2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

O IMPACTO DA OPERAÇÃO DE JANELAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES[1]

FRANCESCHINI, Paula (1); NEVES, Leticia (2)
(1) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), p229312@dac.unicamp.br
(2) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), leticia@fec.unicamp.br

RESUMO

O comportamento do usuário tem impacto no consumo de energia durante a fase de operação da edificação e pode influenciar também no seu conforto térmico como, por exemplo, através da operação de janelas. Além das temperaturas externa e interna, a rotina e os hábitos dos usuários são fatores que influenciam na operação de janelas em edificações. Entretanto, a representação do comportamento do usuário em uma simulação computacional a fim de prever o desempenho termoenergético de uma edificação é ainda um desafio, pois as informações disponíveis são escassas. O objetivo deste trabalho é analisar cenários de operação de janela e o seu impacto no desempenho térmico de salas de aula de edificações escolares. Uma edificação escolar padrão foi selecionada para o estudo. Quatro cenários de operação de janelas foram definidos com base em resultados de estudos anteriores e simulados no software EnergyPlus. Os resultados das simulações foram comparados por meio das variáveis temperatura operativa, graus-hora de aquecimento e resfriamento e percentual de horas ocupadas em conforto. A operação de janelas demonstrou ter impacto no conforto térmico dos usuários da edificação escolar: a variação de graus-hora total chegou a 38% na comparação entre o melhor e o pior cenários analisados.

Palavras-chave: *Ventilação natural. Operação de janelas. Desempenho térmico. Simulação computacional. Edificação escolar.*

ABSTRACT

Occupant behavior has an impact on the building energy consumption during its operation phase and can also influence on its thermal comfort, for example, through the occupant interaction with windows. Besides the outdoor and indoor temperatures, routine and habits also influence the operation of windows in buildings. However, the representation of the occupant behavior in a building simulation in order to predict its thermal and energy performance is still a challenge, since the available data is scarce. This study aims to analyze scenarios of window operation and its impact on thermal performance of school's classrooms. A school building was selected for the study. Four scenarios of window's operation were defined based on results from previous studies and simulated on the software EnergyPlus. The results of the simulations were compared through the variables operative temperature, heating and cooling degree-hours and percentage of occupied hours in comfort. The operation of windows affected the thermal comfort of the school building's users: the degree-hours variation was up to 38% in the comparison between the best and worst scenarios.

Keywords*: Natural ventilation. Operation of windows. Thermal performance. Computer simulation. School building.*

---

[1] FRANCESCHINI, Paula; NEVES, Leticia. O impacto da operação de janelas no desempenho térmico das edificações escolares. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

As edificações são sistemas complexos e, frequentemente, têm um desempenho diferente na fase de operação em comparação àquele previsto na fase de projeto (SHI et al., 2019). Diversos fatores influenciam nessa lacuna entre os desempenhos previsto e real, como o uso de dados climáticos do município ao invés de dados do local específico da implantação do projeto, problemas de compatibilização entre projeto e obra e interferências causadas pelo comportamento do usuário (SHI et al., 2019). Dentre os três fatores mencionados, o comportamento do usuário é apontado como sendo o principal contribuinte para as incertezas no desempenho termoenergético da edificação (CHEN; HONG; LUO, 2018). O comportamento do usuário inclui todas as ações e respostas a estímulos dos usuários das edificações (SHI et al., 2019) e pode ser influenciado por diversos fatores, como variáveis ambientais, contextuais, psicológicas e sociais (FABI et al., 2012).

O comportamento de abrir ou fechar as janelas, por exemplo, pode impactar no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia da edificação (DUTTON; SHAO, 2010; STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017). A temperatura do ar é considerada o principal fator para a abertura ou fechamento das janelas (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017; ZHANG; BARRETT, 2012). Outros fatores que influenciam a operação de janelas são: a umidade relativa, a direção do vento, a chuva (SHI et al., 2019), os ruídos externos (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017), a orientação das aberturas, a radiação solar, o horário do dia e a densidade de ocupação (ZHANG; BARRETT, 2012). Wei et al. (2017) definem, em seu estudo sobre operação de janelas, dois tipos extremos de usuários: aquele que sempre deixa a janela aberta e outro que sempre deixa a janela fechada.

Algumas pesquisas vêm sendo conduzidas na última década com o objetivo de entender melhor o comportamento do usuário para inclui-lo na simulação de desempenho de edificações. A Agência Internacional de Energia (IEA), por exemplo, possui dois projetos nesta área: o Annex 66 (Definições e Simulação do Comportamento do Usuário em Edifícios), já finalizado, e o Annex 79 (Projeto e Operação de Edifícios Centrados no Usuário), iniciado em 2018. Entretanto, a maioria destas pesquisas é realizada apenas nos contextos residencial ou comercial (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017), havendo, portanto, uma lacuna para o estudo de tal questão em edificações escolares.

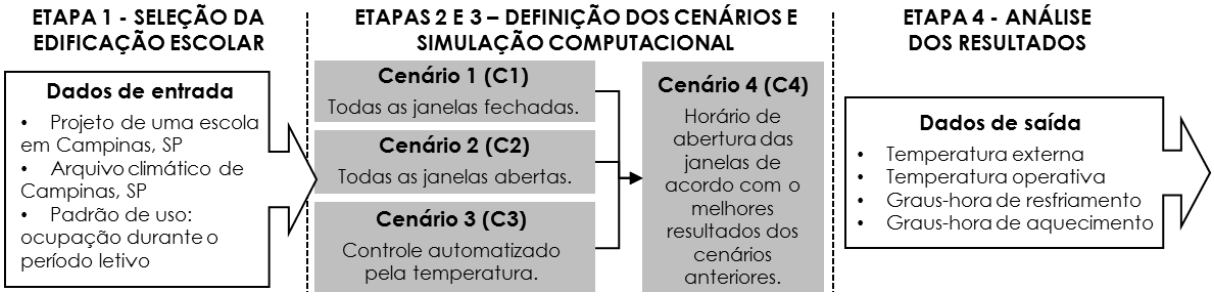
A edificação escolar possui características diferentes das demais, pois é utilizada em períodos específicos do ano (durante o ano letivo) e, no caso do ensino fundamental, é ocupada, principalmente, por crianças. As crianças passam cerca de um terço do seu dia na escola e precisam de um ambiente saudável para melhorar a sua atenção e produtividade (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017). Estudos sugerem a existência de uma relação entre a ventilação natural e o desempenho escolar (DUTTON; SHAO, 2010). Adicionalmente, a edificação escolar representa uma oportunidade de melhorar a eficiência energética do ambiente construído em sua totalidade, uma vez que ela pode influenciar diferentes grupos sociais e gerações, funcionando como um meio de comunicação entre os estudantes e as suas famílias (OUF; ISSA; MERKEL, 2016). Assim, o objetivo deste trabalho é analisar cenários de operação de janelas e o seu impacto no desempenho térmico de salas de aula de edificações escolares.

2 MÉTODO

O método de pesquisa envolveu quatro etapas: (i) seleção de uma edificação escolar padrão, (ii) definição dos cenários de operação de janelas, (iii) simulação

computacional e (iv) análise dos resultados (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma com as etapas do estudo



Fonte: Os autores

2.1 Seleção de uma edificação escolar padrão

A escola selecionada para o estudo tem um projeto padrão da Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE) do estado de São Paulo e possui três pavimentos com um total de dez salas de aula, cantina, refeitório, sala de leitura, laboratório de informática, administração e sala de professores, além de uma quadra poliesportiva e um pátio coberto. As aulas ocorrem no período diurno, nos turnos da manhã (das 7 h às 12 h) e da tarde (das 13 h às 18 h) para alunos do ensino fundamental (1º ao 9º ano).

2.2 Definição dos cenários de operação de janelas

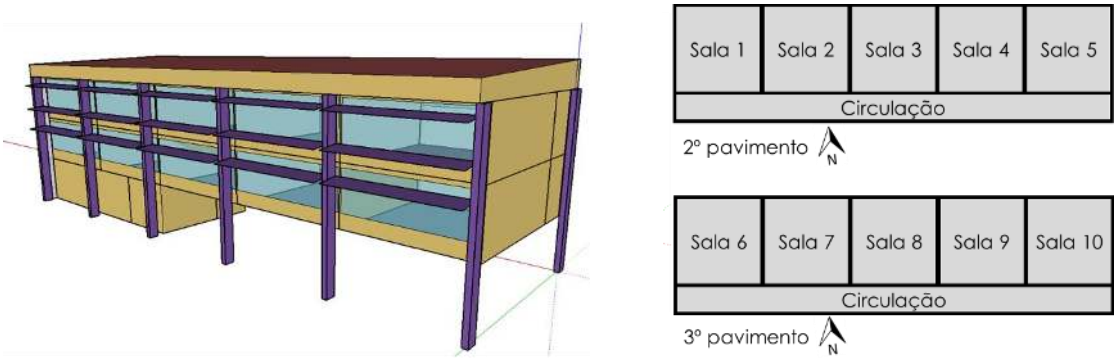
Os cenários utilizados na simulação computacional foram definidos a partir dos resultados de estudos anteriores sobre a operação de janelas (Figura 1). Os cenários 1 (C1) e 2 (C2) correspondem aos dois tipos extremos de usuários propostos por Wei et al. (2017): um que mantém as janelas sempre fechadas (C1) e outro que mantem as janelas sempre abertas (C2). No cenário 2, as janelas foram simuladas abertas apenas durante o período de ocupação, a fim de proteger a sala de intempéries no período noturno, quando a sala está desocupada. O cenário 3 (C3), o qual possui o controle das aberturas automatizado pela temperatura, reflete a variável ambiental considerada determinante no comportamento dos usuários ao abrirem e fecharem as janelas: a temperatura do ar (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017; ZHANG; BARRETT, 2012). Neste cenário, quando a temperatura operativa é maior que a temperatura neutra da zona de conforto proposta na ASHRAE Standard 55 (2004) as janelas ficam abertas, do contrário, as janelas permanecem fechadas. Por último, a fim de criar um cenário otimizado de operação de janelas que garanta o conforto térmico dos usuários na maior parte do tempo, o cenário 4 (C4) foi proposto baseado nos melhores resultados dos cenários anteriores.

2.3 Simulação computacional

A geometria utilizada para a simulação computacional (Figura 2) foi desenvolvida com o Euclid versão 0.9.3, um *plug-in* do *software* SketchUp. O modelo foi considerado como um edifício isolado, sem entorno imediato. Na geometria, foram incluídas as dez salas de aula da edificação escolar selecionada, as quais estão localizadas nos segundo e terceiro pavimentos do edifício, os ambientes localizados no primeiro pavimento da edificação (sala de leitura, depósito e cantina), as circulações de acesso às salas e a cobertura - cada ambiente citado compondo

uma zona térmica. No entanto, para a análise dos resultados, somente as zonas térmicas das salas de aula foram consideradas (Figura 2). Os elementos de sombreamento das fachadas também foram incluídos na geometria, assim como as janelas das salas. Para a simulação, as paredes laterais das salas 1 e 6 foram consideradas adiabáticas, pois são comuns a outros ambientes da escola que não foram modelados e possuem condições térmicas semelhantes.

Figura 2 – Geometria e zonas térmicas



Fonte: Os autores

O *software* EnergyPlus 9.3.1 foi utilizado para a simulação computacional. Como dados de entrada, foram inseridos a geometria da edificação escolar (Figura 2), as propriedades térmicas dos materiais que a compõem (Tabela 1) e o arquivo climático da cidade de Campinas, referente ao ano de 2015 (LABEEE, 2016), elaborado com dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram também consideradas as cargas internas de iluminação (8 luminárias por sala de aula, com duas lâmpadas fluorescentes de 32 W cada) e de ocupação (20 pessoas por sala de aula) durante o período letivo, ou seja, entre 7 h e 12 h e entre 13 h e 18 h nos dias de semana (de segunda a sexta-feira), excluindo os meses de janeiro, fevereiro, julho e dezembro (períodos de férias escolares).

Tabela 1 – Características construtivas

Item	Descrição	Transmitância Térmica (U) [W/m².K]	Capacidade Térmica (C) [kJ/m² K]	Absortância Solar (α)	Fator Solar (FS)
Parede Externa	Reboco + bloco de concreto 190x190x390 mm + reboco	2,50	240	0,3	-
Janelas	Vidro incolor 6 mm	5,68	-	-	0,87
Laje	Laje de concreto 200 mm	-	400	0,7	-
Piso	Argamassa de assentamento + porcelanato esmaltado cinza	-	58	0,5	-
Forro	Forro acústico mineral Ecomin Filigram	-	3,5	0,2	-
Cobertura	Telha de aço galvanizado trapezoidal 0,8 mm	7,27	28	0,25	-

Fonte: Os autores

Para simular a ventilação natural, o modelo Airflow Network foi utilizado, inserindo como parâmetros de entrada as características das esquadrias do projeto da escola. Cada sala de aula possui uma grande abertura com janelas pivotantes em quase toda a parede da fachada Norte e em fita, também com folhas pivotantes, sobre a porta de entrada na fachada Sul, as quais abrem para a circulação, permitindo a ventilação cruzada apenas quando todas as janelas estão abertas. O coeficiente de

descarga utilizado foi de 0,6 e a área efetiva de abertura das esquadrias foi de 0,35, pois, além das folhas pivotantes não abrirem na sua totalidade, algumas folhas das janelas são fixas. Quatro simulações foram realizadas alterando a abertura e o fechamento das janelas, de acordo com os cenários definidos na etapa 2 (Figura 1).

2.4 Análise dos resultados

A temperatura externa, a temperatura operativa e a temperatura neutra da zona de conforto do modelo adaptativo da ASHRAE 55 de cada zona térmica foram os dados de saída das simulações. As temperaturas operativas dos dias letivos mais frio (27 de maio) e mais quente (13 de outubro) foram representadas em gráficos, de forma a comparar os cenários 1, 2 e 3. A zona de conforto foi representada nos gráficos, calculando os limites máximo e mínimo a partir da temperatura neutra resultante das simulações. Além disso, foram representadas nos gráficos apenas as duas salas em situação extrema (maior e menor temperaturas operativas).

Os graus-horas de resfriamento (Ghr) e de aquecimento (Gha) foram calculados a partir da temperatura operativa resultante das simulações para todo o ano letivo, a fim de verificar em quais períodos cada zona térmica estava dentro da zona de conforto e em quais haveria a necessidade de climatização artificial. Para o cálculo, foram utilizadas as temperaturas limites da zona de conforto proposta na ASHRAE Standard 55 (2004) para ambientes naturalmente ventilados. Os melhores resultados dos cenários anteriores serviram como base para a simulação do cenário 4.

Os resultados de Ghr, Gha e graus-hora total (Ghr + Gha) foram comparados para os quatro cenários. Adicionalmente, o percentual de horas ocupadas de conforto (POC) por ventilação natural foi identificado para cada sala de aula e para a edificação como um todo, para cada cenário, a fim de classificar a edificação segundo o método proposto no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de serviço e Públicas – RTQ-C (INMETRO, 2010).

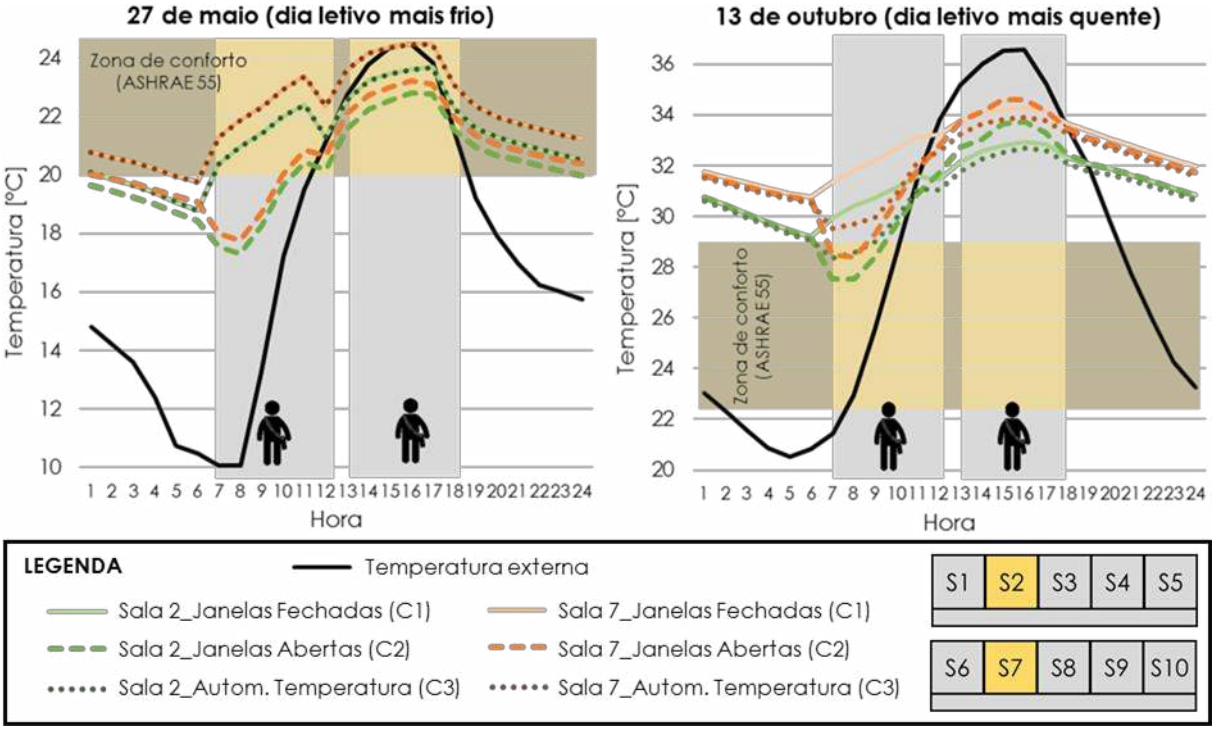
3 RESULTADOS

No dia letivo mais frio (27 de maio), as salas de aula permaneceram na zona de conforto (entre 20,5 ºC e 27,5 ºC) durante o período de ocupação nos cenários nos quais as janelas permaneceram fechadas, C1 e C3, e apenas no turno da tarde no cenário no qual as janelas permaneceram abertas, C2 (Figura 3). Devido às baixas temperaturas externas, o cenário com a abertura das janelas automatizada pela temperatura (C3) definiu que todas as janelas ficassem fechadas durante todo o período de ocupação, resultando em temperaturas operativas iguais no C1 e C3 e a sobreposição das respectivas linhas no gráfico. Além de influenciar no conforto térmico, a permanência das janelas fechadas poderia gerar problemas de salubridade, devido à falta de renovação de ar e consequente aumento da concentração de CO_2, porém essa questão não foi analisada nesse estudo. No período entre 1 h e 7 h, em que as salas estão desocupadas, todos os cenários ficaram com temperaturas abaixo da zona de conforto, mesmo estando também com as janelas fechadas. A partir disso, pode-se inferir que, além da temperatura externa, as cargas térmicas de ocupação e iluminação tiveram influência na temperatura operativa das salas. A operação de janelas também foi um fator significativo, uma vez que, no cenário com todas as janelas abertas durante o período de ocupação (C2), a temperatura operativa ficou menor que nos demais cenários, principalmente no turno da manhã, no qual a temperatura externa estava

menor.

No dia letivo mais quente (13 de outubro), todos os cenários ficaram, em algum momento do dia, fora da zona de conforto (entre 22,2 °C e 29,2 °C) (Figura 3). As salas 2 e 7, no cenário com todas as janelas abertas durante o período de ocupação (C2), apresentaram temperaturas dentro da zona de conforto nas primeiras horas do turno da manhã, das 7 h às 9 h na sala 2 e das 7 h às 8 h na sala 7. A sala 2, quando a abertura das janelas tem controle automatizado pela temperatura (C3), também apresentou temperaturas dentro da zona de conforto nas três primeiras horas do turno da manhã (7 h às 9 h). No cenário com janelas fechadas (C1), ambas as salas apresentaram menores oscilações na temperatura operativa, variando aproximadamente 3 °C ao longo do período de ocupação. O cenário com controle automatizado pela temperatura (C3) também apresentou tal característica, com uma variação de aproximadamente 4 °C ao longo do período de ocupação, porém com temperaturas menores do que o C1 e, portanto, mais próximas da zona de conforto. A variação de temperatura foi maior no cenário em que todas as janelas estão abertas (C2) ao longo do período de ocupação (aproximadamente 6 °C de amplitude térmica) e, embora no turno da manhã tenha apresentado temperaturas mais próximas da zona de conforto, no turno da tarde as temperaturas estavam mais elevadas do que nos outros cenários.

Figura 3 – Temperatura operativa

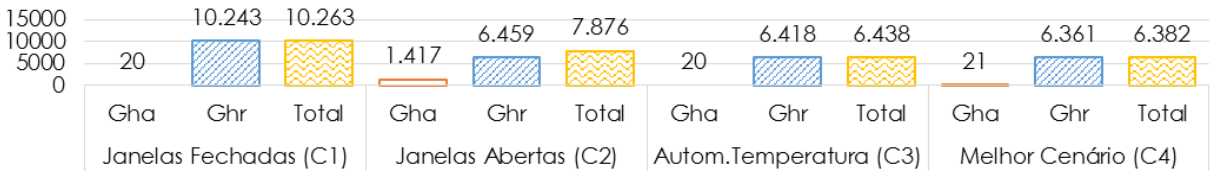


Fonte: Os autores

A partir dos resultados dos três primeiros cenários foram calculados os Gha e Ghr e o último cenário (C4) foi proposto. O C4 utilizou a seguinte variação dos demais cenários: para as salas 1, 2, 3 e 5 utilizou-se o controle automatizado pela temperatura (C3), uma vez que foi o cenário com melhores resultados de Ghr nestas salas. Para as demais salas o cenário com todas as janelas abertas durante o período de ocupação (C2) foi utilizado, porém, fechando as janelas em determinados períodos para reduzir os Gha. Assim, obteve-se uma redução de 3.881 graus-hora total (38%) em relação ao pior cenário, com as janelas sempre fechadas (C1), e de 1.494 graus-hora total

(19%) do cenário com as janelas sempre abertas (C2) (Figura 4). Em relação ao cenário com controle automatizado (C3), a redução foi de apenas 56 graus-hora total (0,01%), apontando que a temperatura do ar é um parâmetro importante na relação entre operação de janelas e conforto térmico.

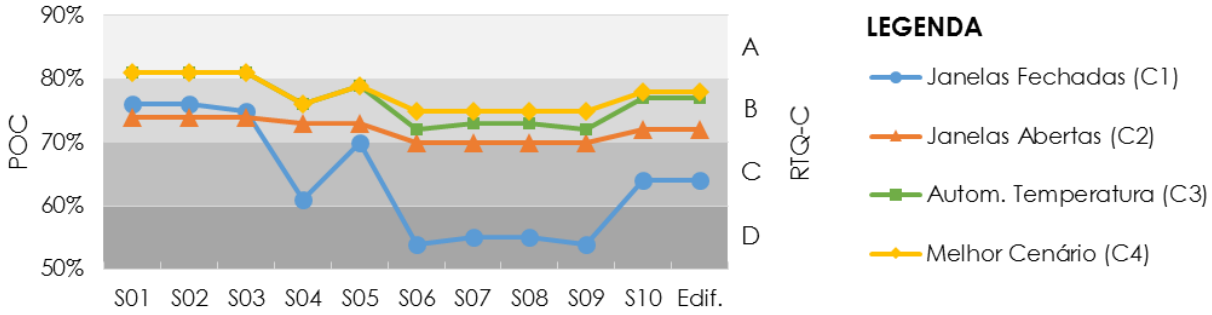
Figura 4 – Gha, Ghr e Graus-hora total (Gha + Ghr)



Fonte: Os autores

A classificação de acordo com o método proposto no RTQ-C (INMETRO, 2010), demonstrou a semelhança no comportamento térmico de algumas salas, as quais obtiveram resultados parecidos para cada cenário (Figura 5). No cenário com as janelas abertas (C2), as salas tiveram o POC mais homogêneo, variando entre 70% (salas 6, 7, 8 e 9) e 74% (salas 1, 2 e 3), tendo uma classificação B de acordo com o RTQ-C. No cenário com as janelas fechadas (C1), a salas 1, 2 e 3 também tiveram melhor desempenho (POC 75-76%, classificação B) e as salas 6, 7, 8 e 9 tiveram um desempenho inferior (POC 54-55%, classificação D). No C4, melhor cenário deste estudo, a classificação das salas de aula ficou muito semelhante ao C3 e foi satisfatória, visto que todas tiveram o POC entre 75% (B) – salas 6, 7, 8 e 9 e 81% (A) – salas 1, 2 e 3. Ainda assim, haveria a necessidade do uso de outra estratégia, além da ventilação natural, para melhorar o conforto térmico em alguns períodos do ano letivo, principalmente nos meses mais quentes (março, abril outubro e novembro), os quais contribuíram para o aumento dos Ghr, em especial nas salas 6, 7, 8 e 9, que em todos os cenários tiveram um desempenho térmico inferior às demais.

Figura 5 – POC e classificação RTQ-C



Fonte: Os autores

4 CONCLUSÕES

Nesse estudo, a análise e comparação de quatro cenários de operação de janelas em dez salas de aula de uma edificação escolar foram realizadas a partir de simulações computacionais. O primeiro cenário (C1), com todas as janelas fechadas durante todo o período de ocupação, apresentou o pior resultado de desempenho térmico, com um grande período do ano fora da zona de conforto térmico, com temperaturas elevadas. O segundo cenário (C2), com todas as janelas abertas durante todo o período de ocupação, apresentou um resultado melhor do que o C1 para a maioria das salas de aula, porém apresentou períodos de desconforto com

temperaturas baixas (graus-hora de aquecimento). O terceiro cenário (C3), com o controle da operação das janelas automatizado pela temperatura do ar, teve melhores resultados de graus-hora de aquecimento do que o C2 e de graus-hora de resfriamento do que os C1 e C2. Através da análise de cada sala de aula, considerando as horas e os dias, foi possível identificar grupos de salas com condições térmicas semelhantes e definir as melhores estratégias para cada grupo, de forma a propor um cenário otimizado (C4).

A identificação das condições térmicas semelhantes para algumas salas de aula demonstrou que, mesmo que os ambientes tenham as mesmas dimensões, orientação solar e tipo de esquadria, a posição deles na edificação (como o pavimento ou a adjacência a uma parede externa) influencia no seu desempenho térmico e requer estratégias diferentes de climatização e operação. Além da operação das janelas, as cargas internas (ocupação e iluminação) também influenciaram na temperatura operativa das salas de aula.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) para a realização desta pesquisa (processo nº 2019/13474-7).

REFERÊNCIAS

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 55:2004** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ashrae, 2004.

CHEN, Y.; HONG, T.; LUO, X. An agent-based stochastic Occupancy Simulator. **Building Simulation**, v. 11, n. 1, p. 37–49, 2018.

DUTTON, S.; SHAO, L. Window Opening Behavior in Naturally Ventilated Schools. In: FOURTH NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA-USA, 4., 2009, Dutton. **Anais eletrônicos...** Dutton: 2010, p. 260–268. Disponível em: <http://www.ibpsa.us/sites/default/files/publications/SB10-DOC-TS05B-02-Dutton.pdf>.

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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **RTQ-C**: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. 2010.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÃO (LABEEE). **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. Arquivos climáticos INMET 2016. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>.

OUF, M.; ISSA, M.; MERKEL, P. Analysis of Real-Time Electricity Consumption in Canadian School Buildings. **Energy and Buildings**, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.022>.

SHI, X. et al. Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: A review. **Sustainability** (Switzerland), v. 11, n. 3, p. 1–21, 2019.

STAZI, F.; NASPI, F.; D'ORAZIO, M. Modelling window status in school classrooms. Results from a case study in Italy. **Building and Environment**, v. 111, p. 24–32, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.013>.

WEI, S. et al. Impact of occupant behaviour on the energy-saving potential of retrofit measures for a public building in the UK. **Intelligent Buildings International**, v. 9, n. 2, p. 97–106, 2017.

ZHANG, Y.; BARRETT, P. Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. **Building and Environment**, v. 50, p. 125–134, 2012.