



## **SimulARES-IQAr: avaliação computacional da qualidade do ar baseada em dados empíricos de sensores**

**João P. de T. GOMES<sup>1</sup>; Nilo H. M. FORTES<sup>2</sup>; José G. P. SOUZA<sup>3</sup>; Murilo D.M. INNOCENTINI<sup>4</sup>; Carlos E. FORMIGONI<sup>5</sup>**

### **RESUMO**

Este relato de pesquisa apresenta uma ferramenta computacional para a avaliação da qualidade do ar interior, fundamentada em dados empíricos provenientes de sensores de baixo custo. Foram utilizadas medições reais realizadas em salas de aula do IFSULDEMINAS – Campus Passos, abrangendo concentrações de CO<sub>2</sub>, material particulado e variáveis ambientais. A simulação possibilitou a comparação entre os níveis preditos e os valores medidos de CO<sub>2</sub>, evidenciando que todas as salas ultrapassaram os 1000 ppm, limite estabelecido por normas nacionais e internacionais. Embora os índices de qualidade do ar (IQAr) tenham indicado boas condições para os demais poluentes, os resultados reforçam a necessidade de estratégias de ventilação mais eficazes. O simulador demonstrou ser uma ferramenta promissora para subsidiar ações de diagnóstico, gestão e educação ambiental.

**Palavras-chave:** Ventilação; Ambientes escolares; Modelagem computacional; Dióxido de carbono; Simulação.

### **1. INTRODUÇÃO**

A concentração global de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) vem aumentando, alcançando média de 425 ppm em fevereiro de 2025 (Lan et al., 2024). Esse aumento afeta o clima e a qualidade do ar interior, especialmente em ambientes escolares com ventilação inadequada, favorecendo o acúmulo de CO<sub>2</sub> e outros poluentes, como compostos orgânicos voláteis (COVs) e material particulado. Ambientes mal ventilados podem causar a Síndrome do Edifício Doente (SED), afetando o conforto e a saúde dos ocupantes (Mustafa; Cook; McLeod, 2025).

Para ambientes saudáveis, recomenda-se manter o CO<sub>2</sub> abaixo de 1000 ppm e a taxa mínima de renovação do ar (ACH – trocas por hora) acima de 5, indicador que mede quantas vezes o ar interno é renovado por hora (Allen et al., 2020). O Índice de Qualidade do Ar interior (IQAr) avalia vários poluentes como material particulado, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, entre outros, sintetizando-os em uma escala qualitativa. Importante notar que o IQAr não inclui o CO<sub>2</sub>, que serve principalmente como indicador da ventilação e ocupação, não como poluente nocivo.

Sensores de baixo custo aliados à modelagem computacional têm sido utilizados para monitorar e prever a qualidade do ar interior, permitindo intervenções rápidas e eficazes (Persily;

---

<sup>1</sup> Doutorando, UNAERP; Professor, IFSULDEMINAS – Campus Passos. E-mail: joao.gomes@ifsuldeminas.edu.br.

<sup>2</sup> Pós-doutorado, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: nilomeirafortes@gmail.com.

<sup>3</sup> Professor, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: jsouza@unaerp.br.

<sup>4</sup> Professor, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: minnocentini@unaerp.br.

<sup>5</sup> Professor, UNAERP – Campus Ribeirão Preto. E-mail: cformigoni@unaerp.br.

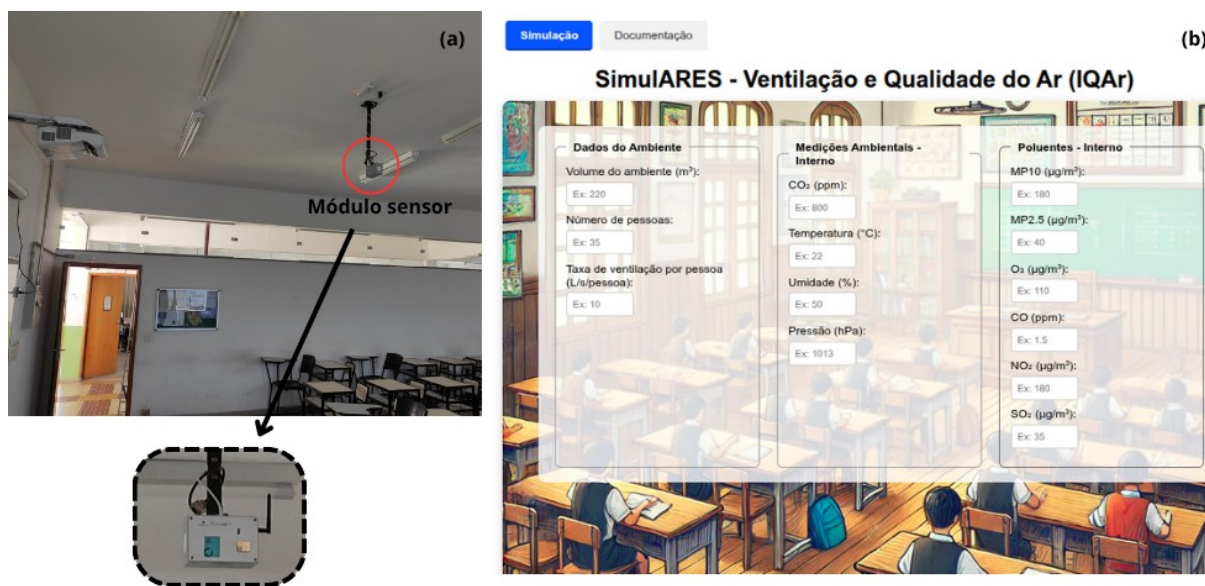
Polidoro, 2022). Neste contexto, esta pesquisa visa aplicar a simulação computacional baseada em dados de sensores acessíveis para analisar a qualidade do ar em salas de aula, promover o entendimento dos efeitos da ventilação e da ocupação, além de estimular ações educativas voltadas à melhoria do ambiente escolar.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Sensores de baixo custo foram instalados há um ano no campus Passos do IFSULDEMINAS (Gomes; Innocentini; Formigoni, 2024), em salas do Bloco D (412, 413 e 421), Laboratório 9 do Bloco C, biblioteca e uma estação externa entre os blocos C e D. Esses sensores monitoram em tempo real concentrações de CO<sub>2</sub>, material particulado (PM1.0, PM2.5, PM10), compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), além de parâmetros ambientais como temperatura, umidade e pressão atmosférica. Foram testados e calibrados, tendo sua validade confirmada por meio de comparações com dados da estação meteorológica A516 do INMET e com estudos prévios sobre sensores de baixo custo (Gomes; Innocentini; Formigoni, 2024).

Como ferramenta educacional agregadora, foi desenvolvido o SimulARES-IQAr, utilizando HTML, CSS e JavaScript, com Bootstrap para *layout* responsivo, Chart.js para gráficos e jsPDF para geração de relatórios em PDF. O simulador se espelha na norma ASHRAE 62.1 e modelos do NIST (Persily; Polidoro, 2022). Além disso, integra dados externos de poluentes (CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) obtidos pela plataforma AccuWeather (2025). A Figura 1 apresenta o módulo sensor e a interface do simulador, disponível em <https://ares.eco.br>.

**Figura 1** – (a) Exemplo do módulo instalado na sala 421; (b) *Layout* do SimulARES versão IQAr



Fonte: Autores, 2025.

Para validar a simulação, foram utilizados dados coletados em 13 de junho de 2025,

referentes a uma aula de 50 minutos (10h–10h50). Embora os sensores transmitam dados a cada 30 segundos, para a análise é considerado apenas os dados iniciais (Tabela 1), complementados pela observação *in loco* da ocupação: 37 pessoas na sala 412, 36 na 413 e 34 na 421.

**Tabela 1** - Amostra de dados dos sensores para testes de desempenho do simulador

Sensores/ Ambientes	Interno (inicial)						Externo (inicial)					
	CO <sub>2</sub> (ppm)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Pressão (hPa)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	CO <sub>2</sub> (ppm)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Pressão (hPa)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
Sala 412	673	22	51	934	5	6						
Sala 413	728	23	49	934	10	12	529	20	52	934	8	11
Sala 421	923	23	52	934	8	11						

Fonte: Autores, 2025.

Esta abordagem configura uma amostragem adequada para o cálculo do IQAr que depende de dados externos obtidos via AccuWeather, que variam ao longo do dia devido a diversos fatores, sendo essencial a coleta desses poluentes no mesmo horário para a correta correlação. Os valores registrados foram: CO = 84 µg/m³ (~0,073 ppm, considerado zero para fins práticos), O<sub>3</sub> = 59 µg/m³, NO<sub>2</sub> = 15 µg/m³ e SO<sub>2</sub> = 1 µg/m³.

As salas possuem volume semelhante, cerca de 220 m³. O CO<sub>2</sub>, gerado pela respiração, é fundamental para avaliar a ventilação, que para a simulação foi fixada em 8 L/s por pessoa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O simulador estimou ACH entre 4,71 e 4,84, adequados porém insuficientes para manter CO<sub>2</sub> abaixo de 1000 ppm. O valor simulado de CO<sub>2</sub> final foi 1154 ppm, mas os sensores indicaram níveis maiores (1368 a 1813 ppm), conforme Tabela 2.

**Tabela 2** – Resultado da simulação e comparação com os registros dos sensores

Resultado / Ambientes	Simulação: ventilação e CO <sub>2</sub>		Sensores	Simulação: IQAr	
	ACH	CO <sub>2</sub> final (ppm)	CO <sub>2</sub> final medido (ppm)	IQA geral	Condição do ar
Sala 412	4,84	1154	1813	4	N1 - boa
Sala 413	4,71	1154	1649	9	N1 - boa
Sala 421	4,71	1154	1368	7	N1 - boa

Fonte: Autores, 2025.

As discrepâncias indicam que, embora as normas teóricas fossem atendidas, a ventilação real não evitou acúmulo excessivo de CO<sub>2</sub>, possivelmente devido a alta ocupação das salas ou condições de ventilação natural insuficientes. Importante destacar que o CO<sub>2</sub> é um indicador indireto da ventilação e ocupação, refletindo o ar expirado pelos humanos, enquanto o IQAr é um índice composto que avalia vários poluentes, mas não inclui o CO<sub>2</sub> diretamente. Assim, a qualidade “boa” indicada pelo IQAr, mesmo com níveis elevados de CO<sub>2</sub>, demonstra que essas métricas

avaliam aspectos diferentes da qualidade do ar interior, evidenciando a importância de análises integradas para avaliação abrangente.

A simulação preditiva do SimulARES-IQAr apoia a compreensão ambiental real e subsidia decisões administrativas e educativas para melhoria da ventilação e saúde escolar.

#### 4. CONCLUSÃO

O SimulARES-IQAr é eficaz para diagnosticar a qualidade do ar em escolas. A comparação entre simulações e medições revelou que, apesar de a ventilação estar dentro dos parâmetros normativos, ela não foi suficiente para manter o CO<sub>2</sub> dentro dos limites recomendados.

A integração dos dados dos sensores com informações ambientais externas amplia o potencial do sistema como ferramenta de apoio à tomada de decisões, promovendo a conscientização e ações preventivas em benefício da saúde e do bem-estar da comunidade escolar.

#### REFERÊNCIAS

ACCUWEATHER. **Qualidade do ar**. Disponível em:

<<https://www.accuweather.com/pt/br/passos/33794/air-quality-index/33794>>. Acesso em: 13 jun. 2025.

ALLEN, Joseph *et al.* **How to assess classroom ventilation: 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms**. Cambridge: Harvard T.H. Chan School of Public Health. **HARVARD HEALTHY BUILDINGS PROGRAM**, 2020. Disponível em:

<<https://healthybuildings.hsph.harvard.edu/research/schools/ventilation-guide/>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

GOMES, João Paulo de Toledo; INNOCENTINI, Murilo D. M.; FORMIGONI, Carlos E. **Desempenho de sensores de CO<sub>2</sub>: comparação experimental entre tecnologias NDIR, óxido metálico e eletroquímico**. In: : 1.JOSIF-2024. SIMPÓSIO DA PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS. Inconfidentes-MG: 18 dez. 2024. Disponível em:

<<https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/1785>>. Acesso em: 9 mar. 2025.

LAN, Xin *et al.* **Trends in globally-averaged CO<sub>2</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements**. NOAA GML, , 2024. Disponível em:

<<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html?doi=10.15138/9n0h-zh07>>. Acesso em: 28 fev. 2025.

MUSTAFA, M.; COOK, M. J.; MCLEOD, R. S. **A critical review of ventilation effectiveness in naturally ventilated spaces from the perspective of sustainability and health**. Building and Environment, v. 270, p. 112471, fev. 2025.

PERSILY, Andrew; POLIDORO, Brian J. **Indoor carbon dioxide metric analysis tool**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (U.S.), 25 mar. 2022. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2213.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2025.