



## **QUALIDADE DO AR INTERNO EM SALA DE AULA: SIMULAÇÃO COM DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO**

**Jean Cláudio Radünz**

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis da  
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) campus Cerro Largo/RS  
jean.radunz@estudante.uffs.edu.br

**Fabiano Cassol**

Professor na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) campus Cerro Largo/RS  
fabiano.cassol@uffs.edu.br

### **1. Introdução**

A qualidade do ar interior (QAI) em escolas naturalmente ventiladas é influenciada por variáveis arquitetônicas, ocupacionais e climáticas, as quais impactam diretamente a saúde e o desempenho de seus ocupantes (Stabile et al., 2017). Estudos demonstram que estratégias de ventilação passiva (ventilação natural) podem ser eficazes na mitigação de contaminantes, mas requerem gestão adequada das aberturas (Furst et al., 2024). Além disso, a variabilidade regional no desempenho energético das escolas públicas brasileiras indica a necessidade de abordagens específicas de avaliação (Gnecco et al., 2022). Nesse contexto, simulações computacionais multizona mostram-se ferramentas robustas para analisar o equilíbrio entre ventilação e eficiência energética (NG et al., 2015).

Diante da ausência de dispositivos mecânicos de renovação de ar, o planejamento arquitetônico e a gestão das aberturas, especialmente janelas e portas, tornam-se elementos-chave para assegurar a adequada dispersão de poluentes internos. Nesse contexto, a modelagem computacional configura-se como abordagem eficaz para simular cenários de ventilação natural e ocupação escolar, permitindo prever a concentração de contaminantes ao longo do tempo. O presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto de diferentes estratégias operacionais de ventilação natural sobre os níveis de CO<sub>2</sub> em salas de aula do ensino fundamental, visando subsidiar intervenções que promovam ambientes escolares salubres.



## 2. Metodologia

A modelagem computacional foi realizada com o software CONTAMW 3.4, desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST). Adotou-se como estudo de caso uma escola de ensino fundamental localizada em Horizontina/RS, cuja edificação apresenta tipologia arquitetônica de escolas brasileiras, conforme caracterizações regionais observadas por Gnecco et al. (2022). O modelo considerou seis salas de aula dispostas linearmente ao longo de um corredor central, totalizando sete zonas internas.

Cada sala foi modelada com dimensões de 8,5 m  $\times$  6,5 m e altura de 3 m. O corredor foi definido com 3 m de largura e 24 m de comprimento. A orientação da fachada principal foi ajustada em  $-25^\circ$  em relação ao Norte verdadeiro, de modo a refletir a geometria real e alinhar o modelo aos dados climáticos externos.

A ventilação natural foi representada por quatro janelas por sala de aula. Cada janela foi configurada com 1,3 m de altura, 0,8 m de largura e coeficiente de descarga (Cd) de 0,78. A escolha desse valor foi baseada em recomendações técnicas de janelas basculantes totalmente abertas e sem obstruções, conforme relatado por Etheridge & Sandberg (1996), ASHRAE Fundamentals (2021), e o manual técnico do NIST (NIST TN 1887r1, 2021). As portas das salas também foram modeladas com Cd = 0,78, altura de 2,1 m e largura de 0,9 m, conforme práticas recomendadas por Liddament (1996) e corroboradas pelas mesmas fontes anteriormente citadas.

A ocupação foi simulada por meio da inserção de fontes contínuas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), representando 20 crianças e 1 professor por sala. A taxa de geração total adotada foi de 0,000208 kg/s por sala, calculada com base nas diretrizes da ASHRAE (2021) e nos valores propostos por Persily & de Jonge (2017) para ambientes educacionais. Para simular atividades de limpeza, adicionou-se uma fonte secundária de CO<sub>2</sub> equivalente a dois adultos em atividade leve a moderada, com taxa de emissão de  $6,14 \times 10^{-5}$  kg/s, aplicada entre 06:00 e 06:10 diariamente.

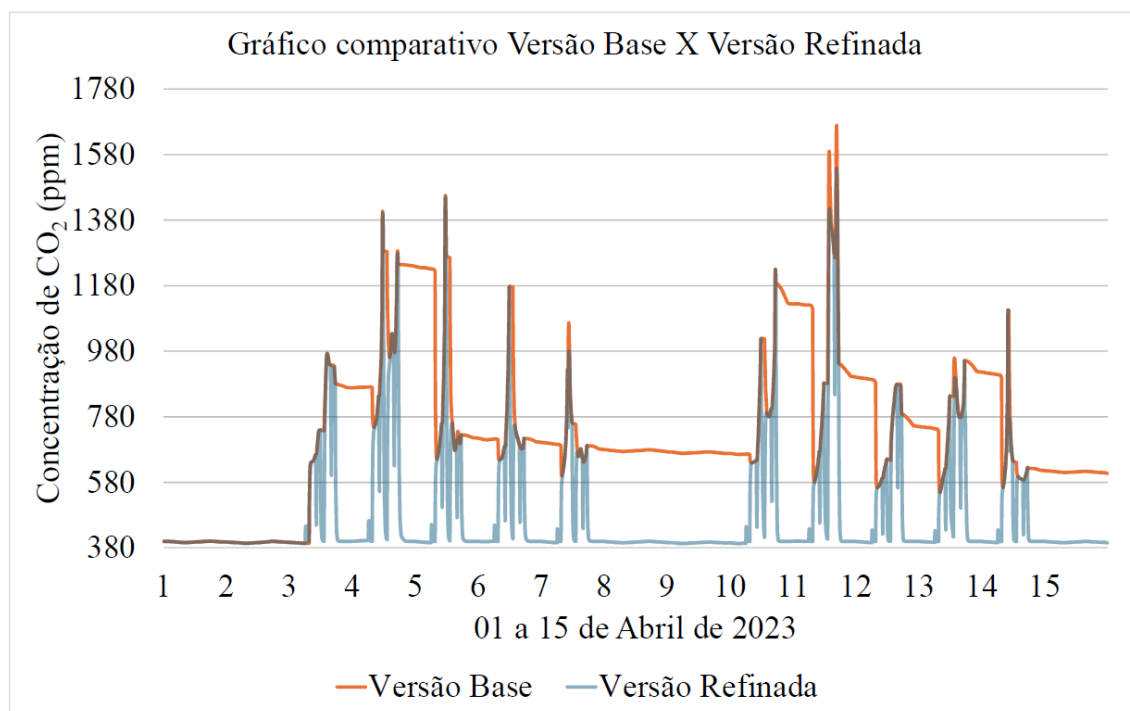
A infiltração de ar foi representada por frestas equivalentes nos contornos das janelas e portas. Para as janelas, modelou-se uma infiltração por sala com 4,8 metros de comprimento e 2 mm de largura, enquanto para as portas foi adotada uma fresta de 0,9 metro por 8 mm de altura.

As simulações foram conduzidas com dados climáticos reais do município de Santa Maria/RS, distante 180 km de Horizontina, que apresenta condições climáticas e atmosféricas semelhantes e representa adequadamente o clima regional. Utilizou-se um arquivo climático completo para o ano de 2023. O período simulado correspondeu de 01 a 15 de abril (período escolhido por representar o primeiro mês de aulas conforme o Calendário Letivo da escola), com passo de tempo de 5 minutos e saída de dados com frequência horária, permitindo análise transiente detalhada da dispersão do CO<sub>2</sub> nas salas de aula.

### 3. Resultados e discussão

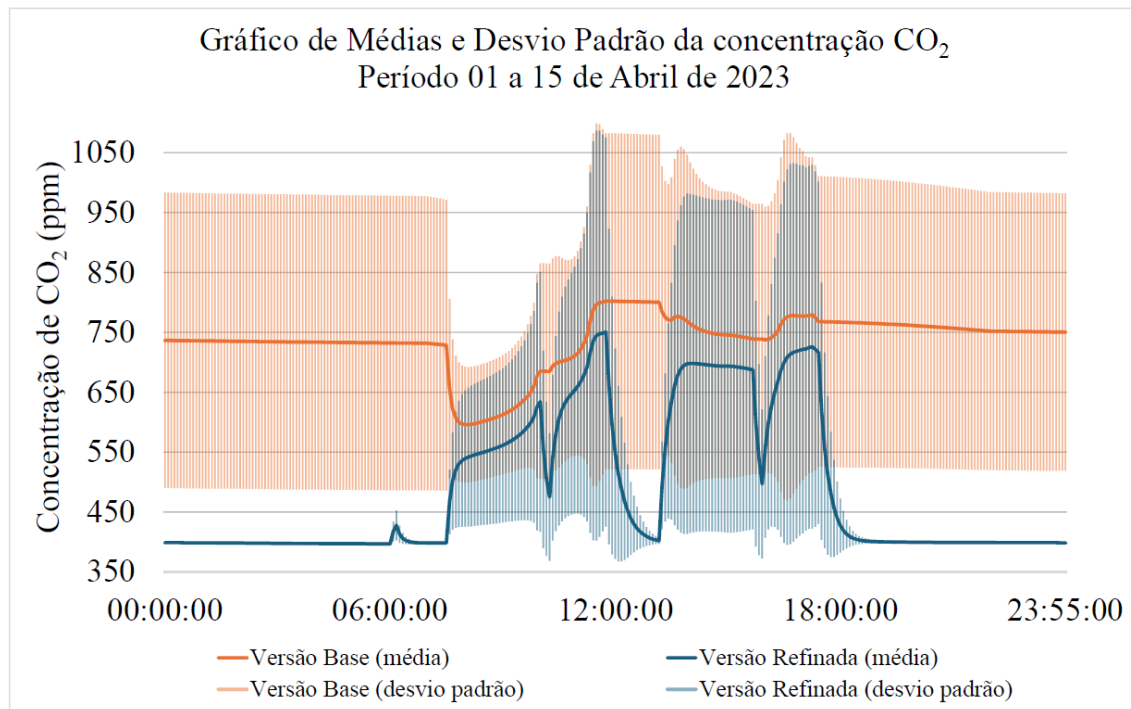
Os resultados simulados comparam duas estratégias de ventilação:

- Versão Base, com janelas abertas apenas durante os horários de aula, que foram modelados de acordo com a seguinte distribuição: 07:30–11:45, 13:10–17:25;
- Versão Refinada, com janelas abertas continuamente das 06:00 às 23:00, sendo abertas pelo pessoal da limpeza no início da manhã e fechadas pelo vigia ao final do expediente.



**Figura 1: Gráfico da Concentração de CO<sub>2</sub> - Versão Base X Versão Refinada**

Fonte: acervo do autor



**Figura 2: Gráfico Média e Desvio Padrão de CO<sub>2</sub> - Comparativo**

Fonte: acervo do autor

A Figura 1 apresenta a variação média da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do dia. Na Versão Base, observam-se valores persistentemente elevados mesmo durante os intervalos, evidenciando ventilação ineficaz. Já na Versão Refinada, o padrão oscilatório mais eficiente indica que a ampliação do tempo de abertura das janelas favorece a dissipação do CO<sub>2</sub>.

A Figura 2 mostra as médias e desvios padrão horários da concentração de CO<sub>2</sub>. Na Versão Base, observa-se acúmulo noturno e alta variabilidade; na Refinada, estabilidade e renovação de ar contínua. A repetição do padrão confirma a eficácia das medidas adotadas.

As simulações demonstram que a ventilação natural, bem gerida, é capaz de manter os níveis de CO<sub>2</sub> dentro de limites aceitáveis. Estratégias simples, como antecipar a abertura das janelas e incluir a rotina de limpeza, mostraram impactos significativos na qualidade do ar interior.





#### 4. Considerações finais

A análise comparativa entre as duas estratégias de ventilação simuladas demonstrou que a simples ampliação dos horários de abertura das janelas, reduziu significativamente a concentração média de CO<sub>2</sub> e estabilizou sua variação horária. A Versão Refinada apresentou menores picos, menor variabilidade e maior eficiência na renovação de ar.

Essas intervenções, de natureza operacional e sem custos estruturais, mostraram-se eficazes para mitigar o acúmulo de contaminantes e melhorar a qualidade do ambiente escolar. A modelagem no CONTAM comprovou seu potencial como ferramenta para diagnóstico e tomada de decisão arquitetônica e gerencial, reforçando sua aplicabilidade em contextos escolares reais.

#### Referências

ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021. Chapter 16: Ventilation and Infiltration.

FURST, L. et al. Comprehensive analysis of particulate matter, gaseous pollutants, and microbiological contamination in an international chain supermarket. *Environmental Pollution*, v. 363, 125236, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125236>.

GNECCO, V. et al. Comparison between national and local benchmarking models: The case of public nursery schools in Southern Brazil. *Sustainable Cities and Society*, v. 78, 103639, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103639>.

NG, L. C. et al. IAQ and energy impacts of ventilation strategies and building envelope airtightness in a big box retail building. *Building and Environment*, v. 92, p. 627-639, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.038>.

PERSILY, A.; IVY, M. *NIST Technical Note 1887r1 – CONTAM User Guide and Program Documentation*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2023.

STABILE, L. et al. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of The Total Environment*, v. 595, p. 894-902, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.048>.