et al. **Air quality and climate change: Designing new win-win policies for Europe.** Environmental Science & Policy, v. 65, p. 48-57, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901116300624>. Acesso em: 04/02/2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.011>.

MARQUES, R.; DOS SANTOS, E. S. **Redes de monitoramento de material particulado inalável, legislação e os riscos à saúde.** Hygeia. Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. 8, n. 14, p. 115, 2012. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/17075/9468>>. Acesso em: 24/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/Hygeia817075>.

MEI, H et al. **Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in Beijing. Sensors.** v. 20, n. 16, p. 4381, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/16/4381>. Acesso em: 02/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164381>

MEIRELES, H. L. **Aspectos legais relacionados com a poluição do ar.** In: Revista de Direito da Procuradoria Geral [do] Estado do Rio de Janeiro (PGE/RJ). p. 406-422. 2006. Disponível em: <<https://biblioteca.pge.rj.gov.br/scripts/bnweb/bnmapi.exe?router=upload/76743>> Acesso em:25/07/2024.

MORAWSKA, L. et al. **Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?.** Environment international, v. 116, p. 286-299, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412018302460?via%3Dihub>> Acesso em: 27/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>

NARAYANA, M. V.; JALIHAI, D.; NAGENDRA, S.M. S. **Establishing a sustainable low-cost air quality monitoring setup: A survey of the state-of-the-art.** Sensors, v. 22, n. 1, p. 394, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/394> Acesso em: 14/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22010394>

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da Célula Fotovoltaica.** Monografia. Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Lavras/MG. 2004. Pdf. Disponível em: <

<https://pt.scribd.com/doc/139643781/Principio-de-Funcionamento-de-Celulas-Fotovoltaicas>. Acesso em: 01/07/2024.

NÚÑEZ, G. J. Z. **Determinação experimental e teórica da resposta transversal à ação do vento de uma torre de telecomunicações de concreto armado**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1552>> Acesso em: 01/07/2024. URI: <http://hdl.handle.net/10183/1552>.

OLIVEIRA, M. M. et al. **Análise da produção científica internacional sobre mudanças climáticas e poluição do ar**. Research, Society and Development, v. 9, n. 10. Set, 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/8314/7467>>. Acesso em: 05/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8314>.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS/OPAS - Organização Pan Americana de Saúde. **Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respiram ar poluído**. 2018. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/1-5-2018-nove-em-cada-dez-pessoas-em-todo-mundo-respiram-ar-poluido>. Acesso em: 03/07/2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Outdoor air pollution**. World Health Organization, 2008. Disponível em: <<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/331797/WHO-CED-PHE-EPE-19.12.14-por.pdf?isAllowed=y&sequence=5>>. Acesso em: 30/07/2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. **AirQ+**: software tool for health risk assessment of air pollution. 2016. Disponível em: <https://www.who.int/tools/airq>. Acesso em: 28/06/2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future**. In: Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. 2017. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/341912/9789289052306-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04/07/2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>>. Acesso em: 25/06/2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. **Air quality database: Update 2022**. Disponível em: <<https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database/2022>>. Acesso em: 27/06/2024.

PAGLIARINI, H. et al. **Estudo de metodologias de monitoramento e avaliação da qualidade do ar por meio de amostragem automática e passiva**. JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, v. 1, n. 12, 2022. Disponível em:

<<https://portaleventos.uffs.edu.br/index.php/JORNADA/article/view/16726/11304>>
Acesso em: 19/07/2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - IPCC. **Mudanças Climáticas 2013: A Base da Ciência Física**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido e Nova York, EUA. 2013. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 27/06/2024.

PARK, D. et al. **Assessment and calibration of a low-cost PM2.5 sensor using machine learning (hybrid LSTM neural network)**: Feasibility study to build an air quality monitoring system. *Atmosphere*, v. 12, n. 10, p. 1306. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/12/10/1306>> Acesso em: 01/07/2024.
DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12101306>.

PASTÓRIO, A. F. **DustAI: Monitor de Material Particulado de Baixo Custo com Calibração via Aprendizado de Máquina**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2023. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/7102>. Acesso em: 02/07/2024.
URI: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/7102>.

PATAKI, A. H.; DE OLIVEIRA, M. M. **Estação de monitoramento da qualidade do ar**. *Caderno Progressus*, v. 1, n. 1, 2021. Disponível em: <<https://www.cadernosuninter.com/index.php/progressus/article/view/1676.pdf>> . Acesso em: 22/07/2024.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto. Publindústria. p. 25-28. 2011.

PETTA, N. L. de; OJEDA, E. A. B. **História: uma abordagem integrada**. São Paulo: Moderna, 2003.

PIVETTA, M. **A poluição que esfria o clima global**. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 308, p. 20-23, out. 2021. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-poluicao-que-esfria-o-clima-global/>>. Acesso em: 15/02/2025.

PROJETO ARDUINO. **What is Arduino?** 2016. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 26/06/2024.

RAI, A. C. et al. **End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring**. *Science of The Total Environment*. v. 607, p. 691-705. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717316935?via%3Di> hub. Acesso em: 14/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266>.

RAPOSO, A.; DE ASSIS, W. L.; NORTON, S. R. **Revisão bibliográfica dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana e uma breve análise crítica da atual legislação brasileira sobre os padrões de qualidade do ar** (CONAMA 491/2018). Cadernos do Leste, v. 21, n. 21. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/caderleste/article/view/35677>>. Acesso em: 05/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.29327/248949.21.21-1>.

ROGULSKI, M. et. al. **Investigation of low-cost and optical particulate matter sensors for ambient monitoring**. Atmosphere, v. 11, n. 10, p. 1040, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/11/10/1040>>. Acesso em: 30/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101040>.

SACHETTI, L. L.S. et al. **pmSensing**: Uma rede de sensoramento participativo para monitoramento preditivo de material particulado. In: Workshop de Computação Urbana (CoUrb). SBC, 2021. p. 168-181. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/17112/16950>>. Acesso em: 02/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.5753/courb.2021.17112>.

SANTOS, J. W.; LARA JUNIOR, R. C. **Sistema de automatização residencial de baixo custo controlado pelo microcontrolador ESP32 e monitorado via smartphone**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16960>. Acesso em: 18/07/2024. URI: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16960>.

SANTOS, U. P. et al. **Poluição do ar ambiental**: efeitos respiratórios. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 47. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpneu/a/Y8XSDqxncfs3jphjFV6FmLD/?lang=pt>. Acesso em: 05/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20200267>.

SCHILT, U. et al. **Low-Cost sensor node for air quality monitoring**: Field tests and validation of particulate matter measurements. Sensors, v. 23, n. 2, p. 794, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/794>> Acesso em: 01/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020794>.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics**: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons, 2006.

SENSIRION. **SPS30** Especifications. 2024. Disponível em: <https://sensirion.com/products/catalog/SPS30>. Acesso em: 08/07/2024.

SERPA, F S et al. **Poluição do ar e saúde respiratória**. Portal Regional da Biblioteca Virtual em Saúde. p. 91-99. 2022. Disponível em: http://aaai-asbai.org.br/detalhe_artigo.asp?id=1250. Acesso em: 14/07/2024.

SILVA, A. L. E.; MORAES, J. A. R.; BENITEZ, L. B. **Sustentabilidade ambiental da impressão 3D por FDM**. In: XL ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 2020. Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2020. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_350_1801_39639.pdf>. Acesso em: 5/02/ 2025.

SNYDER, E. G. et al. **The changing paradigm of air pollution monitoring**. Environmental science & technology, v. 47, n. 20, p. 11369-11377, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es4022602>>. Acesso em: 31/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/es4022602>.

TAGLE, M. et al. **Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile**. Environmental monitoring and assessment, v. 192, n. 3, p. 171, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-8118-4>>. Acesso em: 01/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>

TÉKOUABOU, S. C. et al. **Towards air quality particulate-matter monitoring using low-cost sensor data and visual exploration techniques**: Case study of Kisumu. Kenya. Procedia Computer Science, v. 215, p. 963-972, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922021706>>. Acesso em: 30/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.099>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Air & Radiation Home**. Nation Program & Grant Guidance. 2010. Disponível em: <<https://www.epa.gov/environmental-topics/air-topics>>. Acesso em: 30/07/2024.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER, B.; PETTER, S. **Design research in information systems**. Research Gate. 2004. Disponível em: <http://desrist.org/design-research-in-information-systems>. Acesso em: 08/07/2024.

VENKATRAMAN JAGATHA, J. et al. **Calibration method for particulate matter low-cost sensors used in ambient air quality monitoring and research**. Sensors, v. 21, n. 12, p. 3960. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/3960>. Acesso em: 22/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21123960>.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica**. São Paulo: Saraiva. 2017.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica. 2012.

VON SCHNEIDEMESSER, E. et al. **Chemistry and the linkages between air quality and climate change**. Chemical reviews, v. 115, n. 10, p. 3856-3897. 2015. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.chemrev.5b00089>>. Acesso em: 04/02/2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>.

WANG, H. F. et al. **Flow structure around a finite-length square prism**. In: 15 th Australasian Fluid Mechanics Conference. 2004. p. 13-17. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=5213e03b652d5431db214e2b47cd3a66ba048484>>. Acesso em: 12/07/2024.

WANG, Y. et al. **Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement**. Aerosol science and technology, v. 49, n. 11, p. 1063-1077, 2015. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2015.1100710>>. Acesso em: 14/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710>.

WARREN, P. **Indoor air pollution and ventilation**. Technical Conference. Supplement. 1987. p. 1-13. Disponível em: <https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_2639.pdf>. Acesso em: 04/07/2024.

WELLER, C.; KLEER, R.; PILLER, F. T. **Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited**. Int. J. Prod. Econ., vol. 164, pp. 43-56, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527315000547> Acesso em: 18/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>.

WILLIAMS, M. **Tackling climate change: what is the impact on air pollution?**. Carbon, v. 3, n. 5, 2012. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/cmt.12.49>>. Acesso em: 04/02/2025. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.49>.

YOUN, J. et al. **Hygroscopic properties and respiratory system deposition behavior of particulate matter emitted by mining and smelting operations**. Environmental science & technology, v. 50, n. 21, p. 11706-11713. 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b03621>>. Acesso em: 27/06/2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03621>.

ZHENG, T. et al. **Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments**. Atmospheric Measurement Techniques, v. 11, n. 8, p. 4823-4846, 2018. Disponível em: <<https://amt.copernicus.org/articles/11/4823/2018/>>. Acesso em: 25/07/2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>.