

OPERAÇÃO DE JANELAS E SEUS EFEITOS SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO E A VENTILAÇÃO NATURAL DE SALAS DE AULA DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES

Palavras-Chave: COMPORTAMENTO DO USUÁRIO, DESEMPENHO TÉRMICO, VENTILAÇÃO NATURAL, EDIFICAÇÕES ESCOLARES

Autores(as):

FRANCISCO ANDREAZZA COSTA URSINI, FECFAU – UNICAMP
M^a. PAULA BRUMER FRANCESCHINI KAGAN (co-orientadora), FECFAU – UNICAMP
Prof.^a. Dr.^a. LETICIA DE OLIVEIRA NEVES (orientadora), FECFAU – UNICAMP

1. INTRODUÇÃO:

O comportamento dos usuários afeta o desempenho energético e as condições internas das edificações através de interações com sistemas de iluminação, ventilação, aquecimento, condicionamento de ar, janelas e dispositivos de sombreamento (Sorgato; Melo; Lamberts, 2016). Os usuários reagem conscientemente ou inconscientemente a estímulos internos ou externos, buscando melhorar, restaurar ou manter as condições de conforto ambiental (Fabi et al., 2012).

Manter padrões mínimos de conforto e qualidade do ar interior (QAI) é particularmente importante em escolas, onde o dióxido de carbono constantemente produzido pelos alunos e docentes pode gerar cansaço, tontura e dores de cabeça quando em concentrações excessivas (Daisey; Angel; Wang, 2003), o que pode ser gerado por falta de renovação do ar interno (Dutton; Shao, 2006). Contudo, Wargocki e Wyon (2006) relatam que as condições de conforto ambiental das escolas são inadequadas e frequentemente piores do que em escritórios, o que se deve a fatores que evidenciam grande necessidade de melhoria na ventilação.

Um meio de melhorar o conforto ambiental de edifícios amplamente aceito é a abertura de janelas, que proporcionam ventilação e reduzem a temperatura do ar interno (Hax et al., 2006). Contudo, alguns autores apontam que ainda há falta de compreensão da relação entre a QAI e o comportamento de usuários quanto à abertura de janelas, pois este é influenciado por muitos fatores, que interagem entre si de forma complexa (Dutton; Shao, 2010; Fabi et al., 2012; Hax et al., 2006).

Essa complexidade resulta em variações consideravelmente grandes entre as taxas de troca de ar de ambientes internos, gerando diferenças no gasto energético, uma vez que as taxas de troca de ar têm grande impacto no consumo de energia (Fabi et al., 2012). Dessa forma, as estimativas de desempenho energético dos edifícios ainda são imprecisas, sendo necessário melhor compreender o comportamento do usuário para tornar essas previsões mais realistas (Dutton; Shao, 2010).

As simulações de desempenho de edifícios são uma alternativa altamente eficiente e de baixo custo para analisar e otimizar projetos de edifícios e proporcionar condições internas adequadas aos usuários, quando o edifício estiver em operação. Para que o desempenho previsto na simulação seja o mais próximo do desempenho real, é de fundamental importância melhorar a compreensão do comportamento dos usuários a fim de fornecer informações precisas para a avaliação de seu impacto no desempenho geral do edifício (Balvedi; Ghisi; Lamberts, 2018). Nesse contexto, esta pesquisa tem por objetivo compreender o comportamento dos usuários no que tange a operação de janelas, portas e ventiladores de salas de aula de edificações escolares de ensino fundamental e médio, de forma a dar subsídios para uma melhor avaliação de seu desempenho térmico e ventilação natural.

2. METODOLOGIA:

Esta é uma pesquisa experimental fundamentada em estudo de caso. O objeto de estudo é um conjunto de salas de aula de uma edificação escolar mantida pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE) do estado de São Paulo.

2.1. Monitoramento das salas de aula

A coleta de dados foi realizada em salas de aula de uma escola estadual administrada pela FDE. A escola (Tabela 1 e Figura 1) foi selecionada a partir de uma base de dados contendo 66 escolas construídas pela FDE desde 2008 no estado de São Paulo, desenvolvida em uma pesquisa correlata em andamento¹, e está localizada na cidade de Campinas, São Paulo.

Tabela 1 – Características da escola selecionada

Variável	E. E. Profa. Adriana Cardoso (Vila Esperança)
Ano de construção	2015
Área construída	3.201 m ²
Número de pavimentos	3
Número de salas de aula	10
Faixa etária dos alunos	Ensino Fundamental
Período de Ocupação	Manhã e tarde
Orientação solar das salas de aula	Norte (N)
Posição das salas de aula no edifício	Pavimentos intermediário e superior
Estratégia de ventilação natural	Ventilação cruzada

Figura 1 – Fachada da escola Prof^a Adriana Cardoso. Fonte: Google (2017).



As salas de aula possuem características padrões dos projetos escolares da FDE: área de 49 m², janelas basculantes de aço, porta de madeira e paredes de alvenaria de blocos de concreto. As salas de aula monitoradas foram definidas em conjunto com os responsáveis da escola, considerando o período de ocupação, a posição da sala de aula no edifício e a orientação solar, de forma a selecionar duas salas de aula com características semelhantes.

O monitoramento foi realizado nas salas de aula em duas rodadas de medições, com o objetivo de analisar o comportamento do usuário nas diferentes estações do ano. Na primeira rodada (de 23 de outubro a 20 de novembro), uma sala de aula foi monitorada. Na segunda rodada (de 5 de a 25 de junho), foram medidas simultaneamente duas salas de aula. As variáveis climáticas monitoradas incluíram: temperatura do ar, temperatura de globo, umidade relativa do ar e concentração de CO₂. Adicionalmente, foram monitoradas as operações manuais de janelas, portas e ventiladores. A ocupação durante o período monitorado foi obtida através do contato com a escola, que forneceu o número de alunos por turma, horários de intervalos e atividades externas às salas (como aulas de educação física). As variáveis climáticas externas (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e índice de precipitação) foram disponibilizadas pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) da UNICAMP.

2.2. Análise dos resultados

Os dados coletados foram organizados em uma planilha, relacionando a hora do dia com as variáveis climáticas, o status da porta, janelas e ventiladores e o número de ocupantes das salas de aula. A partir desses dados, foram gerados gráficos para analisar o comportamento dos usuários relacionado à operação dos equipamentos citados, em função das variáveis climáticas e da ocupação.

Para analisar as condições de conforto relativas à umidade relativa interna (UR) e à concentração de CO₂,

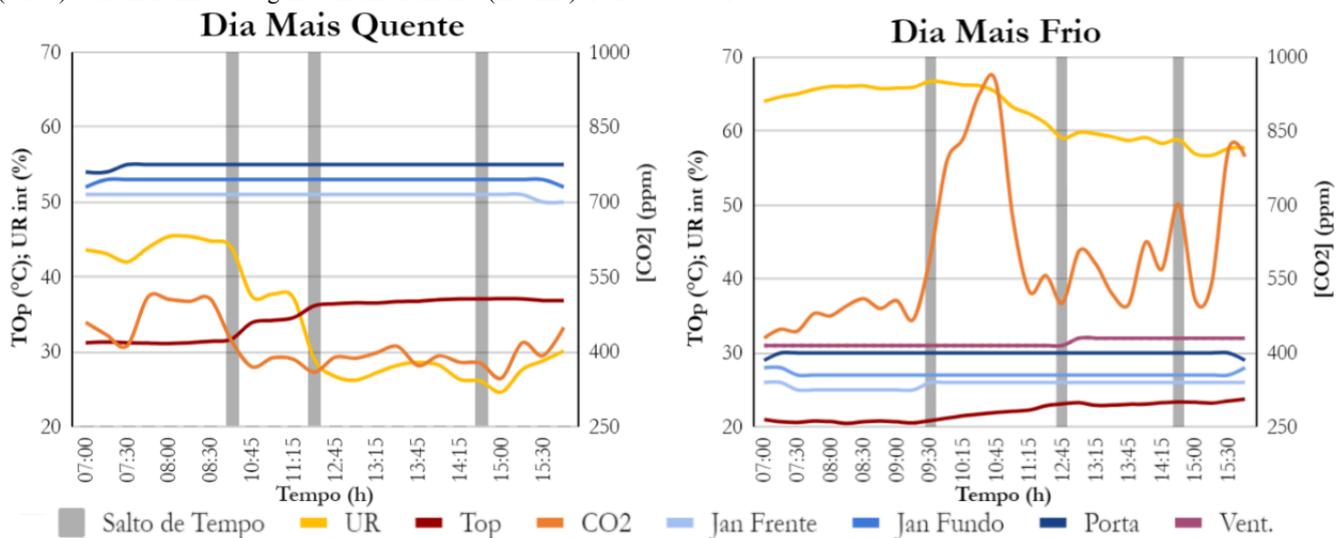
¹ Pesquisa de doutorado da aluna Paula Brumer Franceschini Kagan, doutoranda do programa de pós-graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade da FECFAU-UNICAMP, intitulada *Occupant behaviour modelling for building performance simulation of naturally ventilated school classrooms* (processo FAPESP 2019/13474-7), orientada pela prof^a. Dr^a. Leticia de Oliveira Neves.

foram utilizados os padrões da Anvisa (2003), em que a concentração de CO₂ não deve exceder 1000 ppm em nenhum momento e a UR deve permanecer entre 40 e 65% no verão e entre 35 e 65% no inverno. Para a análise relativa aos intervalos aceitáveis de temperatura operativa (Top) interna, utilizou-se o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2023). Para ambientes naturalmente ventilados, como é o caso da escola em questão, esse modelo conta com um método de avaliação de conforto térmico no qual o intervalo de temperatura operativa aceitável depende da média mensal de temperatura externa local (Text). Durante o período de monitoramento do verão, essa média (Text=25,3 °C) correspondeu a uma zona de conforto de Top=22 a 29°C. No monitoramento de inverno, esse intervalo foi de Top=21 a 28°C (Text=23,2 °C). Esses limites de conforto correspondem a uma aceitabilidade de 80% dos ocupantes, conforme exigido na norma.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados apresentados neste documento referem-se às duas rodadas de monitoramento nas salas de aula da E.E. Profª Adriana Cardoso. A Figura 2 compara os dados climáticos internos (Top, UR e concentração de CO₂) e as operações de janelas, porta e ventilador medidos em cada período. As operações são representadas por linhas (azul claro, azul escuro e roxo), nas quais a região mais alta da linha representa o estado aberto/ligado e a região mais baixa, fechado/desligado (exemplo: no dia mais frio, a janela da frente ficou fechada entre 7:30 e 9:15, enquanto no dia mais quente, foi mantida aberta desde o início da manhã até às 15:15). O sensor responsável por detectar o funcionamento do ventilador não operou no dia mais quente do primeiro monitoramento e, por isso, o estado do ventilador não está representado neste gráfico. As colunas de “salto de tempo” indicam períodos de intervalo das aulas, não incluídos nos gráficos devido à desocupação da sala.

Figura 2 – Gráficos de comparação entre dados medidos na E.E. Profª Adriana Cardoso no dia mais quente do primeiro monitoramento (verão) e dia mais frio do segundo monitoramento (inverno). Fonte: os autores.



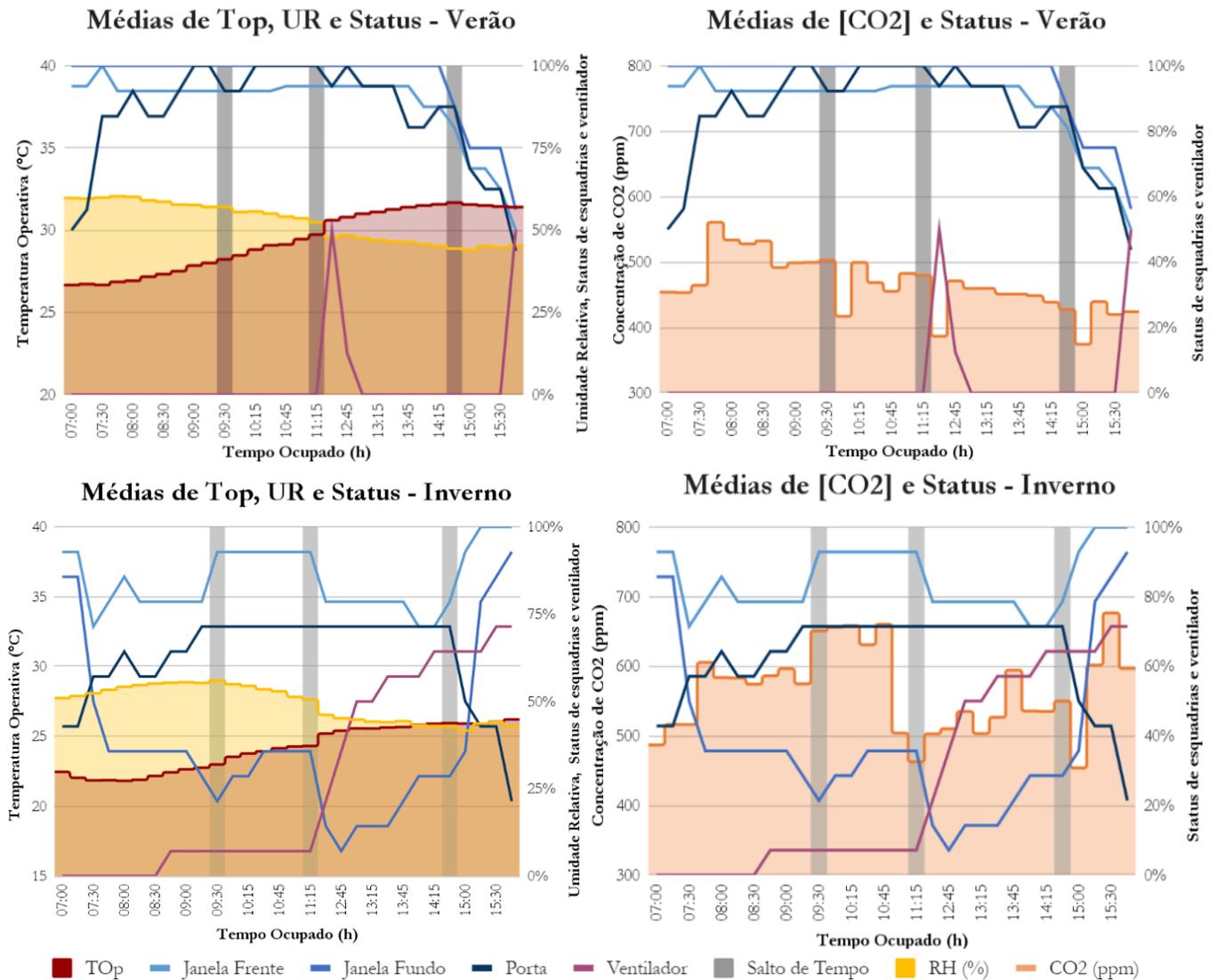
No dia mais quente, as esquadrias (portas e janelas) permaneceram abertas durante todo o dia, enquanto no dia mais frio, a janela do fundo permaneceu fechada e a janela da frente só foi aberta a partir das 9:30 h. A limitação nas trocas de ar nesse dia é perceptível pelo grande aumento da concentração de CO₂, que chegou a um pico de quase 1000 ppm, mesmo com uma das janelas abertas. A queda observada após o período de almoço pode ser atribuída ao funcionamento do ventilador, proporcionando ventilação forçada, contudo, ainda assim os picos próximos de 700 ppm e 850 ppm no final do dia são muito altos se comparados aos valores correspondentes no dia mais quente de verão, evidenciando a importância da abertura da janela do fundo.

Quanto às demais variáveis, no dia mais quente foram registrados valores de UR abaixo dos valores recomendados pela ANVISA (2003) na maior parte do dia. Da mesma forma, a Top esteve acima do valor máximo da zona de conforto definida pelo modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2023) durante todo o dia, mesmo com as janelas e a porta abertas. Já no inverno, a sala de aula apresentou condições de temperatura e umidade dentro dos limites recomendados em 90,5% do período ocupado, contra apenas 34,2% no verão.

A Figura 3 traz gráficos com as médias das variáveis climáticas internas e dos status das esquadrias e do ventilador ao longo dos monitoramentos, permitindo analisá-los como um todo. Nesse caso, são mostrados os

percentuais de tempo em que as esquadrias ficaram abertas e o ventilador ficou ligado em cada horário ocupado ao longo dos dias monitorados.

Figura 3 – Gráficos de médias por horário de dados climáticos internos e status de janelas, porta e ventilador dos períodos monitorados da E.E. Profª Adriana Cardoso. Fonte: os autores.



No primeiro monitoramento (verão), não é possível identificar com clareza alguma relação entre os dados climáticos e as operações de porta e janelas, uma vez que permanecem abertas ao longo de quase todo o período. Especula-se que seu maior fechamento a partir das 13:30 se deve à precipitação, uma vez que os registros de chuva antes desse horário foram nulos. Já no monitoramento do inverno, houve maior fechamento das janelas e porta, gerando maiores concentrações de CO₂, conforme observado na Figura 3. Contudo, neste último caso, os limites não excederam 700 ppm, mostrando que concentrações fora do limite estabelecido pela Anvisa (2003) ocorreram apenas pontualmente em alguns dias. As médias UR também permanecem dentro dos limites aceitáveis em todo o período. Já as médias de Top excederam o limite da zona de conforto nas tardes de verão.

Observando a Tabela 2, identifica-se que houve momentos em que a UR ultrapassou muito os limites máximo e mínimo recomendados no verão, além da Top ter ultrapassado o limite máximo da zona de conforto em aproximadamente 8°C. No inverno, essas condições foram aceitáveis, pouco ultrapassando o limite inferior, porém a concentração de CO₂ chegou a 1350 ppm, muito acima do limite de 1000 ppm.

Tabela 2 – Resumo estatístico dos dados climáticos monitorados. Fonte: os autores.

Variável	Monitoramento de Verão			Monitoramento de Inverno		
	Média	Desv. Pad.	Variação	Média	Desv. Pad.	Variação
Temperatura Operativa (°C)	28,52	3,20	20,7 - 37,4	24,12	1,89	19,86 - 27,84
Temperatura Externa (°C)	25,29	5,19	14 - 38	23,19	4,69	13,10 - 29,76
Umidade Relativa Interna (%)	54,57	11,18	24,6 - 77,6	49,41	7,74	31,8 - 66,70
Umidade Relativa Externa (%)	68,36	21,21	17,9 - 98,8	54,12	18,78	23,24 - 92,50
Concentração de CO ₂ interna (ppm)	421,53	49,63	344 - 750	565,66	140,76	390 - 1350

4. CONCLUSÕES:

Em relação ao comportamento do usuário, observou-se principalmente a preferência por manter todas as esquadrias abertas em quase todo o período de medição na estação quente, possibilitando maior ventilação natural; enquanto no inverno, optou-se pelo fechamento de esquadrias como forma de manter os valores de temperatura e umidade dentro dos limites satisfatórios para os usuários, nos momentos em que as condições externas eram insatisfatórias. Embora essa solução tenha se mostrado efetiva para o conforto térmico, a ventilação natural do ambiente foi prejudicada, não sendo compensada pelo maior uso do ventilador, que só recircula o ar interno. Já no verão, a estratégia de maximizar a ventilação natural adotada pelos usuários não foi capaz de reduzir significativamente a temperatura da sala, mas garantiu níveis adequados de CO₂.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução RE n.º 09, de 16 de janeiro de 2003. Padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, 20 jan. 2003.
- BALVEDI, B. F.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. A review of occupant behaviour in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 495 - 496, 2018.
- DAISEY, J. M.; ANGELL, W. J.; APTE, M. G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. **Indoor Air**, v. 13 n. 1 p. 60, 2003. DOI: 10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x.
- DUTTON, S. M.; SHAO L. L., Window opening behaviour in a naturally ventilated school. **Proceedings...** In: SimBuild Conference 2010: 4th conference of IBPSA-USA, Nova York, v. 4, n. 1, p. 260 - 267, 2010.
- FABI, V. et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. **Building and Environment**, v. 58, p. 188-198, 2012.
- HAX D. R. et al., Influência do Comportamento do usuário no consumo de energia em uma edificação de ensino na zona bioclimática 2. **Anais...** In: XVI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído/ XII Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais...Palmas (TO) online, 2021.
- SORGATO, M.J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1-13., 2016.
- UN ENVIRONMENT PROGRAM. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction, 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- WARGOCKI, P.; WYON, D. Effects of HVAC on student performance. **ASHRAE Journal**, v. 48, p. 23, 2006.
- ZAMBONATO, B. et al. Pesquisa qualitativa sobre o comportamento do usuário em habitação multifamiliar: Estudo piloto. **Anais...** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 18, n. 1 p. 1-8, 2020. DOI: 10.46421/entac.v18i.832.