IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DE SALAS DE AULA NATURALMENTE VENTILADAS

Palavras-chave: EDIFÍCIOS ESCOLARES, RESILIÊNICA TÉRMICA, AQUECIMENTO GLOBAL

Autoras:

DANIELA ELEONORA CARREGÃ BALZAN, FECFAU – UNICAMP

Profª. Drª. LETICIA DE OLIVEIRA NEVES (orientadora), FECFAU – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As mudanças climáticas têm sido assunto de importante discussão nas últimas décadas, devido ao aumento de cerca de 1,8 °C na temperatura global, no último século, projeções de 1,4 °C a 5,8 °C até o final desse século (Global..., 2024; Lindsey; Dahlman, 2024). Impulsionadas majoritariamente por atividades humanas e emissões de gases do efeito estufa (GEE), essas alterações impactam características bioclimáticas e a saúde humana, incluindo mortalidade e sequelas por extremos térmicos e doenças infecciosas (IPCC, 2023; Patz et al., 2005). Com esse panorama, é inevitável que haja uma preocupação com o futuro do planeta e da humanidade, representado pelas crianças (IPCC, 2023).

O processo de desenvolvimento físico e mental, torna a sensibilidade de crianças às mudanças e sensações térmicas é maior do que em adultos (Teli *et al*., 2017) e as edificações escolares possuem grande impacto em sua saúde e crescimento, pois são onde passam cerca de 30% do seu tempo (Dong *et al*, 2023). Jiang *et al*. (2018) abordam como as condições ambientais escolares interferem no desempenho das atividades dos alunos e como as mudanças climáticas e o aumento das temperaturas no futuro intensificarão negativamente esses efeitos. A ventilação natural ineficiente e a alta densidade de ocupação de ambientes escolares podem causar superaquecimento e má qualidade do ar em salas de aula, fenômenos que precisam ser estudados e avaliados, de forma a melhor qualificá-los e a construir modelos mais sustentáveis e eficientes no futuro (Dong *et al*, 2023; Heracleous; Michael, 2018).

Os estudos dos efeitos das mudanças climáticas nos ambientes escolares ainda são poucos se comparados aos de ambientes habitacionais (Dong *et al*, 2023) e, em sua maioria, são concentrados em países do hemisfério Norte (ou clima temperado), diferente do que temos na realidade brasileira, o que mostra uma necessidade de ampliação de pesquisas para adequar e direcionar a construção de escolas em climas quentes como os encontrados em grande parte do território brasileiro.

Nesse sentido, pesquisas envolvendo estudos de caso, monitoramento de campo e simulações computacionais podem contribuir para a proposta e análise de estratégias de projeto que procurem minimizar os efeitos das mudanças climáticas nos ambientes internos de edificações escolares. Em vista

disso, esta pesquisa utilizou dados monitorados de salas de aula para o desenvolvimento de simulações computacionais, de forma a avaliar suas condições climáticas atuais e futuras e sua resiliência térmica. O objetivo consistiu em avaliar os impactos das mudanças climáticas no desempenho térmico de salas de aula naturalmente ventiladas em escolas de ensino fundamental, por meio da modelagem de uma escola com características projetuais padronizadas pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE). Ressalta-se aqui a abordagem, pelo presente projeto de pesquisa, dos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU): educação de qualidade (4), cidades e comunidades sustentáveis (11) e combate às alterações climáticas (13) (ONU, 2015).

METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa experimental fundamentada em estudo de caso. O objeto de estudo são salas de aula de uma escola de ensino fundamental em Campinas-SP, analisadas via simulação computacional.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: CALIBRAÇÃO

Uma pesquisa de campo foi realizada na escola estadual Profa. Adriana Cardoso, localizada em Campinas-SP, pertencente à FDE do estado de São Paulo (Chaga, *et al*, 2025). Variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura de globo, umidade relativa do ar e concentração de CO_2) de três salas de aula da escola foram monitoradas *in loco* ao longo de seis meses (de julho a dezembro de 2024), de forma a registrar todas as estações do ano e possíveis ondas de calor. Sensores de estado foram utilizados para monitorar abertura e fechamento de janelas e sensores de temperatura do tipo iButton para monitorar o acionamento manual de ventiladores de parede. Tal estudo foi conduzido pela aluna de mestrado Eduarda Gonçalves Chaga, orientanda da profa. Dra. Leticia de Oliveira Neves[1] . Essa escola foi utilizada como estudo de caso para a presente pesquisa.

Para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho térmico das salas de aula naturalmente ventiladas, um modelo de simulação computacional representativo da escola monitorada (Figura 1) foi modelado com ajuda do *plug in* Euclid para SketchUp e suas propriedades foram especificadas no *software* EnergyPlus segundo Chaga, *et al*, 2025. O primeiro passo consistiu na calibração do modelo, com base nos dados medidos na pesquisa de campo desenvolvida pela aluna de mestrado Eduarda Gonçalves Chaga. O modelo de simulação foi montado com base no projeto arquitetônico da escola (disponibilizado pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação - FDE), para modelagem da geometria e materiais construtivos; e em dados levantados em campo, para modelagem de cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e padrões de uso.

A modelagem da ventilação natural foi executada por meio do módulo AirflowNetwork, que realiza cálculos de pressão, fluxo de ar, temperatura e umidade dos nós, localizados no centro geométrico das aberturas (DOE, 2023). Um arquivo climático foi montado usando dados climáticos da estação

[1] Pesquisa de mestrado da aluna Eduarda Gonçalves Chaga, orientada pela profa. Dra. Leticia de Oliveira Neves e financiada pela FAPESP, intitulada 'Avaliação dos impactos de ondas de calor e mudanças climáticas nas condições de conforto térmico em usuários de salas de aula de ensino fundamental'.

meteorológica mais próxima, considerando o mesmo período de medição em campo. O programa Weather Converter, fornecido pela EnergyPlus, foi utilizado para converter os dados meteorológicos no formato EnergyPlus Weather file (epw). Uma comparação entre dados medidos e simulados foi realizada com base nas seguintes medidas, usadas para verificar a precisão do modelo calibrado): erro médio absoluto (Mean Absolute Error – MAE), coeficiente de variação da raiz do erro quadrático médio (Coefficient Variation of Root Mean Square Error – CV RMSE) e erro médio normalizado (Normalized Mean Square Error – NMBE) (Neves et al., 2020) (Tabela 1).

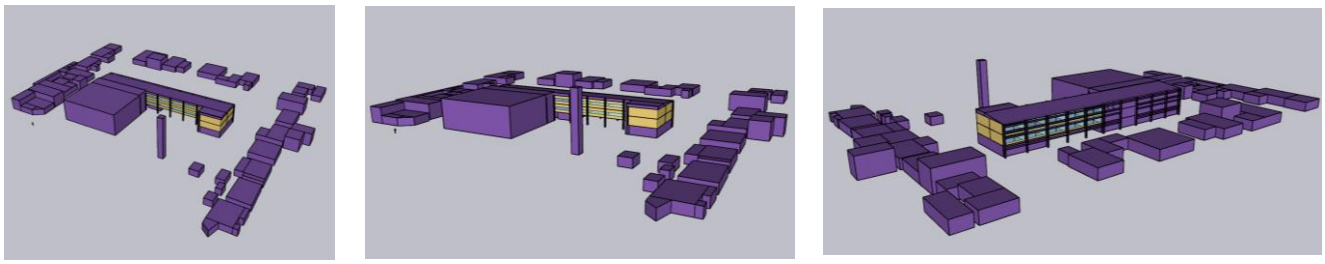

Figura 1 – Modelo da escola e do entorno, em que as salas em amarelo são simuladas com ventilação natural, em roxo os elementos para sombreamentoe trocas de calor.Fonte: Chaga, *et al,* 2025.

Medidas estatísticas	Resultados do modelo	Referência ASHRAE Guideline 14
MAE	0,8	menor que 1
CV RMSE	3%	30% max
NMBE	-3%	10% max

Tabela 1 – medidas do modelo calibrado.

SIMULAÇÕES COM ARQUIVOS CLIMÁTICOS FUTUROS

O modelo calibrado foi utilizado para simular cenários futuros de alterações climáticas. Para isso, um arquivo climático no formato Typical Meteorological Year (TMY) de Campinas foi utilizado como base, contendo dados monitorados no período de 2004 A 2018 (Climate..., 2024). As alterações climáticas globais futuras foram incorporadas ao arquivo climático por meio da ferramenta Future Weather Generator, desenvolvida por Rodrigues, Fernandes e Carvalho (2023). Trata-se de uma ferramenta do tipo Morphing, de código aberto, multiplataforma e de última geração, que gera dados meteorológicos futuros de hora em hora para realização de simulações de desempenho de edifícios (Rodrigues; Fernandes; Carvalho, 2023). No programa, as mudanças climáticas globais são calculadas com base no último relatório (Assessment Report 6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) para produzir arquivos climáticos no formato EnergyPlus weather file (epw). Para essa pesquisa foram selecionados os cenários SSP2-4.5, com uma trajetória intermediária de emissões, e o SSP5-8.5, um cenário de crescimento econômico intensivo com altas emissões de combustíveis fósseis, sendo realizadas para os anos de 2050 e 2080.

ANÁLISE DE RESULTADOS

O Percentual de Horas na Faixa de Temperatura (PHFT) e a Carga Térmica de Resfriamento (CgTR) foram calculados tanto para o arquivo representativo das condições climáticas atuais (TMY de 2004-2018) quanto para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para 2050 e 2080, para fins de comparação.

O intervalo de temperatura considerada confortavel para o calculo do PHFT foi calculado pelo modelo adaptativo (ASHRAE, 2023). A carga de aquecimento não foi considerada dada a sua menor relevância devido às altas temperaturas operativas do local.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela Tabela 2, nota-se que no cenário intermediario (SSP2-4.5) houve uma redução de 10% nas horas ocupadas na faixa de temperatura para 2050 e 21% para 2080. No cenário pessimista (SSP5-8.5), para 2050 diminuiu houve uma redução de 12% e para 2080 de quase 30%, em relação ao cenário atual. A carga térmica para resfriamento, ou seja, a quantidade de energia necessária para retirar calor do ambiente para que ele fique dentro da faixa de conforto aceitável , demonstrou aumentar com o tempo, sendo identificado, no cenário intermediário, um aumento de 37,97% em 2050 e de 71,87% em 2080, e no pessimista, um aumento de 52,71% para 2050 e de 109,53% para 2080, em relação ao cenário atual. (Tabela 2). A Figura 2 mostra com detalhes essas variações.

Arquivo climático	PHFT	CgTR (kWh/m²)
TMY atual	52%	118,63
2050 SSP 2-4.5	42%	163,69
2080 SSP 2-4.5	31%	203,90
2050 SSP 5-8.5	40%	181,18
2080 SSP 5-8.5	23%	248,58

Tabela 2 – Índices calculados

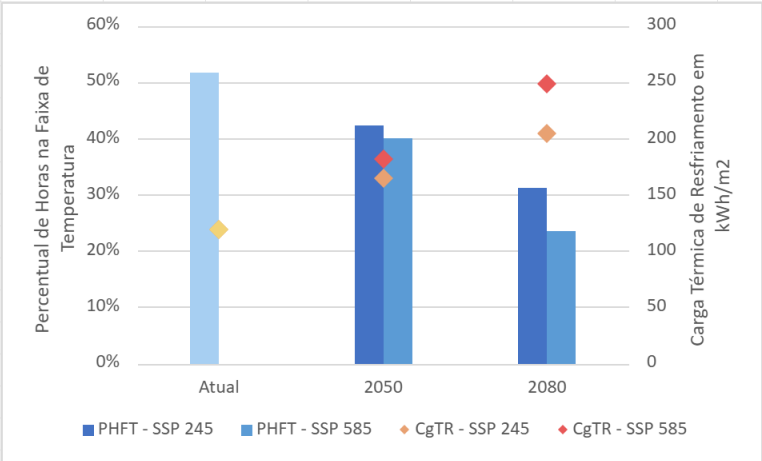

Figura 2 – PHFT e carga térmica para o cenário atual e cenários futuros. Fonte: Chaga, *et al*, 2025

CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa atestam que as mudanças climáticas ao longo do tempo se agravam e enfatizam a importância de projetar e adaptar edifícios escolares para acompanharem suas intensificações. O aumento da carga térmica e a diminuição do Percentual de Horas na Faixa de Temperatura (PHFT), mostram que Ao comparar o cenário SSP 5-8.5 com o cenário SSP 2-4.5, é possivel perceber o segundo, em que os esforços de mitigação são moderados e as emissões de gases de efeito estufa permanecem em níveis relativamente altos, apresentou uma taxa de aumento, em relação ao cenário atual, menos crítica que o cenário SSP 5-8.5, configurado pelo aumento significativo

da temperatura global pelo uso intensivo de combustíveis fósseis. Para possíveis pesquisas futuras, seria interessante analisar quais estratégias passivas seriam mais eficazes para mitigar esses efeitos, como seria possível adaptar as escolas atuais e projetar para o futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. *ASHRAE Guideline 14 – Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2014.

BABA, F. M. et al. Optimizing overheating, lighting, and heating energy performances in Canadian school for climate change adaptation: Sensitivity analysis and multi-objective optimization methodology. Building and Environment, v. 237, 2023.

CLIMATE ONE BUILDING. Arquivos climáticos. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 07 de maio de 2024.

CHAGA, E; BALZAN, D; NEVES, L O.. Efeitos de ondas de calor e mudanças climáticas na resiliência térmica de salas de aula naturalmente ventiladas In: Anais... Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), XVIII, São Carlos, 2025

CLIMATE ONE BUILDING. Arquivos climáticos. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 07 de maio de 2024.

DOE. U. S. Department of Energy. EnergyPlus ™ Version 23.2.0. Documentation Engineering Reference. 2023.

DONG, J. et al. The impact of climate change on cognitive performance of children in English school stock: A simulation study. Building and Environment, v. 243, 1 set. 2023.

GLOBAL TIME SERIES. Climate at Glance in Global Time Series. Dados climáticos disponibilizados por Climate.gov. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/1/3/1923-2024>. Acesso em: 8 de maio de 2024.

HAMDY, M.; CARLUCCI, S.; HOES, P.; HENSEN, J. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings - A Dutch case study. Building and Environment, v. 122, 2017.

HERACLEOUS, C.; MICHAEL, A. Assessment of overheating risk and the impact of natural ventilation in educational buildings of Southern Europe under current and future climatic conditions. Energy, v. 165, p. 1228–1239, 15 dez. 2018.

IPCC. Climate Change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, 2023.

JIANG, J. et al. A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. Building and Environment, v. 134, p. 102–113, 15 abr. 2018.

LINDSEY, R; DAHLMAN, L. Climate change: global temperature. Climate.gov, 2024. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature#:~:text=Highlights,0.20%C2%B0%20C)%20per%20decade>. Acesso em: 08 maio 2024.

NEVES, L.O.; HOPES, A.P.; CHUNG, W.J.; NATARAJAN, S. "Mind reading" building operation behaviour. Energy for Sustainable Development, v. 56, p. 1-18, 2020.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015>. Acesso em: 18 dez. 2023.

PATZ, J. A; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J. Impact of regional climate change on human health. Nature, v. 438, n. 7066, p. 310–317, 2005. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature04188>. Acesso em: 09 maio 2024.

RODRIGUES, E.; FERNANDES, M. S.; CARVALHO, D. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. Building and Environment, v. 233, 1 abr. 2023.

TAVAKOLI, E.; O'DONOVAN, A.; KOLOKOTRONI, M.; O'SULLIVAN, P. Evaluating the indoor thermal resilience of ventilative cooling in non-residential low energy buildings: A review. Building and Environment, v. 222, 2022.

TELI, D. et al. Thermal Performance Evaluation of School Buildings using a Children-based Adaptive Comfort Model. Procedia Environmental Sciences, v. 38, p. 844–851, 2017.