

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR POR MEIO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO INTEGRADOS À INTERNET DAS COISAS: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Guilherme Faustino Boelter - boelterguilherme@gmail.com - Discente de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) pela Universidade Federal de Santa Maria-Campus da UFSM em Frederico Westphalen, Frederico Westphalen- RS, Brasil

Jaqueline Ineu Golombieski - jaqueline.golombieski@ufsm.br - Docente da Universidade Federal de Santa Maria-Campus da UFSM em Frederico Westphalen, Frederico Westphalen- RS, Brasil

Pedro Daniel da Cunha Kemerich - pedro.kemerich@ufsm.br - Docente da Universidade Federal de Santa Maria-Campus da UFSM em Santa Maria, Santa Maria- RS, Brasil

Resumo: A poluição atmosférica representa um importante problema ambiental e de saúde pública, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias acessíveis para o monitoramento da qualidade do ar. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar uma plataforma de monitoramento baseada em sensores de baixo custo da série MQ (MQ4, MQ7 e MQ135), integrada a um sistema de Internet das Coisas (IoT), para o monitoramento de gases atmosféricos em diferentes áreas do município de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul. O sistema foi composto por um microcontrolador ESP32, sensores de temperatura e umidade (DHT22), pressão atmosférica e altitude (BMP280), além de um anemômetro para registro da velocidade do vento. As coletas foram realizadas em quatro áreas representativas, com campanhas quinzenais e análises baseadas na razão Rs/R0. Os resultados evidenciaram diferenças espaciais e temporais entre as áreas monitoradas, bem como respostas distintas entre os sensores ao longo das duas quinzenas avaliadas. Observou-se influência das variáveis meteorológicas sobre o comportamento dos sensores, especialmente da temperatura, umidade e velocidade do vento. Embora a estimativa de altitude tenha apresentado inconsistências em relação à altitude real da área de estudo, a plataforma demonstrou potencial para o monitoramento comparativo da qualidade do ar, constituindo uma alternativa tecnicamente viável, de baixo custo e aplicável em estudos ambientais e redes complementares de monitoramento.

Palavras-chave: qualidade do ar; sensores de baixo custo; Internet das Coisas; monitoramento ambiental; sensores MQ.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR POR MEIO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO INTEGRADOS À INTERNET DAS COISAS: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Abstract: Air pollution is a major environmental and public health issue, driving the development of accessible technologies for air quality monitoring. In this context, the present study aimed to develop and evaluate an air quality monitoring platform based on low-cost MQ series gas sensors (MQ4, MQ7, and MQ135) integrated into an Internet of Things (IoT) system for monitoring atmospheric gases in different areas of the municipality of Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brazil. The system consisted of an ESP32 microcontroller, temperature and humidity sensors (DHT22), a barometric pressure and altitude sensor (BMP280), and an anemometer for wind speed measurements. Data were collected in four representative areas through biweekly monitoring campaigns, and analyses were based on the Rs/R0 ratio. The results revealed spatial and temporal differences among the monitored areas, as well as distinct responses from the sensors over the two sampling periods. Meteorological variables, particularly temperature, humidity, and wind speed, were found to influence sensor performance. Although the altitude estimates showed inconsistencies compared with the actual elevation of the study area, the proposed platform demonstrated potential for comparative air quality monitoring, representing a technically feasible, low-cost alternative suitable for environmental studies and as a complementary tool to conventional air quality monitoring networks.

Keywords: air quality; low-cost sensors; Internet of Things; environmental monitoring; MQ sensors.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica representa um dos principais problemas ambientais e de saúde pública da atualidade, estando associada ao aumento da incidência de doenças cardiovasculares, respiratórias e processos inflamatórios decorrentes da exposição contínua aos poluentes atmosféricos (GBD 2019 RISK FACTORS COLLABORATORS, 2020; JIANG et al., 2022; ZHANG et al., 2022; XUE et al., 2022). Nos centros urbanos, as emissões provenientes do tráfego veicular constituem uma das principais fontes de degradação da qualidade do ar, liberando poluentes como dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO), carbono negro (BC) e material particulado fino (MP_{2,5}) (ZHANG et al., 2022). Nesse contexto, a identificação das principais fontes emissoras e o monitoramento da distribuição espacial desses poluentes são fundamentais para subsidiar políticas públicas e estratégias voltadas à melhoria da qualidade ambiental.

Nos últimos anos, sensores de baixo custo têm despertado crescente interesse para aplicações em monitoramento ambiental, tanto em ambientes internos quanto externos (CHOJER et al., 2020; SÁ et al., 2022). Esses dispositivos apresentam vantagens como baixo custo de aquisição, dimensões reduzidas, baixo consumo energético e possibilidade de obtenção de dados em tempo quase

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

real, ampliando o acesso às informações ambientais e permitindo campanhas de monitoramento com maior resolução temporal (CASTELL et al., 2013). Além disso, seu uso favorece iniciativas de ciência cidadã, permitindo que instituições de ensino, órgãos públicos e a população participem da coleta e do acompanhamento de informações relacionadas ao ambiente (SNYDER et al., 2013; THOMPSON, 2016).

Paralelamente ao avanço desses sensores, o desenvolvimento da Internet das Coisas (Internet of Things – IoT) possibilitou a integração de dispositivos eletrônicos capazes de coletar, armazenar e transmitir dados automaticamente por meio da internet. Conforme descrito por Chojer et al. (2020), sistemas IoT permitem a comunicação entre sensores, microcontroladores, plataformas em nuvem e interfaces de visualização, tornando possível o monitoramento remoto de variáveis ambientais e o armazenamento contínuo das informações. Essa integração amplia significativamente o potencial de aplicações em monitoramento ambiental, principalmente em locais onde inexistem estações automáticas convencionais (DAI et al., 2023).

Entretanto, é importante destacar que sensores semicondutores da série MQ apresentam resposta baseada na variação da resistência elétrica do elemento sensor e possuem sensibilidade cruzada a diferentes gases, não sendo seletivos para um único composto químico. Dessa forma, esses sensores não fornecem concentrações absolutas dos poluentes, mas permitem avaliar alterações relativas na resposta do sensor ao longo do tempo e comparar diferentes ambientes quando submetidos às mesmas condições de calibração e operação.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma plataforma experimental de monitoramento ambiental baseada em sensores de baixo custo da série MQ (MQ4, MQ7 e MQ135), associada aos sensores DHT22 e BMP280, integrada a um microcontrolador ESP32 e a uma arquitetura baseada em Internet das Coisas (IoT). O sistema também incorporou um anemômetro para obtenção de informações meteorológicas durante as campanhas de campo. O estudo buscou avaliar a resposta relativa dos sensores em diferentes áreas do município de Frederico Westphalen – RS, investigando a influência das condições meteorológicas sobre o comportamento dos sensores e demonstrando a viabilidade da plataforma como ferramenta de monitoramento ambiental comparativo de baixo custo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido no município de Frederico Westphalen, localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). O município apresenta aproximadamente 30 mil habitantes, conforme o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), e caracteriza-se por relevo ondulado, com altitude média próxima de 520 m em relação ao nível do mar. A região apresenta clima subtropical úmido, com influência de variações sazonais de temperatura, umidade e regime de ventos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700

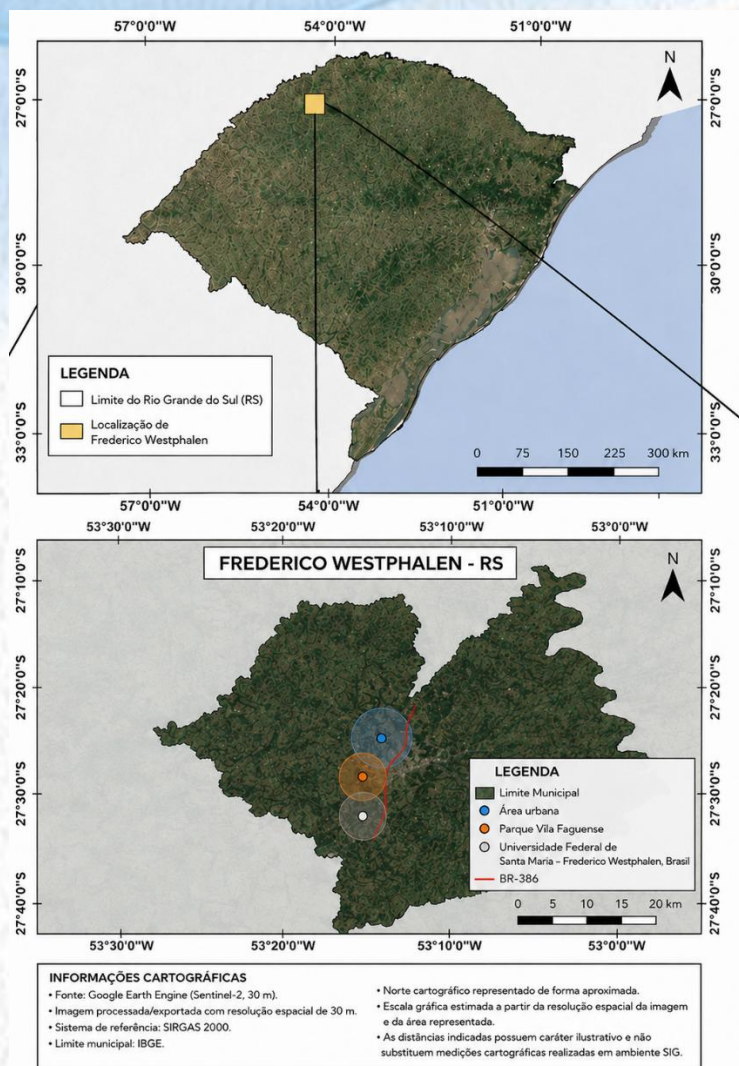


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 1 - Mapa do município de Frederico Westphalen-RS, com as demarcações dos pontos de coleta de dados



A escolha do município fundamentou-se na inexistência de estações oficiais de monitoramento contínuo da qualidade do ar, tornando viável a construção e utilização de uma plataforma experimental para monitoramento ambiental comparativo e complementar.

Para representar diferentes condições de emissão atmosférica, foram selecionadas quatro áreas com características distintas:

- **Área Urbana Central:** região com elevada circulação de veículos, intensa atividade comercial e maior concentração de potenciais fontes emissoras.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

- Rodovia BR-386: trecho caracterizado por intenso fluxo de veículos leves e pesados, incluindo aceleração, desaceleração e frenagem frequentes, condições que favorecem emissões provenientes da combustão dos motores.
- Campus da UFSM – Frederico Westphalen: ambiente com tráfego moderado, composto principalmente por veículos de estudantes e servidores, representando uma condição intermediária entre a área urbana e o parque.
- Parque Municipal Vila Faguense: área com predominância de cobertura vegetal, baixa circulação de veículos e reduzida influência direta de fontes emissoras.

Foram definidos cinco pontos fixos de monitoramento em cada área, totalizando vinte pontos amostrais no município. A utilização de múltiplos pontos buscou reduzir a influência de condições locais específicas e aumentar a representatividade espacial dos dados obtidos em cada ambiente monitorado.

2.2. Delineamento e Desenho Experimental

As campanhas de monitoramento foram realizadas durante a primeira e a segunda quinzena do mês de abril de 2026, sempre utilizando os mesmos pontos de coleta previamente definidos em cada área. As medições foram realizadas em períodos semelhantes do dia, procurando minimizar a influência da variação diária das condições meteorológicas sobre a resposta dos sensores. Em cada ponto amostral foram obtidas 150 leituras consecutivas para cada sensor, utilizando intervalo de aquisição de 4 segundos entre leituras, programado diretamente no firmware do microcontrolador.

Ao final de cada campanha, cada ponto gerava uma série temporal composta por 150 observações para os sensores MQ4, MQ7, MQ135, DHT22 e BMP280, permitindo posteriormente a aplicação de análises estatísticas descritivas e comparativas entre áreas e entre os dois períodos de monitoramento.

2.3. Arquitetura de Hardware e Integração do Sistema

A plataforma experimental foi desenvolvida utilizando um microcontrolador ESP32 DevKit, responsável pela aquisição, processamento e transmissão dos dados. O sistema foi composto pelos sensores semicondutores da série MQ4, MQ7 e MQ135, empregados para avaliar a resposta relativa a diferentes gases atmosféricos, sendo eles: MQ135- Amônia (NH_3), óxidos de nitrogênio (NO_x), benzeno (C_6H_6), álcool (etanol), fumaça e dióxido de carbono (CO_2); MQ4- Metano (CH_4), gás natural (principalmente CH_4); MQ7- Monóxido de carbono (CO). Como esses sensores apresentam sensibilidade cruzada, suas respostas não são exclusivas para um único gás, podendo sofrer influência simultânea de diferentes compostos presentes na atmosfera. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como indicadores relativos das alterações ambientais, e não como concentrações absolutas de gases específicos. Além dos sensores MQ, a plataforma incorporou um sensor DHT22, utilizado para monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar, e um sensor BMP280, empregado para registro da pressão atmosférica e estimativa da altitude relativa dos pontos monitorados.

A velocidade do vento foi determinada utilizando um anemômetro portátil, sendo as medições realizadas simultaneamente às coletas dos sensores, porém de forma independente do sistema.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Inicialmente, o circuito foi alimentado por um conjunto de seis pilhas AA associado a um regulador de tensão LM2596. Entretanto, devido ao elevado consumo energético dos elementos de aquecimento internos dos sensores MQ, a autonomia mostrou-se insuficiente para as campanhas de campo. Em função dessa limitação, adotou-se como fonte definitiva de alimentação um power bank com capacidade nominal de 20.000 mAh, garantindo estabilidade durante todo o período de aquisição dos dados. O circuito eletrônico foi inicialmente montado em protoboard para realização dos testes laboratoriais e, posteriormente, acondicionado em uma caixa de acrílico, desenvolvida para proteger os componentes eletrônicos contra impactos e intempéries, mantendo apenas as regiões sensíveis dos sensores expostas ao ambiente. Como as saídas analógicas dos sensores MQ podem atingir níveis de tensão superiores aos suportados pelo ESP32 (3,3 V), foram implementados divisores de tensão utilizando resistores de 10 k Ω e 4,7 k Ω , reduzindo o sinal analógico antes da entrada nos conversores analógico-digitais do microcontrolador e garantindo a integridade do circuito eletrônico.

2.4. Desenvolvimento do Sistema de Software e Conectividade

A O firmware da plataforma foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando a Arduino IDE para programação do microcontrolador ESP32. O software foi responsável pela aquisição das leituras dos sensores, processamento dos sinais analógicos, organização dos dados e comunicação com o aplicativo móvel. Para automatizar as campanhas de monitoramento, foi desenvolvido um aplicativo utilizando a plataforma MIT App Inventor, permitindo a comunicação entre o smartphone e o ESP32 por meio da tecnologia Bluetooth.

O aplicativo possibilitou ao operador selecionar a área e o ponto de monitoramento, visualizar as leituras em tempo real e controlar o início e o término de cada campanha. Após o recebimento de 150 leituras válidas, o próprio aplicativo encerrava automaticamente a aquisição, reduzindo a possibilidade de erros operacionais durante as coletas. Os dados foram transmitidos para uma planilha hospedada no Google Drive, permitindo armazenamento automático em nuvem. Posteriormente, essas informações foram disponibilizadas em uma página web desenvolvida na plataforma Netlify, onde os dados puderam ser consultados por meio de gráficos, tabelas e histórico das campanhas realizadas.

2.4. Metodologia de Calibração e Normalização dos Sensores

Os sensores da série MQ operam com base na variação da resistência elétrica do material semicondutor quando exposto a diferentes gases. Em razão dessa característica, antes do início das campanhas experimentais foi realizado um procedimento de estabilização (pré-aquecimento) dos sensores. No entanto, realizou-se um período de aquecimento de 48 horas anterior ao aquecimento de calibração dos sensores, pois para a calibração do R0 definitivo, os datasheets dos sensores MQ recomendam um período de burn-in (pré-aquecimento inicial de fábrica/armazenamento) que varia de 24 a 48 horas ligado continuamente para limpar resíduos químicos da superfície de óxido de estanho.

Inicialmente, cada sensor permaneceu energizado por aproximadamente 15 minutos, permitindo a estabilização do elemento sensor e do filamento interno de aquecimento. Esse

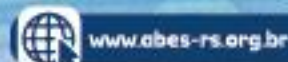
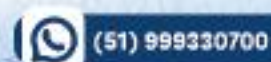
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



procedimento reduz oscilações iniciais da resposta elétrica e melhora a repetibilidade das medições durante o monitoramento.

Após esse período, realizou-se a determinação da resistência de referência (R0) para cada sensor em conjunto, com valores determinados individuais. A determinação da linha de base (baseline) foi realizada em um ambiente considerado de referência, sala controlada, isento de circulação de pessoal, temperatura e circulação de ar controlados durante o período de tomada de dados (sensores ligados), este ambiente foi utilizado como condição de "ar limpo" para fins de normalização relativa. Ressalta-se que não foi realizada a definição da baseline utilizando gases padrão certificados, sendo adotado um procedimento de normalização relativa, amplamente empregado em estudos exploratórios com sensores semicondutores de baixo custo.

Para cada sensor foram registradas diversas leituras consecutivas da resistência elétrica (Rs), sendo posteriormente calculada a média dessas observações para obtenção do valor de R0. Assim, cada sensor passou a possuir seu próprio valor de referência, utilizado em todas as análises subsequentes.

Os resultados foram expressos por meio da razão adimensional:

$$\text{Razão Adimensional} = \frac{R_s}{R_0} \quad (1)$$

em que:

- Rs corresponde à resistência interna do sensor no ambiente de funcionamento real, ou seja, varia constantemente à medida que a concentração do gás ao redor do sensor muda.);
- R0 corresponde à resistência elétrica de referência obtida durante o procedimento de calibração.

A utilização dessa razão reduz parte da variabilidade inerente aos sensores MQ e permite comparar diferentes campanhas independentemente das diferenças individuais entre sensores.

A interpretação dos resultados foi realizada conforme os seguintes critérios:

- $R_s/R_0 \approx 1$: resposta semelhante à obtida durante a calibração, indicando condições próximas ao ambiente de referência.
- $R_s/R_0 < 1$: redução da resistência elétrica do sensor em relação ao valor de referência, indicando maior resposta do elemento sensor à presença de gases redutores presentes na atmosfera.
- $R_s/R_0 > 1$: aumento da resistência elétrica em relação ao ambiente de referência, indicando menor resposta do sensor quando comparada à condição utilizada para obtenção de R0.

É importante destacar que os sensores MQ4, MQ7 e MQ135 apresentam sensibilidade cruzada, respondendo simultaneamente a diferentes gases presentes na atmosfera. Dessa forma, os valores de R_s/R_0 não representam concentrações absolutas de um composto específico, mas sim alterações relativas na resposta elétrica do sensor decorrentes da composição gasosa do ambiente monitorado. Esses valores servem como um indicador da possibilidade de uma maior ou menor concentração dos gases avaliados no ponto monitorados, quando comparado ao valor de base, medido no ambiente controlado.

Após cada campanha de monitoramento, os dados foram exportados automaticamente em arquivos no formato CSV e armazenados em ambiente de nuvem, organizados por campanha, área e ponto amostral. Inicialmente, foi realizada análise estatística descritiva, incluindo média, mediana,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



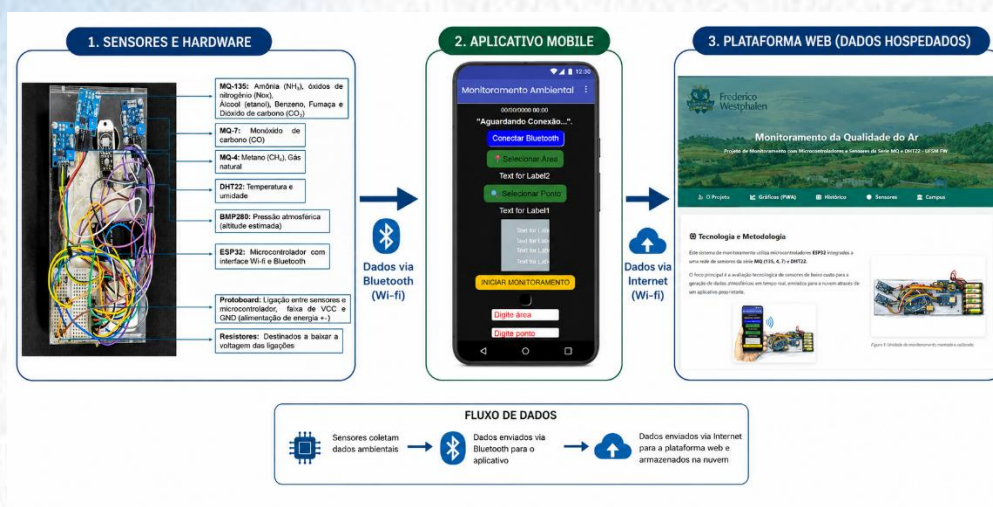
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

desvio-padrão, valores mínimos e máximos para todas as variáveis monitoradas. Além disso, foram avaliadas as associações entre as respostas dos sensores e as variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento), buscando identificar possíveis influências ambientais sobre o comportamento dos sensores, como exemplificado na figura 2:

Figura 2: Fluxograma do sistema de monitoramento, aplicativo mobile, site de hospedagem e divulgação dos dados.



3. RESULTADOS

3.1 Resultados dos sensores de gás da série MQ

As campanhas de monitoramento foram realizadas durante a primeira e a segunda quinzena de abril de 2026, permitindo comparar a resposta relativa dos sensores MQ4, MQ7 e MQ135 entre diferentes áreas do município de Frederico Westphalen – RS.

Os resultados foram expressos por meio da razão R_s/R_0 , utilizada como parâmetro de comparação entre os períodos de monitoramento. Como os sensores da série MQ apresentam sensibilidade cruzada a diferentes gases atmosféricos, os valores obtidos representam alterações relativas da resposta elétrica dos sensores.

Tabela 1 - Comparação dos resultados do MQ7 entre as duas quinzenas

Área	1ª quinzena	2ª quinzena	Variação observada
Parque Faguense	0,949	1,639	Aumento expressivo dos valores
Campus UFSM-FW	1,044	1,411	Aumento dos valores
Urbano	1,137	1,118	Valores praticamente estáveis

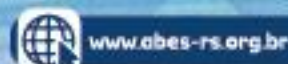
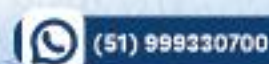
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Área	1ª quinzena	2ª quinzena	Variação observada
BR-386	1,211	1,105	Pequena redução dos valores

Observou-se que o sensor MQ7 apresentou comportamento distinto entre as áreas monitoradas. Na primeira quinzena, as áreas Parque Faguense e Campus apresentaram valores médios próximos da unidade, enquanto as áreas Urbana e BR-386 apresentaram médias ligeiramente superiores. Na segunda quinzena verificou-se aumento dos valores médios nas áreas Parque Faguense e Campus, enquanto as áreas Urbana e BR-386 apresentaram pequenas variações em relação ao primeiro período. Essas diferenças indicam alteração da resposta relativa do sensor entre as campanhas.

Tabela 2 - Comparação dos resultados do MQ135 entre as duas quinzenas

Área	1ª quinzena	2ª quinzena	Variação observada
Parque Faguense	0,832	1,086	Aumento dos valores
Campus UFSM-FW	0,919	1,407	Aumento expressivo
Urbano	1,132	0,890	Redução dos valores
BR-386	1,279	0,854	Redução expressiva

O sensor MQ135 apresentou mudanças mais pronunciadas entre as duas campanhas de monitoramento. Durante a primeira quinzena, as áreas Parque Faguense e Campus apresentaram médias inferiores à unidade, enquanto as áreas Urbana e BR-386 apresentaram médias superiores. Na segunda quinzena observou-se alteração desse padrão, com redução dos valores médios nas áreas Urbana e BR-386 e aumento das médias na área Campus.

Tabela 3 - Comparação dos resultados do MQ4 entre as duas quinzenas

Área	1ª quinzena	2ª quinzena	Variação observada
Parque Faguense	1,380	1,439	Valores semelhantes
Campus UFSM-FW	1,553	1,130	Redução dos valores
Urbano	1,157	0,846	Redução para valores inferiores a 1
BR-386	1,302	0,962	Redução para valores próximos da unidade

O sensor MQ4 apresentou comportamento diferente dos demais sensores avaliados. Na primeira quinzena todas as áreas apresentaram médias superiores à unidade. Na segunda quinzena observou-se redução dos valores médios em praticamente todas as áreas monitoradas, especialmente nas áreas Urbana e BR-386, onde as médias passaram a assumir valores próximos ou inferiores à unidade.

3.2 Influência da temperatura e umidade nos sensores de gás da série MQ

A resposta dos sensores MQ também apresentou variações associadas às condições meteorológicas registradas durante as campanhas de monitoramento. Na primeira quinzena, o sensor

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

MQ135 apresentou maior sensibilidade às variações de temperatura e umidade relativa do ar, seguido pelo MQ7. Em contraste, o MQ4 apresentou comportamento relativamente estável, indicando menor influência dessas variáveis nesse período.

Durante a segunda quinzena foi observado um padrão diferente daquele registrado anteriormente. Os três sensores passaram a apresentar tendência de redução dos valores de Rs/R0 com o aumento da temperatura e aumento dos valores com maior umidade relativa do ar, sendo essa resposta mais evidente para o sensor MQ7. Esses resultados indicam que fatores meteorológicos exercem influência sobre a resposta elétrica dos sensores semicondutores da série MQ, reforçando a necessidade de considerar temperatura e umidade durante a interpretação dos dados obtidos em campo, como visualizado na tabela 4:

Tabela 4 - Comparação da influência da temperatura e umidade sobre os sensores nas duas quinzenas

Sensor	1ª quinzena	2ª quinzena
MQ135	Tendência de aumento dos valores com maior temperatura e redução com maior umidade;	Tendência de redução dos valores com maior temperatura e leve aumento com maior umidade;
MQ7	Leve aumento dos valores com maior temperatura e redução com maior umidade;	Redução dos valores com maior temperatura e aumento com maior umidade;
MQ4	Pouca influência da temperatura e da umidade, mantendo comportamento relativamente estável.	Redução dos valores com maior temperatura e aumento com maior umidade;

3.2 Variáveis ambientais de pressão atmosférica, altitude estimada e velocidade do vento

As variáveis meteorológicas apresentaram diferenças entre as quatro áreas monitoradas. A área Parque Faguense apresentou a maior altitude estimada pelo sensor BMP280 e os menores valores médios de pressão atmosférica. Em contraste, a área Urbana apresentou menores valores estimados de altitude e maiores valores médios de pressão atmosférica. A velocidade média do vento apresentou pequena variação entre as áreas, sendo os menores valores registrados na BR-386 e os maiores valores observados em pontos da área Urbana. É importante destacar que os valores de altitude obtidos pelo BMP280 diferiram da altitude conhecida do município de Frederico Westphalen. Essa discrepância está relacionada ao fato de que a estimativa de altitude realizada por sensores barométricos depende diretamente da pressão atmosférica local, podendo sofrer influência das condições meteorológicas durante as campanhas.

Assim, neste estudo, os dados de altitude foram utilizados apenas para comparação relativa entre os pontos monitorados, não sendo empregados como representação da altitude real dos locais de coleta.

Tabela 5 - Comparação das variáveis ambientais entre áreas e pontos durante o período de monitoramento

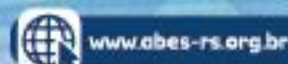
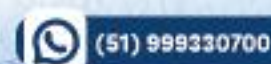
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Área	Vento médio (km/h)	Pressão média (hPa)	Altitude média (m)	Pontos com maior destaque
Parque Faguense	1,1	921,3	765,6	Maior altitude entre as áreas; vento variando de 0,5 a 1,4 km/h.
Campus UFSM-FW	1,0	939,9	625,8	Altitude intermediária; maior variação de velocidade do vento (0,0–2,0 km/h).
Urbano	1,0	964,9	438,9	Menor altitude média; maior pressão atmosférica e ocorrência do maior vento registrado (2,5 km/h no Ponto 2).
BR-386	0,8	952,8	497,6	Menor velocidade média do vento; altitude intermediária e ampla variação de pressão entre os pontos.

4. DISCUSSÃO

4.1 Comparação espacial dos sensores entre as áreas de monitoramento

Os resultados obtidos demonstraram que a resposta relativa dos sensores MQ variou entre as áreas avaliadas. Embora os sensores da série MQ não permitam a identificação específica dos gases presentes na atmosfera, as diferenças observadas entre as áreas sugerem que fatores relacionados à intensidade do tráfego veicular, à cobertura vegetal e às condições meteorológicas influenciaram as respostas registradas. Na primeira quinzena, os sensores MQ7 e MQ135 apresentaram comportamento semelhante, com valores de Rs/R0 próximos da unidade nas áreas Parque Faguense e Campus UFSM e valores relativamente superiores nas áreas Urbana e BR-386. Já na segunda quinzena, observou-se alteração desse padrão, especialmente para o MQ135, indicando que mudanças nas condições ambientais entre os períodos monitorados influenciaram sua resposta elétrica.

O MQ4 apresentou comportamento distinto dos demais sensores durante todo o período experimental. Esse resultado era esperado, considerando que cada sensor possui diferentes faixas de sensibilidade e responde de maneira distinta aos diversos gases presentes na atmosfera. Além disso, a conhecida sensibilidade cruzada desses sensores faz com que sua resposta seja influenciada simultaneamente por diferentes compostos gasosos, dificultando a atribuição das alterações observadas a uma única fonte emissora. Esses resultados reforçam que sensores semicondutores de baixo custo deve ser utilizados principalmente para monitoramento ambiental comparativo e identificação de tendências temporais e espaciais, e não para determinação direta da concentração de poluentes específicos.

4.2 Variação temporal entre a primeira e a segunda quinzena

As condições meteorológicas exerceram influência sobre a resposta dos sensores durante as campanhas de monitoramento. Entre as variáveis avaliadas, temperatura e umidade relativa do ar

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

apresentaram maior relação com as alterações observadas na razão R_s/R_0 . Na primeira quinzena, os sensores MQ7 e MQ135 apresentaram tendência de aumento dos valores com o aumento da temperatura e redução com maior umidade. Já na segunda quinzena observou-se comportamento diferente, com tendência de diminuição dos valores de R_s/R_0 em temperaturas mais elevadas e aumento sob maiores valores de umidade relativa.

Esse comportamento está de acordo com estudos que demonstram que sensores semicondutores de óxido metálico apresentam elevada dependência das condições ambientais, especialmente temperatura e umidade, fatores capazes de modificar os processos de adsorção e dessorção dos gases na superfície sensível do sensor (CHOJER et al., 2020; SÁ et al., 2022). A velocidade do vento também pode ter contribuído para a dispersão dos gases atmosféricos durante as campanhas. Em ambientes com maior circulação de ar, espera-se redução da permanência dos gases próximos às fontes emissoras, enquanto velocidades menores favorecem sua acumulação local. Entretanto, considerando a pequena amplitude observada entre as áreas monitoradas, não é possível atribuir isoladamente à velocidade do vento as diferenças registradas pelos sensores.

Da mesma forma, a pressão atmosférica apresentou pequenas variações durante o monitoramento. Embora essa variável influencie a densidade do ar e, consequentemente, a dispersão dos gases, seus efeitos provavelmente ocorreram em conjunto com temperatura, umidade e velocidade do vento, dificultando a identificação de sua contribuição individual. Em conjunto, esses resultados demonstram que a interpretação das respostas dos sensores MQ deve considerar simultaneamente as condições meteorológicas, uma vez que essas variáveis podem modificar significativamente o comportamento elétrico dos sensores independentemente das alterações na composição gasosa do ambiente.

4.3. Considerações sobre as variáveis ambientais e limitações das medições

Entre Apesar dos resultados promissores obtidos, algumas limitações devem ser consideradas durante a interpretação dos dados. Os sensores MQ utilizados neste estudo apresentam sensibilidade cruzada a diferentes gases atmosféricos e, portanto, não permitem identificar individualmente cada composto presente no ambiente. Além disso, como a calibração foi baseada em um procedimento de normalização relativa (R_s/R_0) e não em gases padrão certificados, os resultados obtidos representam alterações relativas da resposta elétrica dos sensores, não sendo equivalentes às concentrações absolutas normalmente fornecidas por estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar.

Outra limitação observada refere-se ao sensor BMP280. Embora tenha apresentado boa estabilidade na medição da pressão atmosférica, a estimativa de altitude apresentou diferenças consideráveis em relação à altitude real da área de estudo. Esse comportamento é esperado, uma vez que sensores barométricos calculam a altitude com base na pressão atmosférica, a qual sofre influência das condições meteorológicas locais. Dessa forma, neste estudo, os valores de altitude foram utilizados apenas para comparação relativa entre os diferentes pontos monitorados. Também deve ser considerado que as campanhas foram realizadas em apenas duas quinzenas do mês de abril. Apesar dessas limitações, a plataforma desenvolvida demonstrou bom desempenho operacional durante as campanhas, permitindo

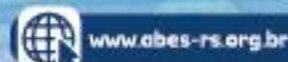
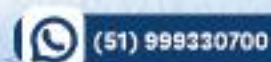
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



aquisição automática, armazenamento em nuvem e visualização remota dos dados, características importantes para aplicações de monitoramento ambiental de baixo custo.

4.4 Potencial da plataforma desenvolvida

Um dos principais diferenciais deste trabalho foi a integração entre hardware, software e sistemas de comunicação em uma única plataforma de monitoramento ambiental. A arquitetura desenvolvida reuniu sensores de baixo custo, microcontrolador ESP32, aplicativo móvel para aquisição dos dados, armazenamento automático em nuvem e página web para consulta pública das informações. Essa integração possibilitou automatizar todo o fluxo de aquisição, armazenamento e disponibilização dos dados, reduzindo a necessidade de intervenção manual durante as campanhas.

Em comparação com estações automáticas convencionais de monitoramento da qualidade do ar, que apresentam elevado custo de aquisição, instalação e manutenção, a plataforma proposta representa uma alternativa de menor custo para estudos exploratórios, monitoramento ambiental comparativo e atividades de ensino e pesquisa. Embora não substitua equipamentos de referência utilizados por órgãos ambientais, o sistema demonstra potencial para complementar redes oficiais de monitoramento, especialmente em municípios que não dispõem de estações automáticas.

Essas características evidenciam que a plataforma possui potencial para futuras aplicações em monitoramentos de maior duração, estudos espaciais mais abrangentes e desenvolvimento de redes colaborativas de monitoramento ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica do desenvolvimento de uma plataforma experimental de monitoramento ambiental baseada em sensores semicondutores de baixo custo da série MQ integrados a uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT). A integração entre sensores, microcontrolador ESP32, aplicativo móvel, armazenamento em nuvem e plataforma web possibilitou a aquisição automatizada, o armazenamento e a visualização remota dos dados obtidos durante a campanha de monitoramento.

As respostas relativas dos sensores MQ4, MQ7 e MQ135 apresentaram variações entre as áreas monitoradas e entre as duas campanhas realizadas, indicando que tanto as características ambientais dos locais quanto as condições meteorológicas influenciaram o comportamento dos sensores. Entre as variáveis avaliadas, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento mostraram-se importantes para a interpretação dos resultados, evidenciando a necessidade de considerar esses fatores em estudos utilizando sensores semicondutores. Entretanto, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações inerentes à tecnologia empregada. Os sensores da série MQ apresentam sensibilidade cruzada a diferentes gases atmosféricos e foram utilizados neste estudo por meio de normalização relativa (R_s/R_0), não permitindo a determinação de concentrações absolutas de poluentes. Dessa forma, a plataforma desenvolvida deve ser entendida como uma ferramenta destinada ao monitoramento ambiental comparativo e à identificação de tendências espaciais e temporais, não substituindo estações automáticas de referência utilizadas em programas oficiais de monitoramento da qualidade do ar.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Apesar dessas limitações, a plataforma demonstrou potencial para aplicações em pesquisas ambientais de monitoramentos exploratórios em municípios que não dispõem de estações convencionais de monitoramento da qualidade do ar. Trabalhos futuros poderão ampliar os conhecimentos obtidos com este experimento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

CHOJER, Harsh; BRANCO, Pedro T. B. S.; MARTINS, Fernando G.; ALVIM-FERRAZ, Maria do Carmo M.; SOUSA, Sofia I. V. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 727, 20 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>. Acesso em: 19 mai. 2026.

CHOJER, H.; BRANCO, P. T. B. S.; MARTINS, Fernando G.; ALVIM-FERRAZ, Maria Conceição M.; SOUSA, Sofia I. V. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 727, p. 138385, 20 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>. Acesso em: 19 mai. 2026.

CASTELL, Nuria et al. Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring. **European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM)**, nov. 2013. ETC/ACM Technical Paper 2013/16. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260600086_Real-world_application_of_new_sensor_technologies_for_air_quality_monitoring. Acesso em: 19 de mai 2026.

DAI, Xilei; SHANG, Wenzhe; LIU, Junjie; XUE, Min; WANG, Congcong. Achieving better indoor air quality with IoT systems for future buildings: Opportunities and challenges. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 895, p. 164858, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164858>. Acesso em: 19 mai. 2026.

GBD 2019 RISK FACTORS COLLABORATORS. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. **The Lancet**, [s. l.], v. 396, n. 10258, p. 1223-1249, 17 out. 2020. Disponível Em: [https://www.thelancet.com/article/S0140-6736\(20\)30752-2/fulltext](https://www.thelancet.com/article/S0140-6736(20)30752-2/fulltext). Acesso em: 19 mai. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Frederico Westphalen: panorama. Rio de Janeiro: IBGE, [s. d.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/federico-westphalen/panorama>. Acesso em: 4 maio 2026.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

JIANG, Xing; HAN, Yiqun; QIU, Xinghua; CHAI, Qianqian; ZHANG, Hanxiyue; CHEN, Xi; CHENG, Zhen; WANG, Yanwen; FAN, Yunfei; XUE, Tao; LI, Weiju; GONG, Jicheng; ZHU, Tong. Organic Components of Personal $SPM_{2.5}$ Exposure Associated with Inflammation: Evidence from an Untargeted Exposomic Approach. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 56, n. 22, p. 15930–15941, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02023>. Acesso em: 19 mai. 2026.

SÁ, Juliana Pinheiro de; ALVIM-FERRAZ, Maria da Conceição M.; MARTINS, Fernando G.; SOUSA, Sofia I. V. Application of the low-cost sensing technology for indoor air quality monitoring: A review. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 28, p. 102551, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102551>. Acesso em: 19 mai. 2026.

SNYDER, Emily G.; WATKINS, Timothy H.; SOLOMON, Paul A.; THOMA, Eben D.; WILLIAMS, Ronald W.; HAGLER, Gayle S. W.; SHELOW, David; HINDIN, David A.; KILARU, Vasu J.; PREUSS, Peter W. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 47, n. 20, p. 11369–11377, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es4022602>. Acesso em: 19 mai. 2026.

THOMPSON, Jonathan E. Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 11, p. 23-34, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2016.06.001>. Acesso em: 19 mai. 2026.

XUE, Yueguang; WANG, Liuxiang; ZHANG, Yiming; ZHAO, Yuliang; LIU, Ying. Air pollution: A culprit of lung cancer. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 434, p. 128937, 15 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128937>. Acesso em: 19 mai. 2026.

ZHANG, Qingli; DU, Xihao; LI, Huichu; JIANG, Yixuan; ZHU, Xinlei; ZHANG, Yang; NIU, Yue; LIU, Cong; JI, John; CHILLRUD, Steven N.; CAI, Jing; CHEN, Renjie; KAN, Haidong. Cardiovascular effects of traffic-related air pollution: A multi-omics analysis from a randomized, crossover trial. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 435, p. 129031, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129031>. Acesso em: 19 mai. 2026.

ZHANG, Qingli; DU, Xihao; LI, Huichu; JIANG, Yixuan; ZHU, Xinlei; ZHANG, Yang; NIU, Yue; LIU, Cong; JI, John; CHILLRUD, Steven N.; CAI, Jing; CHEN, Renjie; KAN, Haidong. Cardiovascular effects of traffic-related air pollution: A multi-omics analysis from a randomized, crossover trial. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 435, p. 129031, 5 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129031>. Acesso em: 19 mai. 2026.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br