



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS NEPOMUCENO**

JOEL RESENDE GARCIA

**PROPOSTA DE UMA ESTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICES DE
QUALIDADE DO AR**

NEPOMUCENO

2025

JOEL RESENDE GARCIA

**PROPOSTA DE UMA ESTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICES DE QUALIDADE
DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr^o Alencar Franco de Souza

Coorientadora: Dr^a Priscila Ferreira de Sales Amaral

NEPOMUCENO

2025

JOEL RESENDE GARCIA

**PROPOSTA DE UMA ESTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICES DE QUALIDADE
DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Doutor Alencar Franco de Souza

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Doutora Priscila Ferreira de Sales Amaral

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Doutor Israel Teodoro Mendes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Dedico este trabalho, com todo o meu carinho e gratidão, à minha mãe, Maria Josefa de Resende, e ao meu pai, Heitor Garcia, pelo apoio incondicional, pela motivação constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis desta jornada. Agradeço também aos meus professores, que com paciência, dedicação e conhecimento, contribuíram imensamente para a minha formação. E, de maneira especial, à minha querida irmã, que partiu há muito tempo, mas cuja presença sinto em espírito. Sua lembrança e sua alma me fortalecem e me guiam, sendo uma luz constante no meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder forças, sabedoria e coragem para enfrentar cada etapa desta caminhada. Sem sua presença, nada disso seria possível. Obrigado, meu Deus, por nunca me abandonar, por ouvir minhas orações silenciosas, por levantar-me quando pensei em desistir e por permitir que este sonho se tornasse realidade.

À minha mãe, Maria, pelo amor incondicional, pelo apoio nos momentos mais difíceis e por sempre acreditar em mim. Seu exemplo de força e dedicação foi meu maior incentivo, a senhora sempre será o alicerce da minha vida. Ao meu pai, pelo apoio, pelos ensinamentos e por sempre estar presente. Sua força, seus conselhos e sua confiança em mim foram parte importante da minha trajetória. Muito obrigado por tudo. Ao meu tio, Tarcísio, por estar sempre ao meu lado com seus conselhos sábios e por ser uma presença constante e acolhedora ao longo da minha vida acadêmica.

Aos meus amigos, que conquistei durante a faculdade, levo cada um de vocês com carinho no coração. Obrigado por compartilharem momentos de aprendizado, descontração e apoio mútuo. E com todo o meu amor e carinho, agradeço profundamente à minha avó, Lais Aparecida de Resende, minha segunda mãe, que sempre esteve ao meu lado, me auxiliando, me acolhendo e me fortalecendo com seu amor e cuidado inigualáveis. Sua presença foi essencial em todos os momentos.

Estendo minha gratidão a toda a minha família, que, de diferentes formas, contribuiu com palavras de incentivo, gestos de carinho e apoio incondicional. Cada um de vocês foi parte importante desta jornada, e levo comigo o amor e a união familiar como pilares da minha caminhada.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador, Dr^o Alencar Franco de Souza, que foi mais que um guia acadêmico, foi um verdadeiro sustento nesta caminhada, um amigo, um mentor e um exemplo de profissionalismo e dedicação que levarei comigo por toda a vida. À minha coorientadora, Dr^a Priscila Ferreira de Sales Amaral, por toda a orientação, paciência e apoio técnico, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço, com imenso respeito e gratidão, a todos os professores do CEFET, que ao longo desta jornada acadêmica contribuíram significativamente para a minha formação pessoal e profissional. Cada aula, orientação, conselho e incentivo foram fundamentais para meu crescimento e desenvolvimento. Levo comigo não apenas o conhecimento técnico que me foi transmitido, mas também valores como ética, compromisso, perseverança e amor pelo aprendizado.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

*“Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e
se tornar um autor da própria história”*

Augusto Cury

RESUMO

O crescimento econômico tem afetado cada vez mais a concentração dos poluentes atmosféricos e impactando diretamente a saúde humana. Com isso, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma estação de monitoramento da qualidade do ar, com foco na coleta de dados ambientais utilizando sensores eletrônicos de baixo custo e microcontrolador. O sistema foi projetado para detectar e registrar parâmetros atmosféricos como ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO), fumaça, material particulado (MP), temperatura e umidade relativa. O projeto utiliza sensores como MQ-131, MQ-07, MQ-02, DSM-501 e DHT11, integrados ao microcontrolador. Os dados foram processados e armazenados em cartão SD, além de enviados por SMS utilizando o módulo GSM SIM800L. A estação foi instalada em ambiente real nas proximidades do campus Nepomuceno do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, em que coletou mais de 62.000 amostras ao longo do período de análise. A metodologia incluiu calibração experimental dos sensores, desenvolvimento de algoritmos em C/C++ na IDE Arduino, testes em protoboard, montagem da placa de circuito impresso e desenvolvimento de um invólucro. As análises dos dados permitiram identificar padrões e possíveis causas de variações diárias, semanais e mensais na qualidade do ar. Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), indicando vários episódios. Entre os principais resultados, destaca-se a viabilidade do uso de sensores de baixo custo para análises ambientais e a identificação de correlações entre variáveis meteorológicas e níveis de poluição. Por outro lado, o sistema apresentou algumas desvantagens, como a sensibilidade dos sensores a interferências entre gases e a necessidade de calibrações frequentes para garantir a confiabilidade dos dados. O projeto se mostra promissor como alternativa acessível para o monitoramento ambiental em áreas urbanas e rurais e até mesmo industriais, podendo servir de base para estudos acadêmicos e políticas públicas de saúde e meio ambiente.

Palavras-chave: Microcontrolador, qualidade do ar, sustentabilidade, saúde humana.

ABSTRACT

Economic growth has increasingly affected the concentration of atmospheric pollutants, directly impacting human health. Therefore, this work aims to develop an air quality monitoring station, focusing on collecting environmental data using low-cost electronic sensors and a microcontroller. The system is designed to detect and record atmospheric parameters such as ozone (O₃), carbon monoxide (CO), smoke, particulate matter (PM), temperature, and relative humidity. The project uses sensors such as MQ-131, MQ-07, MQ-02, DSM-501, and DHT11, integrated into the microcontroller. The data were processed and stored on an SD card, in addition to being sent via SMS using the SIM800L GSM module. The station was installed in a real environment near the Nepomuceno campus of the Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, where it collected more than 62,000 samples during the analysis period. The methodology included experimental calibration of the sensors, development of C/C++ algorithms in the Arduino IDE, breadboard testing, printed circuit board assembly, and development of a housing. Data analysis identified patterns and possible causes of daily, weekly, and monthly variations in air quality. The results were compared with the limits established by the World Health Organization (WHO) and the National Environmental Council (CONAMA), indicating several episodes. Among the main findings, we highlight the feasibility of using low-cost sensors for environmental analysis and the identification of correlations between meteorological variables and pollution levels. However, the system presented some drawbacks, such as the sensors' sensitivity to interference between gases and the need for frequent calibrations to ensure data reliability. The project shows promise as an affordable alternative for environmental monitoring in urban, rural, and even industrial areas, and could serve as a basis for academic studies and public health and environmental policies.

Keywords: Microcontroller, air quality, sustainability, Human health.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição típica do tamanho do número de partículas do ar urbano medido	21
Figura 2: Distribuição típica do tamanho do número de partículas do ar urbano medido a distribuição de massa.....	22
Figura 3: Diagrama de Pinos do Microcontrolador Atmega-328	26
Figura 4: Imagem do Arduino nano.	27
Figura 5: Imagem do Sensor MQ-131	28
Figura 6: Imagem do Sensor MQ-7.....	29
Figura 7: Sensor Mq-2.....	30
Figura 8: Imagem do Sensor DSM-501.....	32
Figura 9:Imagem do Sensor DHT11.	33
Figura 10: Imagem do Modulo Cartão de Memória.....	34
Figura 11: Imagem do GSM (SIM800L.....	35
Figura 12: Módulo RTC	35
Figura 13: Plataforma Arduino IDE	36
Figura 14: Interface do Kicad.....	37
Figura 15: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-131.....	38
Figura 16: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-131, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de ozônio.....	39
Figura 17: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-02.....	40
Figura 18: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-02, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de fumaça	41
Figura 19: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-07.....	41
Figura 20: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-07, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de monóxido de carbono.....	42
Figura 21: Curva de Sensibilidade do Sensor DSM501 em Função da Concentração de Partículas em Suspensão.....	44
Figura 22: Protótipo da estação de monitoramento na fase de testes	46
Figura 23: Protótipo da estação de monitoramento em fase de testes com implementação dos demais módulos	47
Figura 24: Fluxograma do Funcionamento da Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar	48
Figura 25: <i>Layout</i> da PCI da estação de monitoramento da qualidade do ar, desenvolvida no KiCad.....	49

Figura 26: Impressão 3D da Carcaça para Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar ...	50
Figura 27: Protótipo da Estação Ambiental Desenvolvido	50
Figura 28: Cópia da mensagem de monitoramento enviada via SMS pelo módulo GSM.....	52
Figura 29: Registro dos dados dos sensores salvos no cartão SD via Arduino	52
Figura 30: Mostra a Variação de Temperatura ao Longo de 24 horas -28 de Maio de 2025 ...	54
Figura 31: Variação de Temperatura ao longo do dia 26 de Maio ao dia 1 de Junho de 2025	55
Figura 32: Variação da Temperatura ao longo de 30 dias.....	56
Figura 33: Umidade ao Longo do dia 28 de Maio de 2025.....	57
Figura 34: Umidade Relativa ao Longo da semana do dia 26 de Maio ao dia 1 de Junho de 2025	58
Figura 35: Variação de Umidade Relativa do ar ao longo de 30 dias	59
Figura 36: Concentração de Ozônio ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025	60
Figura 37: Concentração de Fumaça ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025	61
Figura 38: Concentração de monóxido de carbono ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025	62
Figura 39: Concentração de Material Particulado ao Longo de 24 horas -28 de Maio de 2025	63
Figura 40: Análise Semanal da Concentração de Ozônio entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário	64
Figura 41: Análise Semanal da Concentração de Fumaça entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário	65
Figura 42: Análise Semanal da Concentração de Monóxido de Carbono entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário.....	66
Figura 43: Concentração de Material Particulado ao Longo de uma semana do dia 26 de Maio a dia 1 de Junho de 2025	67
Figura 44: Variação da Concentração de Ozônio ao Longo de 30 dias	68
Figura 45: Variação da Concentração de Fumaça ao Longo de 30 dias.....	69
Figura 46: Variação da Concentração de Monóxido de Carbono ao Longo de 30 dias	71
Figura 47: Concentração de Material Particulado ao Longo de 30 dias.....	72
Figura 48: Análise de Componentes Principais.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência da Temperatura e Umidade Relativa do ar na Concentração de Poluentes Atmosféricos.....	24
Tabela 2: Especificações Técnicas Arduino Nano	27
Tabela 3: Características do MQ-131, Sensor de O ₃	28
Tabela 4: Características do MQ-07, Sensor de CO.....	29
Tabela 5: Características do MQ-02, Sensor de gás inflamáveis	30
Tabela 6: Características do DSM-501.....	31
Tabela 7: Descrição das Pinagem.....	32
Tabela 8: Características do DHT11	33
Tabela 9: Relação do ar puro.....	43
Tabela 10: Resistores de carga	43
Tabela 11: Valor médio obtido de R _o	44
Tabela 12: Dados Horários de Parâmetros Ambientais para Análise de Componentes Principais (PCA).....	73
Tabela 13: Parâmetros de concentração aceitável	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OMS: Organização Mundial da Saúde

CO: Monóxido de carbono

CF₂: Tetrafluoretileno

Cl₂: Gás Cloro

Cl: Cloro

O₂: Oxigênio

O: Ozônio

OCDE: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

MP: Material Particulado

N₂O: Óxido Nitroso

Nox: Óxidos de Nitrogênio

COV: Carbono Orgânico Volátil

PWM: *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

SPI: *Serial Peripheral Interface* (Protocolo de Comunicação Síncrona)

VCC: Fonte De Alimentação

GND: Terra

USB: Universal Serial Bus

AVR: *Automatic Voltage Regulator* (Reguladores de Tensão Automáticos)

KB: Quilobyte

MHz: Mega Hertz

C°: Graus Celsius

Ppb: Partes Por Bilhão

Ppm: Partes Por Milhão

PCB: *Printed Circuit Board* (Placas de Circuito Impresso)

PCI: Placas de Circuito Impresso

GPL: Gases de Petróleo Liquefeito

CH₄: Metano

IDE: *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)

MP: Material Particulado

MP_{2,5}: Material Particulado 2,5 µm

MP₁₀: Material Particulado 10 µm

AVC: Acidente Vascular Cerebral

PCA: Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)

RTC: *Real Time Clock* (relógio de tempo real)

MOSI: *Master Out, Slave In* (Mestre sai, escravo entra)

MISO: *Master In, Slave Out* (Mestre entra, escravo sai)

SCK; *Serial Clock* (Relógio serial)

CS: *Chip Select* (Seleção de Chip)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivos Gerais	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2.REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Conceitos Gerais	18
2.1.1 Monóxido de Carbono (CO)	18
2.1.2 Ozônio Troposférico (O3)	18
2.1.3 Resíduos de Queima no Ar	19
2.1.4 Material Particulado	20
2.1.5 Temperatura	22
2.1.6 Umidade relativa	23
2.2 Microcontroladores	24
2.2.1 PIC Controlador de Interface Periférica.....	25
2.2.2 Microcontrolador ESP32	25
2.2.3 Microcontrolador STM 32.....	25
2.2.5 ATmega 328	25
2.3 Sensores	27
2.3.1 Sensor MQ-131	28
2.3.2 Sensor MQ-07	29
2.3.3 Sensor MQ-02	30
2.3.4 Sensor DSM-501	31
2.3.5 Sensor DHT11	32
2.3.7 Cartão de Memória	33
2.3.8 Módulo de Envio de Mensagem de Texto GSM SIM800I.....	34

2.3.9 Relógio de Tempo Real (RTC)	35
2.4 Plataformas	35
2.4.1 Arduino IDE.....	35
2.4.2 Software KiCad	36
3.METODOLOGIA.....	38
3.1 Análises dos Manuais	38
3.2 Desenvolvimento e Teste do Código.....	45
3.3 Montagem e Testes no Protoboard	45
3.4 Integração de Módulos e Salvamento de Dados	46
3.5 Projeto da Placa de Circuito Impresso	48
3.6 Instalação e Confeção de Caixa Protetora.....	49
4.RESULTADO E DISCUSSÕES.....	51
4.1Envio de Alertas via SMS e Gravação de Leituras no Cartão de Memória.....	51
4.2 Análise Meteorológica	53
4.2.1 Temperatura	53
4.2.2Umidade Relativa do Ar.....	56
4.3Análise da Qualidade do Ar para um Período de 24 Horas	59
4.4 Comportamento Semanal da Qualidade do Ar	63
4.5 Avaliação Mensal da Qualidade do Ar	67
4.6 Análise dos dados por PCA tridimensional.....	72
4.7 Análise dos Resultados Detectados em Relação aos Limites Recomendados pela OMS e CONAMA.....	75
5.CONCLUSÃO.....	78
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
GLOSSÁRIO	84
APÊNDICE A - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	85
APÊNDICE B - CÓDIGO DE AJUSTE DE DATA E HORA DO RTC.....	87

APÊNDICE C - CÓDIGO DE TESTE E AJUSTE DO MODULO GSM SIM (800L) ..	90
APÊNDICE D - CÓDIGO DE LEITURA DO SENSOR.....	91

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar contribui para mortes de uma quantidade expressiva de pessoas a cada ano. Não obstante, os problemas advindos da poluição ambientais estão crescendo em muitas nações em desenvolvimento. Embora os esforços políticos anteriores tenham conseguido reduzir partículas e gases poluentes na América do Norte e na Europa, efeitos adversos à saúde são encontrados até mesmo quando os níveis estão abaixo para ser considerado poluição do ar.

Esse fenômeno é responsável por trazer problemas ao meio ambiente. Como, por exemplo, o aumento da temperatura global e a ocorrência de desastres naturais provocados pelo efeito estufa; na saúde dos seres vivos, destaca-se o aumento de mortes causadas por doenças respiratórias associadas aos gases poluentes; e, na economia global, os elevados gastos com o tratamento de pacientes acometidos por essas doenças. (WEST; COHEN; DENTENER; BRUNEKREEF; ZHU; ARMSTRONG; BELL; BRAUER; CARMICHAEL; COSTA, 2016).

A poluição do ar é caracterizada pela presença de partículas em suspensão, substâncias químicas nocivas e microrganismos na atmosfera terrestre. Esses poluentes têm efeitos adversos nos organismos vivos, os quais incluem os seres humanos, os animais, e as plantas, além de causarem danos ao ambiente construído e aos ecossistemas naturais. A exposição prolongada à poluição do ar causa uma série de problemas de saúde, como alergias, doenças cardiovasculares, doenças respiratórias crônicas, e que pode resultar até em morte prematura (WEST; COHEN; DENTENER; BRUNEKREEF; ZHU; ARMSTRONG; BELL; BRAUER; CARMICHAEL; COSTA, 2016).

Estudos recentes destacam a gravidade desse problema em escala global. Um relatório divulgado pelo *Greenpeace* estimou que quase 1,2 milhão de indianos morrem anualmente devido a doenças relacionadas à poluição do ar (UENO; SOUZA, 2018). Esses números chamam a atenção e refletem a urgente necessidade de políticas públicas eficazes e inovações tecnológicas para mitigar os impactos da poluição atmosférica. Neste contexto, este trabalho propõe a construção de uma estação sobre os índices de poluição do ar, em que se emprega uma abordagem tecnológica baseada na medição de parâmetros atmosféricos por meio de sensores eletrônicos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Projetar e construir uma estação para medição e monitoramento da qualidade do ar, nas proximidades do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a análise técnica e prática dos sensores utilizados na detecção de poluentes atmosféricos;
- Desenvolver códigos de leitura, calibração e tratamento de sinais dos sensores;
- Integrar os módulos de sensores com sistemas de armazenamento e comunicação criando uma estação de monitoramento automatizada e portátil;
- Realizar a coleta de dados em campo e aplicar o reconhecimento de padrões não supervisionado para avaliar a correlação entre as variáveis estudadas e comparar os resultados ao longo de um dia, ao longo de uma semana e ao longo de 30 dias;
- Comprovar o funcionamento do sistema por meio de testes experimentais;
- Produzir informações que possam fundamentar estudos futuros sobre a poluição do ar e sua conexão com a saúde.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A poluição atmosférica é um dos principais problemas ambientais contemporâneos sendo responsável por causar danos relevantes à saúde humana, ao meio ambiente e à economia. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), quase toda a população do mundo (aproximadamente 99%) respira ar com uma qualidade abaixo dos parâmetros recomendados pela OMS, o que pode comprometer a saúde. Os dados advindos dessa Organização revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2022). Nesse sentido, o monitoramento de parâmetros inerentes ao nível de poluição consiste em uma iniciativa que une ciência, tecnologia e sustentabilidade para monitorar a qualidade do ar e auxiliar na formulação de políticas públicas eficazes.

2.1 Conceitos Gerais

A poluição do ar é definida como a presença de composto nocivos na atmosfera, como gases tóxicos, particulados e microrganismos, em concentrações que afetam negativamente a saúde humana e o meio ambiente. Dentre os vários poluentes, são destacados: monóxido de carbono (CO), ozônio troposférico (O₃), detecção de fumaças e material particulado.

2.1.1 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um óxido neutro que não reage com ácidos, bases ou água. É considerado como um composto de grande risco para a saúde humana, cuja inalação pode levar à morte por asfixia. Isso ocorre porque, ao ser inalado, se une à hemoglobina que, conforme a necessidade, se liga ao oxigênio. Embora a concentração atmosférica de CO seja geralmente inferior a 0,001%, esta pode se tornar superior em áreas urbanas ou ambientes fechados, tais como estacionamentos subterrâneos (ÓRFÃO, 2011).

A intoxicação por esse gás é identificada quando sua concentração superam os limites estabelecidos e tornam-se alta. Ele é comumente encontrado na fumaça dos incêndios. Em situações cuja intoxicação extrapola demasiadamente o limite máximo, ou seja, em casos mais sérios, são fornecidas elevadas doses de oxigênio, normalmente por meio de ventiladores. Além disso, o uso de uma máscara facial acelera a eliminação do monóxido de carbono do sangue amenizando os sintomas ocorre a substituição do oxigênio na cadeia de transporte de elétrons.

2.1.2 Ozônio Troposférico (O₃)

Enquanto o ozônio estratosférico atua como um escudo protetor para a vida na Terra, o ozônio ao nível do solo representa uma ameaça significativa para plantas e animais, incluindo

os humanos (DONZELLI; SUAREZ-VARELA, 2024). Quando a radiação ultravioleta, proveniente da energia solar, interage com o gás oxigênio, ela promove a quebra dessa substância simples em dois átomos de oxigênio, no fenômeno denominado dissociação do oxigênio molecular (AMARAL, 2023).

É importante ressaltar que a qualidade do ar é influenciada por outras alterações ambientais, que incluem a circulação do ar, os ciclos hidrológicos e temperaturas, que provavelmente sofrerão alterações devido aos impactos combinados da alteração do ozônio estratosférico e do clima. O ozônio troposférico apresenta efeitos relevantes sobre a morbidade e a mortalidade humanas, contribuindo para o agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Como frequentemente está presente em conjunto com outros poluentes atmosféricos, torna-se desafiador isolar seus impactos específicos sobre a saúde (MADRONICH; SHAO; WILSON; SOLOMON; LONGSTRETH; TANG, 2015).

Vários estudos extrapolaram os efeitos da exposição ao O₃ para o futuro. Com base no estudo da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), as mortes prematuras por ozônio troposférico aumentarão cerca de 0,75 milhões por ano em todo o mundo até 2050. Os maiores aumentos são previstos na Índia (130 mortes prematuras por milhão por década até 2050). Porém, nos países da OCDE, estes aumentos estão grandes quanto (95 mortes prematuras por milhão por década até 2050), principalmente como resultado de maior sensibilidade em uma população envelhecida (OECD,2012).

A simulação das interações entre as concentrações de ozônio troposférico, precursores do ozônio na atmosfera, e as alterações climáticas indica que, até 2050, as concentrações de O₃ subirão em nações emergentes e cairão em nações desenvolvidas, em virtude de variações regionais nas emissões futuras (OECD,2012).

Para as plantas, o poluente atmosférico mais importante é o O₃, uma vez que partículas não são apresentadas efeitos diretos substanciais sobre as plantas. Foi postulado que os rendimentos das principais culturas (por exemplo, trigo, arroz, soja e milho) seriam reduzidos em cerca de 5% por causa do O₃. No entanto, isso pode ser compensado por um aumento no rendimento da maioria das culturas em cerca de 13% por causa das concentrações aumentadas de CO₂, dependendo da disponibilidade de água (MADRONICH; SHAO; WILSON; SOLOMON; LONGSTRETH; TANG, 2015).

2.1.3 Resíduos de Queima no Ar

Conforme a intensidade e o tamanho dos incêndios florestais se intensificam, crescem também os custos relacionados. Portanto, os efeitos da fumaça de incêndios florestais na saúde

pública estão ganhando maior relevância e precisam do cuidado de todos os responsáveis pelas decisões de gestão da qualidade do ar e do solo, bem como pela política de incêndios florestais, que salvaguardam a saúde do público e das comunidades vulneráveis, além das partes interessadas que são afetadas pela política de incêndios florestais (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022).

As emissões provenientes de incêndios florestais são complexas, tanto fisicamente quanto quimicamente, e a geração de fumaça e o transporte atmosférico relacionados são afetados por diversos fatores, que incluem, mas não se restringe ao tipo de combustível, à natureza do incêndio, ao ritmo de uso de combustível e às condições climáticas. As principais emissões primárias de incêndios florestais que pioram a qualidade do ar incluem partículas do ar ambiente, como partículas finas e grossas (MP) e gases, monóxido de carbono (CO), metano, óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrogênio (NO_x), carbono orgânico volátil (COV), bem como muitos outros tóxicos do ar ((URBANSKI; HAO; BAKER, 2008). Não há correlação entre a exposição à fumaça de incêndios florestais e a mortalidade respiratória. As informações epidemiológicas que vinculam a exposição à fumaça de incêndios florestais à mortalidade e morbidade cardiovascular ainda são mistas e não conclusivas.

Globalmente, a poluição do ar foi responsável por cerca de 4,2 milhões de mortes em 2019, sendo 70 % delas por doenças cardiovasculares (MILLER; CESARE; RAHIMZADEH; ADEOYE; PEREL; TAYLOR; SHRIKHANDE; ARMSTRONG-WALENCZAK; SHAH; BERENSTEIN, 2024). Sendo assim, é necessário obter mais informações que estabeleçam com exatidão o risco de consequências cardiovasculares para a saúde, que englobam eventos clínicos comuns, letais, incapacitantes e custosos, como infarto do miocárdio, derrame, insuficiência cardíaca, alterações do ritmo cardíaco e morte repentina. Informações de saúde, incluindo resultados clínicos recolhidos em regiões geográficas mais extensas, com um número maior de indivíduos expostos e por períodos mais extensos, poderiam ajudar a estabelecer de forma mais precisa o risco de consequências negativas para a saúde (BROOK et al., 2010).

2.1.4 Material Particulado

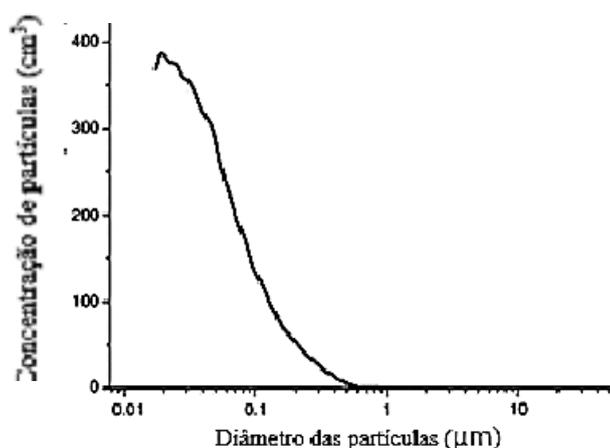
O material particulado na atmosfera é composto por micropartículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, também conhecidas como aerossóis. O tamanho do MP é reconhecido como importante para os impactos na saúde. Partículas menores que $2,5 \mu m$ (PM 2,5) atingem mais profundamente os pulmões do que partículas maiores, normalmente medidas como todas as partículas menores que $10 \mu m$ (PM 10).

A presença de material particulado na troposfera provoca impactos negativos consideráveis na saúde. As partículas ultrafinas são geradas diretamente pela combustão e atividade fotoquímica. São instáveis e persistem brevemente, agregando-se para formar partículas de acumulação maiores. Enquanto as partículas finas e ultrafinas são formadas principalmente por emissões de escapamentos veiculares, parte das partículas grossas pode ser gerada pela combustão, mas principalmente por processos mecânicos que quebram o material de uma variedade de fontes não combustíveis em pó (VALAVANIDIS; FIOTAKIS; VLACHOGIANNI, 2008).

As distribuições de partículas podem ser expressas em termos de número ou massa. No que diz respeito ao número, a maior parte das partículas transportadas pelo ar se localiza na região ultrafina. Por exemplo, em um ambiente urbano onde as emissões de veículos automotores são uma fonte dominante de poluição, mais de 80% da matéria particulada em termos de número está na faixa ultrafina. No entanto, a massa total dessas partículas é geralmente insignificante quando comparada à massa de um pequeno grupo de partículas grandes, as quais representam a maior parte da massa de partículas transportadas pelo ar (MORAWSKA; THOMAS; BOFINGER; WAINWRIGHT; NEALE, 1998).

A Figura 1 representa a relação entre o número de partículas em função do diâmetro, onde o eixo horizontal mostra o diâmetro das partículas em micrômetros e o eixo vertical representar a concentração por centímetro cúbico (MORAWSKA, 2000). Além da quantidade de partícula no ar é essencial considerar a massa das partículas em suspensão, como ela tem uma relação direta com os efeitos fisiológicos causados à saúde humana.

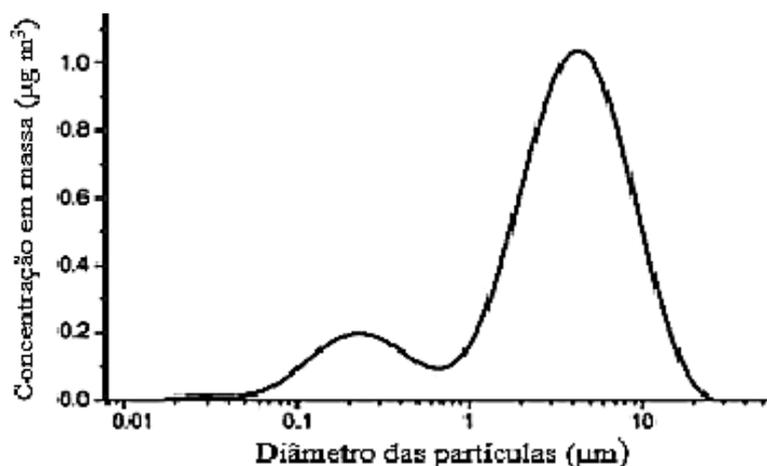
Figura 1: Distribuição típica do tamanho do número de partículas do ar urbano medido



Fonte: MORAWSKA, (2000).

A distribuição de massa em função da partícula permite a análise sobre quais as faixas de tamanho representam um maior efeito significativo para a carga total de material particulado no ar. A Figura 2, apresenta essa distribuição destacando os principais grupos de partículas por tamanho. O eixo horizontal é representado o diâmetro das partículas que varia de 0,01 micrometro a um valor superior a 10 micrometro.

Figura 2: Distribuição típica do tamanho do número de partículas do ar urbano medido a distribuição de massa



Fonte: MORAWSKA, (2000).

2.1.5 Temperatura

A temperatura pode ser entendida fundamentalmente como a medida da velocidade de agitação das partículas. Os termômetros são instrumentos utilizados para medir a temperatura máxima e mínima do ar a uma altura de cerca de 1,5 m do solo, como nas estações de trem (INMET, 2023). A temperatura do ar exerce grande influência na dispersão de gases poluentes na atmosfera. Em temperaturas mais elevadas, o ar tende a subir, promovendo a convecção e facilitando a dispersão vertical dos gases. Em dias frios, especialmente durante a madrugada e o início da manhã, pode ocorrer a inversão térmica. Assim, a temperatura atua diretamente na dinâmica da qualidade do ar e na exposição da população aos poluentes. As condições meteorológicas, especialmente a temperatura e a estabilidade atmosférica, são fatores críticos que determinam o transporte, a transformação e a remoção dos poluentes atmosféricos (SEINFELD; PANDIS, 2016).

A latitude, que influencia a incidência e a direção da radiação solar, é um dos principais fatores que determinam a variação espacial da temperatura do ar. Além disso, características como a cobertura da superfície, a proximidade de grandes reservatórios hídricos, o relevo, os

ventos predominantes e as correntes marítimas também exercem influência significativa sobre essa variação.

Verifica-se que o relevo tem um efeito atenuador sobre a temperatura, principalmente porque esse parâmetro normalmente diminui com a altitude crescente a uma taxa média de 0,6°C a cada 100 metros. Sendo assim, pode-se inferir que a altura é um importante fator que influencia na temperatura dos trópicos. A relativa uniformidade térmica que predomina nos trópicos é distorcida principalmente pelos efeitos da altura. De fato, as grandes diferenças de temperatura entre distâncias curtas nos trópicos são usualmente devidas aos efeitos da variação da altitude. Entretanto, vale a pena ressaltar que o índice de variação térmica se mostra variável e controlável principalmente pela elevação e nebulosidade (AYOADE, 1996, p.53- 54).

A distância de corpos hídricos causa os efeitos da continentalidade, onde a superfície continental se aquece e se esfria mais rapidamente do que a superfície hídrica. Esse efeito faz com que seja possível observar que a amplitude térmica anual é menor nas localidades costeiras do que nas localidades continente adentro (PENTEADO, 2017).

2.1.6 Umidade relativa

O vapor d'água corresponde um pequeno volume na composição da atmosfera, mas tem grande relevância na compreensão do tempo e do clima. A quantidade de vapor d'água num certo volume de ar é uma indicação da capacidade potencial da atmosfera para produzir precipitação. Este pode absorver tanto a radiação solar quanto a terrestre e, assim, desempenha o papel como regulador térmico do sistema Terra-atmosfera. Em particular, ele exerce um grande efeito sobre a temperatura do ar (AYOADE, 1996, p.128).

A umidade relativa é uma medida utilizada para quantificar a quantidade de vapor d'água presente em uma porção de ar. De acordo com Ayoade (1996, p. 143), essa grandeza é definida como a relação entre o teor real de umidade de uma amostra de ar e a quantidade máxima de umidade que esse mesmo volume de ar pode conter, nas mesmas condições de temperatura e pressão, quando está saturado. Além de ser facilmente determinada por meio de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, a umidade relativa indica o grau de saturação do ar.

A umidade relativa do ar também é um fator que exerce influência significativa sobre a concentração de gases poluentes na atmosfera. Em condições de baixa umidade, a dispersão dos poluentes tende a ser mais limitada, favorecendo sua permanência no ar próximo ao solo. Isso pode aumentar os efeitos adversos à saúde, especialmente em áreas urbanas com alta emissão de poluentes. Além disso, a baixa umidade pode intensificar a ação de poluentes gasosos como o ozônio, aumentando sua reatividade. Por outro lado, em ambientes com alta

umidade, a presença de gotículas de água no ar pode facilitar a absorção ou deposição úmida de alguns poluentes, reduzindo temporariamente sua concentração (JACOB, 1999).

A Tabela 1 apresentada as condições meteorológicas e suas influencias nos poluentes atmosféricos. Em baixas temperaturas, há redução do ozônio, mas aumento do monóxido de carbono e do material particulado, devido à menor dispersão dos poluentes. Em altas temperaturas, o ozônio aumenta por causa das reações fotoquímicas e tanto o monóxido de carbono tanto o material particulado também tendem a se acumular.

Quanto à umidade, a baixa umidade favorece o aumento do ozônio e do material particulado, pois reduz a remoção de poluentes do ar, enquanto tem pouco efeito sobre o monóxido de carbono. Por outro lado, a alta umidade contribui para a redução do ozônio e do material particulado, mas também apresenta influência limitada sobre o monóxido de carbono. Essa tabela ajuda a entender como as condições climáticas como temperatura e umidade relativa do ar afetam a qualidade do ar.

Tabela 1: Influência da Temperatura e Umidade Relativa do ar na Concentração de Poluentes Atmosféricos

Parâmetros	Ozônio	Monóxido de Carbono	Material Particulado
Baixa temperatura	Reduz	Aumenta	Aumenta
Alta temperatura	Aumenta	Favorece acúmulo	Aumenta
Baixa umidade	Aumenta	Pequeno efeito	Aumenta
Alta umidade	Reduz	Pequeno efeito	Reduz

Fonte: Adaptado de (HOLMES; MORRISON, 2008; JACOB, 1999; MILLER; SEINFELD, 2002; SEINFELD; PANDIS, 2016).

2.2 Microcontroladores

Da mesma forma que os seres humanos obtêm informações através dos seus sentidos e as processam utilizando o cérebro, os sistemas eletrônicos realizam essas funções através de sensores e dispositivos digitais de processamento, como microcontroladores. Apesar de serem pequenos, esses aparelhos são considerados inteligentes e indispensáveis em diversos setores (industrial, automobilístico, aéreo, médico, eletrônicos de consumo e eletrodomésticos) tornando-se quase impossível verificar uma sociedade que não os utilize. Alguns exemplos de microcontroladores foram apresentados abaixo.

2.2.1 PIC Controlador de Interface Periférica

Uma família de microcontroladores desenvolvida pela Microchip Technology, os microcontroladores PIC, são populares por sua facilidade de uso, ampla gama de variantes disponíveis e preço acessível. A família PIC inclui várias séries, como PIC10, PIC12, PIC16 e PIC18, cada uma com diferentes capacidades e aplicações. Um exemplo bem comum é o PIC 16F877A é baseado em uma arquitetura eficiente de 8 bits com recursos de pipelining, tornando-o uma escolha versátil para sistemas embarcados. Com seu comprimento de palavra de instrução de 14 bits, ele suporta cerca de 35 instruções, permitindo uma ampla gama de operações, incluindo aritmética, lógica, transferência de dados e I (SAMIULLAH; IRFAN; RAFIQUE, 2023).

2.2.2 Microcontrolador ESP32

O ESP32 é um dispositivo de baixo custo e baixo consumo de energia, criado pela Espressif Systems, projetado para uso em dispositivos móveis, eletrônicos vestíveis e aplicações de IoT. Seus recursos de economia de energia são especialmente úteis em cenários de hubs de sensores de IoT com baixo ciclo de trabalho. (SAMIULLAH; IRFAN; RAFIQUE, 2023).

2.2.3 Microcontrolador STM 32

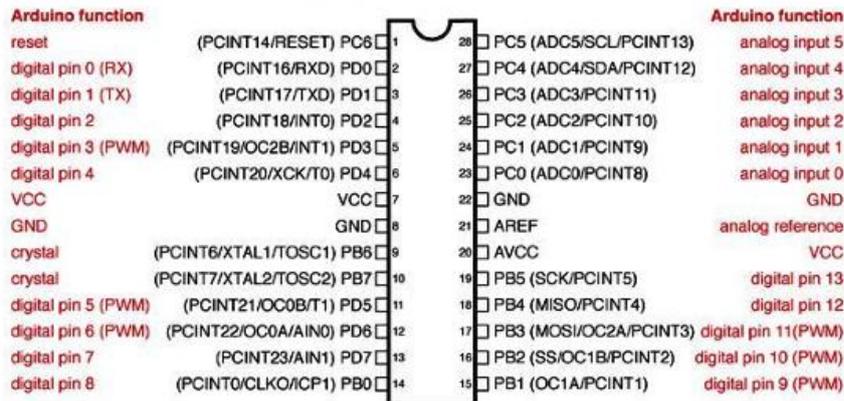
O microcontrolador STM32, desenvolvido pela STMicroelectronics, é amplamente utilizado em sistemas embarcados por sua alta flexibilidade, desempenho e variedade de recursos. Entre suas principais vantagens, destaca-se a grande variedade de modelos disponíveis, o que permite escolher dispositivos conforme as necessidades de desempenho, consumo de energia e custo. Esses microcontroladores são baseados em um sistema que garante compatibilidade com diversas ferramentas e bibliotecas amplamente utilizadas na indústria. No entanto, o STM32 também apresenta algumas desvantagens. A principal delas é a curva de aprendizado mais acentuada quando comparado a plataformas como o Arduino, especialmente devido à necessidade de configurar detalhes como o clock, os periféricos e as interrupções. As ferramentas de desenvolvimento, apesar de poderosas, podem ser complexas para iniciantes e exigem familiaridade com programação.

2.2.5 ATMega 328

O ATMega-328 possui 28 pinos. Ele é composto por 6 entradas analógicas, conforme ilustrado no diagrama de pinos. As entradas analógicas podem ser indicadas como PC0 a PC5. Esses pinos de entrada analógica recebem um sinal de tempo contínuo, que funciona como um ponto de entrada analógico para o sistema. Ademais, também inclui 12 entradas digitais. Os

pinos PB6 e PB7 atuam com um cristal para gerar um sinal de clock. Usando esses cristais, podendo gerar os sinais de clock e, através desses sinais de clock, podendo usar esses sinais de clock, o pino PC6 é aquele onde pode ser usado para a opção de reinicialização (KUMAR *et al.*, 2015). O diagrama de pinos do microcontrolador ATmega-328 pode ser mostrado abaixo.

Figura 3: Diagrama de Pinos do Microcontrolador Atmega-328



Fonte: (SUDHAN; KUMAR; PRAKASH; DEVI; P., 2015).

Os microcontroladores ATmega são comercializados em plataformas de desenvolvimento como Arduino UNO, Arduino Leonardo, Arduino Mega, Arduino, Arduino Nano, Arduino Due e Micro Arduino. Os microcontroladores ATmega são programados usando a IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), local onde pode ser utilizado para criar o programa que será executado nos aplicativos. Este programa é compatível com as linguagens de programação C e C++. Trata-se inteiramente de uma linguagem de alto padrão.

A escolha do Arduino Nano para o projeto e uma combinação de fatores que o tornam especialmente adequado para aplicações compactas, de baixo consumo de energia e com necessidade de processamento confiável em tempo real. Outro fator importante é a facilidade de utilização, tanto em termos de programação quanto de integração de hardware. A plataforma Arduino oferece uma IDE amigável, extensa documentação e uma comunidade ativa, o que facilita o desenvolvimento, a depuração e a expansão do sistema. Ademais, o Arduino Nano pode ser alimentado tanto por USB quanto por fontes externas, o que proporciona flexibilidade no fornecimento de energia em distintos contextos de uso.

Em comparação com outras opções como o STM32 ou o ESP32, que possuem maior poder de processamento, o Arduino Nano apresenta uma curva de aprendizado menor, porém é indicado para projetos que não exigem alto desempenho computacional. Portanto, sua escolha representa um equilíbrio ideal entre simplicidade, tamanho, custo e capacidade, atendendo perfeitamente às necessidades do projeto proposto. Na Tabela 2: Especificações Técnicas

Arduino Nano mostra as especificações técnicas do Arduino Nano como tensão de operação e memória.

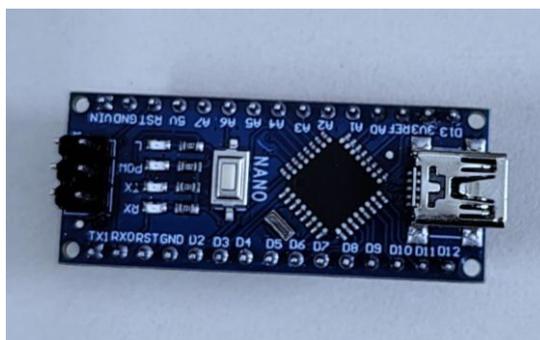
Tabela 2: Especificações Técnicas Arduino Nano

Arduino Nano	Especificações
Microcontrolador	ATmega328P
Arquitetura	AVR
Tensão de Operação	5Volts
SRAM	2KB
Memória Flash	32KB/2KB
Tensão de Entrada	7-12 Volts
Corrente DC	40 miliamperes
EEPROM	1KB
Analógico I/O Pins	8
Frequência do Oscilador	16MHz

Fonte: Autor (2025).

A Figura 4, mostra a placa Arduino Nano, uma das versões mais compactas e populares da plataforma Arduino, ideal para projetos compactos. Esta versão utiliza o microcontrolador ATmega328P.

Figura 4: Imagem do Arduino nano



Fonte: Autor (2025).

2.3 Sensores

Os sensores são capazes de detectar e responder a estímulos físicos provenientes do ambiente, convertendo essas variáveis em sinais elétricos que podem ser interpretados por sistemas eletrônicos como microcontroladores. Eles desempenham um papel fundamental em sistemas automatizados sendo amplamente utilizados para monitorar parâmetros como temperatura, umidade, concentração de gases. Através dos sensores, os sistemas adquirem informações do meio externo, permitindo a tomada de decisões, o controle de processos e a

geração de dados importantes para análise e diagnóstico em diversas áreas, como saúde, meio ambiente, indústria, agricultura e automação.

2.3.1 Sensor MQ-131

O sensor MQ-131 é sensível a partículas de ozônio (O_3). As moléculas de ozônio são voláteis e sempre buscam um local para liberar um átomo de oxigênio através da oxidação, a fim de se converterem numa molécula estável de oxigênio (O_2). A Tabela 3, apresentada as principais características técnicas de funcionamento do sensor MQ-131, amplamente utilizado em projetos de monitoramento ambiental com microcontroladores. Assim, esta tabela sintetiza os limites operacionais e de detecção do sensor, funcionando como um guia para assegurar seu funcionamento eficiente e preciso.

Tabela 3: Características do MQ-131, Sensor de O_3

Características do Sensor	Valores típicos
Potência de aquecimento	<900mW
Tensão de aquecimento	5 V
Resistencia de aquecimento	31 Ω
Amplitude da temperatura Ambiente	-10°C a 50°C
Amplitude da Humildade Relativa	5%-95%
Amplitude de detecção de O_3	10ppb - 1000ppb

Fonte: Autor (2025).

A Figura 5, mostra o sensor MQ-131, montado em uma placa de circuito impresso (PCI), usado especificamente para a detecção de ozônio (O_3) no ar. Este tipo de sensor é do tipo eletroquímico com aquecedor interno.

Figura 5: Imagem do Sensor MQ-131



Fonte: Autor (2025).

2.3.2 Sensor MQ-07

O sensor MQ-07 é um dispositivo de detecção de gases utilizado para identificar monóxido de carbono (CO). Este dispositivo apresenta características como alta sensibilidade ao monóxido de carbono (CO), estabilidade e durabilidade prolongada. A Tabela 4 apresenta as características técnicas do sensor. O mesmo tem uma faixa de detecção que varia de 20 ppm a 2000 ppm (partes por milhão) (HANWEI ELECTRONICS, 2025). Isso significa que pode detectar desde níveis baixos de monóxido de carbono, que podem ser encontrados em ambientes mal ventilados, até concentrações altas que representam risco à saúde humana. Isso faz com que o mesmo seja apropriado para usos como sistemas de alarme em residências, indústrias ou veículos.

Tabela 4: Características do MQ-07, Sensor de CO

Características do Sensor	Valores típicos
Potência de aquecimento	< 350mW
Tensão de aquecimento	5 V
Resistencia de aquecimento	33Ω
Amplitude da temperatura Ambiente	-20°C a 50°C
Amplitude da Humildade Relativa	< 95%
Amplitude de detecção de CO	20ppm - 2000ppm

Fonte: Autor (2025).

A Figura 6, mostra o sensor MQ-07, montado em uma placa de circuito, usado especificamente para a dectecção de monoxido de carbono.

Figura 6: Imagem do Sensor MQ-7



Fonte: Autor (2025).

2.3.3 Sensor MQ-02

O sensor MQ-02, produzido a partir de material semicondutor SnO_2 , com alta sensibilidade a gases inflamáveis, como GLP e CH_4 , além de outros gases, como CO e fumaça. É um material que apresentar baixa condutividade em ar limpo, enquanto que se o sensor detectar a presença de gás, a condutividade do sensor aumentará. Esse aumento da condutividade do sensor de gás é linear com o aumento da concentração de gás (PUTRA; RIVAI; IRFANSYAH, 2019). A

Tabela 5, descreve as características técnicas do sensor MQ-02, um dos sensores mais utilizados em sistemas de segurança.

Tabela 5: Características do MQ-02, Sensor de gás inflamáveis

Características do Sensor	Valores típicos
Potência de aquecimento	< 800mW
Tensão de aquecimento	5 V
Resistencia de aquecimento	33 Ω
Amplitude da temperatura Ambiente	-20°C a 50°C
Amplitude da Humildade Relativa	< 95%
Amplitude de detecção de GLP e Propano	200ppm - 5000ppm
Amplitude de detecção de Metano	5000ppm - 20000ppm
Amplitude de detecção de Álcool	100ppm - 2000ppm
Amplitude de detecção de Butano	300ppm - 5000ppm

Fonte: Autor (2025).

A na presença de múltiplos gases ao mesmo tempo pode causar leituras imprecisas pelo efeito de interferência.

Figura 7, mostra o sensor MQ-02, esse sensor na presença de múltiplos gases ao mesmo tempo pode causar leituras imprecisas pelo efeito de interferência.

Figura 7: Sensor Mq-2



Fonte: O autor (2025).

2.3.4 Sensor DSM-501

O módulo DSM-501 é usado para identificar partículas suspensas no ar, sendo frequentemente usado em aplicações de monitoramento da qualidade do ar e em aparelhos como purificadores de ar (SHINYEI TECHNOLOGY CO., LTD., 2007). O seu funcionamento é fundamentado em uma técnica óptica que emprega a dispersão da luz na presença de material particulado as partículas modificam a intensidade da luz refletida, que é identificada por um fotodiodo. Ele é apto a reconhecer partículas como poeira fina e aerossóis, como as partículas PM 10 (menores que 10 μm) e, em menor escala, as partículas PM 2,5. O sensor disponibiliza saídas digitais ou analógicas, possibilitando a medição em tempo real da concentração de partículas e a estimativa do índice de qualidade do ar.

A Tabela 6, descreve os parâmetros operacionais do sensor DSM-501. O sensor tem um consumo de energia de 90 mA, o que representa um consumo moderado e com corrente limitada. Sua tensão de alimentação é de 5 V, o que o torna compatível com a maioria dos microcontroladores.

Tabela 6: Características do DSM-501

Características do Sensor	Valores típicos
Consumo de Energia	90mA
Tensão de Alimentação	5 V
Sinal de Saída	PWM
Amplitude da Temperatura Ambiente	-10°C a 65°C
Amplitude da Humidade Relativa	< 95%
Tempo de Estabilização	1 minuto após ligar
Tamanho de Partículas Detectável	Aproximadamente 1 μm

Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 7, está representado os pinos do sensor DSM-501 e suas respectivas funções. O pino 1, chamado *Control*, é responsável por ativar ou desativar a saída Vout1. O pino 2, Vout2, fornece uma saída de sinal PWM contínua que varia com a concentração de partículas no ar. O pino 3, Vcc, é utilizado para alimentar o sensor com 5 volts. O pino 4, Vout1, também fornece um sinal PWM. Por fim, o pino 5, GND, corresponde ao pino terra do circuito, servindo como referência elétrica para o funcionamento do sensor.

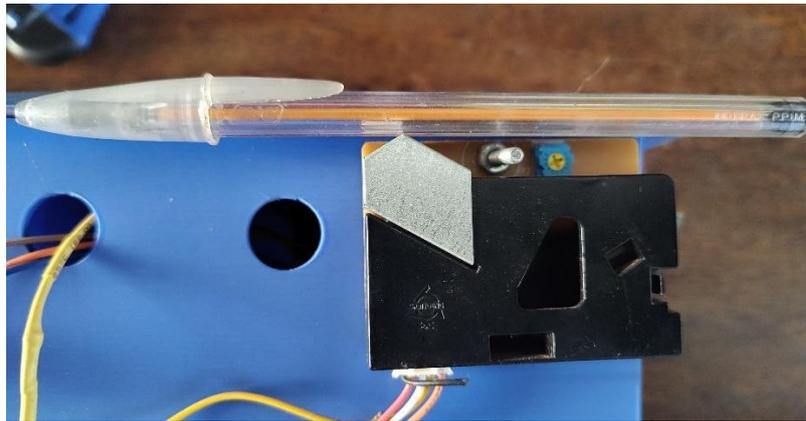
Tabela 7: Descrição das Pinagem

Número	Nome do pino	Descrição
#1	Control	Vout 1 control
#2	Vout2	Vout 2 output(PWM)
#3	Vcc	Fonte de Alimentação
#4	Vout 1	Vout 1 output(PWM)
#5	GND	Terra

Fonte: Autor adaptado de *ELECROW* (2025).

A Figura 8, mostra um sensor DSM-501, esse sensor detecta a densidade de partículas em suspensão no ar usando um feixe de luz infravermelha refletido por partículas que entram pela abertura.

Figura 8: Imagem do Sensor DSM-501



Fonte: Autor (2025).

2.3.5 Sensor DHT11

O DHT11 é um sensor amplamente utilizado para medir temperatura e umidade relativa do ar. O mesmo é bastante popular em projetos de eletrônica, principalmente com Arduino, devido ao seu baixo custo e facilidade de uso. Este sensor inclui um componente de medição de umidade do tipo resistivo e um componente de medição de temperatura. A Tabela 8, apresenta os parâmetros básicos de funcionamento do sensor DHT11, que é amplamente usado para medir temperatura e umidade relativa, seu período de amostragem de 1 segundo que é suficiente para a maioria das aplicações.

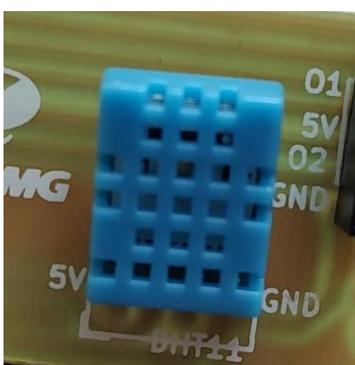
Tabela 8: Características do DHT11

Características do Sensor	Valores típicos
Fonte de energia (CC)	5V
Corrente	1mA
Período de amostragem	1 (segundo)

Fonte: Autor (2025).

A Figura 9, mostra a imagem do DHT instalado na estação, ele é um sensor simples e eficiente, com baixo consumo de energia, ideal para este tipo de projeto.

Figura 9: Imagem do Sensor DHT11

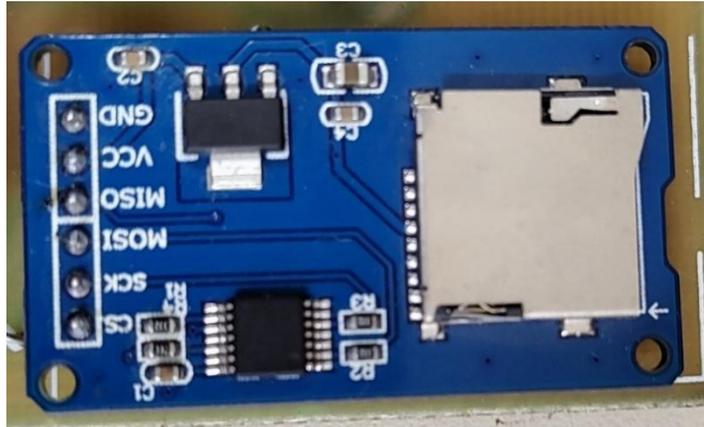


Fonte: Autor (2025).

2.3.7 Cartão de Memória

O módulo de cartão de memória para Arduino é um componente importante para projetos que necessitam de armazenamento externo de dados, como gravação de medições de sensores e até armazenamento de arquivos de áudio e imagens. O mesmo funciona com cartões microSD e microSDHC, geralmente com capacidade de até 4 GB, e utiliza a interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) para se comunicar com o microcontrolador. Seu circuito possui um regulador de tensão integrado que permite a alimentação tanto em 5V quanto em 3,3V, além de um conversor de nível lógico para garantir compatibilidade entre os sinais de 5V do Arduino e os 3,3V exigidos pelo cartão microSD. O módulo conta com pinos específicos para a comunicação SPI, incluindo MOSI (*Master Out, Slave In*), MISO (*Master In, Slave Out*), SCK (*Serial Clock*) e CS (*Chip Select*), onde o pino *Chip Select* (CS) é responsável por ativar o módulo durante a comunicação. Na Figura 10, esse módulo é útil em aplicações como estações meteorológicas, monitoramento de variáveis ambientais e sistemas de registro de dados industriais.

Figura 10: Imagem do Modulo Cartão de Memória



Fonte: Autor (2025).

2.3.8 Módulo de Envio de Mensagem de Texto GSM SIM800L

O termo GSM significa Sistema Global para Comunicação Móvel, foi desenvolvido pelo Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações. O SIM800L é um módulo de celular compacto e de baixo custo, projetado para enviar e receber mensagens de texto e atender chamadas (KANANI; PADOLE, 2020).

Após conectar o módulo à fonte de energia, o mesmo inicializa automaticamente, busca redes celulares e realiza autenticação. O LED integrado no estado de um em um segundo indica não conectado, piscado a cada três segundos é indicador de módulo conectado à rede. O SIM800L opera com uma tensão de alimentação entre 3,8 V até 4,2 V. Seu consumo de energia é inferior a 2,0 mA em modo de espera e abaixo de 7,0 mA em modo ocioso, enquanto a transmissão GSM consome, em média, 350 mA, podendo atingir picos de até 2 A (SIMCOM WIRELESS SOLUTIONS, 2015). Além disso, o SIM800L suporta frequências Quad Band (850 / 950 / 1800 / 1900 MHz). Na Figura 11, mostra o módulo GSM SIM800L, usado para comunicação com o celular em projetos. Esse módulo permite enviar e receber SMS, realizar chamadas e até conectar-se à internet.

Figura 11: Imagem do GSM (SIM800L)



Fonte: Autor (2025).

2.3.9 Relógio de Tempo Real (RTC)

O RTC (*Real Time Clock*) é um dispositivo que opera com uma bateria a parte do circuito de alimentação da placa principal, assim sua utilidade é manter informações como data e hora atualizados no sistema mesmo que a fonte de alimentação tenha sido desligada (Mahzan et al., 2017). O RTC é um relógio de baixo consumo de energia e alta precisão, mostrado na Figura 12 Este módulo fornece dados de hora e data completos com ajustes automáticos para meses com 30 dias. Pode escolher o formato da hora que desejar, 12 horas ou 24 horas. Ele serve para registrar e manter o horário atual, mesmo durante quedas de energia ou reinicializações do sistema. Isso é possível graças a uma bateria de lítio interna (FIGUEIRÓ, 2022).

Figura 12: Módulo RTC



Fonte: Oliveira, E. (2018).

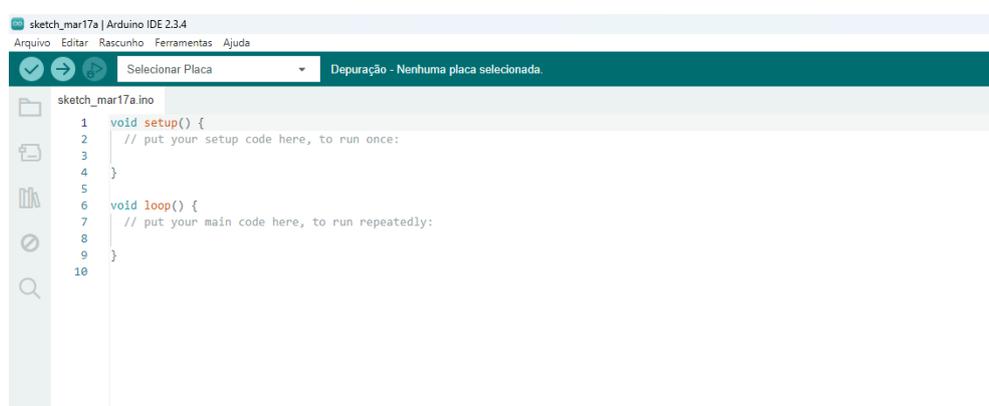
2.4 Plataformas

2.4.1 Arduino IDE

A plataforma Arduino IDE, também conhecida como Ambiente de Desenvolvimento Integrado, é um dos recursos mais difundidos e acessíveis para a criação de projetos eletrônicos e de programação. Criada para simplificar o uso de microcontroladores da família Arduino, a

IDE proporciona um ambiente intuitivo e simples, possibilitando que programadores novatos e experientes possam desenvolver e testar seus projetos de maneira eficaz. A plataforma é compatível com várias placas Arduino e outras compatíveis, empregando uma linguagem de programação fundamentada em C/C++. Isso permite a programação através de um editor de código, compilador e ferramentas de transferência direto para a placa. Com uma comunidade engajada e um extenso acervo de bibliotecas e tutoriais. A Figura 13, mostra a interface do Arduino IDE, que é o ambiente de desenvolvimento usado para compilar e enviar códigos para placas Arduino.

Figura 13: Plataforma Arduino IDE



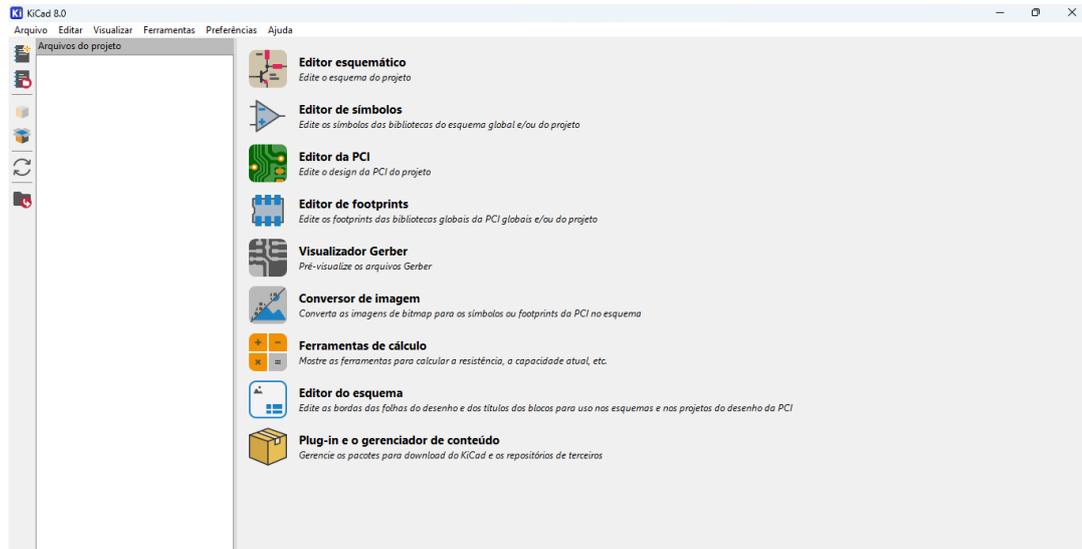
Fonte: Autor adaptado do Arduino IDE (2025).

2.4.2 Software KiCad

As placas de circuito impresso (PCB) constituem o núcleo de qualquer aparelho eletrônico, desde torradeiras até telefones celulares. O desenvolvimento do KiCad começou em 1992. O software que roda nos sistemas operacionais de computador GNU/Linux, Windows e Apple, cria esquemas para placas de circuito impresso com até 32 camadas de cobre com camadas técnicas adicionais (DEL ROSSO, 2015). Os criadores do KiCad são bastante ativos e estão constantemente em busca de melhorias.

Entre tantos objetivos, alcançar a simulação de circuitos eletrônicos com precisão é um deles. Modelos PSPICE e outros, as habilidades disponíveis para o futuro. A modelagem de circuitos eletrônicos, a representação tridimensional e a depuração de layout são extremamente abrangentes. Esta é especializada em eletrônica técnica o que impede o KiCad de ser categorizado como uma ferramenta de programas populares, como um editor de texto ou um processador de texto navegador web ou administrador de e-mail. Na Figura 14, demonstra o ponto de partida para criar um projeto eletrônico completo no KiCad, desde o esquema elétrico até a geração dos arquivos para fabricação da placa.

Figura 14: Interface do Kicad



Fonte: Autor adaptado do Kicad (2025).

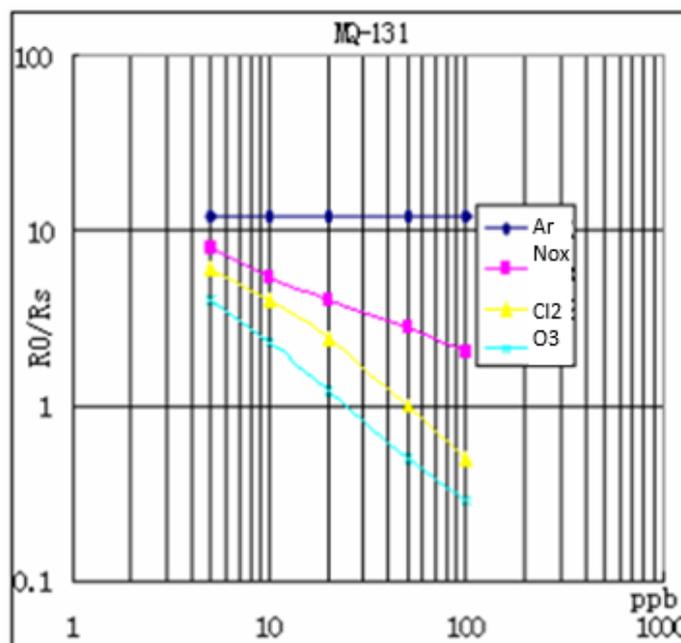
3. METODOLOGIA

O tipo de metodologia utilizada no projeto é do tipo científica e experimental, combinando aspectos de pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e análise sistemática. O estudo foi conduzido em etapas, a qual se iniciou com uma revisão bibliográfica abrangente sobre o uso de sensores para monitoramento da qualidade do ar, seguida pela análise detalhada dos *datasheets* dos sensores selecionados, desenvolvimento de códigos específicos para Arduino, montagem e testes iniciais em protoboard, integração de módulos para armazenamento de dados, projeto e fabricação de uma placa de circuito impresso, instalação do sistema em um ambiente protegido. Por fim, foi realizada uma análise estatística dos dados coletados para validação e avaliação dos resultados.

3.1 Análises dos Manuais

Foram realizadas análises detalhadas dos *datasheets* dos sensores MQ-131, MQ-07, MQ-02, e DSM-501A. Nesta etapa, foram extraídos os parâmetros essenciais para a calibração dos sensores. Com esses dados, foram elaborados planilhas e gráficos de calibração, visando garantir que os sensores funcionassem dentro das especificações técnicas e proporcionassem leituras precisas durante os experimentos. A calibração foi um processo que exigiu ajustes finos e testes repetidos para assegurar a exatidão das medições. As Figura 15, Figura 17 e Figura 19, mostrar curvas de resposta dos sensores, extraídos dos manuais dos mesmos mostrando a razão em função da concentração de gases e variação da resistência interna.

Figura 15: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-131



Fonte: Adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.)(2025).

A equação 1, pode ser reorganizada para encontrar a concentração de ozônio em qualquer condição da razão de resistência. Portanto, a fórmula necessária pode ser expressa como:

$$y = 0,3892x^{-0,4243} \quad (1)$$

Em que:

y : Relação de resistência (R_o/R_s);

x : Concentração em ppm.

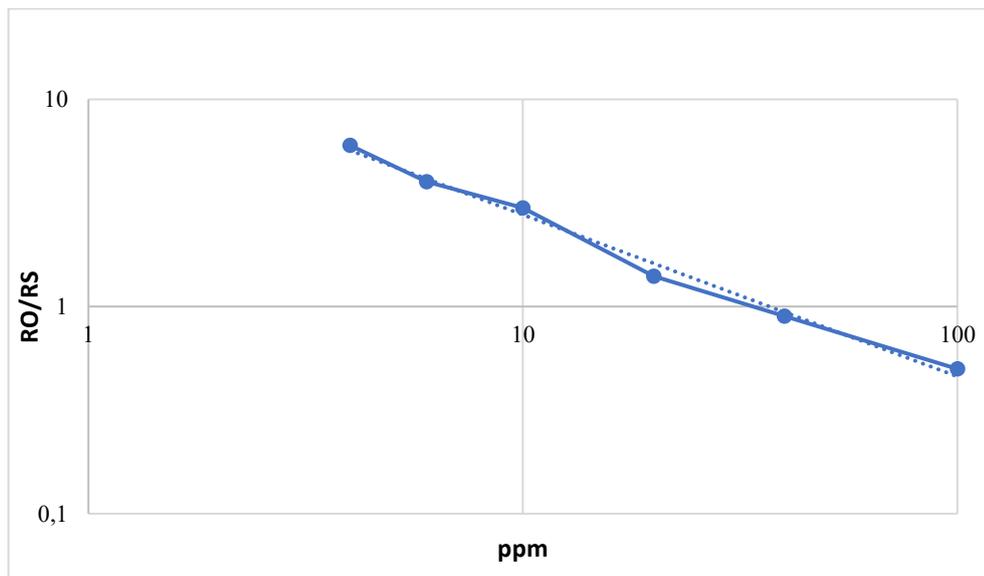
$$\text{concentração [ppm]} = \left[\frac{\frac{R_o}{R_s}}{0,3892} \right]^{\left(\frac{-1}{0,4243} \right)} \quad (2)$$

Em que:

R_o : Resistência do sensor de gás em ar limpo;

R_s : Resistência do sensor de gás em diferentes concentrações.

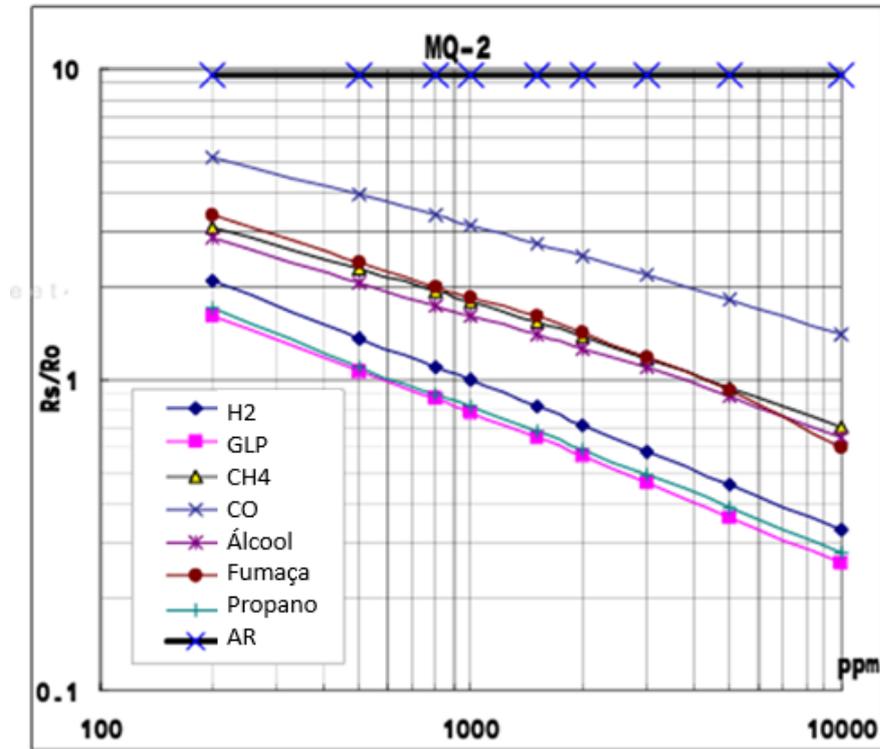
Figura 16: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-131, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de ozônio



Fonte: Autor adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.) (2025).

A Figura 17, representa a curva de sensibilidade do sensor MQ-02, que detecta a presença de diversos gases combustíveis e fumaça. Essa figura mostra a relação entre R_s/R_o no eixo vertical e a concentração de gás em partes por milhão (ppm) no eixo horizontal, ambos em escala logarítmica.

Figura 17: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-02



Fonte: Adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.) (2025).

Após a análise da figura anterior, foi utilizado uma planilha para criar um novo gráfico, representado na Figura 18, que mostra a relação entre a razão R_s/R_o e a concentração de fumaça para o sensor MQ-02. Além disso, foi traçado uma linha de tendência a fim de obter a equação correspondente. A equação 3 é fundamental para a medição de partículas de fumaça

$$y = 35,864x^{-0,429} \quad (3)$$

Em que:

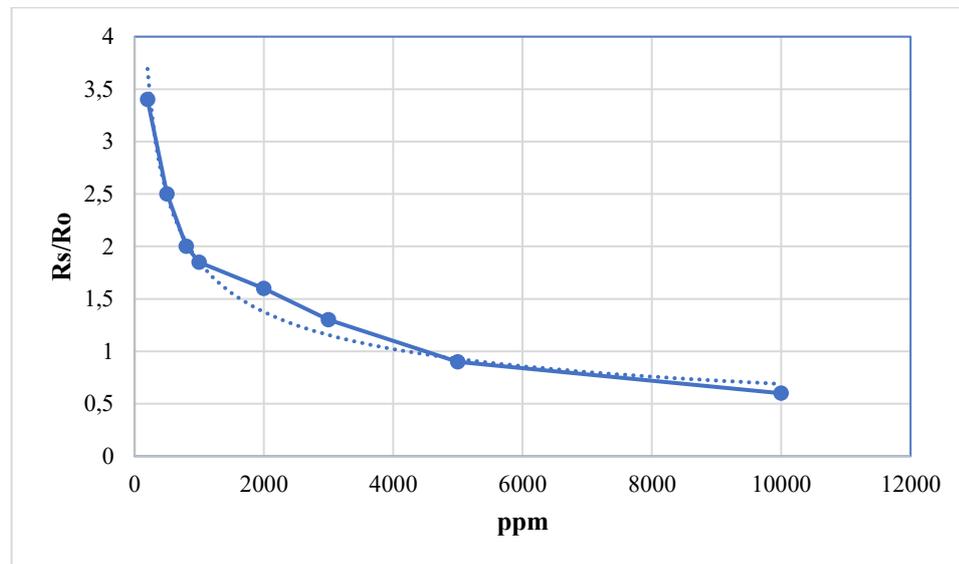
y : Relação de resistência (R_o/R_s);

x : Concentração em ppm.

Reorganizado a equação anterior, pode ser obter a concentração de fumaça em qualquer condição da razão de resistência. Portanto, a fórmula necessária pode ser expressa como:

$$\text{concentração [ppm]} = \left[\frac{R_o}{R_s} \right]^{\left(\frac{-1}{0,429} \right)} \quad (4)$$

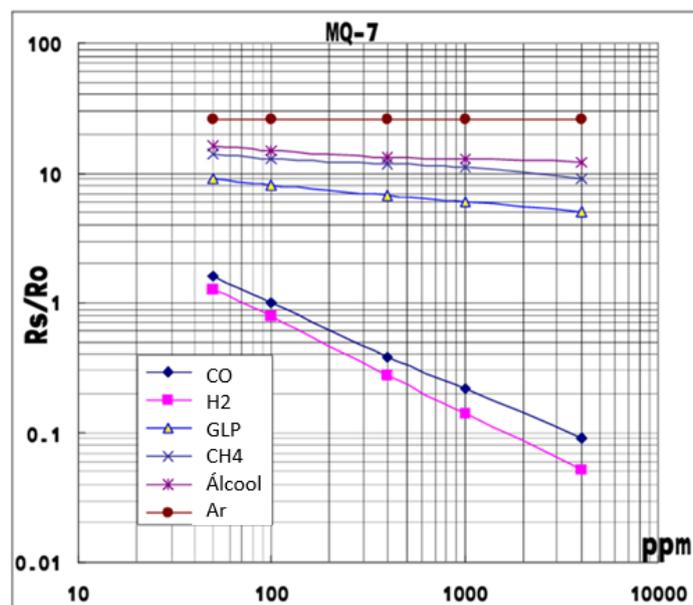
Figura 18: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-02, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de fumaça



Fonte: Autor adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.).

As Características de Sensibilidade do Sensor MQ-07, são mostradas na Figura 19. O gráfico pode ser usado para determinar a concentração de CO em ppm em relação à razão de resistência (R_s/R_o) do sensor. Essas curvas foram utilizadas como base para a retirada das equações de calibração, e ainda para obtenção do parâmetro de qualidade do ar puro, que relacionam a resistência do sensor à concentração dos poluentes, permitindo assim a estimativa da concentração de gases presentes no ar e a posterior definição do índice de concentração desses gases na atmosférica.

Figura 19: Curvas de sensibilidade do sensor MQ-07



Fonte: Adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.).

Conforme mostrado na Figura 20, um novo gráfico foi construído utilizando os pontos de dados extraídos da curva característica do CO. Nesta próxima etapa, a curva de melhor ajuste e sua equação foram encontradas utilizando a opção de linha de tendência, de forma que representasse a equação de CO original com maior precisão. A essa equação e fundamental para a medição de partículas de monóxido de carbono, onde está representada na equação 8.

$$y = 19,709x^{-0,652} \quad (5)$$

Em que:

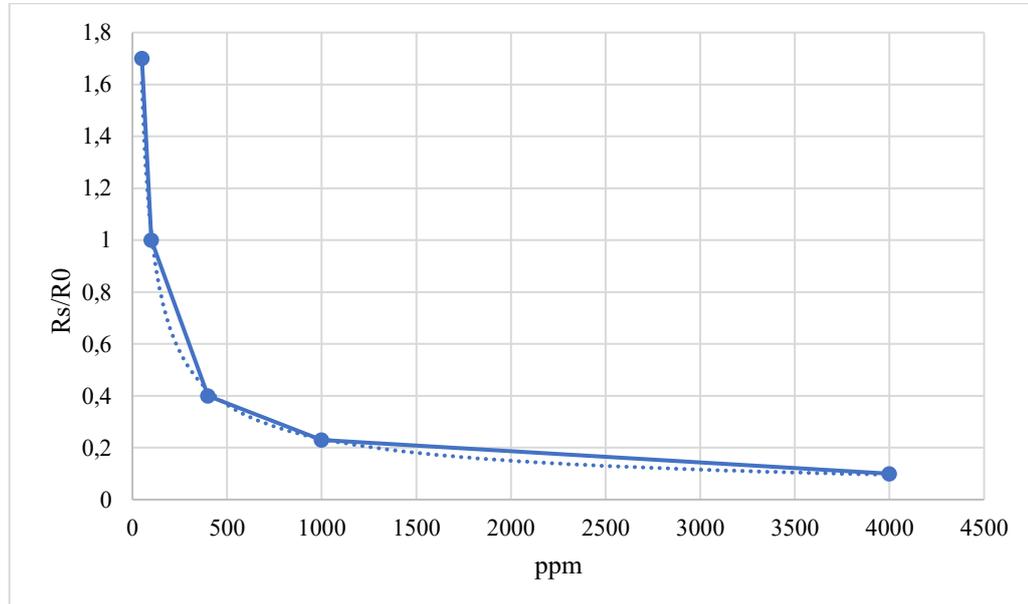
y : Relação de resistência (R_o/R_s);

x : Concentração em ppm.

A equação 5, pode ser reconstruída para encontrar a concentração de fumaça em qualquer condição da razão de resistência. Portanto, a fórmula necessária pode ser expressa como:

$$\text{concentração [ppm]} = \left[\frac{\frac{R_o}{R_s}}{19,709} \right]^{\left(\frac{-1}{0,652}\right)} \quad (6)$$

Figura 20: Gráfico obtido a partir da curva de sensibilidade do sensor MQ-07, com ajuste de regressão exponencial para estimativa da concentração de monóxido de carbono



Fonte: Autor adaptado de HANWEI ELECTRONICS (s.d.).

Essas curvas foram utilizadas como base para a retirada das equações de calibração, que relacionam a resistência do sensor à concentração dos poluentes, permitindo assim a estimativa da concentração de gases presentes no ar e a posterior definição do índice de poluição atmosférica. A Tabela 9, representará a razão de resistência dos sensores para ar puro e a razão de resistência em ar limpo.

Tabela 9: Relação do ar puro

Sensor	Relação dos sensores em ar puro
MQ-131	11,00
MQ-02	9,80
MQ-07	25,75

Fonte: Autor (2025).

Para a configuração experimental, foi utilizado um resistor de carga para cada sensor, cuja a finalidade fazer um divisor de tensão entre o GND, os valores dos resistores utilizados então representados na Tabela 10 , para uma maior precisão utilizar se um multímetro para aferir as resistências e adotar esse valor como referência e a tensão (V) através do resistor de carga foi medida usando o microcontrolador ATMega.

Tabela 10: Resistores de carga

Sensor	Resistência Especificada (Ω)	Resistência Medida (Ω)
MQ-131	100000,00	97800,00
MQ-02	5000,00	4810,00
MQ-07	10000,00	9780,00

Fonte: Autor (2025).

Se o valor de R_s da equação 7 for conhecido, o termo restante R_o pode ser determinado, visto que a razão de resistência é conhecida. Portanto, o objetivo do processo de calibração é encontrar R_o resistência de saída em condições de ar puro. Considerando a equação 7, é necessário encontrar o valor de R_s para calcular R_o . O valor de R_s em ar limpo precisa ser determinado por meio de procedimentos experimentais, conforme descrito a seguir. A regra do divisor de tensão pode ser usada para obter a seguinte expressão para o circuito de teste do sensor.

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) X RL \quad (7)$$

Onde:

V_C : Tensão de alimentação;

V_{RL} : Tensão do sensor medida pelo microcontrolador;

RL : Resistor de carga.

O valor de R_o , foi obtido por meio do código de calibração apresentado no Apêndice A. Foram coletadas 10 amostras de R_o para cada sensor, e realizado média aritmética desses

valores, está apresentada na Tabela 11. Utiliza-se os valores encontrados como referência padrão para o código do Apêndice D.

Tabela 11: Valor médio obtido de R_o

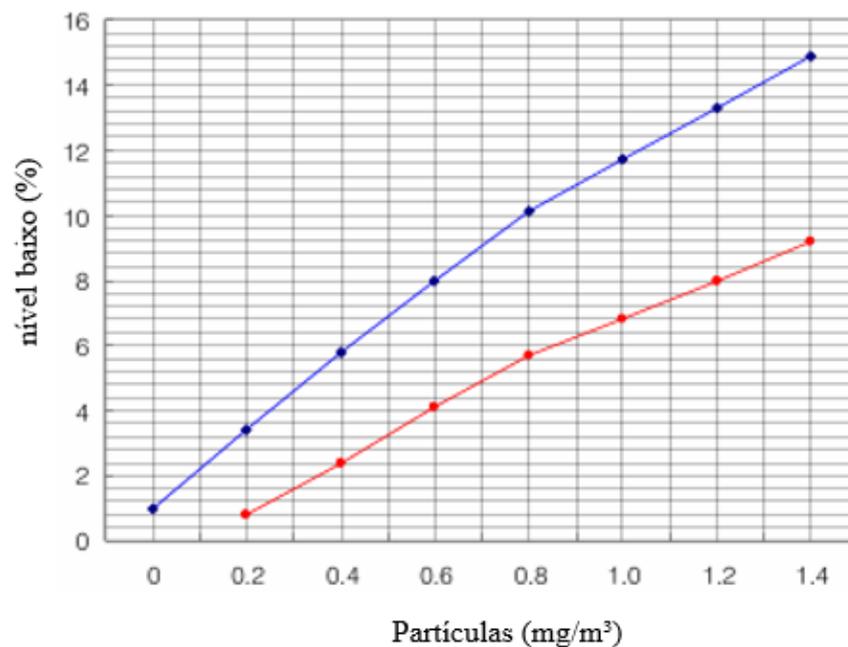
Sensor	$R_o(\Omega)$
MQ-131	18500000,00
MQ-02	1730,00
MQ-07	13000,00

Fonte: Autor (2025).

O gráfico da Figura 21, extraído do *datasheet* do sensor DSM501A, mostra a relação entre a concentração de partículas em suspensão no ar (eixo horizontal, em mg/m^3) e a razão de tempo em nível baixo (*Low ratio*) no sinal de saída digital do sensor.

- *Low ratio* (Baixa proporção) [%], representa a porcentagem de tempo em que o sinal de saída digital do sensor permanece em nível baixo dentro de um intervalo de amostragem (30 segundos). Esse tempo de nível baixo aumenta à medida que cresce a concentração de partículas no ar;
- O comportamento tem tendência linear nas faixas iniciais, o que torna uma fácil calibração do sensor para medir a concentração de material particulado (MP).

Figura 21: Curva de Sensibilidade do Sensor DSM501 em Função da Concentração de Partículas em Suspensão



Fonte: Adaptado de ATRINELEC (2022).

A equação 8 é fornecida no *datasheet* do sensor DSM501A e serve para calcular a porcentagem de tempo em que o sinal de saída do sensor permanece em nível lógico baixo durante um intervalo de 30 segundos.

$$\text{Nivel baixo}(\%) = \frac{t(s)}{30(s)} \times 100 \quad (8)$$

3.2 Desenvolvimento e Teste do Código

Para estimar a concentração de gases em ppm foi escolhido o Arduino. Inicialmente foi implementado um código que realiza inicialmente a calibração do sensor em ar puro. Nessa etapa, o sensor ficou exposto a um ambiente sem poluentes, e sua resistência elétrica, denominada R_0 , é calculada com base na tensão medida no divisor resistivo. Esse valor de R_0 é armazenado como parâmetro de referência para as demais medições, com o sensor posicionado no ambiente de teste, o microcontrolador realiza a leitura da nova tensão e calcula a resistência atual do sensor (R_s). A partir desses dados, é determinada a razão, que é usada como entrada para as equações extraídas das Figuras 16, 18 e 20. Características do sensor, permitindo calcular a concentração dos poluentes em análise na condição analisada. O código responsável por essas etapas está disponível no Apêndice A deste trabalho.

Com base nas resistências em ar puro de cada sensor, foi desenvolvido um código específico utilizando a IDE Arduino. A programação foi realizada considerando as características únicas de cada sensor e suas respectivas funções no projeto. Inicialmente, os códigos foram testados individualmente para verificar a funcionalidade básica de cada sensor. Em seguida, a integração dos códigos em um sistema único, permitindo a leitura simultânea de todos os sensores.

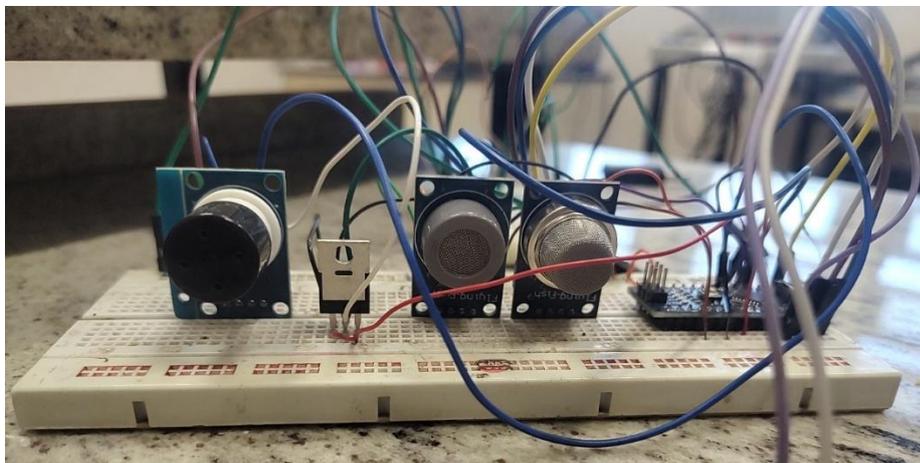
3.3 Montagem e Testes no Protoboard

Com o código finalizado, iniciou-se a montagem dos circuitos em uma protoboard. Essa fase permite verificar a funcionalidade do circuito, bem como identificar possíveis falhas ou incompatibilidades no código ou nas conexões. Pode-se inferir que a prototipagem foi essencial para detectar antecipadamente problemas, os quais incluem ruído nas leituras dos sensores e/ou conflitos de hardware. Todos os componentes, como resistores, semicondutores e módulos adicionais, foram conectados e testados em conjunto, garantindo que o sistema operasse conforme o planejado antes da montagem definitiva.

A Figura 22, apresenta a montagem do protótipo da estação de monitoramento da qualidade do ar sobre uma protoboard, realizada durante a fase de testes do projeto. Estão conectados os sensores de gases MQ-131 (ozônio), MQ-07 (monóxido de carbono) e MQ-02 (gases inflamáveis e fumaça). Ao final da imagem, está o microcontrolador Arduino Nano, que realiza

a leitura dos sensores e processamento dos dados. Essa configuração foi essencial para testar a funcionalidade dos componentes, validar o código e realizar a calibração dos sensores.

Figura 22: Protótipo da estação de monitoramento na fase de testes



Fonte: Autor (2024).

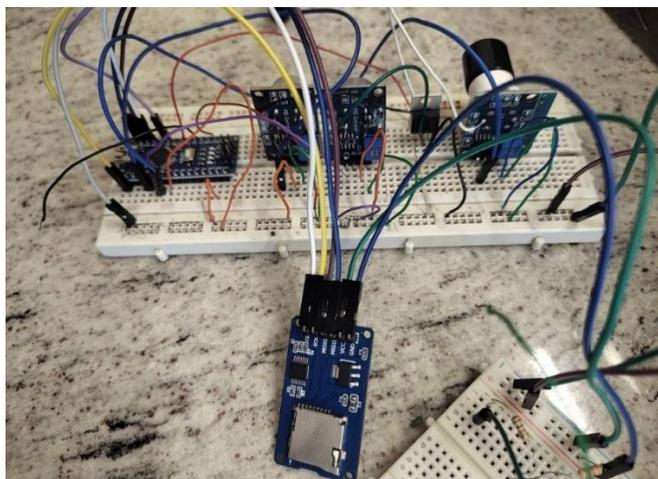
3.4 Integração de Módulos e Salvamento de Dados

Após a verificação do circuito, foi iniciado o processo de adequação dos demais módulos, como o GSM-SIM 800L, módulo de cartão micro SD, o sensor DHT 11 e o módulo RTC. Nesta etapa, foi feita a codificação do módulo RTC foi configurado com o código específico para ajuste inicial de data e hora, garantindo que o sistema registrasse corretamente os horários de cada leitura realizada. Como demonstrado no Apêndice B.

Para o módulo GSM SIM800L, foi desenvolvido um código específico com o objetivo de testar a comunicação serial com o microcontrolador e a funcionalidade de envio de mensagens SMS, sua operação em diferentes condições de sinal. O código responsável por esse teste está no Apêndice C. Paralelamente, foi realizada a implementação do módulo de cartão micro SD, que envolveu a criação de um código para testar a leitura e escrita de dados, assegurando o correto armazenamento das medições para uma análise futura de tendência das concentrações dos poluentes. O sensor DHT11, responsável por aferir temperatura e umidade do ar, foi adicionado ao código dos sensores calibrados pelo fato do mesmo não precisar de calibração específica.

Ao final dessa etapa de validação individual, foi desenvolvido um código unificado, capaz de integrar todos os sensores e módulos em funcionamento simultâneo, realizando medições, registros e comunicação de forma automática e contínua. Esse código completo encontra-se disponível no Apêndice D deste trabalho. Na Figura 23 mostra a fase de testes e integração dos diversos sensores e módulos que compõem a estação de monitoramento da qualidade do ar. Observa-se o uso de uma protoboard para facilitar a conexão entre os componentes.

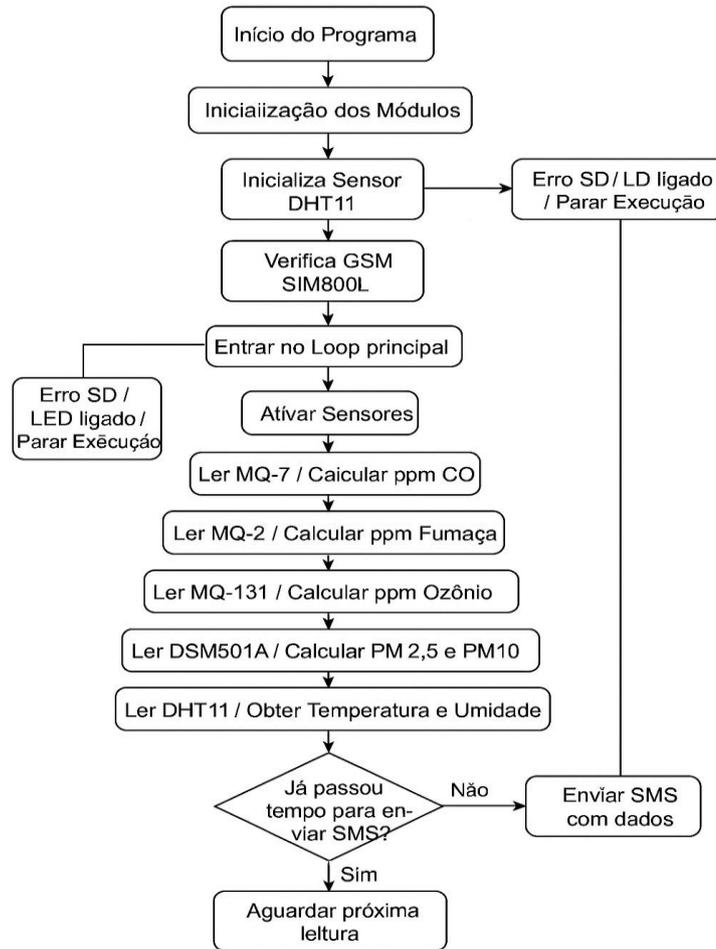
Figura 23: Protótipo da estação de monitoramento em fase de testes com implementação dos demais módulos



Fonte: Autor (2025).

O fluxograma apresentado na Figura 24, descreve o funcionamento de um sistema de monitoramento ambiental automatizado baseado em microcontrolador, com sensores diversos e capacidade de envio de dados via SMS. A execução do programa se inicia com a inicialização dos módulos conectados, incluindo o sensor de temperatura e umidade DHT11. Caso haja falha nessa etapa, o sistema acende um LED de erro e interrompe a execução. Em seguida, o programa verifica se o módulo GSM SIM800L está funcionando corretamente. Estando tudo em ordem, o sistema entra no loop principal, onde as leituras dos sensores são realizadas continuamente. Nesse ciclo, os sensores são ativados para coletar dados ambientais. O sensor MQ-7 é utilizado para medir a concentração de monóxido de carbono (CO), o MQ-2 mede a concentração de fumaça, o MQ-131 verifica a presença de ozônio (O₃), e o sensor DSM501A calcula os níveis de partículas inaláveis, especificamente PM2.5 e PM10. Por fim, o sensor DHT11 obtém novamente os dados de temperatura e umidade do ambiente.

Figura 24: Fluxograma do Funcionamento da Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar



Fonte: Autor (2025).

3.5 Projeto da Placa de Circuito Impresso

Com as simulações concluídas, iniciou-se o projeto da placa de circuito impresso utilizando o software KiCad. A Placa de Circuito Impresso ficou desenhada de modo a acomodar todos os componentes do circuito, considerando a disposição ideal para minimizar interferências e otimizar o desempenho. A Figura 25, demonstra o *layout* da placa de circuito impresso (PCI) da estação de monitoramento da qualidade do ar, desenvolvido no KiCad. A imagem representa a etapa final do projeto eletrônico, onde o circuito esquemático é convertido em um layout físico, com trilhas, furos e áreas de cobre, prontos para serem fabricados.

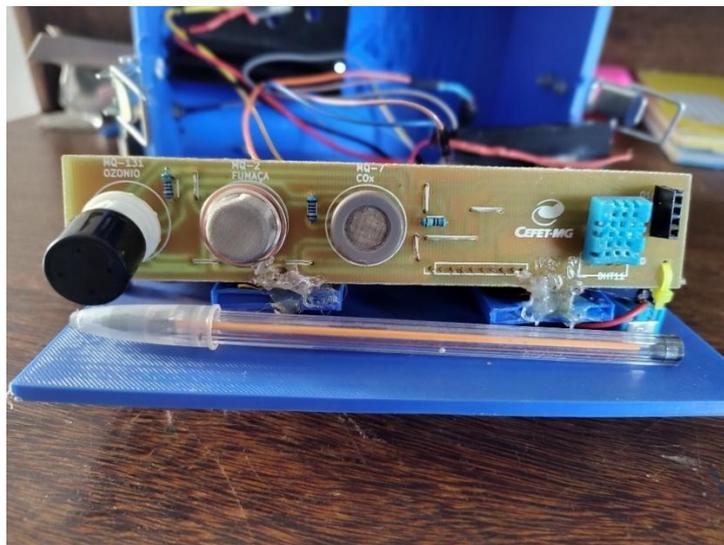
Figura 26: Impressão 3D da Carcaça para Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar



Fonte: Autor (2025).

A Figura 27, representa a placa de circuito impresso com os sensores instalados e a superfície de apoio da mesma produzida por impressão 3D, projetadas para formar uma estrutura de proteção para uma estação de medição do índice de poluição. As peças foram fixadas, com parafusos e cola quente, garantindo firmeza na montagem. A geometria mostra a rigidez da estrutura e como o circuito apresenta um formato compacto e funcional, o que contribui para sua aplicação em ambientes com restrição de espaço.

Figura 27: Protótipo da Estação Ambiental Desenvolvido



Fonte: Autor (2025).

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos permitem identificar variações e detectar possíveis episódios críticos de poluição e compreender a influência de fatores climáticos e humanos na concentração de poluentes. Essas informações são essenciais para a conscientização da população, para a formulação de políticas públicas e para a tomada de decisões voltadas à preservação da saúde e do meio ambiente.

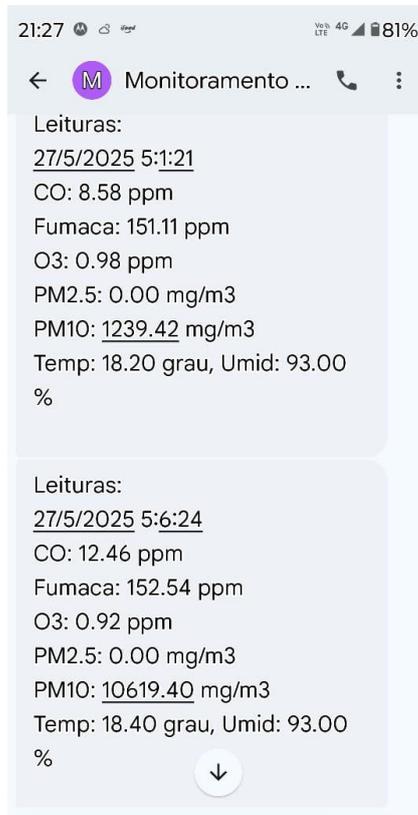
4.1 Envio de Alertas via SMS e Gravação de Leituras no Cartão de Memória

Durante a fase de análise, foram trabalhadas duas funcionalidades principais do sistema, o envio de mensagens SMS por meio do módulo GSM SIM800L e o salvamento dos dados dos sensores em um cartão de memória microSD. Ambas as funcionalidades demonstraram integração satisfatória com a plataforma Arduino, confirmando a viabilidade e praticidade do sistema de monitoramento.

No que se refere ao envio de SMS, o módulo SIM800L foi corretamente inicializado após a estabilização da alimentação com tensão adequada. As mensagens foram enviadas de em intervalos regulares de tempo, contendo informações formatadas com os valores medidos pelos sensores, como temperatura, umidade, concentração de gases e material particulado. Foram observadas pequenas variações no tempo de envio dependendo da qualidade do sinal GSM, sendo que em áreas com cobertura instável houve atraso ou falha na transmissão, o que é compatível com as limitações técnicas do módulo. Ainda assim, o sistema se mostrou robusto, realizando reenvios automáticos.

Quanto ao salvamento de dados no cartão de memória, o sistema utilizou um módulo leitor de cartão microSD conectado via interface SPI, com inicialização correta e escrita de dados em formato de texto. txt. A cada leitura dos sensores, os dados eram armazenados com data, hora e valores individuais, garantindo o registro histórico completo das medições. Foram realizados testes com gravações contínuas e os arquivos gerados puderam ser abertos e lidos corretamente em computadores, permitindo posteriormente uma análise gráfica e estatística dos dados ambientais. Ao final o sistema registrou 62.824 amostras provenientes dos sensores, comprovando sua capacidade de armazenamento e funcionamento contínuo. De maneira geral como mostra a Figura 28 e a Figura 29, os resultados obtidos com o envio de SMS e o armazenamento em cartão SD demonstram que o sistema desenvolvido funcionou satisfatoriamente.

Figura 28: Cópia da mensagem de monitoramento enviada via SMS pelo módulo GSM



Fonte: Autor (2025).

Figura 29: Registro dos dados dos sensores salvos no cartão SD via Arduino

Arquivo	Editar	Exibir
26/5/2025 18:45:36		
115.50		
167.54		
6.38		
1861.90		
22.36		
20.60 °C		
93.00 %		
26/5/2025 18:50:32		
142.54		
151.11		
4.32		
8151731.00		
0.00		
22.30 °C		
95.00 %		

Fonte: Autor (2025).

4.2 Análise Meteorológica

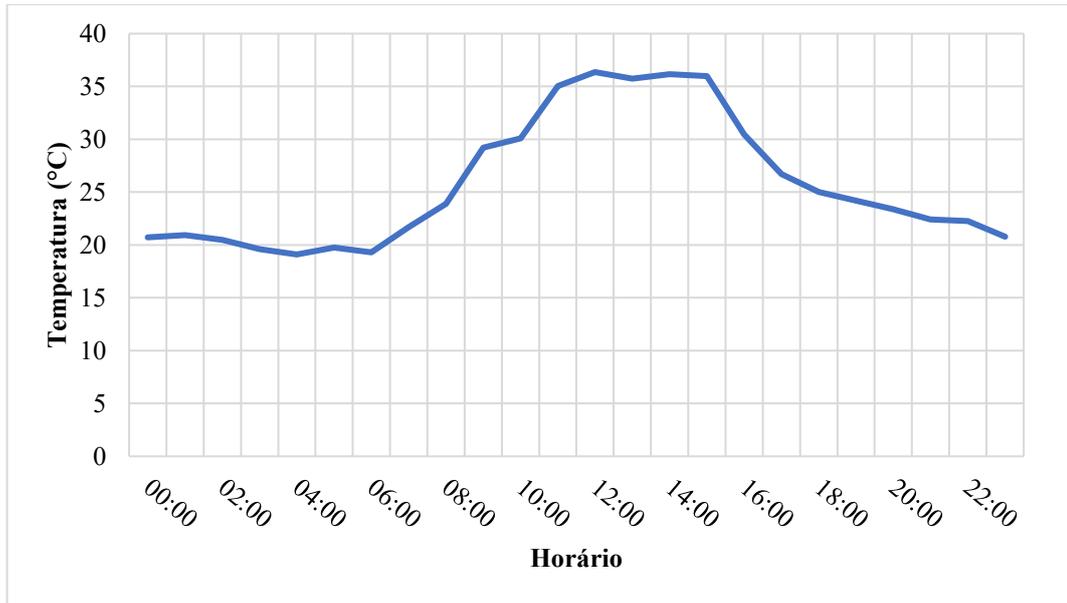
As análises meteorológicas são fatores importantes para a definição do nível da poluição. Isso se deve ao fato de que parâmetros como umidade e temperatura permitem verificar se a atmosfera esteve mais ou menos estável, o que favorece ou não a dispersão dos poluentes (GUERRA, 2011). Neste sentido, com o objetivo de caracterizar as condições de dispersão dos contaminantes atmosféricos, empregou-se a temperatura média do ar e a umidade relativa do ar.

4.2.1 Temperatura

Análise de forma detalhada como a temperatura se comportou ao longo do dia 28 de maio de 2025. Durante a madrugada, entre 00:00 e 06:00, a temperatura permaneceu estável, em torno de 21 °C, indicando um período de baixa variação térmica típico das primeiras horas do dia, quando a radiação solar é praticamente inexistente. Próximo das 07:00 a temperatura começa a subir gradualmente, evidenciando o início do aquecimento solar. Entre 08:00 e 10:00, esse aumento se intensifica, chegando em uma temperatura aproximada de 30 °C,

A temperatura mais alta do dia ocorre entre 12:00 e 14:00, quando atinge valores situados de 36 °C a 37 °C. Esse é o período de maior aquecimento, resultado direto da incidência solar máxima, comum nas primeiras horas da tarde. Após as 14:00, inicia-se um processo de resfriamento progressivo. A temperatura começa a cair de maneira gradual até o final da tarde e início da noite. Entre 18:00 e 22:00, a temperatura cai dos 30 °C para 22 °C, voltando aos níveis registrados no início do dia. Esses dados mostram um padrão térmico comum para um dia quente e ensolarado: manhãs frescas, aquecimento rápido durante a manhã, pico de calor à tarde e resfriamento ao anoitecer. A linha suave na Figura 30, indica uma mudança gradual entre as várias fases do dia, sem oscilações acentuadas, o que aponta para uma estabilidade nas condições do tempo.

Figura 30: Mostra a Variação de Temperatura ao Longo de 24 horas -28 de Maio de 2025



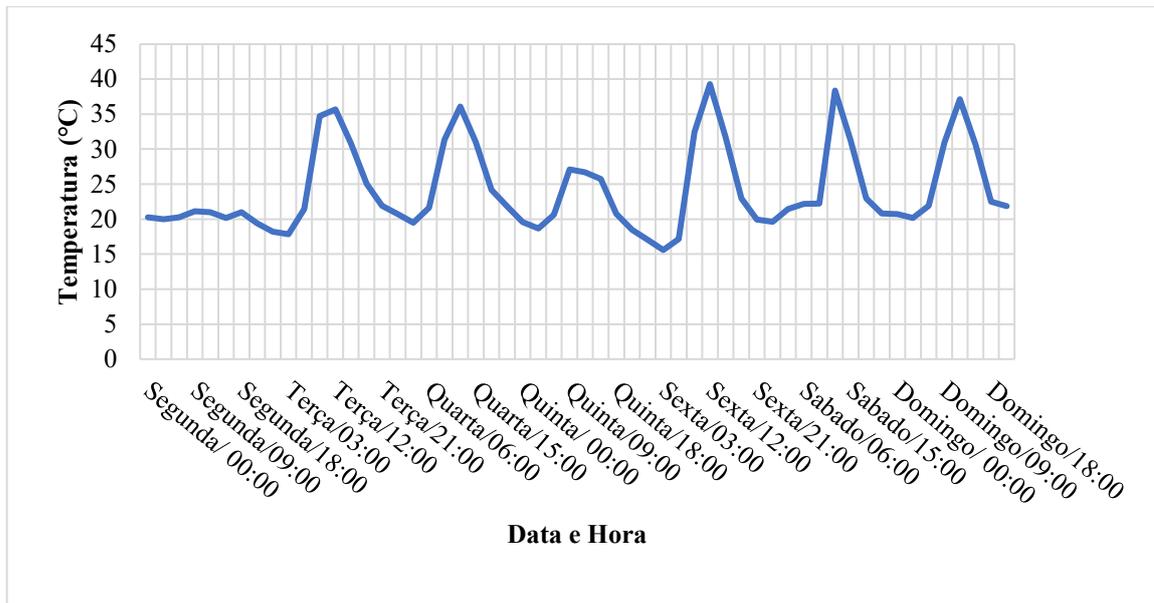
Fonte: Autor (2025).

A Figura 31, apresenta um gráfico de linha que mostra a variação da temperatura ao longo de uma semana. Ao analisar o gráfico percebe-se um padrão cíclico bem definido de variação diária. Em todos os dias da semana, a temperatura apresenta um comportamento típico de regiões tropicais ou subtropicais: começa mais baixa durante a madrugada e início da manhã, aumenta gradativamente ao longo do dia, atinge o máximo entre o meio-dia e o fim da tarde (aproximadamente entre 12h e 18h), e volta a diminuir à noite. Os valores diários ultrapassam frequentemente os 35 °C, fator esse que pode ser explicado pelo local de instalação da estação que ocorre a incidência direta dos raios solares e uma reflexão de calor do material onde ela foi fixada, com destaque para terça-feira, sexta-feira e sábado, quando a temperatura atinge valores próximos de 40 °C.

Por outro lado, os momentos mais frios do dia ocorrem durante a madrugada e início da manhã, com temperaturas próximas de 20 °C, especialmente entre 03:00 e 06:00. Isso mostra uma amplitude térmica diária considerável, o que pode indicar influência de fatores como radiação solar intensa durante o dia e céu limpo à noite, que facilita o resfriamento do ar.

Em análise, o gráfico demonstra que há uma variação térmica significativa ao longo de cada dia entre 26 de maio e 1º de junho de 2025. As temperaturas se elevam de forma consistente durante o dia e caem à noite, evidenciando um padrão climático diário regular.

Figura 31: Variação de Temperatura ao longo do dia 26 de Maio ao dia 1 de Junho de 2025



Fonte: Autor (2025).

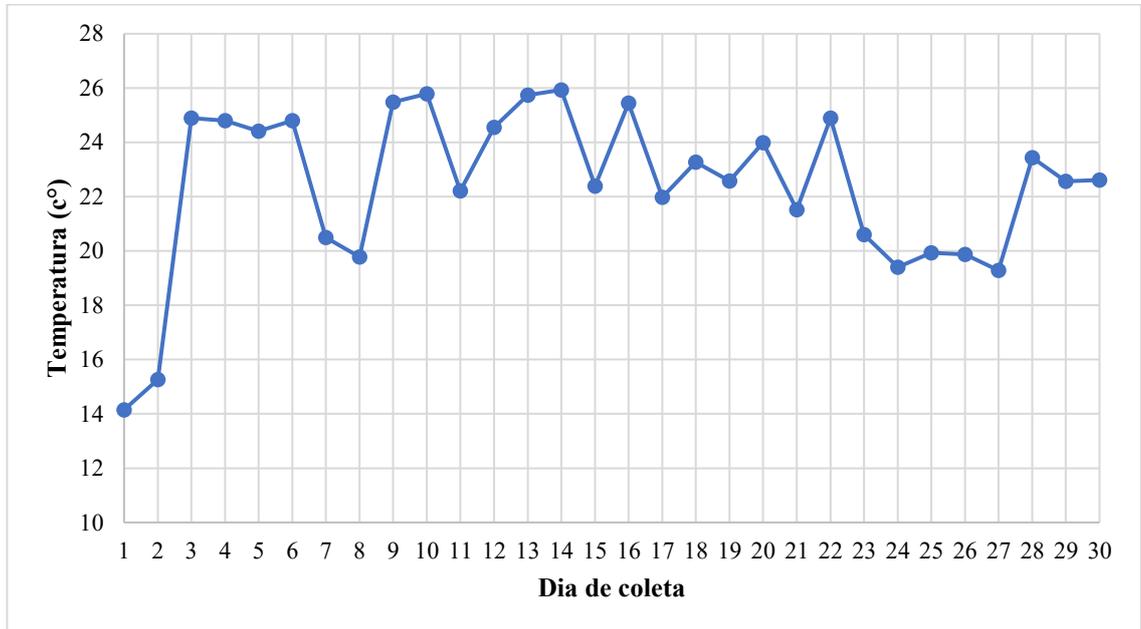
A variação da temperatura do ar, em graus Celsius (°C), ao longo do dia 19 de maio de 2025 a 18 de junho de 2025. No início do período, as amostras 1 e 2, registram-se as temperaturas mais baixas, com valores entre 14°C e 16°C. A partir do dia 3, observa-se um aumento expressivo, com a temperatura se estabilizando na faixa compreendida entre 24°C a 26°C durante boa parte do mês. Pequenas oscilações ocorrem entre os dias 7 e 9, quando a temperatura cai para aproximadamente 20°C, seguida de uma elevação nos dias seguintes. No final do período, entre os dias 24 e 27, há nova queda, com temperaturas situadas próxima de 19°C a 21°C, que voltam a subir levemente após o dia 28, encerrando o mês com valores próximos de 23°C.

Vale ressaltar que as variações de temperatura observadas ao longo dos 30 dias influenciam diretamente os níveis de poluição atmosférica, especialmente em relação ao monóxido de carbono (CO), ozônio troposférico (O₃), fumaça e material particulado. O monóxido de carbono é um poluente primário resultante da queima incompleta de combustíveis, sendo mais crítico em dias frios, quando ocorrem inversões térmicas. Esse fenômeno impede a dispersão dos poluentes e os mantém concentrados próximos à superfície, aumentando os riscos à saúde. Em contrapartida, em dias quentes com maior movimentação de massas de ar, há uma maior dispersão dos poluentes, reduzindo a concentração de CO no ar.

Por fim, o material particulado, também sofre influência direta da temperatura. Em dias frios e estáveis, com pouca ventilação, essas partículas permanecem mais tempo em suspensão, aumentando a exposição da população. Em dias quentes e com maior movimentação atmosférica, há tendência de dispersão desses poluentes, embora fontes emissoras ativas, como

trânsito e atividades industriais, possam continuar contribuindo para sua presença no ar (ALVES, 2015). A Figura 32, representa essa variação de temperatura ao longo de 30 dias.

Figura 32: Variação da Temperatura ao longo de 30 dias



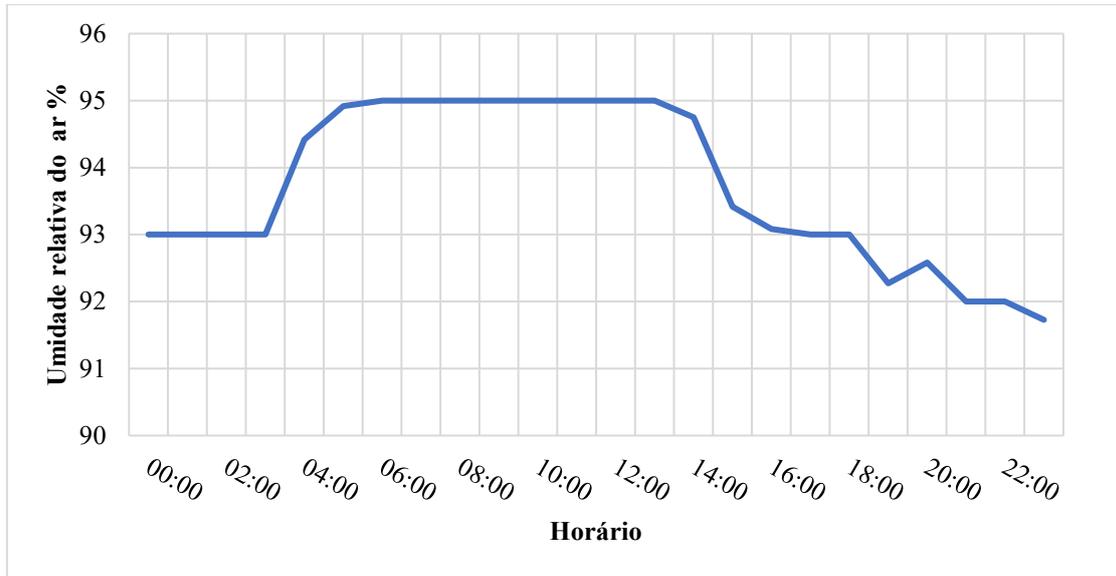
Fonte: Autor (2025).

4.2.2 Umidade Relativa do Ar

A variação da umidade relativa registrada ao longo do dia 28 entre 00:00 até 23:59. É possível observar que durante a madrugada, entre 00:00 e 04:00, a umidade se manteve estável, e próxima de 93%, indicando um ar bastante úmido, típico das horas mais frias e com menor incidência solar. Por volta das 05:00, houve um leve aumento, atingindo cerca de 95%, valor que se manteve constante durante toda a manhã até o início da tarde. Esse comportamento sugere uma atmosfera estável, possivelmente com céu encoberto ou presença de neblina.

A partir das 14:00, observa-se uma queda gradual na umidade relativa do ar, que vai de 95% para aproximadamente 93% às 16:00. Essa redução coincide com o período mais quente do dia, quando a elevação da temperatura provoca maior evaporação e, conseqüentemente, uma diminuição na umidade relativa. Entre 16:00 e 22:00, a umidade continua a cair lentamente, atingindo cerca de 91,5% no final do dia, com pequenas oscilações ao longo da noite.

Figura 33: Umidade ao Longo do dia 28 de Maio de 2025

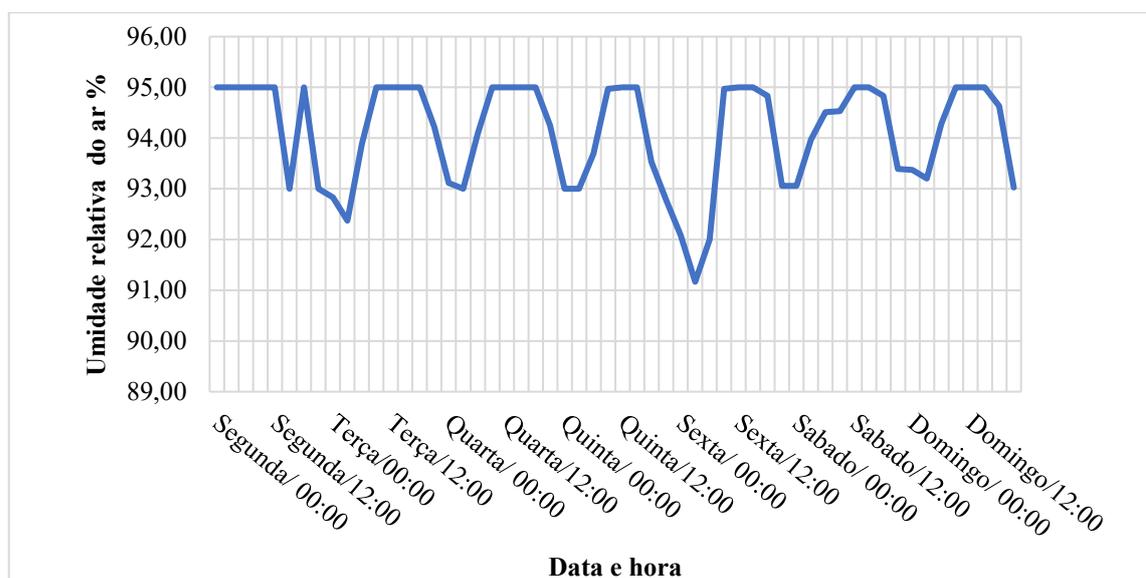


Fonte: Autor (2025).

A Figura 34, apresenta um gráfico de linha que representa a variação da umidade relativa do ar ao longo da semana, entre os dias 26 de maio e 1º de junho de 2025. Ao longo da semana analisada, observa-se um padrão cíclico diário bastante consistente, com os valores de umidade oscilando entre valores máximos por volta de 95% e mínimos próximos de 91%. De modo geral, a umidade tende a ser mais alta nas madrugadas e manhãs e mais baixa durante o meio dia. Esse comportamento está de acordo com o ciclo natural de aquecimento e resfriamento do ar ao longo do dia. Durante o dia, o aumento da temperatura promove a evaporação, reduzindo a umidade relativa. Por outro lado, durante à noite, com o resfriamento, a umidade volta se elevar.

Apesar da oscilação, os valores se mantêm dentro de uma faixa relativamente estreita e elevada, indicando altos níveis de umidade relativa ao longo de toda a semana, o que é típico de regiões úmidas. De modo geral, o gráfico mostra que, durante a semana de estudo, a umidade relativa do ar manteve-se elevada, com variações diárias dentro do previsto. Esse comportamento está fortemente relacionado à variação da temperatura e à presença de vapor d'água na atmosfera, sendo relevante para o conforto térmico da população e para o comportamento de poluentes e partículas no ar. Um vez que a umidade influencia diretamente a dispersão de partículas.

Figura 34: Umidade Relativa ao Longo da semana compreendida entre os 26 de Maio ao dia 1 de Junho de 2025



Fonte: Autor (2025).

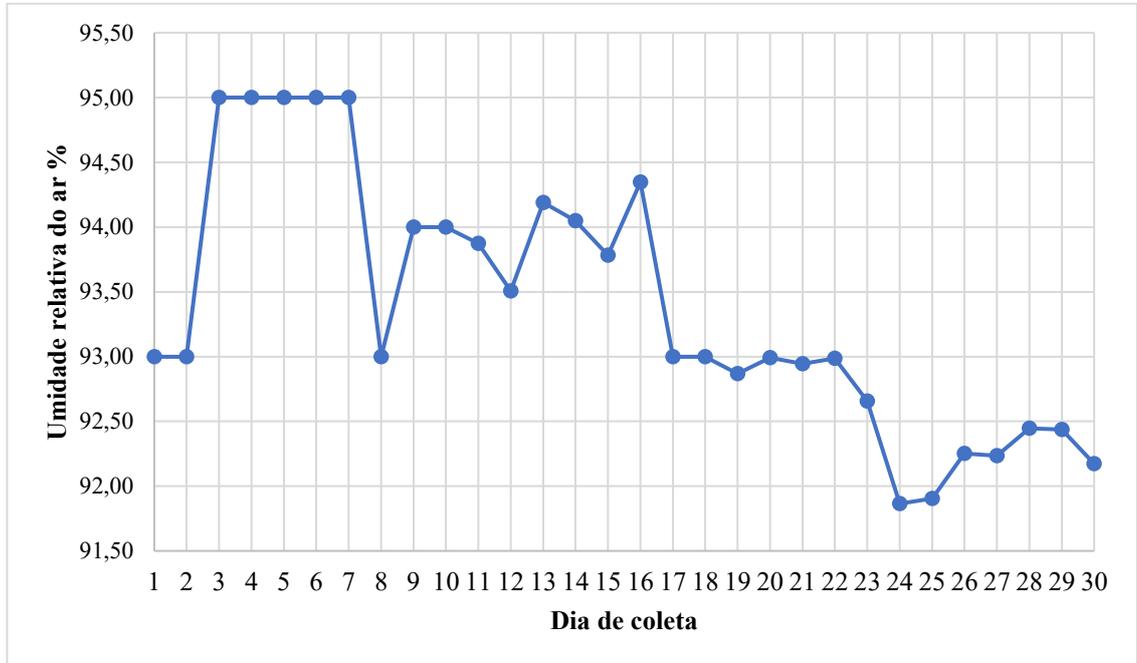
A média diária de variação da umidade relativa do ar ao longo dos dias 19 de maio de 2025 e 18 de junho de 2025 resultou em 30 amostras. Nas duas primeiras amostras, os valores permanecem estáveis em torno de 93%, e a partir da terceira até a sétima, observa-se um aumento, com a umidade atingindo 95%, mantendo-se constante nesse patamar por cinco dias. Em níveis elevados, a maior presença de vapor d'água no ar favorece a aglomeração de partículas e sua deposição no solo, contribuindo para a melhora da qualidade do ar. Em contrapartida, durante períodos de baixa umidade, o ar seco impede esse processo natural de purificação, permitindo que poluentes se mantenham em suspensão por mais tempo, o que piora as condições ambientais.

No caso do monóxido de carbono (CO), a alta umidade devida à maior presença de vapor de água no ar ajuda a diluir e transporta os poluentes de áreas de maior concentração para áreas de menor concentração favorece sua dispersão, enquanto a baixa umidade, especialmente se associada a inversões térmicas, contribui para a sua concentração nas camadas mais baixas da atmosfera, aumentando os riscos de intoxicação, principalmente em áreas urbanas com grande tráfego de veículos. O ozônio troposférico (O₃), tende a se formar em maiores concentrações em dias quentes e secos. A umidade elevada pode reduzir sua formação, pois interfere nas reações químicas. Portanto, ambientes secos favorecem a formação de ozônio, o que representa um risco adicional à saúde respiratória.

Dessa forma, os dados da Figura 35, demonstram que a redução gradual da umidade relativa ao longo dos 30 dias pode ter favorecido a permanência e o aumento da concentração

de diversos poluentes no ar, especialmente durante a segunda quinzena do período. Com o acompanhamento contínuo da umidade do ar, em conjunto com os níveis de poluentes atmosféricos, é essencial para poder explicar a qualidade do ar analisado.

Figura 35: Variação de Umidade Relativa do ar ao longo de 30 dias



Fonte: Autor (2025).

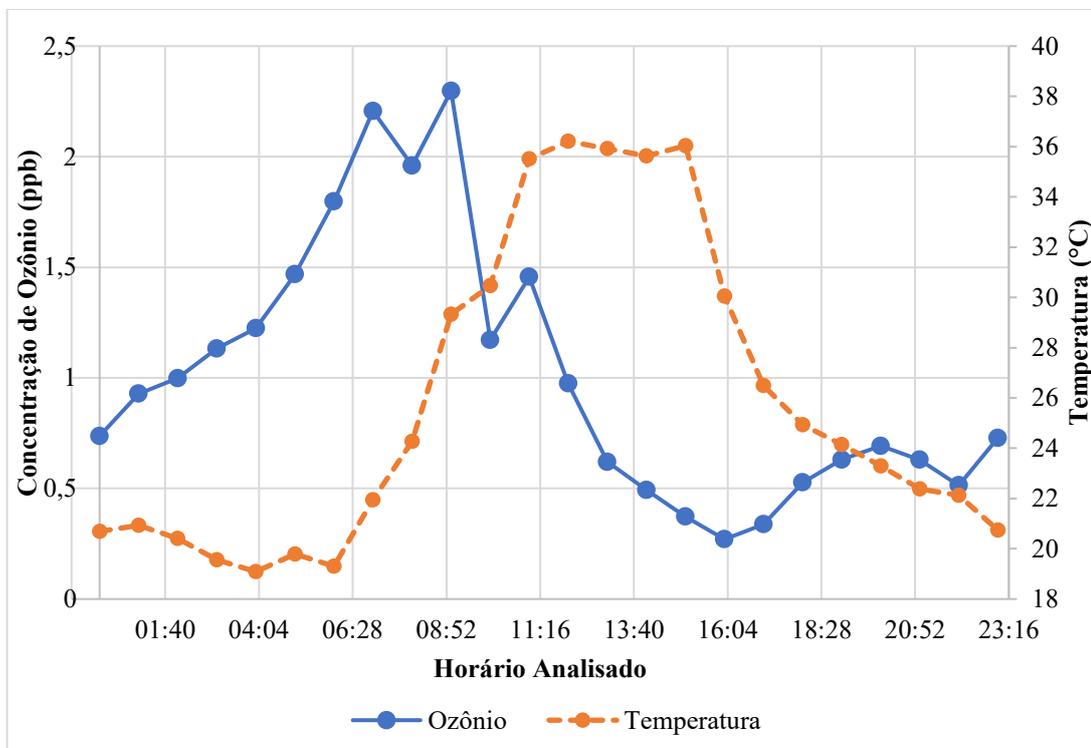
4.3 Análise da Qualidade do Ar para um Período de 24 Horas

A análise da qualidade do ar permite identificar os períodos do dia em que ocorrem picos de poluição e as faixas com melhor dispersão dos poluentes. Fatores como temperatura, tráfego veicular, atividades humanas e inversão térmica muito comum na época de análise influenciam diretamente nas concentrações de gases e partículas. Este intervalo de 24 horas é essencial para compreender a dinâmica diária da emissão e acúmulo de poluentes atmosféricos ao longo deste tempo e explicar fatores que contribuem para esses dados.

A concentração de ozônio ao longo do dia 28 de maio de 2025, no qual apresenta uma correlação direta com o ciclo solar, fortemente influenciada pela presença da radiação solar e pelas condições atmosféricas. A partir do início da manhã, por volta das 06:00 horas, a concentração de ozônio aumenta de forma acentuada, alcançando seus maiores valores entre 08:00 horas e 10:00 horas. Esse comportamento está diretamente ligado à intensificação da radiação solar, que ativa reações fotoquímicas essenciais para a formação do ozônio troposférico. Quando comparado com o aumento da temperatura, observa que o aumento do ozônio ocorre pouco tempo antes da temperatura chegar no seu valor máximo.

Após esse valor, observa-se uma queda expressiva nos níveis de ozônio ao longo do final da manhã e início da tarde, mesmo com a continuidade da presença solar. Essa redução pode ser atribuída à maior dispersão atmosférica, que dilui o ozônio acumulado bem como o consumo da substância por reações secundárias. Durante a tarde, entre 14:00 horas e 18:00 horas, a concentração se mantém baixa, o que também pode estar relacionado ao aumento da ventilação e mistura do ar. No período da noite, com o fim da radiação solar, a produção de ozônio praticamente cessa. No entanto, observa-se na Figura 36, uma leve recuperação nos níveis de concentração devido à menor dispersão e à estagnação do ar, o que permite o acúmulo de traços residuais da substância.

Figura 36: Concentração de Ozônio ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025



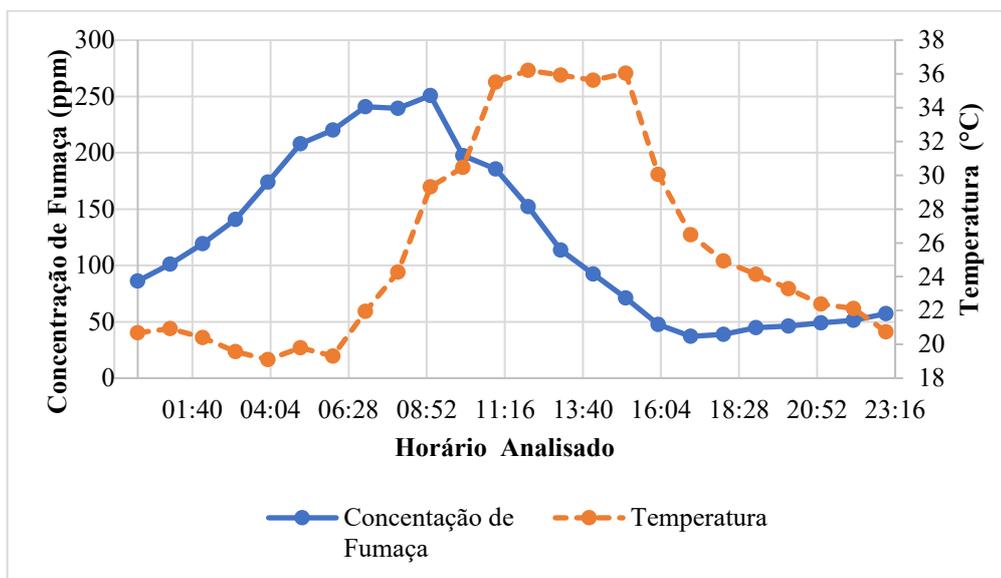
Fonte: Autor (2025).

A concentração de fumaça ao longo do dia 28 de maio de 2025, no qual apresentou variações relevantes, com destaque para o período de 06:00 horas as 10:00 horas. Durante a madrugada, entre 00:00 horas e 06:00 horas os níveis começaram relativamente baixos, e aumentaram de forma constante, alcançando cerca de 2,44 ppm no período da manhã. Esse aumento está associado ao início das atividades urbanas, como o tráfego de veículos ou queimada local, em conjunto com a inversão térmica, que dificulta a dispersão dos poluentes.

A partir das 10:00 horas, a concentração começou a cair gradualmente, seguindo um comportamento de queda acentuada até as 16:00 horas, quando atingiu seu ponto mínimo, próximo de 40 ppm. Essa redução pode ser explicada pela elevação da temperatura e pelo

aumento da movimentação do ar, que favorecem a dispersão da fumaça. No final da tarde e início da noite, entre 16:00 horas e 22:00 horas houve uma leve recuperação nos níveis, com a concentração subindo. Com essa análise é possível destacar que os maiores valores de concentração estão atrelados a horário que a população está ativamente se deslocando entre casa e trabalho. De forma geral, a Figura 37, mostra que a qualidade do ar diminui durante a manhã, sendo a dispersão dos poluentes mais eficiente no período da tarde e com o menor tráfego de veículos.

Figura 37: Concentração de Fumaça ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025



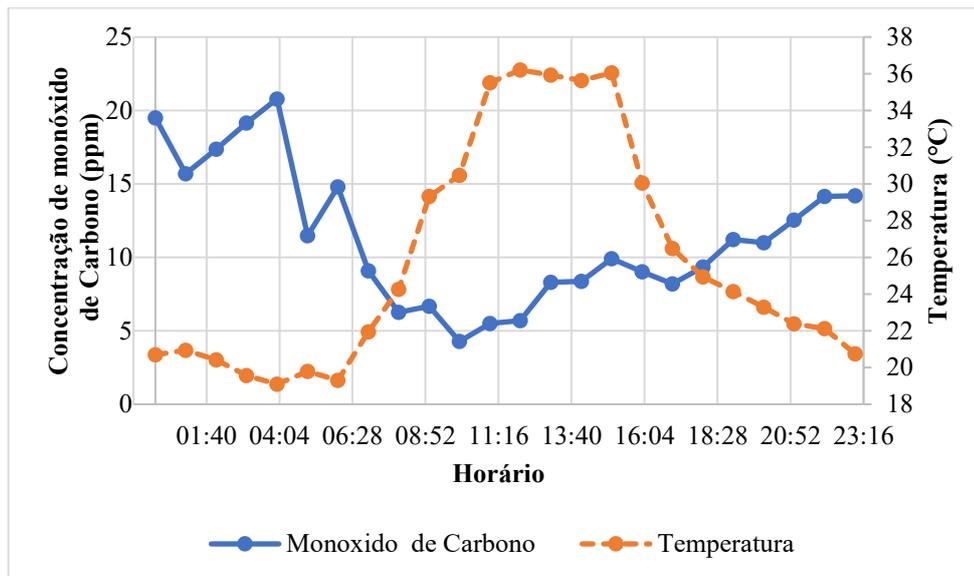
Fonte: Autor (2025).

O gráfico de concentração de monóxido de carbono ao longo do dia 28 de maio de 2025, mostra que durante a madrugada, os níveis de CO começaram elevados, próximo de 20 ppm, com oscilações que atingiram picos de aproximadamente 21 ppm por volta das 04:00. Esse comportamento pode ser atribuído à baixa dispersão do ar nesse período, o que favorece o acúmulo de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis. A partir das primeiras horas da manhã, entre 06:00 horas e 10:00 horas, houve uma queda significativa na concentração, atingindo o valor mínimo do dia, próximo de 4 ppm às 10:00 horas. Essa redução, está relacionada ao aumento da radiação solar, da movimentação atmosférica e da inversão térmica. Neste período de análise os gases permaneceram mais próximos da atmosfera devido ao período mais frio do dia, que promove uma melhor ventilação e dispersão dos poluentes em temperaturas mais elevadas. Durante a tarde, entre 10:00 horas e 18:00 horas, os níveis de CO permaneceram relativamente baixos e estáveis, variando entre 5 e 10 ppm.

No final do dia, entre 18:00 horas e 22:00 horas, observou-se um novo aumento na concentração de monóxido de carbono, com os valores subindo gradualmente até cerca de 15

ppm. Esse crescimento pode estar associado ao aumento de tráfego de veículos nas proximidades e à redução da ventilação natural no período noturno. De modo geral, a Figura 38 revela que os maiores níveis de CO ocorrem em horários de menor dispersão atmosférica e maior emissão de poluentes, enquanto os menores níveis coincidem com os períodos de melhor ventilação e radiação solar.

Figura 38: Concentração de monóxido de carbono ao Longo de 24 horas - 28 de Maio de 2025



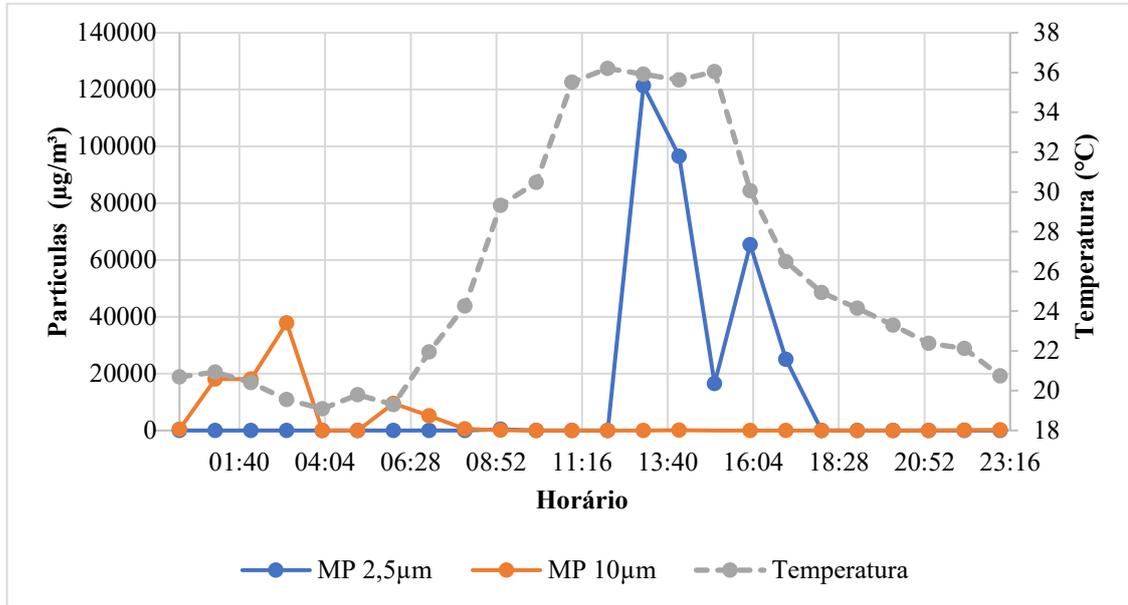
Fonte: Autor (2025).

A concentração de material particulado ao longo do dia 28 de maio de 2025, a mesma apresentou duas análises sendo uma em que a concentração em partículas de MP 2,5 μm e a outra MP 10 μm , comportamentos distintos entre duas análises de dados. O MP 10 μm , representada material particulado de até 10 nm pela linha laranja, apresentou atividade significativa nas primeiras horas do dia, com concentrações elevadas entre 00:00 e 08:00. Os maiores valores ocorreram por volta das 02:00 horas e, especialmente, às 04:00 horas, quando os níveis se aproximaram de 40.000 mg/m^3 . Após esse período, os valores se mantiveram praticamente nulos até o final do dia. Esse padrão sugere que essas partículas podem estar associadas a fontes noturnas, como queima de resíduos e até mesmo maior dispersão de partículas de poeira. Observa-se que na cidade de Nepomuceno nesta época do ano há torrefação de café durante a madrugada.

O MP 2,5 representa partículas menores de 2,5 nm, que pode ser notada pela linha azul. Verifica-se que está concentrações significativas apenas entre 12:00 horas e 18:00 horas. O valor mais alto foi registrado às 13:00 horas ultrapassando 120.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido por nova elevação às 16:00 horas. Esse comportamento está relacionado à presença de partículas mais

finas, que permanecem em suspensão por mais tempo e são mais influenciadas por fatores atmosféricos como a elevação da temperatura, movimentação do ar e atividade humana neste período. Durante o restante do dia, essa análise apresentou valores nulos ou próximos de zero.

Figura 39: Concentração de Material Particulado ao Longo de 24 horas -28 de Maio de 2025



Fonte: Autor (2025).

4.4 Comportamento Semanal da Qualidade do Ar

A avaliação da qualidade do ar ao longo de sete dias oferece uma visão mais ampla do comportamento dos poluentes em relação à rotina urbana, variações climáticas e padrões de atividade durante a semana. Essa análise permite detectar repetições cíclicas e oscilações nos níveis de poluentes, contribuindo para o planejamento de medidas preventivas e estratégias de controle ambiental.

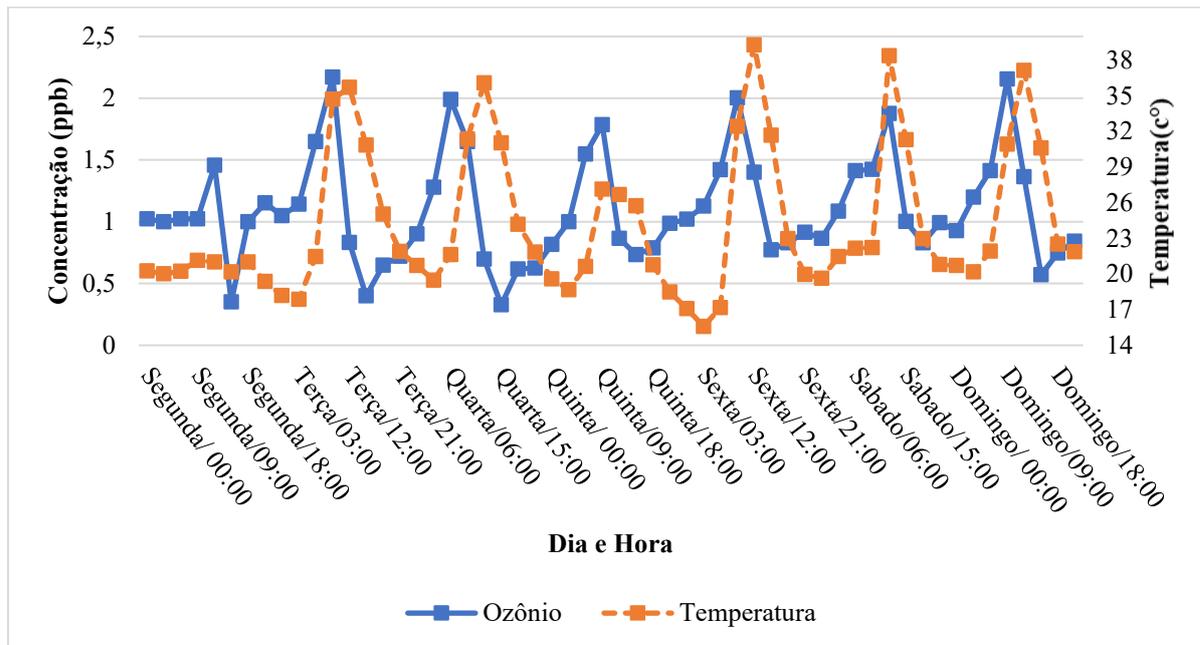
A análise semanal da concentração de ozônio no ar entre os dias 26 de maio e 1º de junho de 2025, mostra com registros realizados ao longo de cada dia. A concentração é expressa em partes por bilhão (ppb) e mostra variações claras ao longo do tempo. De modo geral, observa-se um padrão cíclico diário bastante consistente. Em todos os dias da semana, a concentração de ozônio começa mais baixa durante a madrugada, aumenta gradualmente pela manhã, atinge seu valor máximo entre o final da manhã e o início da tarde e depois começa a diminuir, voltando a níveis mais baixos ao anoitecer e durante a madrugada seguinte.

Na terça-feira, quarta-feira e domingo, os valores foram os mais elevados da semana, com concentrações ultrapassando os 2,0 ppb, especialmente próximo do meio-dia. Nos demais dias, como segunda, quinta e sábado, os valores máximos se mantiveram entre 1,7 e 2,0 ppb. As menores concentrações ocorreram durante a madrugada, geralmente abaixo de 1,0 ppb. Esse

comportamento é típico da formação de ozônio troposférico, que ocorre devido a reações fotoquímicas entre poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de radiação solar. Por isso, as maiores concentrações ocorrem antes das horas mais quentes. Durante a noite, com a ausência da luz solar, essas reações cessam e o ozônio tende a se dissipar.

Assim, a Figura 40 evidencia como a concentração de ozônio varia de forma previsível ao longo dos dias, influenciada principalmente pela intensidade da radiação solar. Esses dados reforçam a importância do monitoramento ambiental para identificar os horários de maior risco à saúde, principalmente para pessoas com problemas respiratórios, que são mais sensíveis à exposição ao ozônio em níveis elevados.

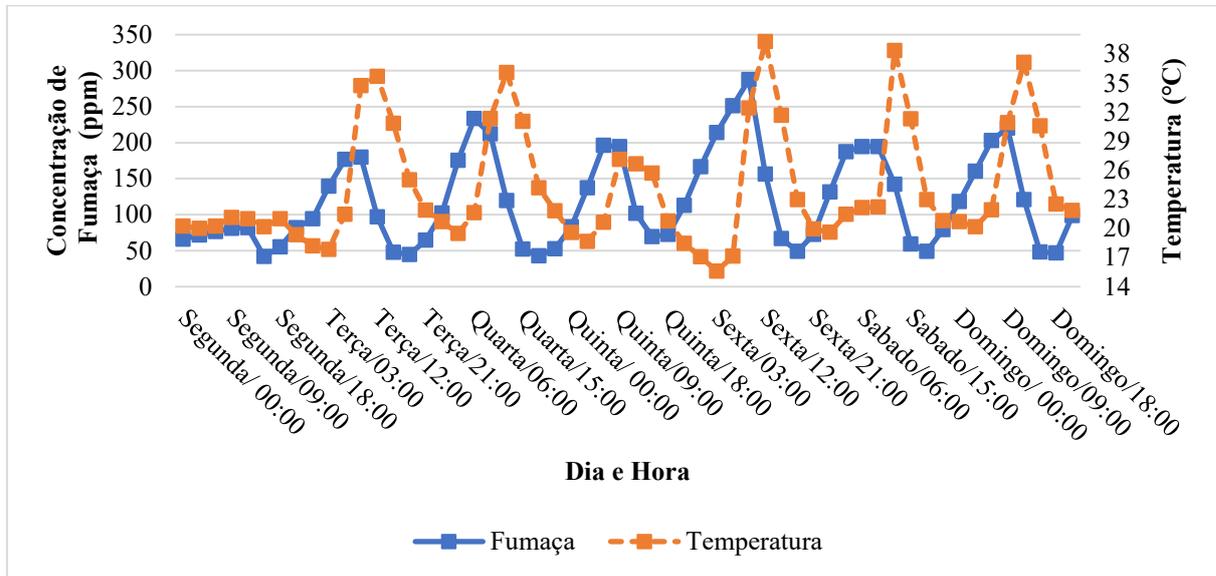
Figura 40: Análise Semanal da Concentração de Ozônio entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário



Fonte: Autor (2025).

A Figura 41, mostrar um gráfico de linha que mostra a análise semanal da concentração de fumaça. Durante todos os dias nota-se um padrão bem definido ao longo da semana, durante todos os dias. A concentração de fumaça apresenta aumentos significativos entre o final da manhã e o início da noite, chegando a valores entre 250 e 300 ppm. Por outro lado, os níveis mais baixos são observados durante a madrugada, especialmente entre 03:00 horas e 06:00 horas, com concentrações variando de 30 a 60 ppm. Esse padrão cíclico e repetitivo indica uma significativa influência das atividades humanas diurnas, como o tráfego de veículos e processos industriais, que elevam a contaminação do ar durante o dia e a diminuem à noite, quando essas atividades se reduzem.

Figura 41: Análise Semanal da Concentração de Fumaça entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário



Fonte: Autor (2025).

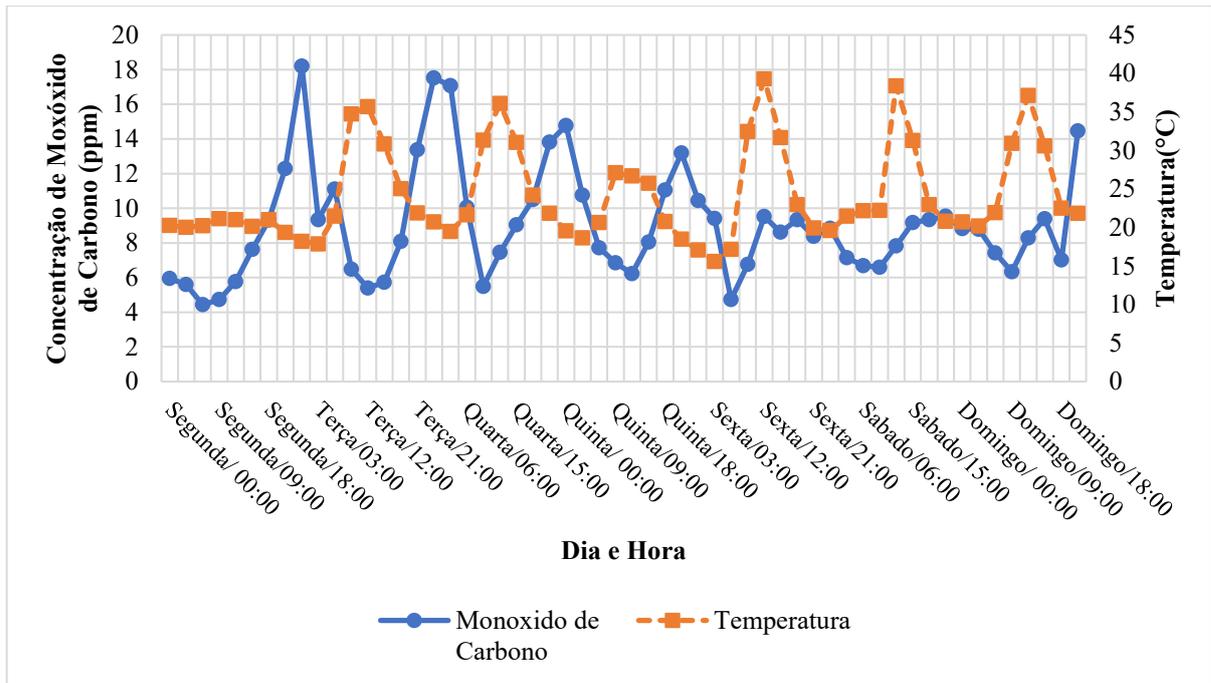
A análise semanal da concentração de monóxido de carbono (CO) no ar entre os dias 26 de maio e 1º de junho de 2025, estabelece medições realizadas em diferentes horários ao longo de cada dia. A concentração é expressa em partes por milhão (ppm), e os dados revelam oscilações significativas, com picos acentuados em determinados períodos, especialmente durante os dias úteis. Na segunda-feira, a concentração começa em 6 ppm e sobe gradualmente até alcançar aproximadamente 12 ppm no final da manhã, diminuído em seguida. Na terça-feira, observa-se o maior valor da semana ultrapassando 18 ppm logo nas primeiras horas do dia, indicando um aumento na atividade urbana e no tráfego de veículos. Na quarta-feira, o padrão se repete, com amplitude atingido 17 ppm, seguido de uma diminuição e uma nova elevação mais moderada durante a noite.

Durante a quinta-feira, a concentração volta a subir até cerca de 14 ppm no início da tarde, e depois diminui gradualmente. Na sexta-feira apresenta um comportamento mais estável, com concentrações variando entre 9 e 11 ppm, sem valores muito altos. No sábado, os valores permanecem relativamente constantes, entre 8 e 11 ppm, o que sugere uma diminuição na atividade urbana. No domingo, a concentração começa mais baixa pela manhã, mas no fim do dia há um novo aumento acentuado, atingindo cerca de 16 ppm.

O comportamento observado na Figura 42, ao longo da semana reflete a influência direta das atividades humanas sobre a presença de monóxido de carbono na atmosfera. Os valores mais altos ocorrem nos dias úteis, especialmente nas manhãs e madrugadas, coincidindo com os horários de maior movimentação de veículos e a inversão térmica. Por outro lado, a redução

dos níveis de CO nos fins de semana sugere menor emissão de poluentes, associada à redução da atividade urbana. O monitoramento contínuo desses dados é fundamental para avaliar os impactos da poluição do ar na saúde pública e para orientar políticas de controle ambiental em áreas urbanas.

Figura 42: Análise Semanal da Concentração de Monóxido de Carbono entre os dias 26 de Maio e dia 1 de Junho 2025: Monitoramento Diário



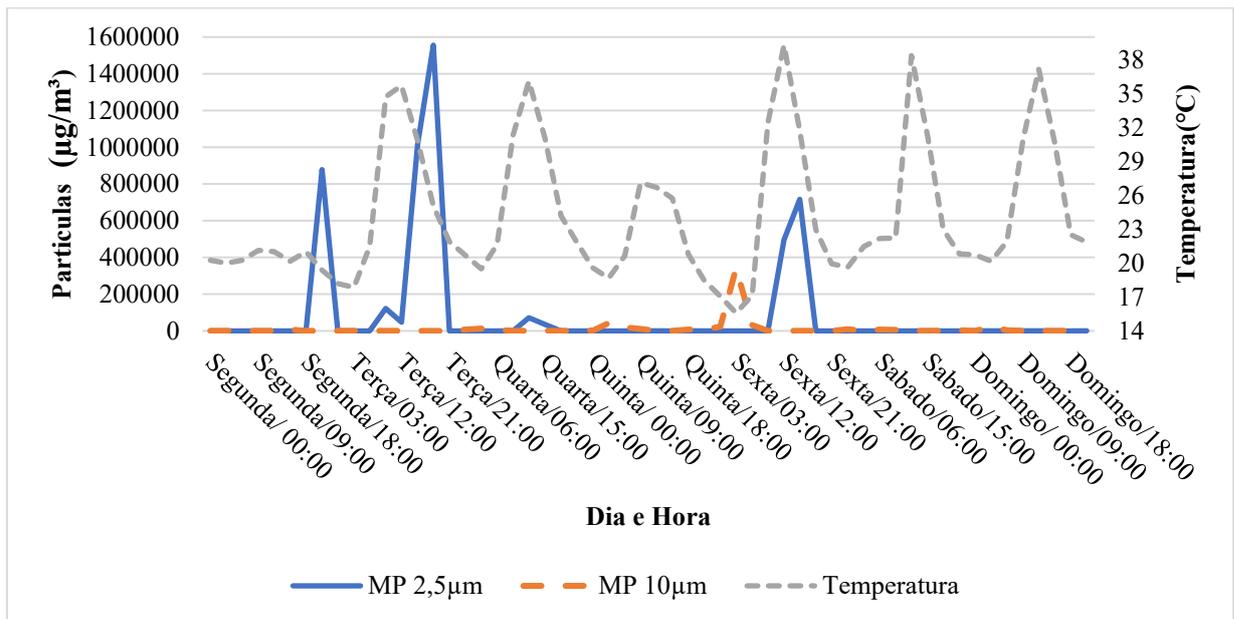
Fonte: Autor (2025).

A Figura 43, que mostra a concentração de material particulado ao longo da semana. MP 2,5 apresenta valores acentuados de concentração de partículas em momentos específicos da semana. Os três maiores valores ocorrem na segunda-feira por volta das 18:00 horas, na terça-feira por volta das 12:00 horas e na sexta-feira por volta das 03:00 horas, com valores que ultrapassam, respectivamente, 100.000, 160.000 e 90.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esses aumentos indicam episódios críticos de poluição do ar, possivelmente causados por queimadas, atividades industriais intensas ou aumento significativo de tráfego veicular.

Por outro lado, de MP 2,5 mostra um comportamento muito mais estável, com concentrações baixas ao longo de toda a semana, raramente ultrapassando valores mínimos. Isso pode indicar que MP 2,5 representa partículas mais finas ou uma área menos afetada por poluentes, ou até mesmo outro tipo de sensor ou critério de medição. A diferença marcante entre as duas análises sugere a presença de diferentes fontes ou tipos de material particulado sendo monitorados.

A Figura 43 evidencia que, embora a maior parte da semana apresente níveis controlados de material particulado, há momentos específicos com aumentos extremamente elevados que representam riscos sérios à qualidade do ar e à saúde da população. Isso reforça a importância do monitoramento constante e da identificação de fontes pontuais de poluição para tomada de decisões em políticas ambientais e de saúde pública.

Figura 43: Concentração de Material Particulado ao Longo de uma semana do dia 26 de Maio a dia 1 de Junho de 2025



Fonte: Autor (2025).

4.5 Avaliação Mensal da Qualidade do Ar

A análise mensal fornece uma perspectiva consolidada da qualidade do ar, permitindo observar tendências de longo prazo, identificar períodos críticos e correlacionar variações com fatores meteorológicos. Este tipo de abordagem é fundamental para compreender o impacto acumulado da poluição atmosférica sobre a saúde pública e o meio ambiente, bem como para validar a eficácia de sistemas de monitoramento. Os dias de análise em questão foram os dias 19 de maio de 2025 a dia 18 de junho de 2025.

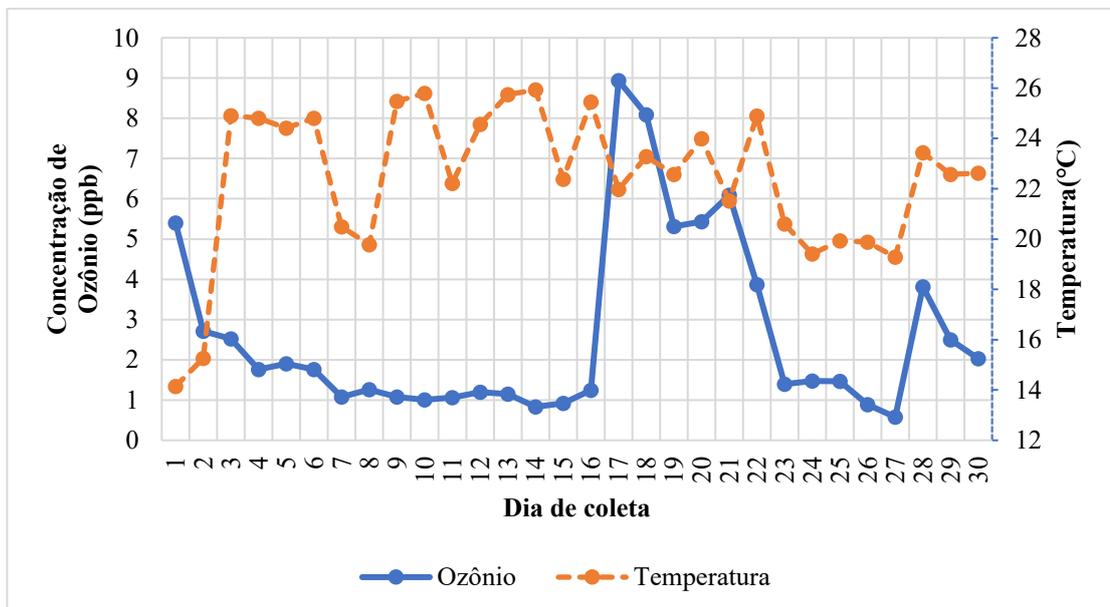
Foi avaliada a variação da concentração de ozônio (O_3), medida em partes por bilhão (ppb), ao longo de 30 dias consecutivos de coleta. Observa-se que, nas primeiras amostras, os níveis de ozônio mantêm-se relativamente baixos e estáveis, com valores que partem de cerca de 5,5 ppb no dia 1º e caem gradualmente até aproximadamente 1,1 ppb, indicando um período de boa qualidade do ar. A partir da décima sexta amostra, inicia-se uma elevação brusca na concentração, atingindo valor máximo na décima sétima com aproximadamente 9,2 ppm, o maior valor registrado em todo o período. Esse aumento acentuado pode estar relacionado a

fatores como maior incidência solar, acúmulo de poluentes precursores, baixa circulação atmosférica e inversão térmica.

Nos dias seguintes, a concentração de ozônio começa a cair, mas ainda permanece relativamente alta até a vigésima terceira análise. A partir da vigésima primeira, os valores voltam a se estabilizar em torno de 1,5 a 2 ppb, representando novamente uma condição de ar mais limpo. A vigésima sétima apresenta o menor valor do mês, com aproximadamente 0,5 ppb, indicando o momento de melhor qualidade do ar durante o período monitorado. Nos últimos três dias da amostra, nota-se uma leve elevação em torno de 3,5 ppb, seguida de uma pequena queda até a última análise cerca de 2,5 ppb, sugerindo uma nova oscilação nos níveis de ozônio, porém de menor intensidade em comparação com os resultados observado anteriormente.

De forma geral, a Figura 44 evidencia três fases distintas: uma inicial de estabilidade com baixa concentração, um valor elevado e súbito entre as amostras décima sexta e décima oitava, e uma posterior retomada de estabilidade com variações mais suaves. O ozônio devido a sua particular característica de formação é altamente influenciado pelas condições de vento, temperatura, radiação e concentração de seus precursores. Com isso a sua formação do ozônio na troposfera está diretamente relacionada às fontes móveis de poluição (MARTINS, 2006).

Figura 44: Variação da Concentração de Ozônio ao Longo de 30 dias



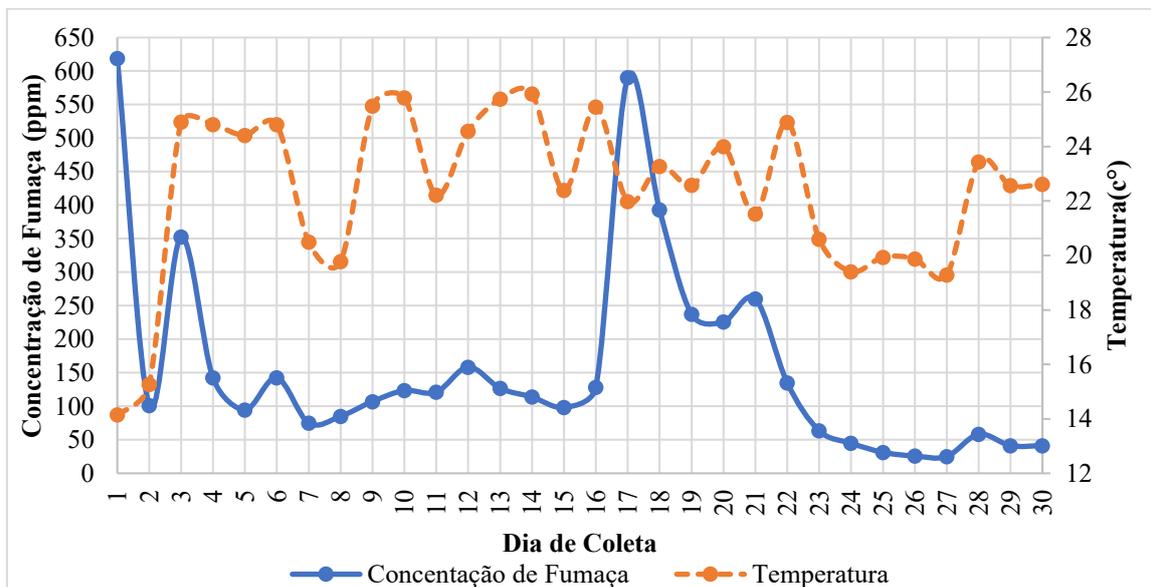
Fonte: Autor (2025).

A Figura 45, mostra a variação da concentração de fumaça no ar e a correlação com a temperatura nas proximidades do CEFET do dia 19 de maio de 2025 ao dia 18 de junho de 2025, medida em partes por milhão (ppm), ao longo de 30 dias consecutivos de coleta. Nota-se

que, no início do período, há uma grande oscilação nos valores. Isso pode ser explicado pelo tráfego veicular no dia e ainda algum fator atípico no mesmo momento, a concentração atinge aproximadamente 620 ppm, caindo bruscamente para cerca de 110 ppm na segunda amostra e voltando a subir na terceira para cerca de 360 ppm. Essa instabilidade inicial indica a presença de fontes variáveis de emissão de fumaça, como atividades de queima ou mudanças nas condições meteorológicas.

Entre quarta e decima sexta amostra, os níveis de fumaça permanecem relativamente estáveis, variando entre 80 e 160 ppm, sem grandes oscilações, o que sugere um período de controle ou equilíbrio nas fontes de poluição. No entanto, na decima sétima análise ocorre um novo pico acentuado, com a concentração chegando a aproximadamente 590 ppm, representando o segundo maior valor registrado no gráfico. Após esse aumento súbito, nota-se uma queda gradual nos dias seguintes: cerca de 400 ppm, 250 ppm e 270 ppm respectivamente, indicando a dispersão progressiva dos gases. A partir da vigésima segunda amostra até a trigésima análise, a concentração de fumaça se mantém em níveis baixos, entre 20 e 70 ppm, o que reflete uma melhora significativa na qualidade do ar e uma redução nas emissões de poluentes. Esse comportamento demonstra três fases distintas ao longo do mês. Primeiramente uma fase inicial com forte instabilidade, uma fase intermediária de concentração moderada e uma fase final de baixa poluição. Essas variações refletem a influência de fatores como atividade humana, condições climáticas e processos de dispersão atmosférica, sendo fundamentais para a compreensão da dinâmica da qualidade do ar ao longo do tempo pesquisado.

Figura 45: Variação da Concentração de Fumaça ao Longo de 30 dias



Fonte: Autor (2025).

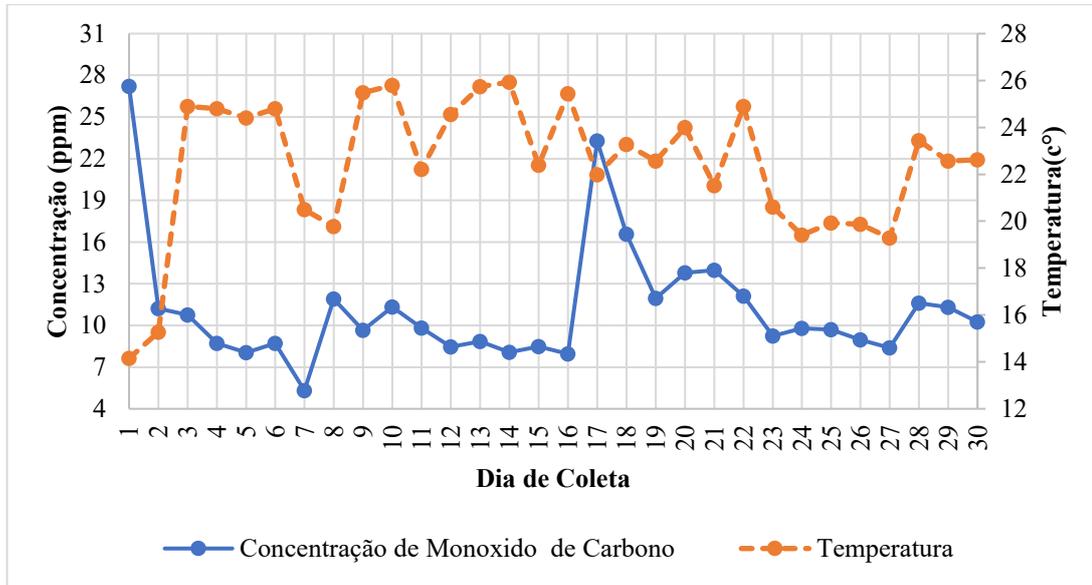
A variação da concentração de monóxido de carbono (CO) e sua correlação com a temperatura média do dia, ao longo de 30 dias consecutivos de coleta. Logo na primeira amostra, observa-se um valor extremamente elevado, próximo de 28 ppm, sendo o maior registrado no período, o que indica uma condição crítica de poluição. Na segunda amostra, há uma queda acentuada para cerca de 11 ppm, seguida por um período de relativa estabilidade entre as amostras terceira e décima sexta, com os valores variando entre 6 e 13 ppm. Essas concentrações moderadas podem estar relacionadas ao fluxo constante de veículos em áreas urbanas, atividades industriais ou até mesmo à presença de pequenas queimadas urbanas.

Na amostra décima sétima ocorre um novo valor expressivo, atingindo cerca de 24 ppm, seguido por uma diminuição gradual nos dias seguintes: aproximadamente 17 ppm, 13 ppm e estabilização entre 9 e 15 ppm até o fim do mês. Nos últimos dias de resultados os níveis de monóxido de carbono se mantêm relativamente baixos, entre 9 e 12 ppm, com uma pequena elevação observada na vigésima oitava. Esses valores e variações podem ser explicados por fatores ambientais e antrópicos, como maior circulação de veículos em determinados dias, baixa dispersão atmosférica causada por inversões térmicas que aprisionam os poluentes nas camadas mais baixas da atmosfera e também por fontes pontuais como queimadas ou intensificação de atividades industriais.

O monóxido de carbono é um gás tóxico, incolor e inodoro, que se liga à hemoglobina no sangue, formando carboxiemoglobina, o que reduz a capacidade de transporte de oxigênio para os tecidos. A exposição a níveis elevados de CO pode gerar sintomas leves como dor de cabeça, fadiga e tontura, a partir de exposições prolongadas superiores a 9 ppm. Em concentrações moderadas a altas, pode provocar náuseas, confusão mental, perda de consciência e, em casos extremos, até a morte por parada respiratória, especialmente em ambientes fechados e mal ventilados. Os grupos mais vulneráveis aos efeitos do monóxido de carbono são idosos, crianças, gestantes e pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2000; EPA, 2010).

Dessa forma, os dados apresentados na Figura 46, reforçam a importância do monitoramento contínuo da qualidade do ar, principalmente em centros urbanos, onde os valores de CO podem representar um sério risco à saúde pública. A análise desses valores permite identificar padrões de emissão, compreender os impactos das condições meteorológicas e orientar políticas públicas voltadas à redução de fontes poluidoras e à proteção da população.

Figura 46: Variação da Concentração de Monóxido de Carbono ao Longo de 30 dias



Fonte: Autor (2025).

O gráfico apresentado abaixo, mostra a variação na concentração de partículas em suspensão no ar, medida em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ao longo de 30 dias consecutivos de coleta, abrangendo os meses de maio de 2025 e junho de 2025. As três análises distintas de dados, correspondentes a diferentes tipos de material particulado como partículas grossas e finas, por exemplo MP 10 e MP 2,5 coletadas simultaneamente, e ainda a correlação com a temperatura.

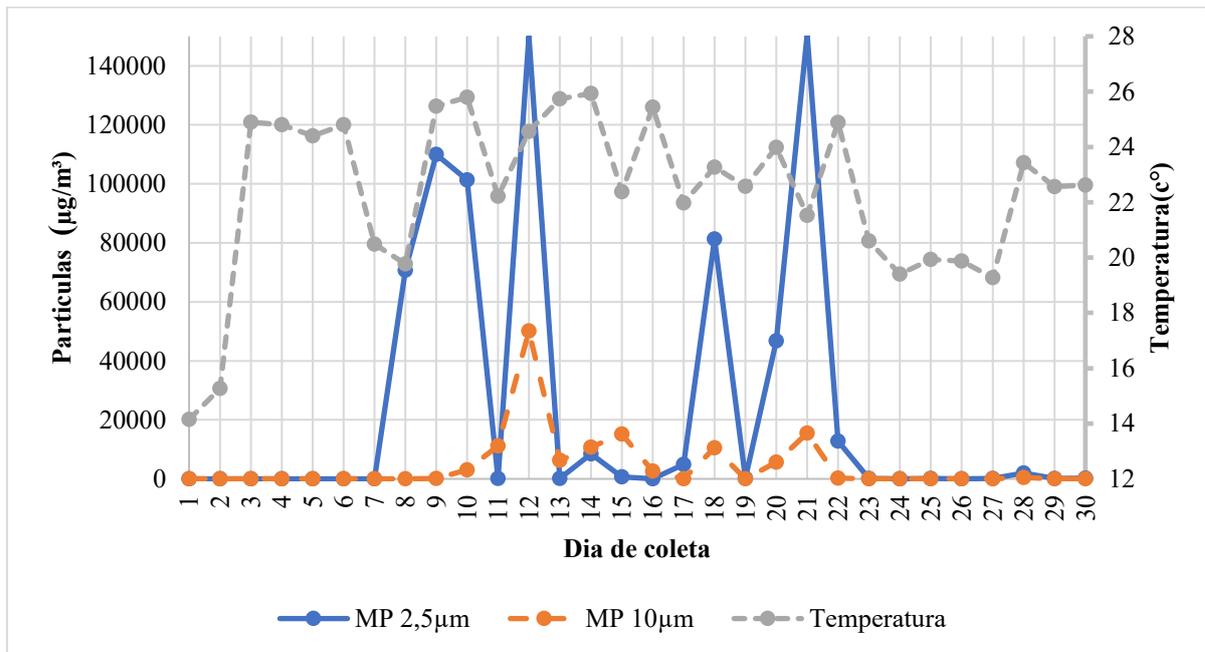
Observa-se que, na maior parte do período, ambos resultados apresentam níveis baixos ou quase nulos de partículas. No entanto, em determinados dias especialmente na décima terceira e nas décima nona até a vigésima segunda análise ocorrem picos extremamente elevados, com destaque para a MP 2,5 que ultrapassa $150.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na décima terceira amostra, além de outros picos significativos. O MP 10 também apresenta elevação nesse intervalo, embora em escala muito menor, com pico ao redor de $45.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no décimo segundo resultado. Esses aumentos abruptos e pontuais sugerem eventos esporádicos de grande liberação de partículas, possivelmente associados a queimadas urbanas, poeira intensa causada por ventos secos, movimentação de solo ou obras, além de atividades industriais que emitem material particulado em grande quantidade.

Como os dados da Figura 47, foram coletados nos meses de maio e junho, que em muitas regiões do Brasil marcam a transição do outono para o inverno. É importante considerar que esse período costuma ter índices de vendavais, redução das chuvas e maior incidência de inversão térmica. Esses fenômenos atmosféricos impedem que o ar quente suba e que o ar frio se dissipe, fazendo com que poluentes e partículas em suspensão fiquem concentrados nas

camadas mais baixas da atmosfera, próximos ao solo, agravando a qualidade do ar em centros urbanos e industriais.

As consequências para a saúde humana podem ser severas, principalmente durante os dias de altos valores de partículas. A exposição aos altos níveis de material particulado, especialmente as partículas finas está associada a uma série de problemas respiratórios e cardiovasculares, como irritação nos olhos e garganta, agravamento de asma, bronquite, crises alérgicas, redução da função pulmonar e aumento do risco de infartos e AVC (Acidente Vascular Cerebral). Crianças, idosos, gestantes e pessoas com doenças crônicas são os grupos mais vulneráveis. A exposição contínua a essas partículas também pode levar ao desenvolvimento de doenças mais graves ao longo do tempo, como doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e até câncer de pulmão (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021).

Figura 47: Concentração de Material Particulado ao Longo de 30 dias



Fonte: Autor (2025).

4.6 Análise dos dados por PCA tridimensional

Análise de Componentes Principais (PCA – Principal Component Analysis) é uma análise matemática usada na redução da dimensão de dados (JOLLIFFE, 1986). Assim, a PCA permite identificar padrões nos dados e expressá-los de uma maneira que suas semelhanças e diferenças sejam destacadas. Uma vez encontrados padrões nas amostras, é possível comprimi-las com poucas perdas de informação. Esse tipo de método é aplicado aos dados coletados ao longo de 24 horas. Ela foi utilizada para identificar correlações entre variáveis e padrões de variação entre o ozônio, monóxido de carbono, fumaça e material particulado, além da

temperatura ambiente. Sendo útil para reduzir a complexidade dos dados e destacar tendências que não são facilmente observáveis nos gráficos individuais.

A Tabela 12 exibe os valores coletados ao longo de 24 horas com diferentes variáveis ambientais, empregadas para estudo da qualidade do ar no Campus Nepomuceno. Todos os valores apresentados correspondem às médias aritméticas coletadas a cada hora, permitindo uma análise detalhada do comportamento dos poluentes e das condições atmosféricas ao longo de todo o dia. Ao aplicar essa técnica sobre os dados da tabela, é possível identificar agrupamentos de horários com características ambientais semelhantes, além de averiguar quais variáveis têm maior peso nas mudanças observadas ao longo do dia.

Tabela 12: Dados Horários de Parâmetros Ambientais para Análise de Componentes Principais (PCA)

Horário	Ozônio	Concentração de Fumaça	Monóxido de Carbono	MP	Temperatura	Umidade
01:00	0,736666667	86,21	19,48916667	460,2817	20,69166667	95
02:00	0,928333333	101,0866667	15,69666667	18053,77	20,93333333	95
03:00	0,998333333	119,2158333	17,37083333	18053,77	20,40833333	95
04:00	1,132727273	140,9718182	19,13818182	37873,83	19,56363636	95
05:00	1,224166667	174,0608333	20,79	0,430833	19,09166667	95
06:00	1,468333333	207,9833333	11,46916667	10,12917	19,79166667	95
07:00	1,7975	220,135	14,80666667	9496,358	19,3	94,33333
08:00	2,206666667	240,7783333	9,088333333	5144,14	21,94166667	93,25
09:00	1,96	239,5208333	6,256666667	550,1717	24,26666667	93
10:00	2,2975	250,8033333	6,668333333	129,7917	29,325	93
11:00	1,171666667	197,645	4,273333333	8,985	30,475	92,91667
12:00	1,456363636	185,6263636	5,509090909	1,942727	35,50909091	92,36364
13:00	0,974166667	152,2125	5,7	3,264167	36,20833333	92,25
14:00	0,62	113,7708333	8,313333333	0,320833	35,925	92
15:00	0,493333333	92,47083333	8,3775	53,83333	35,625	92
16:00	0,3725	71,0575	9,918333333	-7,22917	36,04166667	91,41667
17:00	0,27	47,76666667	9,013333333	4,053333	30,05	91,08333
18:00	0,3375	37,0775	8,204166667	3,1275	26,49166667	91
19:00	0,526666667	38,88083333	9,356666667	0,810833	24,93333333	91

20:00	0,63	44,81869565	11,21454545	0,941818	24,14545455	91,90909
21:00	0,6925	46,2475	10,99833333	8,0125	23,29166667	93,08333
22:00	0,629166667	49,10166667	12,54583333	38,33833	22,38333333	94,91667
23:00	0,514166667	51,36083333	14,1425	82,35	22,125	95
24:00	0,728333333	57,35	14,20090909	202,7183	20,74545455	95

Fonte: Autor (2025).

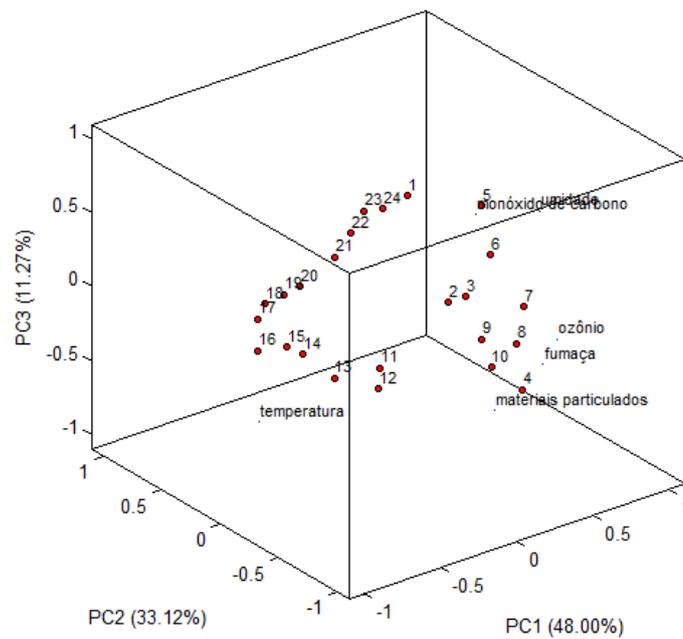
A análise dos três componentes principais (PC1, PC2 e PC3) explicam juntos 92,39% da variabilidade total dos dados, o que indica que a representação tridimensional é suficiente para capturar as principais estruturas de correlação entre as variáveis. O componente principal 1 (PC1), responsável por 48% da variância, representa a direção que mais distingue os dados ao longo do dia. O PC2 (33,12%) e o PC3 (11,27%) complementam essa explicação, permitindo uma visualização mais clara dos agrupamentos por hora. As variáveis fumaça, monóxido de carbono e material particulado estão fortemente correlacionadas entre si, localizadas próximas no gráfico. Isso indica que esses parâmetros tendem a apresentar altas concentrações simultaneamente em determinados horários, sugerindo uma mesma origem ou fenômeno comum de dispersão. A proximidade das amostras nestes vetores indica que nas horas em que um deles apresentou aumento, os outros também seguiram tendência parecida. Por outro lado, a variável ozônio aparece em uma região oposta, com direção praticamente contrária à de fumaça e CO. Isso pode indicar que, durante os horários em que a fumaça e o monóxido de carbono estiveram em níveis mais altos, geralmente em períodos de menor circulação de ar ou ausência de radiação solar, a concentração de ozônio será reduzida.

Os poluentes aumentam quando ocorre uma inversão térmica. Normalmente, a temperatura do ar decresce com o aumento da altitude. Entretanto, durante uma inversão térmica, a temperatura do ar aumenta com a altitude. Os poluentes emitidos em condições normais são mais quentes e menos densas que as ar a sua volta. Como resultado, eles sobem e são dispersados. Em uma situação de inversão, os poluentes sobem somente até o ponto em que encontrem um ar mais quente do que eles. Quando essa camada de ar quente está a baixa altitude, os poluentes se concentram próximo do nível do solo, porque não podem penetrar na camada de ar quente (GALVÃO FILHO, 1990).

A temperatura ambiente, posicionada mais afastada dos demais parâmetros, também aparece correlacionada com os gases, reforçando a ideia de que as horas mais frias do dia apresentaram maiores concentrações de fumaça, CO e material particulado. Esse comportamento está associado a fenômenos de inversão térmica, que ocorrem tipicamente nas primeiras horas da manhã e durante a madrugada, dificultando a dispersão dos poluentes e

favorecendo seu acúmulo próximo ao solo. Com análise da PCA aplicada às 24 horas de monitoramento revelou dois comportamentos distintos ao longo do dia, um período crítico de poluição atmosférica durante a madrugada e o início da manhã, e um período de melhora relativa da qualidade do ar durante a tarde, com aumento de temperatura e menor presença de fumaça, CO e partículas. A Figura 48, reforçam a importância da identificação tendência dos gases na época analisada.

Figura 48: Análise de Componentes Principais



Fonte: Autor (2025).

4.7 Análise dos Resultados Detectados em Relação aos Limites Recomendados pela OMS e CONAMA

A qualidade do ar é determinada pela concentração de diversos poluentes atmosféricos, os quais, em níveis elevados, podem causar impactos à saúde humana e ao meio ambiente. Para analisar essa qualidade, utiliza-se parâmetros de referência estabelecidos por órgãos internacionais, como o CONAMA e a Organização Mundial da Saúde (OMS). Na Tabela 13, encontrar valores recomendado pelo CONAMA e OMS.

Tabela 13: Parâmetros de concentração aceitável

Gases	Valor limite recomendado	Unidade
Ozônio	30	ppb
Monóxido de Carbono	4	ppm
MP2,5	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
MP10	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fonte: Autor (2025).

Durante o período de coleta de resultados, foram monitoradas as concentrações de diversos poluentes, tais como ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), fumaça e material particulado (MP 2,5 e MP 10), além da temperatura ambiente e umidade. A análise destes resultados permite comparar os valores observados com os limites de qualidade do ar estabelecidos pelos órgãos competentes.

Em relação ao ozônio, os dados indicam que as concentrações se mantiveram predominantemente baixas do valor determinado pela OMS ao longo dos dias, variando entre aproximadamente 1 e 9 ppb. No entanto, mesmo em valores altos, os níveis de ozônio não ultrapassaram 30 ppb. Pode-se concluir que a concentração de ozônio esteve em conformidade com os padrões de qualidade do ar durante todo o período avaliado, sem oferecer risco à saúde humana.

A análise da fumaça, realizada com o sensor MQ-02, apresentou resultados mais preocupantes. Em diversos dias houve concentração elevada de fumaça, com destaque para o primeiro dia de coleta, no qual o valor ultrapassou 600 ppm, e ainda entre as amostras 17 e 18 que registraram valores acima de 500 ppm. De acordo com a faixa de calibração do MQ-02, valores acima de 300 ppm indicam condições de qualidade do ar ruim, e acima de 600 ppm representam condições críticas, com alto risco à saúde.

No que se refere ao monóxido de carbono, os resultados indicaram concentrações variando entre 5 e 27 ppm. Os resultados mais acentuados ocorreram entre os dias 17 e 20, com destaque para o dia 17, que apresentou o maior valor registrado. A OMS recomenda como limite seguro uma concentração de 4 ppm em média de 24 horas, enquanto o CONAMA admite valores de até 9 ppm em média de 8 horas. Portanto, os níveis ultrapassam os padrões estabelecidos, especialmente com valores elevados, representando risco potencial à saúde respiratória e cardiovascular da população exposta.

A situação mais alarmante, entretanto, foi observada nos dados de material particulado. As concentrações de MP 2,5 apresentaram valores extremamente elevados, superiores a

140.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esses valores estão muito acima dos limites recomendados pela OMS, que estabelece 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como limite seguro para MP 2,5 em média de 24 horas. Da mesma forma, as concentrações de MP 10, embora menores, também ultrapassaram os limites de segurança em diversos dias. Os dados alcançados demonstram que, apesar das concentrações de ozônio permanecerem dentro do limite aprovável, houve registros elevados de monóxido de carbono, fumaça e material particulado, especialmente entre períodos de 50% da amostra.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou caracterizar a qualidade do ar nas proximidades do CEFET campus Nepomuceno, em que englobar os níveis de concentração dos poluentes ao longo de dias, analisar as legislações vigentes e os efeitos da meteorologia sob a dispersão dos poluentes. Este projeto apresentou o desenvolvimento de uma estação de monitoramento ambiental de baixo custo, aproximadamente 250 reais. Capaz de detectar e registrar, em tempo real, os principais poluentes atmosféricos tais como: ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO), fumaça e material particulado, além da comparação dos resultados de concentrações de gases com temperatura e umidade relativa do ar. Utilizando sensores comerciais e tecnologias acessíveis, o sistema foi projetado para ser compacto e ter a capacidade de armazenamento e comunicação, proporcionando uma alternativa viável às estações convencionais, que muitas vezes apresentam custos elevados e difícil acesso no interior do país.

A análise dos dados coletados em diferentes períodos revelou comportamentos distintos entre os poluentes ao longo do dia e das semanas. A concentração de ozônio manteve-se dentro dos limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), enquanto os demais poluentes, principalmente o material particulado fino, apresentaram níveis críticos em vários momentos da coleta, ultrapassando em grande escala os limites recomendados pela Resolução CONAMA nº 491/2018. Esses resultados apontam para situações de risco real à saúde humana, especialmente para grupos mais vulneráveis como crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias. Além disso, a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) permitiu compreender com maior profundidade as correlações entre as variáveis ambientais, evidenciando que a inversão térmica está inversamente relacionada ao acúmulo de poluentes em determinados períodos. Essa abordagem estatística fortalece a análise, oferece respaldo científico e demonstra que mesmo soluções simples, quando bem programadas e analisadas, são capazes de gerar informações relevantes para a saúde pública e o meio ambiente.

A estação desenvolvida se mostrou tecnicamente eficiente, apresentando estabilidade nas medições e facilidade de operação. Sua construção compacta, aliada aos recursos de armazenamento em cartão SD e envio de SMS, confere ao sistema flexibilidade de aplicação em diversos contextos, tanto para fins acadêmicos quanto para uso por instituições públicas ou privadas que demandem informações sobre a qualidade do ar de forma prática e explícita.

Portanto, é cada vez mais essencial entender as realidades das cidades, destinar recursos consideráveis ao planejamento urbano, em transporte público, visando reduzir o número de veículos em circulação constante em todo o município ou ainda novas fontes de energia que

produzam menos substâncias poluentes do ar para garantir a qualidade de vida e do meio ambiente.

Desta forma, recomenda-se para futuros trabalhos, a utilização de uma análise de dados com a incorporação de imagens de satélite e modelagem numérica para estudo da dispersão dos poluentes e elementos que possam indicar a ocorrência de inversão térmica, possibilitando maior exatidão e compatibilidade com o comportamento real dos poluentes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Air quality guidelines for Europe, 2nd edition. Disponível em:

<<https://www.who.int/publications/i/item/9789289013581>>.

ALLDATASHEETPT.COM. **MQ-131 Folha de dados(PDF).** Disponível em:

<<https://www.alldatasheetpt.com/datasheet-pdf/pdf/1132716/HANWEI/MQ-131.html>>.

Acesso em: 10 jul. 2025.

ALLDATASHEETPT.COM. **MQ-7 Folha de dados(PDF).** Disponível em:

<<https://www.alldatasheetpt.com/datasheet-pdf/pdf/1648921/HANWEI/MQ-7.html>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ALLEMANG, Randall J.; PHILLIPS, Allyn W.; ALLEMANG, Matthew R.. Application of Principal Component Analysis Methods to Experimental Structural Dynamics. **Conference Proceedings Of The Society For Experimental Mechanics Series**, [S.L.], p. 477-498, 2011. Springer New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9834-7_45.

AMARAL, Priscila Ferreira de Sales. **Ciência e Integração.** Nepomuceno: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023. 96 p. Disponível em:

<http://www.cefetmg.br/wp-content/uploads/2024/10/Ci%C3%Aancia-e-Integra%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2025.

Atmospheric Chemistry and Physics. Disponível em:

<[https://books.google.com.br/books?hl=pt-](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=SEINFELD)

[BR&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=SEINFELD](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=SEINFELD)>.

ALVES, Maria de Fátima Araújo. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO MICROCLIMA URBANO DE POMBAL – PB.** 2015. 74 f. TCC Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2015.

AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à climatologia para os trópicos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1986.

BATES, David V.. Health indices of the adverse effects of air pollution: the question of coherence. **Environmental Research**, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 336-349, dez. 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-9351\(05\)80040-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-9351(05)80040-4).

BROOK, Robert D.; RAJAGOPALAN, Sanjay; POPE, C. Arden; BROOK, Jeffrey R.; BHATNAGAR, Aruni; DIEZ-ROUX, Ana V.; HOLGUIN, Fernando; HONG, Yuling; LUEPKER, Russell V.; MITTLEMAN, Murray A.. Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease. **Circulation**, [S.L.], v. 121, n. 21, p. 2331-2378, jun. 2010. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1161/cir.0b013e3181d8bec1>
DEL ROSSO, Antonella. **KiCad software gets the CERN treatment.** 2015. Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/2028755>. Acesso em: 10 jan. 2025.

DONZELLI, Gabriele; SUAREZ-VARELA, Maria Morales. Tropospheric Ozone: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. **Atmosphere**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 779, 29 jun. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos15070>
DSM501 DUST SENSOR MODULE TO : DUST SENSOR MODULE P/N : DSM501 SPECIFICATIONS . [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.elecrow.com/download/DSM501.pdf?srsltid=AfmBOorZPhI96fv-gczy1C3sYztNqBiafrC8VZuvYcl1DyyFtAT3oCF6>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

FIGUEIRO, Michael Nunes. **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA COM RTC E COMUNICAÇÃO WI-FI**. 2022. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

FIGUEIRÓ, Michael Nunes. **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA COM RTC E COMUNICAÇÃO WI-FI**: projeto e desenvolvimento de estação meteorológica com rtc e comunicação wi-fi. 2022. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.
 GUANGZHOU AOYI ELECTRONICS CO., LTD. **DHT11 Technical Data Sheet**. [S. l.]: Guangzhou Aoyi Electronics Co., Ltd., 2020. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2025.

IMCOM WIRELESS SOLUTIONS. **SIM800 Series Hardware Design**. v. 1.09. 2015.
 Disponível em:

https://simcom.ee/documents/SIM800L/SIM800L_Hardware_Design_V1.09.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

IMPrensa NACIONAL. **Diário Oficial da União - Imprensa Nacional**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058850>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>.

JACOB, D. J. **Introduction to Atmospheric Chemistry**. [s.l.] Princeton University Press, 1999.

KANANI, Pratik; PADOLE, Mamta. Real-time Location Tracker for Critical Health Patient using Arduino, GPS Neo6m and GSM Sim800L in Health Care. **2020 4Th International Conference On Intelligent Computing And Control Systems (Iciccs)**, [S.L.], p. 242-249, maio 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iciccs48265.2020.9121128>.

MADRONICH, S.; SHAO, M.; WILSON, S. R.; SOLOMON, K. R.; LONGSTRETH, J. D.; TANG, X. Y.. Changes in air quality and tropospheric composition due to depletion of stratospheric ozone and interactions with changing climate: implications for human and environmental health. **Photochemical & Photobiological Sciences**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 149-169, jan. 2014. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1039/c4pp90037e>.

MAHZAN, Najwa Nasuha. Design and Development of an Arduino Based Data Logger for Photovoltaic Monitoring System: design and development of an arduino based data logger for photovoltaic monitoring system. **International Journal Of Simulation: Systems, Science & Technology**, [S.L.], p. 1-5, 1 jan. 2016. UK Simulation Society.
<http://dx.doi.org/10.5013/ijssst.a.17.41.15>.

MARTINS, Leila Droprinchinski. *Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo*. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
<https://doi.org/10.11606/T.14.2007.tde-02062007-162434>.

MILLER, Mark R.; CESARE, Mariachiara di; RAHIMZADEH, Shadi; ADEOYE, Marvellous; PEREL, Pablo; TAYLOR, Sean; SHRIKHANDE, Shreya; ARMSTRONG-WALENCZAK, Kelcey; SHAH, Anoop S. V.; BERENSTEIN, César Damián. Clearing the Air to Address Pollution's Cardiovascular Health Crisis. **Global Heart**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 82, 30 out. 2024. Ubiquity Press, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5334/gh.1364>.

MORAWSKA, L.; THOMAS, S.; BOFINGER, N.; WAINWRIGHT, D.; NEALE, D.. Comprehensive characterization of aerosols in a subtropical urban atmosphere. **Atmospheric Environment**, [S.L.], v. 32, n. 14-15, p. 2467-2478, ago. 1998. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310\(98\)00023-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310(98)00023-5).

NOVOS DADOS DA OMS REVELAM QUE BILHÕES DE PESSOAS AINDA RESPIRAM AR INSALUBRE. Genebra, 4 abr. 2022.

OECD Environmental Outlook to 2050 THE CONSEQUENCES OF INACTION. [s.l: s.n.]. Disponível em:
 <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2012/03/oecd-environmental-outlook-to-2050_g1g14e69/9789264122246-en.pdf>.

ÓRFÃO, G. N. G. **Intoxicação por monóxido de carbono**. Disponível em:
 <<https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/81004>>.

Particle / Dust Sensor Module DSM 501 Series Features. [s.l: s.n.]. Disponível em:
 <[https://www.atrinelec.com/download/datasheet/DSM501A\(Atrinelec.com\).pdf](https://www.atrinelec.com/download/datasheet/DSM501A(Atrinelec.com).pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PENTEADO, Sandro. *Climatologia: noções básicas e aplicadas*. 3. ed. São Paulo: Editora Ciências Ambientais, 2017.

PUTRA, M. D. L Radimas; RIVAI, Muhammad; IRFANSYAH, Astria Nur. Unmanned Surface Vehicle Navigation Based on Gas Sensors and Fuzzy Logic Control to Localize Gas Source. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1201, n. 1, p. 012001, 1 maio 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1201/1/012001>.

SAMIULLAH, Muhammad; IRFAN, Muhammad Zohaib; RAFIQUE, Abid. Microcontrollers: a comprehensive overview and comparative analysis of diverse types. **Engrxiv**: engrxiv, [S.L.], v. 1, p. 1-5, 22 set. 2023. Semanal. Open Engineering Inc. <http://dx.doi.org/10.31224/3228>.

SHINYEI TECHNOLOGY CO., LTD. *DSM501A Dust Sensor Specification*, 2007. Disponível em: <https://www.shinyei.co.jp/stc/optical/dust.html>. Acesso em: 9 jul. 2025.
 SUDHAN, R.Hari; KUMAR, M.Ganesh; PRAKASH, A.Udhaya; DEVI, S.Anu Roopa; P., Sathiya. ARDUINO ATMEGA-328 MICROCONTROLLER. **Ijireeice**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 27-29, 15 abr. 2015. Tejass Publishers. <http://dx.doi.org/10.17148/ijireeice.2015.3406>.

TRINH, Thi Thuy; TRINH, Thi Tham; LE, Thi Trinh; NGUYEN, The Duc Hanh; TU, Binh Minh. Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam. **Environmental Geochemistry And Health**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 929-937, 18 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-018-0190-0>.

UENO, Alexssandro; SOUZA, Kleber Marcio de. **ESTAÇÕES DISTRIBUÍDAS DE MONITORAMENTO DO AR DE BAIXO-CUSTO UTILIZANDO PLATAFORMA ARDUINO**. Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa, Londrina – Paraná, p. 69-75, 31 jul. 2018.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Spreading like wildfire: The rising threat of extraordinary landscape fires**. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires>. Acesso em: 29 maio 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Integrated Science Assessment (ISA) for Carbon Monoxide (CO)**. Washington, DC: EPA, 2010. URBANSKI, Shawn P.; HAO, Wei Min; BAKER, Stephen. Chapter 4 Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. **Developments In Environmental Science**, [S.L.], p. 79-107, 2008. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s1474-8177\(08\)00004-1](http://dx.doi.org/10.1016/s1474-8177(08)00004-1).

VALAVANIDIS, Athanasios; FIOTAKIS, Konstantinos; VLACHOGIANNI, Thomais. Airborne Particulate Matter and Human Health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. **Journal Of Environmental Science And Health, Part C**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 339-362, 26 nov. 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10590500802494538>.

WEST, J. Jason; COHEN, Aaron; DENTENER, Frank; BRUNEKREEF, Bert; ZHU, Tong; ARMSTRONG, Ben; BELL, Michelle L.; BRAUER, Michael; CARMICHAEL, Gregory; COSTA, Dan L.. “What We Breathe Impacts Our Health: improving understanding of the link between air pollution and health”. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 50, n. 10, p. 4895-4904, 5 maio 2016. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b03827>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Billions of people still breathe unhealthy air: New WHO data**. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Acesso em: 04 jul. 2025.

ZHANG, Hui-Fu; KANG, Wei. Design of the Data Acquisition System Based on STM32. **Procedia Computer Science**, [S.L.], v. 17, p. 222-228, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.030>.

GLOSSÁRIO

Glossário de termos epidemiológicos apresentados no texto desta dissertação.

Troposférico- Trata-se de um adjetivo que alude a algo ligado à troposfera, a camada mais baixa da atmosfera terrestre.

Estratosférico- Adjetivo relativo à estratosfera, ou seja, lugar alto.

Aerossóis -Suspensão de partículas sólidas

Datasheets – Ficha de dados

Interface - Meio pelo qual o usuário interage com um programa ou sistema operacional

APÊNDICE A - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

```

int CO_sensorPin = A1;
int Mq2_sensorPin = A0;
int Mq131_sensorPin = A2;
int pwmpin = 5; // Pino de saída PWM para o MOSFET
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicia a comunicação serial
  pinMode(CO_sensorPin, INPUT); // Define o pino do sensor como entrada
  pinMode(pwmpin, OUTPUT); // Define o pino PWM como saída
}
void loop() {
  float CO_VRL; // Tensão do sensor
  float CO_RS; // Resistência do sensor
  float CO_R0; // Valor R0 do sensor
  float CO_sensorRead = 0.0; // Leitura do sensor
  float CO_RL = 9780; // Resistência de carga (Ohms)
  float CO_VC = 5.0; // Tensão de alimentação do sensor
  //MQ2
  float Mq2_VRL; // Tensão do sensor
  float Mq2_RS; // Resistência do sensor
  float Mq2_R0; // Valor R0 do sensor
  float Mq2_sensorRead = 0.0; // Leitura do sensor
  float Mq2_RL = 4810; // Resistência de carga (Ohms)
  float Mq2_VC = 5.0; // Tensão de alimentação do sensor
  // MQ131
  float Mq131_VRL; // Tensão do sensor
  float Mq131_RS; // Resistência do sensor
  float Mq131_R0; // Valor R0 do sensor
  float Mq131_sensorRead = 0.0; // Leitura do sensor
  float Mq131_RL = 978000; // Resistência de carga (Ohms)
  float Mq131_VC = 5.0; // Tensão de alimentação do sensor
  // Liga o LED/MOSFET por 1 segundo
  digitalWrite(pwmpin, HIGH);
  delay(1000);

  // Desliga o LED/MOSFET e espera um tempo total de 144 segundos (59s + 85s)
  digitalWrite(pwmpin, LOW);
  delay(59000);
  delay(85000);

  // Leitura do sensor mq-7 e cálculos
  CO_sensorRead = analogRead(CO_sensorPin); // Lê o valor analógico do sensor
  CO_VRL = CO_sensorRead * (CO_VC / 1023.0); // Converte para tensão
  CO_RS = ((CO_VC / CO_VRL) - 1) * CO_RL; // Calcula RS (resistência do sensor)
  CO_R0 = CO_RS / 25.75; // Calcula R0 (valor baseado no gráfico do datasheet)
  // Leitura do sensor mq-2 e cálculos
  Mq2_sensorRead = analogRead(Mq2_sensorPin); // Lê o valor analógico do sensor
  Mq2_VRL = Mq2_sensorRead * (Mq2_VC / 1023.0); // Converte para tensão

```

```

Mq2_RS = ((Mq2_VC / Mq2_VRL) - 1) * Mq2_RL; // Calcula RS (resistência do sensor)
Mq2_R0 = Mq2_RS / 9.8; // Calcula R0 (valor baseado no gráfico do datasheet)
// Leitura do sensor mq-131 e cálculos
Mq131_sensorRead = analogRead(Mq131_sensorPin); // Lê o valor analógico do sensor
Mq131_VRL = Mq131_sensorRead * (Mq131_VC / 1023.0); // Converte para tensão
Mq131_RS = ((Mq131_VC / Mq131_VRL) - 1) * Mq131_RL; // Calcula RS (resistência do
sensor)
Mq131_R0 = Mq131_RS / 11; // Calcula R0 (valor baseado no gráfico do datasheet)
// Exibe os resultados no monitor serial
Serial.print("Sensor resistance in ambient air Mq7_RO: ");
Serial.println(CO_R0);
Serial.println("Sensor resistance in ambient air Mq_2RO: ");
Serial.println(Mq2_R0);
Serial.println("Sensor resistance in ambient air Mq_131RO: ");
Serial.println(Mq131_R0);

delay(1000); // Aguarda 1 segundo antes da próxima leitura
}

```

APÊNDICE B - CÓDIGO DE AJUSTE DE DATA E HORA DO RTC

```

#include <Arduino.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <TimeLib.h>
#include <DS1307RTC.h>

// Cartão SD
const int chipSelect = 10;
File dataFile;

// RTC
tmElements_t tm;
const char *monthName[12] = {
  "Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
  "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"
};

// Função para obter a data do compilador e configurar o RTC
bool getDate(const char *str) {
  char Month[4];
  int Day, Year;
  if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) {
    return false;
  }

  // Converter o nome do mês para número
  for (uint8_t i = 0; i < 12; i++) {
    if (strcmp(Month, monthName[i]) == 0) {
      tm.Month = i + 1;
      break;
    }
  }

  tm.Day = Day;
  tm.Year = CalendarYrToTm(Year); // Converter para formato de ano do RTC
  return true;
}

// Função para obter a hora do compilador e configurar o RTC
bool getTime(const char *str) {
  int Hour, Min, Sec;
  if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) {
    return false;
  }
  tm.Hour = Hour;

```

```

tm.Minute = Min;
tm.Second = Sec;
return true;
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial); // Aguarda o Monitor Serial

  // Inicializa o SD Card
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Falha ao acessar o cartão SD! Verifique as conexões.");
    while (1);
  }
  Serial.println("Cartão SD inicializado.");

  // Criar ou abrir o arquivo datalog.txt
  dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    Serial.println("Arquivo datalog.txt pronto para gravação.");
    dataFile.close();
  } else {
    Serial.println("Erro ao abrir o arquivo datalog.txt.");
    while (1);
  }

  // Configuração do RTC com a data e hora da compilação
  bool parse = false, config = false;

  if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
    parse = true;
    if (RTC.write(tm)) {
      config = true;
    }
  }

  delay(2000); // Pequena pausa para estabilização

  if (parse && config) {
    Serial.print("DS1307 configurado com sucesso: ");
    Serial.print(__DATE__);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(__TIME__);
  } else if (parse) {
    Serial.println("Erro na comunicação com o DS1307. Verifique o circuito.");
  } else {
    Serial.println("Erro ao obter data/hora do compilador.");
  }
}

```

```
void loop() {
  static unsigned long lastPrintTime = 0;
  unsigned long currentTime = millis();

  if (currentTime - lastPrintTime >= 5000) {
    lastPrintTime = currentTime;
    printDateTime();
  }
}

// Função para exibir a data e hora do RTC
void printDateTime() {
  if (RTC.read(tm)) {
    Serial.print("Data e Hora: ");
    Serial.print(tm.Day);
    Serial.print('/');
    Serial.print(tm.Month);
    Serial.print('/');
    Serial.print(tmYearToCalendar(tm.Year));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(tm.Hour);
    Serial.print(':');
    Serial.print(tm.Minute);
    Serial.print(':');
    Serial.println(tm.Second);
  } else {
    Serial.println("Erro ao ler o RTC! Verifique a conexão.");
  }
}
```

APÊNDICE C - CÓDIGO DE TESTE E AJUSTE DO MÓDULO GSM SIM (800L)

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
SoftwareSerial gsm(7, 6); // RX, TX
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  gsm.begin(9600);
```

```
  delay(1000);
```

```
  // Inicia a comunicação GSM
```

```
  gsm.println("AT"); // Testa comunicação
```

```
  delay(1000);
```

```
  gsm.println("AT+CMGF=1"); // Configura modo texto
```

```
  delay(1000);
```

```
  gsm.println("AT+CMGS="+5535992654069+""); // Número do destinatário com DDI e  
  DDD
```

```
  delay(1000);
```

```
  gsm.print("Mensagem enviada pelo arduino");
```

```
  delay(1000);
```

```
  gsm.write(26); // Ctrl+Z para enviar SMS
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  // Não é necessário repetir nada
```

```
}
```

APÊNDICE D - CÓDIGO DE LEITURA DO SENSOR

```

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <TimeLib.h>
#include <DS1307RTC.h>
#include <DHT.h>
#include <SoftwareSerial.h>

// --- Definições ---
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
const int led = 8;
// MQ Sensor Pins
#define MQ131_PIN A2
#define MQ7_PIN A1
#define MQ2_PIN A0

// DSM501A Pins
#define PM25_PIN 3
#define PM10_PIN 2

// PWM pin do módulo sensor
#define PWMPIN 5
#define LEDPIN 8

// SD Card
#define SD_CHIP_SELECT 10
File dataFile;

// GSM
SoftwareSerial gsm(7, 6); // TX, RX do Arduino

// RTC
tmElements_t tm;

// Constantes de calibração dos sensores (ajuste se necessário)
const float VCC = 5.0;
const float R0_MQ7 = 13000;
const float R0_MQ2 = 1730;
const float R0_MQ131 = 18500000;

// SMS temporização
unsigned long lastSMSSent = 0;
const unsigned long intervalSMS = 1000;//UL * 60UL * 60UL * 1000UL; // 8 horas

```

```

// Variáveis globais para armazenar os dados
float ppmCO, ppmSmoke, ppmO3, concPM25, concPM10, temperatura, umidade;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pinMode(PWMPIN, OUTPUT);
  pinMode(LEDPIN, OUTPUT);
  pinMode(PM25_PIN, INPUT);
  pinMode(PM10_PIN, INPUT);

  // SD
  if (!SD.begin(SD_CHIP_SELECT)) {
    Serial.println("Erro ao inicializar cartão SD");
    analogWrite(led, 255);
    while (1);
  }

  // GSM
  gsm.begin(9600);
  delay(2000);
  gsm.println("AT");
  delay(1000);
  gsm.println("AT+CMGF=1"); // Modo texto
  delay(1000);

  // RTC
  if (!RTC.read(tm)) {
    Serial.println("Erro ao acessar o RTC!");
  }
}

void loop() {
  lerSensores();
  gravarDados();

  if (millis() - lastSMSSent >= intervalSMS) {
    enviarSMS();
    lastSMSSent = millis();
  }

  delay(60000); // 1 minuto entre leituras
}

void lerSensores() {
  // Ativa sensor (se necessário)
  digitalWrite(PWMPIN, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(PWMPIN, LOW);
}

```

```

delay(59000);
delay(90000);
// MQ-7
float mq7Volt = analogRead(MQ7_PIN) * (5.0 / 1023.0);
float rs_mq7 = ((10000 * (VCC - mq7Volt)) / mq7Volt);
float ratio_mq7 = rs_mq7 / R0_MQ7;
ppmCO = pow((19.709 / ratio_mq7), (1 / 0.652));

// MQ-2
float mq2Volt = analogRead(MQ2_PIN) * (5.0 / 1023.0);
float rs_mq2 = ((5000 * (VCC - mq2Volt)) / mq2Volt);
float ratio_mq2 = rs_mq2 / R0_MQ2;
ppmSmoke = pow((35.864 / ratio_mq2), (1 / 0.429));

// MQ-131
float mq131Volt = analogRead(MQ131_PIN) * (5.0 / 1023.0);
float rs_mq131 = ((1000000 * (VCC - mq131Volt)) / mq131Volt);
float ratio_mq131 = rs_mq131 / R0_MQ131;
ppmO3 = pow((0.3892 / ratio_mq131), (1 / 0.4243));

// DSM501A - Medição de 30 segundos
unsigned long start = millis();
unsigned long lowPM25 = 0, lowPM10 = 0;
while (millis() - start < 30000) {
    lowPM25 += pulseIn(PM25_PIN, LOW);
    lowPM10 += pulseIn(PM10_PIN, LOW);
}

float ratioPM25 = (lowPM25 / 30000.0) * 100.0;
float ratioPM10 = (lowPM10 / 30000.0) * 100.0;

concPM25 = 1.1 * pow(ratioPM25, 3) - 3.8 * pow(ratioPM25, 2) + 520 *
ratioPM25 + 0.62;
concPM10 = 1.1 * pow(ratioPM10, 3) - 3.8 * pow(ratioPM10, 2) + 520 *
ratioPM10 + 0.62;

// DHT11
temperatura = dht.readTemperature()-7;
umidade = dht.readHumidity()-2;

// Debug
Serial.println("----- Leituras -----");
Serial.print("CO: ");
    Serial.print(ppmCO);
    Serial.println(" ppm");
Serial.print("Fumaça: ");
    Serial.print(ppmSmoke);
    Serial.println(" ppm");
Serial.print("O3: ");

```

```

    Serial.print(ppmO3);
    Serial.println(" ppm");
    Serial.print("PM2.5: ");
    Serial.print(concPM25 / 1000.0);
    Serial.println(" mg/m³");
    Serial.print("PM10: ");
    Serial.print(concPM10 / 1000.0);
    Serial.println(" mg/m³");
    Serial.print("Temp: ");
    Serial.print(temperatura);
    Serial.println(" °C");
    Serial.print("Umidade: ");
    Serial.print(umidade);
    Serial.println(" %");
}

void gravarDados() {
    if (!RTC.read(tm)) {
        Serial.println("Erro ao ler o RTC");
        return;
    }

    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
        dataFile.print(tm.Day);
        dataFile.print("/");
        dataFile.print(tm.Month);
        dataFile.print("/");
        dataFile.print(tmYearToCalendar(tm.Year));
        dataFile.print(" ");
        dataFile.print(tm.Hour);
        dataFile.print(":");
        dataFile.print(tm.Minute);
        dataFile.print(":");
        dataFile.print(tm.Second);
        dataFile.println(" - ");

        dataFile.print("CO: ");
        dataFile.println(ppmCO);
        //dataFile.println(" ppm, ");
        dataFile.print("Smoke: ");
        dataFile.println(ppmSmoke);
        // dataFile.println(" ppm, ");
        dataFile.print("O3: ");
        dataFile.println(ppmO3);
        // dataFile.println(" ppm, ");
        dataFile.print("PM2.5: ");
        dataFile.println(concPM25 / 1000.0);
        // dataFile.println(" mg/m³, ");

```

```

    dataFile.print("PM10: ");
    dataFile.println(concPM10 / 1000.0);
    // dataFile.print(" mg/m³, ");
    dataFile.print("Temp: ");
    dataFile.print(temperatura);
    dataFile.println(" °C, ");
    dataFile.print("Umid: ");
    dataFile.print(umidade);
    dataFile.println(" %");
    dataFile.println("");
    dataFile.println("");
    dataFile.close();
} else {
    Serial.println("Erro ao abrir datalog.txt");
}
}

void enviarSMS() {
    gsm.println("AT+CMGS=\"+5535992654069\""); // Substitua pelo número real
    delay(2000);
    gsm.print("---Leituras:---\n");
    gsm.print("CO: ");
    gsm.print(ppmCO);
    gsm.println(" ppm");
    gsm.print("Fumaca: ");
    gsm.print(ppmSmoke);
    gsm.println(" ppm");
    gsm.print("O3: ");
    gsm.print(ppmO3);
    gsm.println(" ppm");
    gsm.print("PM2.5: ");
    gsm.print(concPM25 / 1000.0);
    gsm.println(" mg/m3");
    gsm.print("PM10: ");
    gsm.print(concPM10 / 1000.0);
    gsm.println(" mg/m3");
    gsm.print("Temp: ");
    gsm.print(temperatura);
    gsm.print(" grau, ");
    gsm.print("Umid: ");
    gsm.print(umidade);
    gsm.println(" %");
    gsm.write(26); // CTRL+Z
}

```




CÓPIA DO TRABALHO Nº 157/2025 - DENP (11.62.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 28/07/2025 10:09)

ALENCAR FRANCO DE SOUZA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DENP (11.62.04)

Matrícula: ###292#3

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **157**, ano: **2025**, tipo: **CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: **26/07/2025** e o código de verificação: **fa7e295e6f**