



DESEMPENHO DE SENSORES DE CO₂: comparação experimental entre tecnologias NDIR, óxido metálico e eletroquímico

João P. de T. GOMES¹; Murilo D.M. INNOCENTINI²; Carlos E. FORMIGONI³

RESUMO

Este relato de pesquisa apresenta uma análise comparativa de sensores de CO₂, incluindo SCD41, MH-Z19B, MQ135 e CCS811, com o objetivo de identificar os sensores mais adequados para diferentes condições ambientais. Os resultados indicaram que os sensores do tipo NDIR, são os mais precisos e confiáveis, com o SCD41 se destacando pela capacidade de integrar medições de umidade e temperatura, sendo, portanto, recomendados para aplicações críticas devido à sua robustez. Em contraste, os sensores eletroquímicos e de óxido metálico enfrentaram maiores desafios de precisão, especialmente devido à sensibilidade às variações de temperatura. Embora a umidade tenha mostrado uma correlação positiva em algumas situações, os dados não são conclusivos para afirmar que é a variável mais influente em todas as medições. Este estudo sugere que a influência da umidade deve ser considerada, mas que outros fatores também contribuem para a variabilidade das leituras de CO₂. Recomenda-se a aplicação de técnicas avançadas, como aprendizado de máquina, para aprimorar a precisão das medições e a compreensão dos fatores ambientais.

Palavras-chave: Qualidade do ar; Calibração de sensores; Variáveis ambientais.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade do ar é crucial para avaliar o impacto da poluição atmosférica na saúde humana e no meio ambiente (ZHANG; SRINIVASAN, 2020). Com o aumento significativo do uso de sensores de baixo custo, surge a necessidade de avaliar sua precisão e confiabilidade em diferentes ambientes (MAO et al., 2019). Este trabalho compara sensores de CO₂ com diferentes tecnologias, como NDIR (HOBSON et al., 2023), eletroquímicos e de óxido metálico (YURKO et al., 2019), para identificar os mais adequados para o monitoramento ambiental.

Estudos anteriores destacam a importância da calibração e da compensação ambiental para a precisão das medições (MÜLLER et al., 2020) (KADUWELA et al., 2019).

Este trabalho objetiva identificar o sensor que melhor se adapta às condições climáticas locais, propondo uma abordagem experimental que avalia a operação dos sensores em diferentes ambientes, considerando variáveis como temperatura, umidade e pressão. Os resultados visam fornecer subsídios para a escolha de sensores em aplicações de monitoramento da qualidade do ar, contribuindo para soluções que melhorem a qualidade de vida em ambientes urbanos e rurais. Além disso, o estudo estabelece relações com pesquisas anteriores (NALAKURTHI et al., 2024), destacando a relevância da calibração e da compensação de variáveis ambientais, e propõe a

1 Professor, IFSULDEMINAS – Campus Passos. E-mail: joao.gomes@ifsuldeminas.edu.br.

2 Professor, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: minnocentini@unaerp.br.

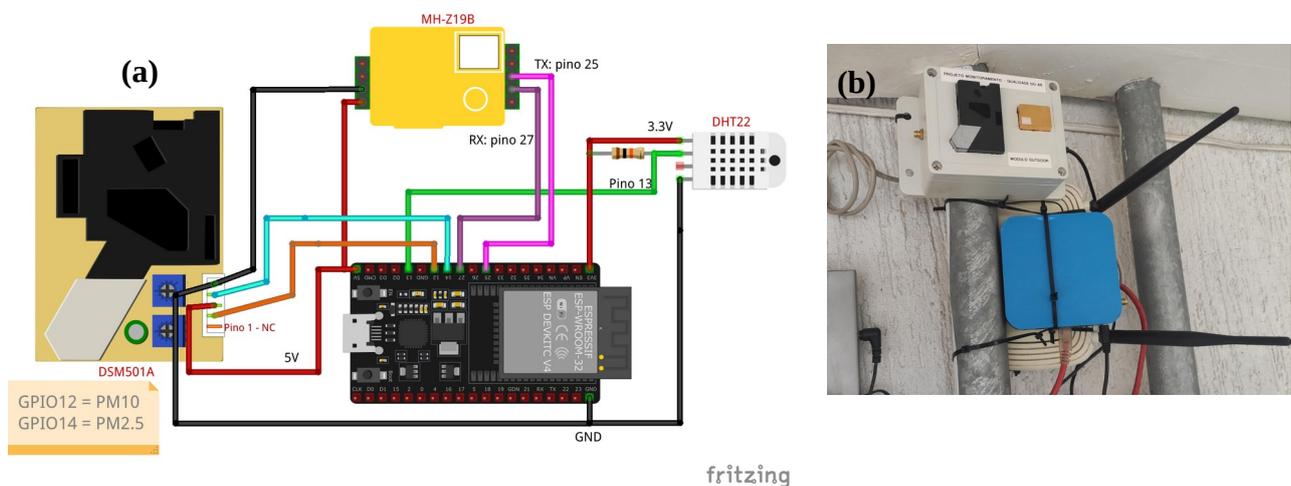
3 Professor, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: cformigoni@unaerp.br.

aplicação de técnicas avançadas para aprimorar a acurácia das medições.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no IFSULDEMINAS - Campus Passos, utilizando uma variedade de sensores de CO₂ instalados no bloco C, bloco D e biblioteca, para avaliar sua precisão e confiabilidade em diferentes condições ambientais. Sensores como o SCD41, MH-Z19B, MQ135 e CCS811 foram instalados em módulos integrados ao ESP32, permitindo comunicação via *Wi-Fi* e coleta de dados em tempo real. A Figura 1(a) apresenta o *layout* do circuito utilizado no experimento com o sensor MH-Z19B, a Figura 1(b) apresenta o módulo sensor instalado do lado externo ao Bloco D para calibração ao ar livre.

Figura 1 – Esquema elétrico e módulo sensor MH-Z19B instalado no Bloco D



Fonte: Autor, 2024.

Os sensores foram calibrados conforme as especificações dos fabricantes, com ajustes específicos para temperatura, umidade e pressão, a fim de garantir a maior precisão possível nas medições de CO₂. Os módulos foram distribuídos em diferentes ambientes, internos e externos, para avaliar o desempenho em condições reais, considerando fatores como ventilação, presença de pessoas, e variações climáticas. Os dados foram coletados em intervalos de 30 segundos, começando com um período inicial de 48 horas para estabilização dos sensores, seguido por múltiplos ensaios no período entre 12/05/2024 e 22/07/2024.

Para ajustar as leituras de CO₂ à temperatura de referência, utilizou-se a relação entre a concentração de CO₂ (em ppm), a temperatura e a pressão através da Equação 1:

$$\text{CO}_2 \text{ corrigido} = \text{CO}_2 \text{ medido} \times (T \text{ medido} / T \text{ ref}) \times (P \text{ ref} / P \text{ medida}) \quad (1)$$

Além disso, aplicou-se um modelo de regressão linear para quantificar a influência dessas variáveis nas concentrações de CO₂:

1. Correlação de Pearson, para calcular o coeficiente (r), expressa pela Equação 2:

$$r = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

2. Regressão Linear, expressa pela Equação 3:

$$\text{CO}_2 = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Temperatura} + \beta_2 \times \text{Umidade} + \beta_3 \times \text{Pressao} \quad (3)$$

Com essa abordagem, permitiu-se identificar e quantificar a influência das variáveis ambientais nas medições de CO₂.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados com os sensores SCD41, MH-Z19B, MQ135 e CCS811 revelaram variações significativas nas medições de CO₂ em função das condições ambientais, como temperatura, umidade e pressão.

Em um dos ensaios, a concentração de CO₂ mostrou uma correlação aparente com a umidade, sugerindo que a correção do CO₂ pode não ser adequadamente explicada apenas pela Lei dos Gases Ideais. Considerou-se a possibilidade de que a concentração de vapor d'água e sua interação com a luz infravermelha dos sensores pudesse alterar as medições.

Para explorar essas hipóteses, foram realizados cálculos de correlação e regressão linear entre as variáveis de temperatura, umidade e pressão, visando identificar influências nas medições de CO₂ nos ambientes testados. No entanto, os resultados obtidos através da aplicação do modelo de regressão linear com os sensores MH-Z19B e SCD41, instalados em paralelo em ambientes internos e externos, mostraram uma capacidade limitada de explicar a variação nos níveis de CO₂ com base na temperatura e umidade. Os dados não são conclusivos para determinar qual dessas variáveis tem maior influência, uma vez que ambas parecem contribuir para a variação do CO₂.

Os resultados indicaram que a umidade apresenta uma correlação positiva significativa com as concentrações de CO₂, sugerindo um impacto relevante nas leituras. A pressão tende a apresentar um coeficiente negativo, geralmente associando aumentos de pressão a reduções nas leituras de CO₂. A temperatura mostrou efeitos variados, com correlações tanto negativas quanto positivas, mas nem sempre estatisticamente significativas.

Os valores de R² variaram de 0.055 (Corredor com SCD41) a 0.364 (Sala 412 com SCD41), indicando a influência de outros fatores não considerados no modelo. O sensor SCD41 destacou-se pela precisão, especialmente em ambientes com grandes variações de umidade, sendo o mais adequado para monitoramento crítico. Os sensores NDIR, como o SCD41 e o MH-Z19B, superaram os sensores eletroquímicos e de óxido metálico em termos de estabilidade e precisão. O sensor MQ135 mostrou-se menos confiável devido à sua alta sensibilidade às variações de temperatura e à necessidade de calibração rigorosa.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicam que os sensores SCD41 e MH-Z19B são precisos e

confiáveis para o monitoramento da qualidade do ar, com o SCD41 se destacando por sua capacidade de integrar medições de umidade e temperatura, o que contribui para maior precisão nas leituras de CO₂. O SCD41 demonstrou superioridade em ambientes com variações significativas de umidade, tornando-o uma opção ideal para monitoramento em ambientes externos. Sensores NDIR, como o SCD41 e o MH-Z19B, são recomendados para aplicações críticas devido à sua robustez e precisão, embora a influência da umidade deva ser considerada ao interpretar os dados.

Em contraste, os sensores eletroquímicos e de óxido metálico, como o MQ135 e o CCS811, enfrentaram maiores desafios em termos de precisão, especialmente em função da sensibilidade às variações de temperatura e da necessidade de calibração rigorosa. Para uma análise mais robusta, sugere-se a inclusão de mais variáveis no modelo e a extensão do período de coleta de dados, a fim de captar melhor a variabilidade das condições ambientais e suas influências nas medições de CO₂.

AGRADECIMENTOS

Ao IFSULDEMINAS – Campus Passos pelo apoio prestado na condução dos experimentos e concessão de licença para qualificação; Ao Núcleo de Materiais Sustentáveis e Otimização de Processos Ambientais da UNAERP.

REFERÊNCIAS

HOBSON, B. W. et al. *Minimum sensor grid density and configuration to enable CO₂-based demand-controlled ventilation in an office building*. *Energy and Buildings*, v. 298, p. 113536, nov. 2023. Acesso em 15 de jun. 2024.

KADUWELA, A. P. et al. *Development of a low-cost air sensor package and indoor air quality monitoring in a California middle school: Detection of a distant wildfire*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 69, n. 9, p. 1015–1022, 2 set. 2019. Acesso em 18 de jun. 2024.

MAO, F. et al. *Low-Cost Environmental Sensor Networks: Recent Advances and Future Directions*. *Frontiers in Earth Science*, v. 7, p. 221, 11 set. 2019. Acesso em 25 de jun. 2024.

MÜLLER, M. et al. *Integration and calibration of non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ low-cost sensors and their operation in a sensor network covering Switzerland*. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 13, n. 7, p. 3815–3834, 15 jul. 2020. Acesso em 15 de jul. 2024.

NALAKURTHI, N. V. S. R. et al. *Challenges and Opportunities in Calibrating Low-Cost Environmental Sensors*. *Sensors*, v. 24, n. 11, p. 3650, 5 jun. 2024. Acesso em 15 de jun. 2024.

YURKO, G. et al. *Real-Time Sensor Response Characteristics of 3 Commercial Metal Oxide Sensors for Detection of BTEX and Chlorinated Aliphatic Hydrocarbon Organic Vapors*. *Chemosensors*, v. 7, n. 3, p. 40, 27 ago. 2019. Acesso em 13 de jul. 2024.

ZHANG, H.; SRINIVASAN, R. *A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management*. *Sustainability*, v. 12, n. 21, p. 9045, 30 out. 2020. Acesso em 26 de jul. 2024.