

ARTIGO

Avaliação da qualidade do ar interno de residências brasileiras com sistemas de ventilação inteligente

Marcos Batistella Lopes^{1,2*}

Denner Ribeiro Machado²

Daniela Mortari²

Nathan Mendes^{1,2}

¹ Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis (PPGCIS), R. Imaculada Conceição, 1155, 80215-901, Curitiba, Paraná, Brasil

² Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), R. Imaculada Conceição, 1155, 80215-901, Curitiba, Paraná, Brasil

*Autor correspondente: marcos.blopes@pucpr.br

RESUMO

Este estudo investiga a avaliação da qualidade do ar interno de residências com sistemas de ventilação inteligente a partir de indicadores de desempenho propostos pelo Annex 86 da Agência Internacional de Energia (IEA). O estudo de caso definido é uma residência brasileira de interesse social que foi submetida a um sistema de ventilação de referência (MEV-cav) e outro inteligente (MEV-rb). Foram conduzidas simulações da edificação para avaliar indicadores de desempenho das concentrações de CO₂, PM_{2.5} e HCHO, através do DALYs, do indicador de umidade, do percentil 95 e de indicadores de exposição do ocupante acumulada e aguda. Além disso, foram analisadas séries temporais e diagramas de caixa para a ocupação e as zonas críticas. O sistema MEV-rb reduziu as concentrações de CO₂ tanto na exposição do ocupante assim como no ambiente crítico, sendo que o percentil 95 foi reduzido em cerca de 40 % em relação ao MEV-cav, enquanto a exposição acumulada do ocupante foi reduzida em aproximadamente 60 %. Apesar desta melhoria, valores medianos da concentração de CO₂ ficaram acima de 1000 ppm. Ambos os sistemas de ventilação apresentaram concentrações *médias* diárias de PM_{2.5} e HCHO na ordem de, respectivamente, 7 µgm⁻³ e 25 µgm⁻³, ou seja, dentro dos limites aceitáveis destes contaminantes.

Palavras-chave: ventilação inteligente, QAI, modelagem, CO₂, PM_{2.5}, formaldeído.

ABSTRACT

This study assesses the indoor air quality in homes with smart ventilation systems using performance indicators proposed by Annex 86 of the International Energy Agency (IEA). The case study selected was a Brazilian social-housing with a reference ventilation system (MEV-cav) and a smart one (MEV-rb). Simulations of the building were carried out to assess performance indicators of CO₂, PM_{2.5} and HCHO concentrations through DALYs, humidity indicator, 95th percentile, and indicators of accumulated and acute occupant exposure. Additionally, time series and boxplots for occupancy and critical zones were analyzed. The MEV-rb system reduced CO₂ concentrations both in occupant exposure and in critical zones, with the 95th percentile reduced by about 40 % compared to MEV-cav, while the accumulated occupant exposure was reduced by approximately 60 %. Despite improvements, median CO₂ concentration levels remained above 1000 ppm. Both ventilation systems showed daily average concentrations of PM_{2.5} and HCHO at around 7 µgm⁻³ and 25 µgm⁻³, respectively, which are within acceptable limits for these contaminants.

Keywords: smart ventilation, IAQ, modelling, CO₂, PM_{2.5}, formaldehyde.

INTRODUÇÃO

Ventilação inteligente pode ser definida como um processo no qual a vazão do ar de um sistema de ventilação de uma edificação é continuamente ajustada no tempo e/ou espaço para proporcionar desejável Qualidade do Ar Interno (QAI) minimizando o consumo energético e outros parâmetros tais como conforto térmico, ruído e serviços (Durier *et al.*, 2018). Os ajustes de um sistema de ventilação inteligente respondem a parâmetros definidos pelo projetista e captados por sensores, diretamente ou indiretamente, no ambiente interno e/ou externo como temperatura, umidade, concentração de contaminantes, ocupação, operação e consumo de energia elétrica.

A ventilação controlada por demanda é um dos exemplos de ventilação inteligente em edificações amplamente difundido desde a década de 1980 que pode ser melhorada usando sensores e ferramentas de simulação (Justo Alonso *et al.*, 2023). Neste cerne, o uso das estratégias de controle de contaminantes não ligados à ocupação se mostram mais viáveis, principalmente com a introdução no mercado de sensores de baixo custo. Aplicar redes de IoT para controlar sistemas de AVAC-R podem reduzir em até 70 % o consumo energético (García-Monge *et al.*, 2023) e aprendizado de máquina pode auxiliar no controle da direção do escoamento de ar (Sharma *et al.*, 2023). O controle automatizado da abertura/fechamento de janelas também pode ajudar na ventilação inteligente (Grygierek *et al.*, 2023).

Definir as variáveis que serão monitoradas

e quais parâmetros serão usados para controlar a ventilação inteligente é crucial para a operação eficiente do sistema. Uma nova métrica que ganha força como indicador de desempenho de sistemas de ventilação inteligente são os *Disability-Adjusted Life Years* (DALYs) que indicam o número de anos perdidos devido a concentração elevada de poluentes no ar (Belias e Licina, 2024; De Jonge *et al.*, 2023). Outro fator de interesse e de difícil controle é o uso da ventilação para atenuar o risco de crescimento de mofo (Morishita, 2020).

Segundo Guyot (2023) ainda há poucos estudos sobre ventilação inteligente em edificações. Neste contexto, em 2020 foi proposto o *Annex 86* para o programa IEA-EBC da Agência Internacional de Energia (<https://annex86.iea-ebc.org/>, acessado em 05/05/2024) intitulado *Energy Efficient Indoor Air Quality Management in Residential Buildings*. Dentre as subtarefas do *Annex 86* encontra-se a *ST4* focando em indicadores de desempenho de sistemas de ventilação inteligente em residências. Uma das atividades desenvolvidas na *ST4* é um *Common Exercise* no qual os participantes de diferentes países propõem estudos de caso e ferramentas de simulação para resolvê-los calculando os mesmos indicadores de desempenho.

O principal objetivo desta pesquisa é apresentar o estudo de caso dos participantes brasileiros do *Annex 86 ST4* focando nos resultados dos indicadores de desempenho da QAI: DALYs, indicador de umidade, percentil 95 e indicadores de exposição do ocupante acumulada e aguda.

MÉTODOS

Contam é um *software* desenvolvido e disponibilizado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) que aplica o modelo multizonal assumindo a hipótese de mistura homogênea do ar. A equação do balanço de massa do contaminante α na zona i pode ser representada como (Dols e Polidoro, 2020):

$$\frac{dm_{\text{cont},i}^{\alpha}}{dt} = \sum_j (\dot{m}_{\text{ar},j \rightarrow i} C_j^{\alpha} - \dot{m}_{\text{ar},i \rightarrow j} C_i^{\alpha}) + S_i^{\alpha} \quad (1)$$

onde $m_{\text{cont},i}^{\alpha}$ é a massa do contaminante [kg], t é o tempo [s], $\dot{m}_{\text{ar},j \rightarrow i}$ é o fluxo mássico de ar da zona j para a zona i [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$], C é a concentração do contaminante [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] e S é um termo fonte do poluente [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$].

Para resolver a Equação (1), o Contam emprega o modelo de volume de controle com método implícito padrão, resultando em equações discretizadas que são resolvidas com algoritmos iterativo

do gradiente biconjugado (BCG) e de relaxações sucessivas (SOR) conforme descrito por Dols e Polidoro (2020).

Nesta pesquisa, Contam foi aplicado na casa de interesse social proposta por Morishita (2020), com área de 67 m^2 e altura de $2,7 \text{ m}$, como representado na Figura 1 na qual as siglas LV, KIT, BR e BD representam, respectivamente, sala, cozinha, banheiro e quarto.

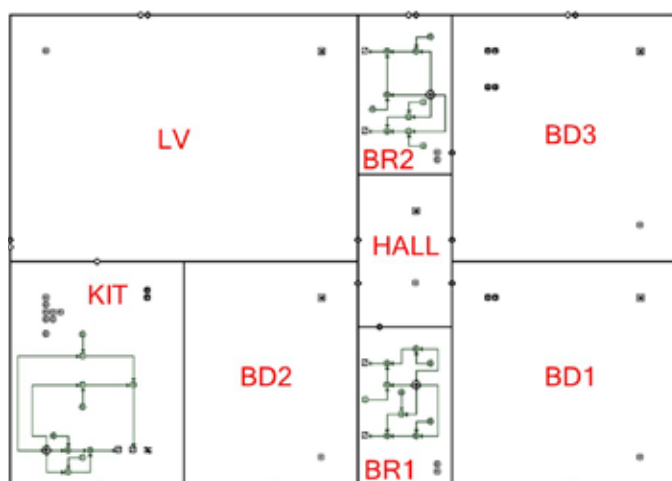


Figura 1. Modelo Contam MEV-rb e zonas.

Dois sistemas de ventilação foram propostos: um sistema de exaustão com vazão constante (MEV-cav), estudo de caso de referência, e um sistema de exaustão com controle da concentração de CO₂ e umidade no ambiente interno (MEV-rb), estudo de caso correspondente a ventilação inteligente. No MEV-cav a troca de ar na cozinha e nos banheiros é 5 h⁻¹ e 1 h⁻¹, respectivamente, acionado constantemente. Já no MEV-rb o sistema de exaustão mantém as vazões do MEV-cav quando a concentração de CO₂ é inferior a 500 ppm ou umidade relativa inferior a 30 %, e é proporcionalmente aumentada até a concentração de CO₂ de 900 ppm ou a umidade relativa de 80 %, neste nível superior o sistema de ventilação mantém vazões de 10 h⁻¹ e 5 h⁻¹ na cozinha e nos banheiros, respectivamente.

apresentado na Tabela 1. Cada ocupante emite 18 L·h⁻¹ e 15 L·h⁻¹ de CO₂ e gera vapor de água de 55 g·h⁻¹ e 40 g·h⁻¹ quando acordado e dormindo, respectivamente. Estes e outros cenários de emissões que serão informados a seguir foram retirados de Poirier *et al.* (2021), caso contrário a devida referência será informada.

Na residência da Figura 1 há quatro ocupantes que seguem o cronograma

Tabela 1. Cronograma diário de ocupação da residência

Zona	Ocupante 1 (adulto 1)	Ocupante 2 (adulto 2)	Ocupante 3 (criança 1)	Ocupante 4 (criança 2)
LV	08h00-10h00	19h00-22h00	08h00-11h00 19h30-21h00	08h00-11h00
	14h00-17h00			19h00-19h30
	19h00-22h00			20h00-21h00
BR2	07h00-08h00	06h00-07h00	-	-
BD3	22h00-06h00	22h00-06h00	-	-
Hall	12h00-14h00	-	-	-
KIT	06h00-07h00	07h00-08h00 18h00-19h00	07h00-08h00	07h00-08h00
	10h00-12h00		11h00-12h00	
	17h00-19h00		18h00-19h00	
BD2	-	-	21h00-07h00	-
BD1	-	-	-	21h00-07h00
BR1	-	-	19h00-19h30	19h30-20h00

Cronogramas específicos de preparação de refeições na cozinha e banho foram definidos. Em relação ao vapor de água, foi assumido que o café da manhã é preparado durante 15 min gerando $1.512 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, o almoço gera $2.268 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ por 30 min e o jantar gera $2844 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ por 40 min. Cada ocupante toma banho por 10 min gerando $1.440 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ de vapor de água. Visto que a maioria das residências brasileiras utilizam combustão do gás liquefeito de petróleo (GLP) para preparar alimentos, é assumido a emissão de $1,3 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ de CO_2 (Oke *et al.*, 2020) em cada preparo, assim como uma taxa emissão de $2,55 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ de $\text{PM}_{2,5}$. Por fim, ainda é assumido uma emissão de um composto orgânico volátil (COV), o formaldeído (HCHO), de $12 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ em todas as zonas.

O arquivo climático utilizado na simulação é um TMY (2001-2010) com dados do INMET para Curitiba no período de 20 de julho a 20 de agosto, usando um passo de tempo de 1 min. A concentração de contaminantes externos foi assumido constante com 400 ppm de CO_2 , $2,6 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de HCHO e $7,3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de $\text{PM}_{2,5}$ (Gidhagen *et al.*, 2021). As portas são assumidas como fechadas e as janelas permanecem abertas entre 7 h e 17 h. A infiltração do ar é assumida como $1,8 \text{ h}^{-1}$ a 4 Pa (Rodrigues *et al.*, 2020) distribuído na fachada da casa proporcionalmente à área das superfícies externas. Por fim, o coeficiente de pressão é assumido como uma casa isolada com 0,5 na fachada do barlavento e -0,7 no sotavento (EN 16798-7, 2017).

Para comparar os sistemas de ventilação MEV-cav e MEV-rb foram usados alguns indicadores de desempenho propostos no

Annex 86 ST4 do programa IEA-EBC. Os DALYs foram calculados do seguinte modo (De Jonge e Laverge, 2022):

$$\text{DALYs} = \sum_{i=0}^{i=n} \text{EF}_i \times V_{\text{br}} \times \int_{t_0}^t C_i(t) dt \quad (2)$$

onde i corresponde ao poluente (neste estudo foram considerados somente o $\text{PM}_{2,5}$ e o HCHO), EF é uma constante que depende do contaminante ($118,6 \text{ DALY}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o $\text{PM}_{2,5}$ e $18,0 \text{ DALY}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o HCHO), V_{br} é a taxa de respiração ($16 \text{ m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$) e C é a exposição do ocupante ao contaminante ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

O indicador de umidade utilizado define a porcentagem do tempo que o pior cômodo permanece fora da faixa entre 25 % e 60 %:

$$E_{\text{RH}} = \frac{100}{d} \sum_{t=0}^{t=d} \Delta t \begin{cases} \text{se } \phi(t) > 60\% \\ \text{se } \phi(t) < 25\% \end{cases} \quad (3)$$

onde d é o período simulado (768 h), Δt é o passo de tempo da simulação (60 s) e ϕ é a umidade relativa (-).

Para comparar os efeitos da ventilação nas concentrações de CO_2 , HCHO e $\text{PM}_{2,5}$ foram utilizados a exposição acumulada (E_{poluente}) e aguda ($E_{\text{poluente, agudo}}$) do ocupante que está a mais tempo exposto:

$$E_{\text{poluente}} = \sum_{t=0}^{t=d} C_{\text{poluente}} \Delta t \quad (4)$$

$$E_{\text{poluente, agudo}} = \max \left(\sum_{t=0}^{t=1h} C_{\text{poluente}} \Delta t \right) \quad (5)$$

Para o CO_2 , o indicador de exposição acumulada é normalizado com o período total e só é considerado se a concentração é superior a 1000 ppm na zona ($C_{\text{CO}_2}^* = C_{\text{CO}_2} - 1000$). Além destes indicadores de exposição, para o CO_2 considera-se o cálculo do percentil 95 (P_{CO_2}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A exposição crítica neste estudo deve ser do ocupante 1 que permanece na casa em tempo integral e em diferentes zonas dependendo do contaminante a ser analisado bem como das emissões e renovação de ar de cada zona. Na Tabela 2 estão os valores calculados para todos os indicadores de desempenho comparando o sistema de ventilação de referência (MEV-cav) e inteligente (MEV-rb). No geral, nota-se ganhos obtidos pelo sistema MEV-rb, sobretudo pelo controle da concentração de CO_2 na cozinha (zona KIT) que indica que a renovação do ar é mais efetiva neste ambiente quando se aplica um sistema de ventilação inteligente.

Tabela 2. Indicadores de desempenho

Indicador	MEV-cav	MEV-rb
E_{CO_2} [ppm]	185	72
P_{CO_2} [ppm]	4018	2357
E_{RH} [%]	99,41	99,44
E_{HCHO} [$\mu\text{g}\cdot\text{dia}\cdot\text{m}^{-3}$]	233	231
$E_{\text{HCHO, agudo}}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{dia}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,01	1,04
$E_{\text{PM}_{2.5}}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{dia}\cdot\text{m}^{-3}$]	163	162
$E_{\text{PM}_{2.5, agudo}}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{dia}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,24	0,22
$\text{DALYS}\times 10^5$ [ano]	37,14	36,90

Em relação a umidade relativa, dado que o clima de Curitiba é frio e úmido durante o inverno, é normal que a maior parte do tempo o indicador de umidade esteja acima de 60 %, evidenciando que este indicador precisa ser melhorado para a realidade desta cidade. Já os indicadores da exposição acumulada e aguda tanto do HCHO como do $\text{PM}_{2.5}$ não apresentaram grandes variações entre os dois sistemas de ventilação, reforçando que para estes contaminantes seria necessário controle das fontes de emissão e/ou sistemas de filtragem para melhorias efetivas. Também não houve variação em relação aos DALYs, no entanto é importante notar que, face ao cenário considerado, para cada 100 mil pessoas devem ser perdidos cerca de 37 anos de vida saudável anualmente devido aos impactos na saúde causados pela exposição ao HCHO e $\text{PM}_{2.5}$, o que significa queda considerável na qualidade de vida assim como impactos na economia.

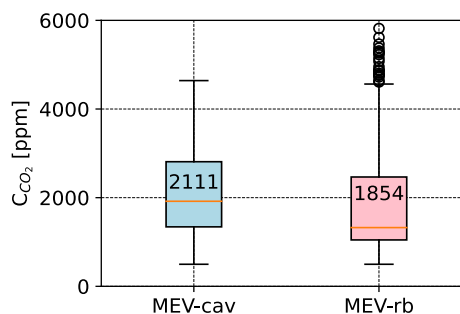
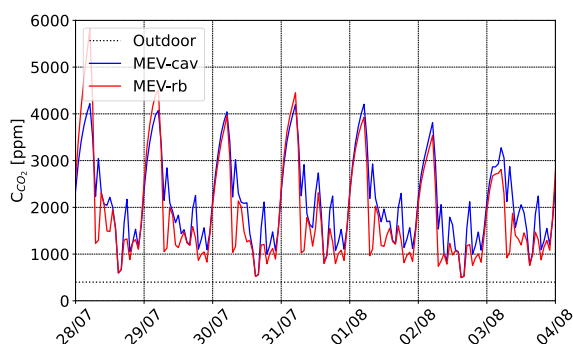
A fim de detalhar melhor os indicadores de desempenho da Tabela 2, a seguir serão apresentadas séries temporais dos contaminantes num intervalo de uma semana do período mensal simulado e diagramas de caixa para todo o período simulado, tanto para o ocupante que permanece todo o momento na residência como para as zonas mais críticas.

A exposição do ocupante 1 às concentrações de CO_2 é apresentado na Figura 2a. É possível observar que os níveis de concentração ultrapassam o limite estabelecido de 1.000 ppm, sobretudo quando o ocupante 1 permanece com o ocupante 2 no quarto (zona BD3) das 22 h às 6 h (Tabela 1). É possível observar um

ganho oferecido pela ventilação inteligente (MEV-rb) que mantém uma mediana de aproximadamente 700 ppm, enquanto o sistema de ventilação de referência (MEV-cav) atinge uma mediana de 2.000 ppm. Em contrapartida, a Figura 2b apresenta a concentração de CO₂ no quarto (zona BD3) indicando ligeira melhora do sistema MEV-rb mantendo um valor mediano de cerca de 1.400 ppm face ao valor de 1.600

ppm do sistema MEV-cav. Estes níveis de concentração são atingidos porque as janelas são consideradas fechadas das 17 h às 7 h e o sistema de ventilação considerado atua somente na cozinha (zona KIT) e nos banheiros (zonas BR1 e BR2), indicando que seria necessário testar outros sistemas de ventilação para melhorar a renovação de ar neste ambiente interno.

(a) Ocupante 1



(b) Quarto (zona BD3)

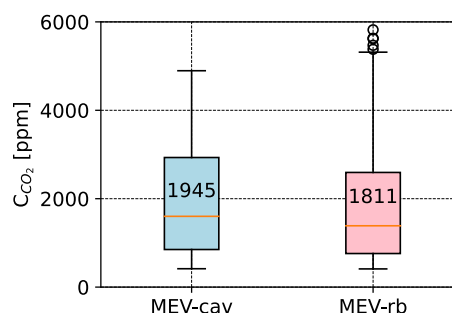
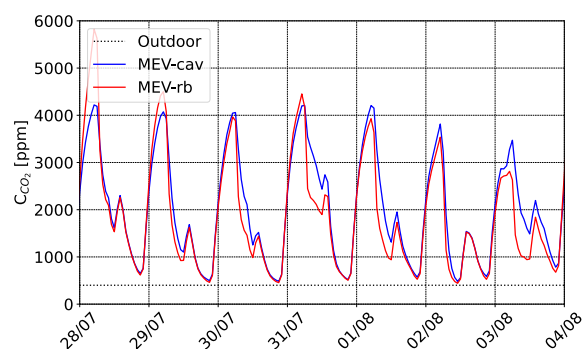


Figura 2. Exposição ao CO₂ (a) do ocupante 1 e (b) no quarto (zona BD3).

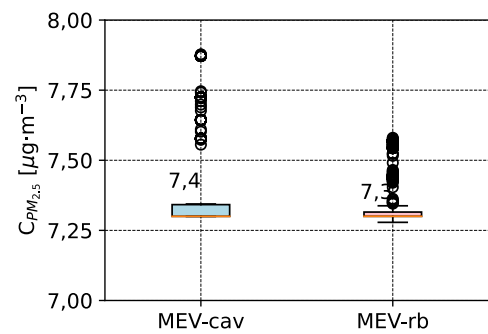
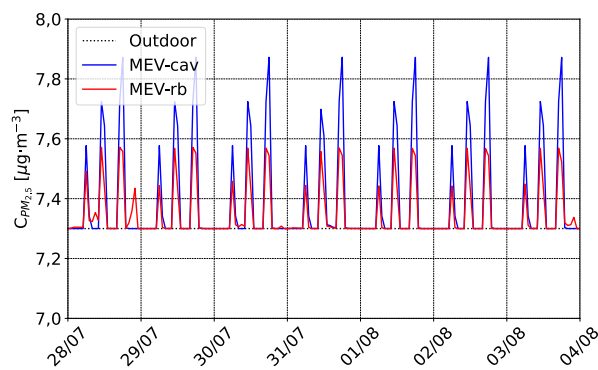
Analogamente às exposições ao CO₂, é apresentado na Figura 3a a exposição do ocupante 1 às concentrações de PM_{2.5}. Há somente emissão de PM_{2.5} durante a preparação de alimentos na cozinha (zona KIT), portanto esta é a zona crítica para analisar as concentrações deste

contaminante, conforme pode ser visto na Figura 3b. Não foram observadas grandes variações entre os sistemas de ventilação MEV-cav e MEV-rb, sendo mantido um valor médio de cerca de 7,3 µgm⁻³. Na ausência de um valor de referência para a concentração de PM_{2.5} em residências, pode-se considerar

o limite de $9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2024). Portanto, ambos sistemas de ventilação satisfazem as concentrações de $\text{PM}_{2.5}$ nestas condições. No entanto, reforça-se que outras atividades domésticas,

como limpeza, não foram consideradas e podem afetar muito a concentração do $\text{PM}_{2.5}$ no ambiente interno assim como a consequente exposição do ocupante a este poluente.

(a) Ocupante 1



(b) Cozinha (zona KIT)

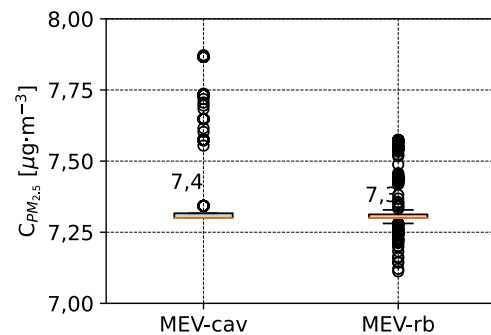
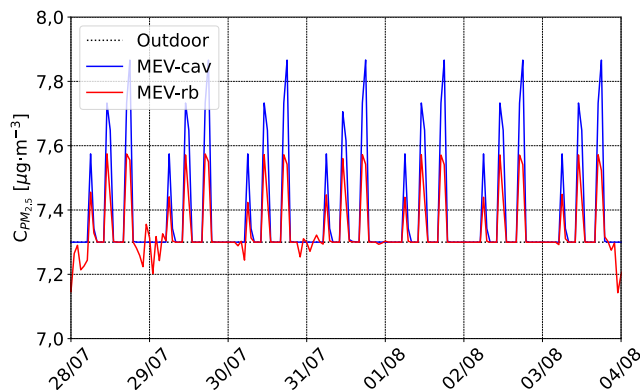
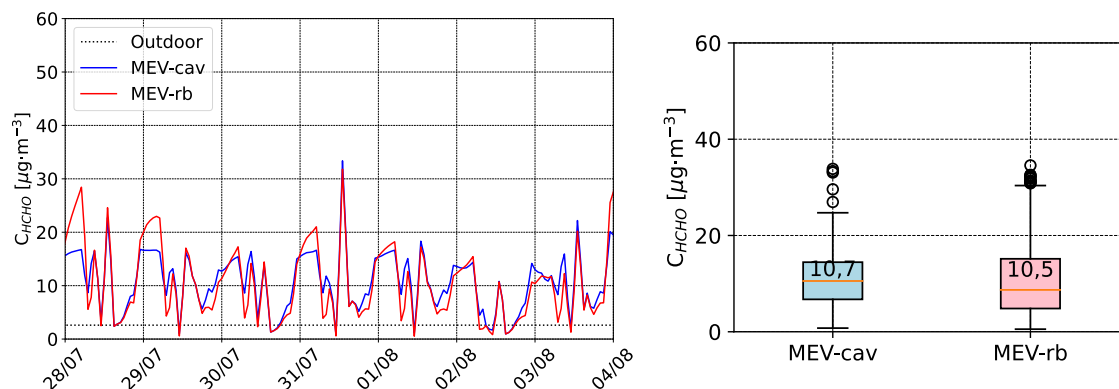


Figura 3. Exposição ao $\text{PM}_{2.5}$ (a) do ocupante 1 e (b) na cozinha (zona KIT).

Por fim, as Figuras 4a e 4b apresentam concentrações de HCHO para a exposição do ocupante 1 e no quarto (zona BD2), respectivamente. O sistema MEV-rb reduz em cerca de 15 % o valor médio da concentração de HCHO neste quarto. Por outro lado, a exposição do ocupante 1 a este contaminante permanece aproximadamente a mesma independente do sistema de ventilação. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece um

limite de $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de concentração média de HCHO por 30 min (WHO, 2010). Portanto, nestas condições, é possível afirmar que não há riscos para os ocupantes. Ainda assim, é preciso considerar que pode aparecer novas fontes como limpeza, novos mobiliários e reformas da casa que não foram incluídas nas condições de contorno deste estudo de caso e que podem piorar estas concentrações.

(a) Ocupante 1



(b) Quarto (zona BD2)

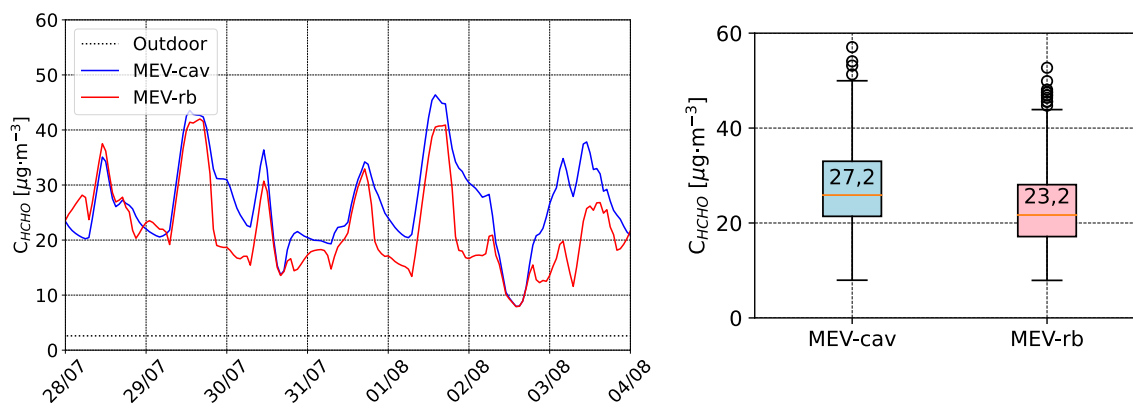


Figura 4. Exposição ao HCHO (a) do ocupante 1 e (b) no quarto (zona BD2).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado um estudo de caso de uma residência de interesse social comparando um sistema de ventilação de referência (MEV-cav) com um sistema inteligente (MEV-rb) formulado pela equipe brasileira que participa do *Annex 86* da Agência Internacional de Energia. Um dos objetivos do *Annex 86* é analisar um grupo de indicadores de desempenho de sistemas de ventilação inteligente em edifícios residenciais. Os indicadores da QAI analisados neste estudo para as concentrações de CO_2 , $\text{PM}_{2,5}$ e HCHO, foram: DALYs, indicador de umidade, percentil 95 e indicadores de exposição do ocupante acumulada e aguda. Além destes

indicadores, foram analisadas séries temporais e diagramas de caixa para a ocupação e as zonas críticas, ou sejam, nas maiores concentrações observadas.

O sistema de ventilação inteligente MEV-rb reduziu as concentrações de CO_2 tanto na exposição do ocupante assim como no ambiente crítico (zona BD3). O percentil 95 foi reduzido em cerca de 40 % em relação ao sistema de ventilação de referência MEV-cav, enquanto a exposição acumulada do ocupante crítico foi reduzida em aproximadamente 60 %. No entanto, valores medianos da concentração de CO_2 ficaram acima de 1.000 ppm, indicando a necessidade de testar outras estratégias de ventilação para aumentar a renovação do ar.

Não houve grandes variações em relação as concentrações de $PM_{2.5}$ e HCHO entre os sistemas de ventilação MEV-cav e MEV-rb nas situações críticas analisadas. A concentração média de $PM_{2.5}$ em ambos os sistemas de ventilação foi de cerca de $7 \mu\text{gm}^{-3}$, inferior a recomendação da EPA (2024) de $9 \mu\text{gm}^{-3}$. Já a concentração média de HCHO em ambos os sistemas de ventilação foi de aproximadamente $25 \mu\text{gm}^{-3}$, abaixo da recomendação da OMS de $100 \mu\text{gm}^{-3}$. Portanto, outras estratégias complementares a ventilação inteligente devem ser empregadas para melhorar estes níveis de concentração quando necessário como controle das fontes e filtragem.

Perspectivas futuras visam incluir simulações acopladas com análise energética do *software* Domus (Mazuroski *et al.*, 2022) para análise efetiva de sistemas de ventilação inteligente. Além disso, pode-se refinar as condições iniciais e de contorno incluindo outras fontes de emissão e melhorando a modelagem, assim como estender o período simulado para um ano e analisar a resiliência climática da edificação. Por fim, o indicador de umidade deve ser reformulado para ser adaptado a realidade das regiões bioclimáticas do Brasil.

AGRADECIMENTO/FINANCIAMENTO

Os autores gostariam de agradecer à PUCPR, à CAPES (CAPES-COFECUB nº898/18), à Fundação Araucária (CP 19/2022) e ao CNPq pelo financiamento deste projeto.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesse e são os únicos responsáveis pelo conteúdo apresentado neste artigo.

COLABORAÇÕES

Marcos Batistella Lopes (<https://orcid.org/0000-0002-9161-9049>): Concepção, Metodologia, Simulação, Análise, Escrita.

Denner Ribeiro Machado (<https://orcid.org/0000-0002-7298-4200>): Concepção, Análise, Revisão, Escrita.

Daniela Mortari (<https://orcid.org/0000-0002-6479-4255>): Concepção, Análise, Revisão, Escrita.

Nathan Mendes (<https://orcid.org/0000-0002-8862-9748>): Concepção, Supervisão, Revisão, Escrita.

REFERÊNCIAS

Belias, E.; Licina, D. (2024) European residential ventilation: Investigating the impact on health and energy demand. *Energy and Buildings*, 304, 113839. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113839 .

De Jonge, K.; Ghijssels, J.; Laverge, J. (2023) Energy savings and exposure to VOCs of different household sizes for three residential smart ventilation systems with heat recovery. *Energy and Buildings*, 290, 113091, DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113091 .

De Jonge, K.; Laverge, J. (2022) Time-resolved dynamic disability adjusted life-years estimation. *Indoor Air*, 32(11), e13149. DOI: 10.1111/ina.13149 .

- Dols, W. S.; Polidoro, B. J. (2020) CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4. NIST. 10.6028/NIST.TN.1887r1. Acessado em 6 de maio de 2024.
- Durier, F.; Carrié, R.; Sherman, M. (2018) What is smart ventilation? AIVC VIP 38. www.aivc.org/resource/vip-38-what-smart-ventilation. Acessado em 6 de maio de 2024.
- EN 16798-7 (2017) EN 16798-7 - Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 7: Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration. European Standard. www.en-standard.eu/bs-en-16798-7-2017. Acessado em 6 de maio de 2024.
- EPA (2024) Final Rule to Strengthen the National Air Quality Health Standard for Particulate Matter Fact Sheet. U.S. Environmental Protection Agency. www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-overview.pdf. Acessado em 6 de maio de 2024.
- García-Monge, M.; Zalba, B.; Casas, R.; Cano, E.; Guillén-Lambea, S.; López-Mesa, B.; Martínez, I. (2023) Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain. *Energy and Buildings*, 285, 112882, 2023, DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.112882.
- Gidhagen, L.; Krecl, P.; Targino, A.C.; Polezer, G.; Godoi, R.H.M. (2021) An integrated assessment of the impacts of PM_{2.5} and black carbon particles on the air quality of a large Brazilian city. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(9), 1455–1473, DOI: 10.1007/s11869-021-01033-7.
- Grygierek, K.; Nateghi, S.; Ferdyn-Grygierek, J.; Kaczmarczyk, J. (2023) Controlling and Limiting Infection Risk, Thermal Discomfort, and Low Indoor Air Quality in a Classroom through Natural Ventilation Controlled by Smart Windows. *Energies*, 16, 592, DOI: 10.3390/en16020592.
- Guyot, G. (2023) What we know about smart ventilation. Anais do 43rd AIVC - 11th TightVent - 9th venticool Conference, Copenhagen (Denmark). www.aivc.org/sites/default/files/003.pdf. Acesso em 6 de maio de 2024.
- Justo Alonso, M.; Liu, P.; Marman, S.F.; Jørgensen, R.B.; Mathisen, H.M. (2023) Holistic methodology to reduce energy use and improve indoor air quality for demand-controlled ventilation. *Energy and Buildings*, 279, 112692, DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112692.
- Mazuroski, W.; Berger, J.; Delinchant, B.; Wurtz, F.; Mendes, N. (2022) A technique to improve the design of near-zero energy buildings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44 (6), 228, DOI: 10.1007/s40430-022-03416-y.
- Morishita, C. (2020) On the assessment of potential moisture risks in residential buildings across Brazil. Tese de doutorado. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná. https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/00009a/00009a35.pdf. Acessado em 6 de maio de 2024.
- Oke, D.O.; Fakindele, B.S.; Sonibare, J.A.; Akeredolu, F.A. (2020) Evaluation of emission indices and air quality implications of liquefied petroleum gas burners. *Heliyon*, 6(8), e04755, DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04755.
- Poirier, B.; Guyot, G.; Woloszyn, M.; Geoffroy, H.; Ondarts, M.; Gonze, E. (2021) Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators. *Journal of Building Engineering*, 43, 103140, DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103140.
- Rodrigues, L.; Tubelo, R.; Vega Pasos, A.; Gonçalves, J.C.S.; Wood, C.; Gillott, M. (2020) Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort. *Building Research & Information*, 49(6), 639–660, DOI: 10.1080/09613218.2020.1825064.
- Sharma, D.; Yadav, S.; Goap, A.; Bansal, D. (2023) SmartVent: A Smart Ventilation Solution for Comfortable Indoor Environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(24), 22270–22278, DOI: 10.1080/09613218.2020.1825064.
- WHO (2010) WHO guidelines for indoor air

quality: selected pollutants. World Health Organization. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf?sequence=1> . Acessado em 6 de maio de 2024.