

# EMQA - Estação de Monitoramento de Qualidade Ambiental

Felipe Sledz Ferreira \* Gabriel Arriello Santana \*\*  
Vinicius Romualdo Silva \*\*\*

\* Faculdade de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, (e-mail: felipesledz@alunos.utfpr.edu.br).

\*\* Faculdade de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, (e-mail: gabrielarriello@alunos.utfpr.edu.br)

\*\*\* Faculdade de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, (e-mail: viniciusromualdo@alunos.utfpr.edu.br)

**Abstract:** This paper presents the design, development, and operation of an Environmental Quality Monitoring Station (EMQA). The project's objective was to create a low-cost system for conducting research in urban environments, assessing air quality, noise levels, and ultraviolet radiation. The station was built using an ESP32 microcontroller as its core, which controls sensors for temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and humidity (%), particulate matter ( $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$ ), carbon monoxide (CO), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), ozone ( $\text{O}_3$ ), volatile organic compounds (VOCs), sound level (dB), and ultraviolet radiation (UV). The final structure, assembled in a plastic enclosure, was tested in two locations in Curitiba (PR), Brazil: Marechal Floriano Peixoto Avenue (a high-traffic area) and the Sítio Cercado neighborhood (a residential area). The collected data were analyzed and discussed at the end of the article.

**Resumo:** Este artigo aborda a estruturação, a criação e o funcionamento de uma Estação de Monitoramento de Qualidade Ambiental (EMQA). O objetivo do projeto foi montar um sistema de baixo custo para a realização de pesquisas em ambientes urbanos, avaliando a qualidade do ar, do som e da radiação ultravioleta. A estação foi confeccionada utilizando como base um microcontrolador ESP32, que controla sensores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade (%), material particulado ( $\text{PM}_{2.5}$  e  $\text{PM}_{10}$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ), compostos orgânicos voláteis (VOCs), ruído sonoro (dB) e radiação ultravioleta (UV). A estrutura final, montada em um gabinete plástico, foi submetida a testes em dois pontos de Curitiba (PR): a Avenida Marechal Floriano Peixoto (via de intenso tráfego de veículos) e o bairro Sítio Cercado (zona residencial). Os dados obtidos foram analisados e discutidos ao final do artigo.

**Keywords:** EMQA; Environmental quality station; Real-time sensing; Urban pollution; Internet of Things (IoT); Low cost; ESP32.

**Palavras-chave:** EMQA; Estação de qualidade ambiental; Sensoriamento em tempo real; Poluição urbana; Internet das Coisas (IOT); Baixo custo; ESP32.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade de vida de uma população está diretamente relacionada ao ambiente em que vive e trabalha. Com a urbanização acelerada, a expansão do setor industrial e o crescimento da frota de veículos, os centros urbanos enfrentam níveis crescentes de poluição atmosférica e sonora, o que representa um risco significativo à saúde de seus habitantes. Segundo a Organização Mundial da Saúde, estima-se que sete milhões de pessoas morram, anualmente, em decorrência da exposição a poluentes atmosféricos em altas concentrações, e que 99% da população mundial resida em locais onde os níveis de poluição excedem os padrões estabelecidos (World Health Organization, 2025).

Diante desse cenário, propõe-se o desenvolvimento de uma Estação de Monitoramento da Qualidade Ambiental

(EMQA), um sistema de baixo custo capaz de monitorar, em tempo real, indicadores relevantes de poluição ambiental. A partir desses dados, torna-se possível avaliar a qualidade do ambiente, identificar padrões de contaminação e embasar ações preventivas e políticas públicas mais eficazes.

A escolha dos parâmetros monitorados pela EMQA foi orientada por sua relevância científica e impacto comprovado na saúde pública.

Entre os principais efeitos à saúde, destacam-se:

- Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs): provocam irritações nas vias respiratórias e estão associados a efeitos cancerígenos (Ferreira, 2007).
- Monóxido de Carbono (CO): reduz a capacidade de oxigenação do sangue, podendo causar tonturas, fa-

- diga e, em níveis mais altos, risco de asfixia (Ferreira, 2007).
- Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ): causa dores de cabeça, tontura, sonolência e dificuldade respiratória (Ferreira, 2007).
  - Dióxido de Nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ): agrava quadros respiratórios preexistentes, como asma e bronquite (Ferreira, 2007).
  - Ozônio ( $\text{O}_3$ ): é relacionado à inflamação pulmonar e diminuição da função respiratória (Ferreira, 2007).
  - Material Particulado ( $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$ ): penetram profundamente nos pulmões e podem alcançar a corrente sanguínea, elevando o risco de doenças cardiovasculares, respiratórias e reduzindo a expectativa de vida (Ferreira, 2007).
  - Ruído Sonoro (dB): está ligado ao aumento de distúrbios do sono, estresse crônico, hipertensão e risco cardiovascular elevado (Hammer et al., 2014).
  - Radiação Ultravioleta (UV): causa queimaduras solares, envelhecimento precoce da pele e aumentar o risco de câncer cutâneo (Tang et al., 2024).

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

### 2.1 Real-time Air Quality Monitoring in Smart Cities using IoT-enabled Advanced Optical Sensors

Aserkar et al. (2024) propõem um sistema IoT para monitoramento da qualidade do ar em tempo real em cidades inteligentes. O sistema utiliza sensores ópticos avançados (PMSA003, MICS-6814 e MQ-131) acoplados a um microcontrolador ESP-WROOM-32, capaz de detectar poluentes como amônia ( $\text{NH}_3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), material particulado ( $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ). Os dados são transmitidos via Wi-Fi/Bluetooth para a nuvem AWS (Amazon Web Services), onde são processados e disponibilizados em um dashboard com alertas em tempo real quando os níveis de poluentes excedem limites seguros.

O trabalho apresenta uma arquitetura robusta com integração em nuvem e um modelo de alertas que obteve um RMSE de 3.7656, demonstrando eficiência na predição. Entretanto, o sistema foca exclusivamente na qualidade do ar, não abordando outros parâmetros ambientais como poluição sonora ou radiação ultravioleta. Para a EMQA, este artigo serve como referência para a seleção de sensores de poluentes gasosos e particulados.

### 2.2 Design and Implementation of an Indoor and Outdoor Air Quality Measurement Device for the Detection and Monitoring of Gases with Hazardous Health Effects

O trabalho de Caselles Nuñez et al. (2025) descreve o desenvolvimento o dispositivo portátil Q-Air para monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos e externos. O dispositivo, baseado no microcontrolador ESP32, integra sensores de gases (MQ135 para  $\text{CO}_2$  e NO, MQ131 para  $\text{O}_3$ , MICS4514 para  $\text{NO}_2$  e CO, SPS30 para  $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$ ) e parâmetros ambientais (DHT22 para temperatura e umidade). Os dados são transmitidos via Wi-Fi para a plataforma Blynk, permitindo visualização em tempo real através de um aplicativo.

Os autores realizaram testes de campo em Barranquilla (Colômbia), comparando as medições do Q-Air com estações fixas oficiais. Os resultados mostraram erros percentuais inferiores a 1.6% para a maioria dos parâmetros, validando a precisão do dispositivo. A principal limitação identificada foi a necessidade de calibração frequente dos sensores da família MQ. Para a EMQA, este trabalho fornece subsídios para a seleção de sensores de gases e partículas, além de estratégias de validação de dados.

### 2.3 A Low-cost IoT System for Environmental Pollution Monitoring in Developing Countries

No artigo de Flores-Cortez et al. (2019), os autores apresentam uma estação de monitoramento de baixo custo para países em desenvolvimento, focada na medição de material particulado ( $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$ ). O sistema utiliza um microcontrolador LoPy ESP32, sensor de partículas PMS5003 e sensor de temperatura DS18B20, com dados transmitidos via Wi-Fi para a Google Suite (Planilhas, Sites e Apps Script). A estação foi testada em San Salvador (El Salvador), mostrando correlação com os dados oficiais e comportamento esperado (aumento de poluição em horários de pico e diminuição após chuvas).

A solução destaca-se pelo uso de ferramentas gratuitas da Google, reduzindo custos de implementação. Contudo, o sistema monitora apenas material particulado e temperatura, não incluindo poluentes gasosos ou outros parâmetros ambientais. Para a EMQA, este artigo serve como referência para o desenvolvimento de estações de baixo custo e inspiração para futura integração com plataformas de nuvem acessíveis.

## 3. METODOLOGIA

A presente seção descreve os métodos e procedimentos adotados no desenvolvimento da EMQA. O sistema foi projetado para realizar, em tempo real, o monitoramento dos parâmetros ambientais definidos na Seção 1, com base nas referências técnicas analisadas na Seção 2, utilizando sensores específicos para cada variável.

A arquitetura geral do funcionamento da EMQA é apresentada por meio do diagrama em blocos da Figura 1 e do fluxograma da Figura 2.

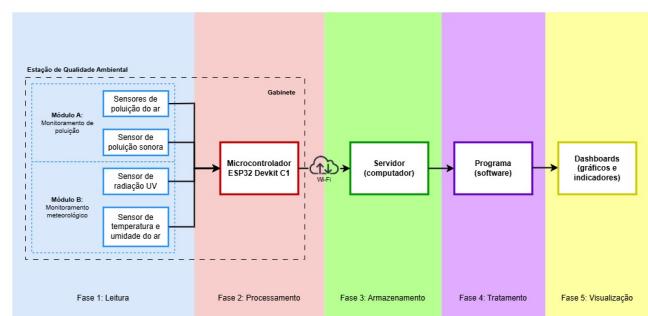


Figura 1. Diagrama em blocos da EMQA. Fonte: Os autores (2025)

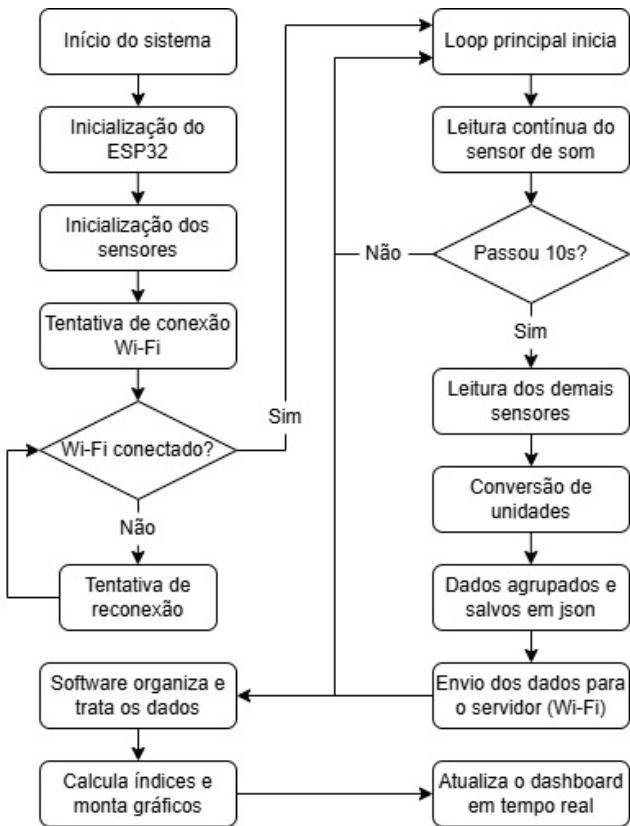


Figura 2. Fluxograma de funcionamento da EMQA. Fonte: Os autores (2025)

### 3.1 Índices de qualidade ambiental

Para interpretação dos dados coletados, a EMQA utiliza índices padronizados que convertem medições brutas em classificações de qualidade.

**Índice de Qualidade do Ar (IQA):** O IQAr classifica a qualidade do ar com base nas concentrações dos principais poluentes atmosféricos e é adotado oficialmente pelo governo federal do Brasil (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025). A Tabela 1 apresenta as faixas de concentração e suas respectivas classificações.

Tabela 1. Classificação de material particulado, trioxigênio, monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio.

Classificação	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Boa	0-45	0-15	0-100	0-9	0-200
Moderada	45-100	15-50	100-130	9-11	200-240
Ruim	100-150	50-75	130-160	11-13	240-320
Muito ruim	150-250	75-125	160-200	13-15	320-1130
Péssima	250-600	125-300	200-800	15-50	1130-3750

**Índice de compostos orgânicos voláteis (VOCs):** A classificação dos VOCs adotada fundamentou-se nos parâmetros propostos pela empresa Kaiterra (Kaiterra, 2022), referência global em soluções comerciais de monitoramento ambiental. A Tabela 2 apresenta os intervalos de concentração e as respectivas categorias.

Tabela 2. Classificação de compostos orgânicos voláteis

Classificação	VOCs (ppb)
Boa	0-220
Moderada	220-660
Ruim	660-2200
Muito ruim	2200-5500
Péssima	> 5500

**Índice de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** Para o CO<sub>2</sub>, também empregaram-se os critérios da Kaiterra (Kaiterra, 2024). A Tabela 3 resume as faixas de concentração e os níveis associados de qualidade.

Tabela 3. Classificação de dióxido de carbono

Classificação	CO <sub>2</sub> (ppm)
Boa	0-1000
Moderada	1000-2500
Ruim	2500-5000
Muito ruim	5000-40000
Péssima	> 40000

**Índice de radiação ultravioleta (IUV):** A classificação do índice UV baseou-se no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2025), que associa níveis de radiação ultravioleta ao risco à saúde humana. A Tabela 4 apresenta essa categorização.

Tabela 4. Classificação da radiação ultravioleta.

Classificação	Índice UV
Boa	0-2
Moderada	2-5
Ruim	5-7
Muito ruim	7-10
Péssima	> 10

**Índice de ruído sonoro:** A classificação do ruído sonoro inspirou-se nas diretrizes da Environmental Compliance Limited (ECL, 2019), que estabelece níveis seguros de exposição para a saúde humana. A Tabela 5 apresenta os intervalos de intensidade sonora e suas classificações.

Tabela 5. Classificação de ruído sonoro

Classificação	Nível de Ruído (dB)
Boa	0-40
Moderada	40-60
Ruim	60-80
Muito ruim	80-100
Péssima	> 100

### 3.2 Componentes eletrônicos

O microcontrolador escolhido para este projeto foi o ESP32, na placa de desenvolvimento ESP32-S3-DevKitC-1 N16R8, destacando-se pela conectividade Wi-Fi integrada e múltiplas portas analógicas e interfaces seriais (UART, I2C), adequadas para projetos com vários sensores.

Os sensores utilizados no projeto, responsáveis pela coleta dos diferentes parâmetros ambientais monitorados pela EMQA, estão listados a seguir:

- PMS5003 (5 V): sensor óptico para medição de material particulado ( $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$ ), com faixa de 0 a  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , resolução de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e precisão de até  $\pm 10\%$ .
  - MiCS-4514 (5 V): detecta monóxido de carbono (1 a 1000 ppm) e dióxido de nitrogênio (0,05 a 10 ppm), sendo utilizado para monitoramento da qualidade do ar urbano.
  - MQ131 Low Concentration (3,3 V): específico para a detecção de ozônio ( $O_3$ ), com faixa de sensibilidade entre 10 e 1000 ppb.
  - SGP30 (3,3 V): monitora  $CO_2$  (400 a 60.000 ppm) e VOCs totais (0 a 60.000 ppb), com ajuste automático de resolução conforme a concentração.
  - GUVA-S12SD (3,3 V): sensor de radiação ultravioleta com faixa espectral de 240 a 370 nm, utilizado para cálculo do índice UV.
  - DHT22 (3,3 V): realiza a medição de temperatura (-40 a 80 °C, com precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa do ar (0-100%, com erro máximo de 5%).
  - MAX9814 (3,3 V): sensor de áudio utilizado para monitoramento de poluição sonora, com saída em decibéis (dB).

O microcontrolador e os sensores utilizados na estação são apresentados na Figura 3, organizados em uma composição visual que facilita a identificação individual dos componentes.

Uma ventoinha alimentada por 5 V também foi incorporada ao sistema, com a finalidade de promover a circulação interna de ar na estrutura.

A fonte de tensão utilizada foi um carregador USB padrão, com saída de 5 V e corrente máxima de 2,4 A, conectado ao sistema por meio de um cabo USB tipo A para USB-C.

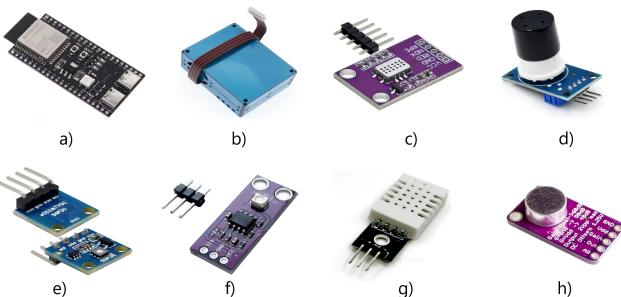


Figura 3. (a) ESP32-S3, (b) PMS5003, (c) MiCS-4514, (d) MQ131, (e) SGP30, (f) GUVA-S12SD, (g) DHT22, (h) MAX9814. Fonte: Montagem dos autores com imagens de divulgação dos fabricantes (AliExpress, 2025).

A Tabela 6 contém os custos totais do projeto considerando todos os materiais utilizados.

Tabela 6. Custos totais do projeto.

Material	Preço (R\$)
ESP32-S3-DevKitC-1 N16R8	69,83
PMS5003	88,49
SGP30	33,30
MiCS-4514	40,17
MQ131 <i>Low Concentration</i>	96,09
GUVA-S12SD	15,72
DHT22	12,16
MAX9814	13,41
Ventoinha 5 V	25,00
Placa de circuito impresso	140,00
<i>Jumpers</i>	5,00
Parafusos	5,00
Módulo USB	21,00
Módulo adaptador PMS5003	30,14
Resistor 10 kΩ	1,00
Resistor 5,6 kΩ	1,00
Transistor IRLZ44N	4,00
Barra de pinos	7,00
Gabinete plástico	30,00
Frete + Impostos	151,00
<b>TOTAL</b>	<b>789,31</b>

### *3.3 Esquemático eletrônico e placa de circuito impresso*

O esquemático eletrônico (Figura 4) e o design da placa de circuito impresso (PCB) foram desenvolvidos utilizando o software *EasyEDA* (versão 6.5.46).

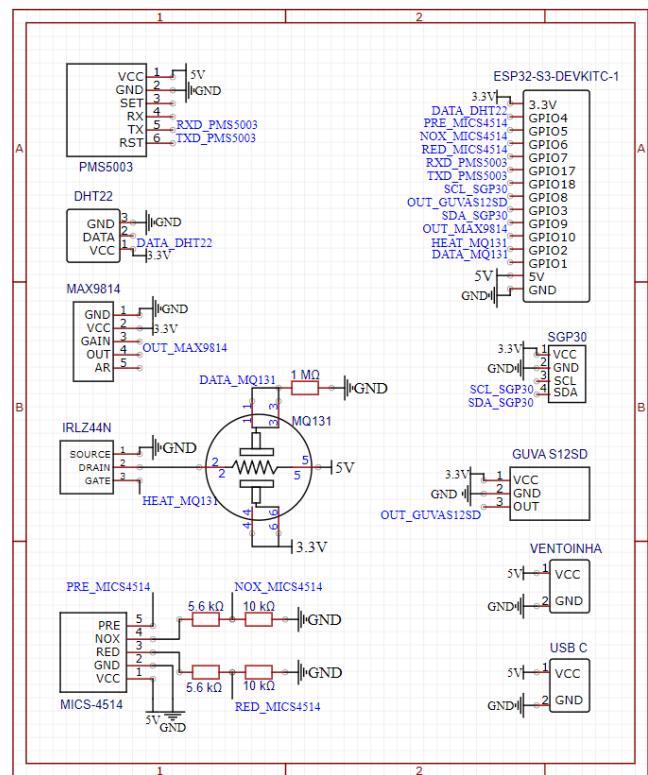


Figura 4. Esquemático eletrônico. Fonte: Os autores (2025)

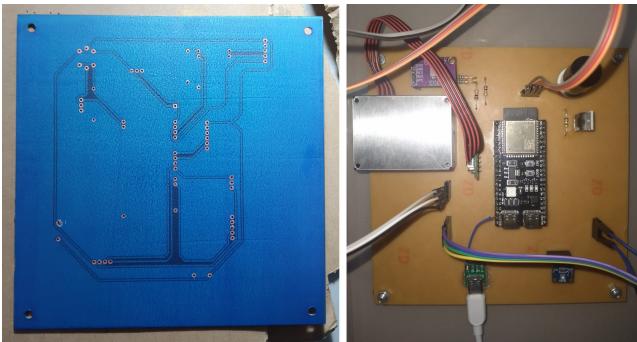


Figura 5. Placa de Circuito Impresso (frente e verso).  
Fonte: Os autores (2025)

Considerando o elevado número de sensores integrados ao projeto, tornou-se imprescindível aprimorar a qualidade da construção do circuito. Para tanto, foi confeccionada uma PCB, capaz de assegurar a integridade das conexões, a organização dos componentes e um acabamento mais profissional à estação. Optou-se pela fabricação caseira, realizada manualmente pelos autores (Figura 5), por oferecer maior agilidade e menor custo em comparação ao envio do projeto para produção externa, como nos serviços internacionais de fabricação.

### 3.4 Estrutura mecânica

A estrutura da EMQA foi construída com uma caixa plástica, que funciona como gabinete para abrigar os componentes eletrônicos. Para permitir a circulação de ar em seu interior, realizaram-se furações na frente da ventoinha (entrada) e na base da caixa (saída), garantindo fluxo contínuo de ar através dos sensores.

Alguns sensores requerem posicionamento específico para assegurar medições mais confiáveis. O sensor de radiação ultravioleta, por exemplo, foi fixado na parte superior do gabinete, exposto à luz solar direta, enquanto o sensor de temperatura e umidade foi instalado na lateral, afastado da placa e dos demais componentes, a fim de evitar interferências térmicas.

A estação foi fixada sobre uma estrutura de madeira, servindo como protótipo da instalação em ambiente real — simulando, por exemplo, a fixação em uma parede.

### 3.5 Calibração dos sensores

Diante da diversidade de sensores utilizados, adotaram-se estratégias de calibração distintas, conforme o princípio de funcionamento de cada dispositivo. Agruparam-se os sensores em três categorias: resistivos com resposta química, sensores de som com conversão logarítmica e sensores digitais com calibração de fábrica. As abordagens consideraram limitações de infraestrutura e a ausência de ambientes controlados, buscando garantir a maior confiabilidade dentro do escopo do projeto.

Os sensores resistivos (MQ131 e MiCS-4514) operam com variação logarítmica de resistência em função da concentração de gases. Conectados a divisores de tensão, permitem calcular a resistência variável  $R_S$  e estimar a concentração por meio da razão  $R_S/R_0$ , em que  $R_0$  representa o

valor médio de  $R_S$  em um ambiente limpo (de referência). A calibração em local aberto consistiu na obtenção de  $R_0$  por meio de um algoritmo que verifica a estabilização térmica e elétrica ao detectar variação inferior a 2,5% entre leituras consecutivas. Após trinta leituras estáveis, registra-se a média como  $R_0$ . Em razão da ausência de atmosferas controladas, os coeficientes da equação foram ajustados com base nas curvas apresentadas nos *datasheets* dos sensores.

O sensor MAX9814 fornece sinal analógico proporcional à pressão sonora, com controle automático de ganho (AGC). Como o sinal não corresponde diretamente a valores em decibéis (dB), aplicou-se uma equação logarítmica, calibrada empiricamente estimando seus coeficientes com o auxílio do aplicativo Decibel X, desenvolvido pela SkyPaw Co., Limited, instalado em um smartphone.

Sensores digitais com calibração de fábrica (SGP30, PMS5003, GUVA-S12SD, DHT22) fornecem leituras diretas em unidades físicas, com compensações aplicadas por hardware ou firmware, dispensando calibração manual.

### 3.6 Software

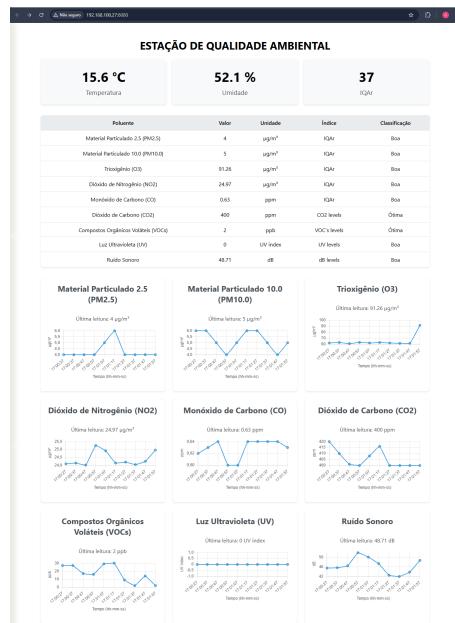


Figura 6. Website para visualização de dashboards em tempo real. Fonte: Os autores (2025)

O sistema de software da EMQA foi dividido em *firmware* embarcado e interface *web*. O *firmware* controla os sensores conectados ao ESP32, coleta dados periodicamente, os agrupa e transmite via Wi-Fi a um servidor local. A interface *web* (Figura 6) permite a visualização em tempo real dos dados, com gráficos e indicadores atualizados, acessíveis por dispositivos na mesma rede.

Desenvolvido na Arduino IDE em C++, o *firmware* utiliza bibliotecas específicas para cada sensor. Essas bibliotecas foram empregadas conforme a disponibilidade de implementações compatíveis com o ESP32. Para os sensores PMS5003, MiCS-4514 e MAX9814, foram elaboradas bi-

biotecas próprias pelos autores, com base nas especificações técnicas presentes nos respectivos *datasheets*. Já os sensores DHT22 e SGP30 fazem uso de bibliotecas públicas mantidas pela Adafruit Industries, fabricante de seus módulos *breakout*. No caso dos sensores MQ131 e GUVA-S12SD, adotaram-se bibliotecas de código aberto para Arduino, desenvolvidas, respectivamente, por Olivier Staquet e Kohei Matsushita, posteriormente adaptadas pelos autores para garantir compatibilidade com o ESP32.

O *back-end* em Flask atua como servidor local em um computador, escutando na porta 5000 e aceitando conexões na rede interna com **Flask-CORS**. Implementa três rotas principais: *POST* e *GET* em */dados* para registro e fornecimento dos dados atuais, e */historico* para medições anteriores. Os arquivos JSON são armazenados em *data/*, criado na inicialização para garantir persistência. O *front-end*, desenvolvido com Vue.js e PrimeVue, organiza os dados em *cards* interativos na interface principal mostrando gráficos (que podem ser expandidos) atualizados a cada 10 segundos por *polling* com **axios** ao servidor Flask.

#### 4. RESULTADOS

Após a utilização dos materiais e a execução dos procedimentos descritos na seção anterior, a EMQA foi finalizada, conforme ilustrado na Figura 7.

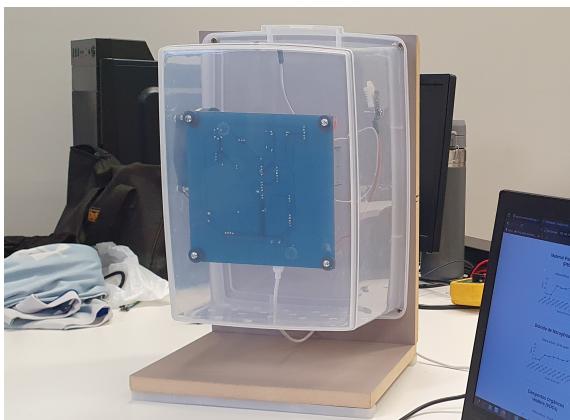


Figura 7. EMQA finalizada. Fonte: Os autores (2025)

##### 4.1 Validação técnica da estação

Para validar o funcionamento da EMQA, realizou-se uma coleta de dados às 16 horas do dia 28 de junho de 2025, em uma área residencial com boa ventilação, localizada no bairro Sítio Cercado, em Curitiba (PR). A amostragem teve duração de 60 minutos, com frequência de 10 segundos, totalizando aproximadamente 360 amostras por sensor. O objetivo principal dividiu-se em duas abordagens de análise: verificar a estabilidade das leituras ao longo do tempo e avaliar a coerência dos valores obtidos em comparação com dados de referência disponíveis publicamente.

Como forma de comparação, a maioria dos dados obtidos pela EMQA foi contrastada com informações disponibilizadas por serviços meteorológicos online que são amplamente utilizados para consulta ambiental e fornecem dados em tempo real com base na localização e no horário definidos.

- Temperatura, umidade, material particulado e gases (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>): comparados com os valores divulgados pela plataforma AccuWeather (AccuWeather, 2025), cujos dados são fornecidos pelo serviço do laboratório Plume Labs, o qual utiliza como fonte de informação a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).
- Índice de radiação ultravioleta: confrontado com os dados disponibilizados pelo sistema Clima e Radar (Clima e Radar, 2025), mantido pelo portal meteorológico alemão WetterOnline, que opera com informações provenientes de estações ambientais distribuídas globalmente.
- Dióxido de carbono, compostos orgânicos voláteis e nível de ruído: não foram encontrados dados públicos de referência para esses parâmetros em Curitiba. Assim, sua análise restringe-se à estabilidade temporal das medições.

Tabela 7. Estatísticas dos parâmetros da coleta de 1 hora e dados de referência externa.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Referência
Temperatura (°C)	21,59	0,04	22
Umidade relativa (%)	72,86	0,29	69
PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	9,62	1,17	9
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	11,50	1,66	22
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	23,25	1,77	51
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	12,34	0,14	11
CO (ppm)	1,1	0,01	1,09
CO <sub>2</sub> (ppm)	434,46	20,24	—
VOCs (ppb)	37,24	17,89	—
Nível de ruído (dB)	46,33	1,52	—
Radiação UV (IUv)	0,00	0,00	0

A análise percentual dos desvios padrão apresentados na Tabela 7 permite avaliar a consistência das leituras ao longo do tempo. De modo geral, os sensores demonstraram bom desempenho em termos de estabilidade, especialmente para temperatura ( $\pm 0,19\%$ ), umidade relativa ( $\pm 0,40\%$ ), CO ( $\pm 0,91\%$ ), CO<sub>2</sub> ( $\pm 4,66\%$ ), NO<sub>2</sub> ( $\pm 1,13\%$ ) e dB ( $\pm 3,28\%$ ), indicando baixa flutuação durante o intervalo de uma hora. Esses valores sugerem uma resposta estável em ambiente com pouca interferência climática, reduzida concentração de poluentes e serenidade sonora.

Os parâmetros PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> registraram variações moderadas ( $\pm 12,16\%$  e  $\pm 14,43\%$ , respectivamente), coerentes com oscilações naturais provocadas por poeira, tráfego esporádico e correntes de ar. O O<sub>3</sub> oscilou de forma relativamente pequena ( $\pm 7,61\%$ ), indicando possível sensibilidade a variações ambientais sutis.

A leitura do índice UV permaneceu constante em zero durante todo o período. Essa ausência de variação pode ser justificada pelo horário da medição, pelas condições nubladas e pela estação do ano (inverno), considerando que a radiação UV tende a ser nula ou muito baixa quando fora de pico.

Os VOCs apresentaram desvios mais elevados ( $\pm 48,04\%$ ), o que sugere maior instabilidade do sensor SGP30 — calibrado de fábrica — e levanta questionamentos acerca de sua confiabilidade.

A comparação entre os valores médios registrados pela EMQA e os dados de referência indicou desempenho suficientemente satisfatório por parte da estação. As medições de temperatura ( $21,59^{\circ}\text{C}$ ), CO (1,1 ppm) e PM<sub>2,5</sub> (9,62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) apresentaram excelente concordância com os valores reportados pelas plataformas consultadas ( $22^{\circ}\text{C}$ , 1,09 ppm e 9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente), conferindo confiabilidade a esses parâmetros.

As leituras de umidade relativa (72,86% frente a 69%) e de NO<sub>2</sub> (12,34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  frente a 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) apresentaram variações discretamente superiores às referências, porém mantidas dentro de margens de erro toleráveis, dado a classe dos sensores empregados.

Por outro lado, os resultados obtidos para O<sub>3</sub> (23,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em comparação a 51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e PM<sub>10</sub> (11,50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  frente a 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) revelaram discrepâncias mais significativas. No caso do O<sub>3</sub>, a diferença pode estar relacionada à limitada sensibilidade do sensor MQ131 em baixas concentrações, especialmente na ausência de calibração laboratorial. A divergência observada no PM<sub>10</sub> pode ser atribuída tanto à menor precisão na detecção de partículas maiores quanto a condições ambientais específicas. Além disso, é importante ressaltar que todos os sensores estão sujeitos a discrepâncias entre a coleta pontual realizada pela EMQA e os valores médios regionais fornecidos pelos serviços remotos.

A índice UV manteve-se zerado tanto na leitura quanto na referência, conforme esperado para o horário e as condições climáticas previamente discutidas.

#### *4.2 Aplicação em campo: comparação entre ambientes*

A fim de avaliar a capacidade da EMQA em distinguir diferentes condições ambientais, foram realizadas duas coletas de dados, cada uma com 20 minutos de duração e amostragem a cada 10 segundos, totalizando cerca de amostras 120 por sensor.

- Dia 1 (26/06/2025) – Ambiente A: Zona residencial no bairro Sítio Cercado - Curitiba (PR).
- Dia 2 (27/06/2025) – Ambiente B: Avenida Marechal Floriano Peixoto - Curitiba (PR) (próximo à UTFPR-CT) (Figura 8).
- Horário das coletas: das 16h00 às 16h20.



Figura 8. Leitura no ambiente B. Fonte: Os autores (2025)

A Tabela 8 apresenta os valores médios obtidos nos dois ambientes.

Tabela 8. Comparação dos valores médios registrados nos dois ambientes monitorados.

Parâmetro	Ambiente A	Ambiente B
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	18,62	20,66
Umidade relativa (%)	93,10	80,54
PM <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	9,36	17,43
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	11,26	18,81
O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	46,94	17,41
NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	11,01	32,58
CO (ppm)	0,6	1,19
CO <sub>2</sub> (ppm)	400,52	458,46
VOCs (ppb)	10,54	126,48
Radiação UV (IUUV)	0	0
Nível de ruído (dB)	44,74	65,68

A análise dos dados coletados em dois ambientes distintos — A (zona residencial) e B (avenida com tráfego intenso) — mostrou variações consistentes em vários parâmetros monitorados pela EMQA.

A maior parte dos poluentes apresentou concentrações mais elevadas no ambiente B, como era esperado para uma região com maior densidade de veículos e circulação de pessoas. Destacam-se os aumentos nos níveis de CO (+0,59 ppm), CO<sub>2</sub> (+57,94 ppm), PM<sub>2,5</sub> (+8,07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), PM<sub>10</sub> (+7,55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), NO<sub>2</sub> (+21,57 ppb) e VOCs (+115,94 ppb). Esses resultados refletem a influência direta da atividade urbana intensa — especialmente do tráfego veicular — sobre a emissão de gases poluentes e partículas em suspensão. Além disso, ambientes com menor ventilação natural e maior concentração de fontes emissoras tendem a acumular maiores níveis desses compostos.

Por outro lado, a concentração de O<sub>3</sub> foi superior no ambiente A (46,94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em comparação ao B (17,41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Essa diferença pode ser atribuída ao processo de titulação do ozônio, comum em locais de tráfego intenso, onde o O<sub>3</sub> é consumido em reações químicas com NO<sub>x</sub>, reduzindo sua concentração no ar.

O índice de radiação UV foi zero em ambas as medições, o que é coerente dado que a radiação depende das condições atmosféricas gerais da cidade, não sendo sensível a variações locais.

Quanto ao nível de ruído, foi registrada uma diferença substancial entre os locais: 44,74 dB no ambiente A e 65,68 dB no ambiente B, evidenciando o impacto direto do fluxo veicular e da movimentação urbana sobre a poluição sonora.

Temperatura e umidade relativa, embora não tenham sido usadas para comparar ambientes, foram registradas por sua importância no contexto climático e impacto no funcionamento dos sensores.

## 5. CONCLUSÃO

Como discutido ao longo deste trabalho, os poluentes atmosféricos, sonoros e a radiação ultravioleta representam riscos significativos à saúde pública. Apesar disso, diversas regiões do mundo ainda carecem de sistemas adequados para o monitoramento ambiental em tempo real. Nesse contexto, o presente projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma Estação de Monitoramento da Qualidade Ambiental (EMQA) acessível e funcional, capaz de medir,

em tempo real, parâmetros relevantes de poluição em ambientes urbanos. O sistema foi projetado, implementado e validado por meio de coletas realizadas em diferentes regiões da cidade de Curitiba – PR, abrangendo tanto zonas residenciais quanto áreas com tráfego veicular intenso.

Os resultados obtidos demonstraram que a EMQA atendeu, em grande parte, à proposta inicial. Os sensores, em sua maioria, apresentaram estabilidade temporal satisfatória e, para os parâmetros cuja comparação com dados de referência confiáveis foi possível, as leituras revelaram coerência com os valores esperados. Entretanto, foram observadas divergências em alguns poluentes, como o O<sub>3</sub> e o PM<sub>10</sub>, cujas diferenças em relação aos dados oficiais podem indicar influências de fatores ambientais locais ou limitações na precisão dos sensores empregados – em especial para o MQ131 e sua calibração aproximada. Os compostos orgânicos voláteis apresentaram flutuações expressivas, o que levanta dúvidas quanto à exatidão do sensor SGP30. Ademais, a baixíssima incidência de radiação UV reforça a necessidade de ampliar a duração das coletas e realizar amostragens em diferentes épocas do ano, a fim de possibilitar conclusões mais sólidas. Embora os resultados exijam cautela na interpretação, o sistema demonstrou desempenho compatível com as limitações técnicas previstas para a categoria dos sensores utilizados e os métodos de calibração adotados.

A execução deste projeto proporcionou aos autores experiência prática em eletrônica aplicada, programação embarcada, integração de sensores ambientais, processamento de dados e análise crítica de resultados experimentais. A experiência também trouxe à tona os desafios recorrentes em projetos de monitoramento ambiental, como a calibração precisa de sensores acessíveis, a influência de variáveis ambientais externas nas medições e a escassez de dados públicos de referência para alguns poluentes.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a hospedagem do sistema em uma plataforma online, a realização de calibrações laboratoriais e a incorporação de algoritmos de correção baseados em modelos físicos ou técnicas de aprendizado de máquina.

Dessa forma, conclui-se que a EMQA representa uma alternativa viável, funcional e economicamente acessível para aplicações em contextos urbanos, com potencial de uso em pesquisas acadêmicas, políticas públicas e iniciativas comunitárias.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Eduardo dos Santos, Juliano Vieira e Ronnier Rohrich, do Departamento Acadêmico de Eletrônica da UTFPR, pela orientação durante o desenvolvimento do projeto. Aos professores Fernando Cardoso Castaldo e Gabriel Kovalhuk, também do Departamento Acadêmico de Eletrônica da UTFPR, pelo auxílio na confecção da placa de circuito impresso.

## REFERÊNCIAS

AccuWeather (2025). Índice de qualidade do ar em curitiba. <https://www.accuweather.com/en/br/curitiba/44944/air-quality-index/44944>. Acesso em: 26 jun. 2025.

AliExpress (2025). Imagens de sensores eletrônicos — lojas diversas. Disponível em: <https://www.aliexpress.com>. Acesso em: 29 jun. 2025.

Aserkar, A.A., Godla, S.R., El-Ebary, Y.A., Krishnamoorthy, and Ramesh, J.V.N. (2024). Real-time air quality monitoring in smart cities using iot-enabled advanced optical sensors. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(4), 840–848. doi: 10.14649/JACSA.2024.0180487.

Caselles Nuñez, J.G., Contreras Negrette, O.A., de Jesús Beleño Sáenz, K., and Díaz Sáenz, C.G. (2025). Design and implementation of an indoor and outdoor air quality measurement device for the detection and monitoring of gases with hazardous health effects. *Engineering Proceedings*, 83, 13. doi:10.3390/engproc2025083013.

Clima e Radar (2025). Índice uv em curitiba. <https://www.climaeradar.com.br/indice-uv/curitiba/5551853>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ECL (2019). Noise exposure limits. URL <https://www.ecl.world/noise-exposure-limits/>. Acessado em 15/05/2025.

Ferreira, J.C. (2007). *Relação Qualidade do Ar e Exposição Humana a Poluentes Atmosféricos*. Ph.D. thesis, Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento. Orientador: Carlos Borrego.

Flores-Cortez, O.O., Cortez, R.A., and Rosa, V.I. (2019). A low-cost iot system for environmental pollution monitoring in developing countries. In *Proceedings of the 26th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, 386–389. Rzeszów, Poland.

Hammer, M.S., Swinburn, T.K., and Neitzel, R.L. (2014). Environmental noise pollution in the united states: Developing an effective public health response. *Environmental Health Perspectives*, 122(2), 115–119.

INPE (2025). Monitoramento de radiação ultravioleta. URL <https://satelite.cptec.inpe.br/uv/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

Kaiterra (2022). Understanding tvoc: What you need to know about volatile organic compounds. URL <https://learn.kaiterra.com/en/resources/understanding-tvoc-volatile-organic-compounds>. Acessado em 15/05/2025.

Kaiterra (2024). Carbon dioxide (co): Health, sources and indoor monitoring. URL <https://learn.kaiterra.com/en/resources/carbon-dioxide-co2>. Acesso em: 29 jun. 2025.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2025). Orientação técnica – Índice de qualidade do ar (iqar). URL <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/indice-de-qualidade-do-ar-iqar/orientacao-tecnica-indice-de-qualidade-do-ar-jan-25.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.

Tang, X., Yang, T., Yu, D., Xiong, H., and Zhang, S. (2024). Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (uv) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin. *Environment International*, 185, 108535.

World Health Organization (2025). Air pollution. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution?lang=en>. Acesso em: 28 jun. 2025.