XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Desempenho de um permutador de calor solo-ar aplicado em salas de aula de um edifício educacional em um cenário de mudanças climáticas para Viçosa - MG

Desempeño de un intercambiador de calor suelo-aire aplicado en salas de aula de un edificio educativo en un escenario de cambios climáticos para Viçosa-MG

Performance of an Earth-to-Air Heat Exchanger applied in classrooms of an educational building in a climate change scenario for Viçosa-MG

Desempenho térmico do ambiente construído

Pires, Leticia Cazelli
Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, leticia.c.pires@ufv.br

Fonseca, Ligiana Pricila Guimarães
Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, ligiana.fonseca@ufv.br

Carlo, Joyce Correna
Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, joycecarlo@ufv.br

Resumo

Com o avanço das mudanças climáticas, alternativas sustentáveis para a climatização de edifícios tornam-se cada vez mais relevantes. Este estudo investigou os Permutadores de Calor Terra-Ar, uma tecnologia que utiliza a inércia térmica do solo para resfriar ou aquecer o ar, oferecendo uma solução eficiente e sustentável para ambientes com baixo consumo energético. Essa tecnologia foi aplicada em salas de aula de um edifício educacional em Viçosa-MG, considerando um cenário de mudanças climáticas e diferentes configurações de operação das aberturas das janelas existentes. A viabilidade do sistema foi avaliada em termos de redução da carga térmica considerando um aparelho de ar-condicionado instalado nas salas. Os casos investigados apresentaram uma redução máxima de 3,3% da carga térmica em relação ao caso base, sem o permutador de calor, com ventilação natural.

Palavras-chave: EAHE. Carga térmica. Desempenho térmico. Ventilação geotérmica.

Resumen

Con el avance del cambio climático, las alternativas sostenibles para climatizar edificios cobran cada vez más relevancia. Este estudio investigó los intercambiadores de calor tierra-aire, una tecnología que utiliza la inercia térmica del suelo para enfriar o calentar el aire, ofreciendo una solución eficiente y sostenible para entornos con bajo consumo energético. Esta tecnología fue aplicada en las aulas de un edificio educativo en Viçosa-MG, considerando un escenario de cambio climático y diferentes configuraciones de funcionamiento de las aberturas de ventanas existentes. Se evaluó la viabilidad del sistema en términos de reducción de carga térmica considerando una unidad de aire acondicionado instalada en las habitaciones. Los casos investigados mostraron una reducción máxima del 3,3% en la carga térmica en comparación con el caso base, sin intercambiador de calor, con ventilación natural.

Palabras clave:. EAHE. Carga térmica, Rendimiento térmico, Ventilación geotérmica.

Abstract

With the advancement of climate change, sustainable alternatives for air conditioning buildings are becoming increasingly relevant. This study investigated Earth-to-Air Heat Exchangers, a technology that uses the thermal inertia of the ground to cool or heat the air, offering an efficient and sustainable solution for environments with low energy consumption. This technology was applied in classrooms in an educational building in Viçosa-MG, considering a climate change scenario and different operating configurations of existing window openings. The system's viability was evaluated regarding thermal load reduction, considering an air conditioning unit installed in the rooms. The investigated cases showed a maximum reduction of 3,3% in thermal load compared to the base case, without the heat exchanger, with natural ventilation.

Keywords: EAHE. Thermal load. Thermal performance. Geothermal ventilation.

Introdução e Objetivos

O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca a importância da redução do consumo de energia como parte integrante da mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2022). Dessa forma, torna-se crucial o estudo de tecnologias de condicionamento térmico mais eficientes energeticamente, em contrapartida às tecnologias tradicionais de condicionamento artificial, cujo uso tende a triplicar até 2050 (Agência Internacional de Energia, 2020), causando problemas no fornecimento de energia, especialmente durante ondas de calor prolongadas (Stone *et al.*, 2021). Ao adotar medidas para aumentar a eficiência energética em salas de aula, ambientes com elevada carga térmica devido à densidade de ocupação, pode-se contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e criar ambientes de aprendizagem mais sustentáveis.

Os Trocadores/permutadores de Calor Terra-Ar (do inglês, *Earth Air Heat Exchangers*, ou EAHE) são uma alternativa para climatizar ambientes que utiliza a inércia térmica do solo para aquecer ou resfriar o ar. Eles funcionam através de um sistema de tubulações enterradas no solo, por onde o ar circula. No verão, o ar quente externo troca calor com o solo mais frio, sendo assim resfriado antes de entrar no ambiente. Já no inverno, o processo ocorre de forma contrária, por meio da troca de calor do ar frio com o solo mais quente, sendo pré-aquecido antes de ser utilizado no edifício (Santana; Ribeiro, 2019). Essa tecnologia oferece benefícios como economia de energia e conforto térmico, e tem se popularizado em construções residenciais, comerciais e industriais (Brum; Labat; Lorente, 2019). Além disso, o sistema apresenta um potencial de aplicação interessante para ambientes de elevada carga térmica devido à ocupação, como as salas de aula, podendo funcionar como sistema de refrigeração.

O objetivo deste trabalho foi investigar o desempenho termoenergético de um permutador de calor solo-ar passivo aplicado com diferentes configurações de operação em salas de aula de um edifício educacional existente em um cenário de mudanças climáticas para Viçosa-MG.

Metodologia

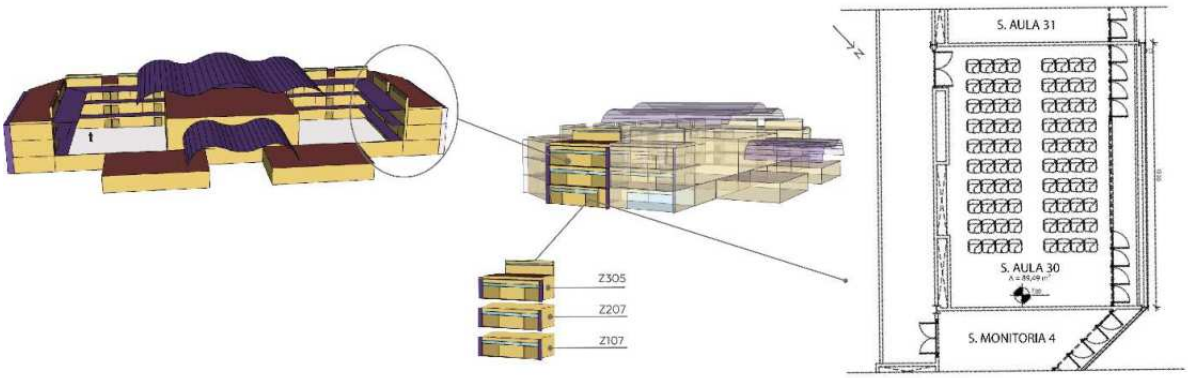
A tecnologia foi investigada por meio de simulação computacional em um modelo calibrado de edificação educacional. As simulações foram conduzidas para um cenário de mudanças climáticas

para Viçosa-MG (atual zona bioclimática 2M – ABNT, 2024) apresentado no último relatório do IPCC: o cenário SSP2-4.5 (2050) - correspondente a níveis intermediários de emissões de CO2. O arquivo climático correspondente foi gerado pelo *software* Future Weather Generator (Rodrigues; Fernandes; Carvalho, 2023) a partir de um arquivo climático TMY que abrange o período 1985-2014, desenvolvido com base na ISO15927-4 (ISO, 2005).

Como estudo de caso, tomou-se o Pavilhão de Aulas B (PVB), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que foi modelado e calibrado (Souza, 2024) no EnergyPlus v.22.1 (U.S. Department of Energy, 2024). O edifício de 3 pavimentos e 10.721 metros quadrados de área construída possui como sistema construtivo estrutura metálica, lajes em *steel deck*, paredes externas em blocos de concreto vazado (U=2,72W/m².K) e as internas de *drywall* com lã de vidro e câmara de ar. As salas de aula possuem varandas sombreando as fachadas, portas metálicas e janelas do tipo maxim-ar localizadas na parte superior da parede externa e chaminés com ventilação permanente com descarga na cobertura, que possui telhas de aço galvanizado (U=0,56W/m².K).

Para investigação do desempenho do permutador, foi criado um recorte do edifício e selecionado para modelagem o braço da edificação com a fachada com a orientação solar mais desfavorável no verão: a noroeste (Figura 1). A tecnologia para ventilação geotérmica foi aplicada nas salas 107, 207 e 305, localizadas no meio da fachada e abrangendo os três pavimentos. Essas salas apresentam contato com o exterior por meio das paredes noroeste e sudeste e contato com as salas adjacentes. A Tabela 1 apresenta as configurações do permutador.

Figura 1: Modelo do edifício simulado.



Fonte: As autoras.

Tabela 1: Parâmetros de modelagem dos tubos.

Classe	Campo	Unidade	Valor
Zone Earthtube	*Design flow rate*	m^3/s	0,69
	Minimum zone temperature when cooling	°C	18
	Maximum temperature when heating	°C	24
	Delta temperature	Delta °C	0
	Earthtube type	-	*Natural*
	Fan pressure rise	Pa	400
	Fan total efficiency	-	0,7
	Pipe radius	m	0,2
	Pipe thickness	m	0,003
	Pipe length	m	40
	Pipe thermal conductivity	W/m.K	0,18
	Pipe depth underground surface	m	4
	Soil condition	-	*Heavy and Damp*
	Average soil surface temperature	°C	21,9
	Amplitude of soil surface temperature	Delta °C	3,9
	Phase constant of soil surface temperature	dias	328

Fonte: As autoras.

Foi estabelecida uma densidade de ocupação de 60% da capacidade total de ocupação - o que corresponde a 0,89 pessoas/m^2, conforme o modelo calibrado. O edifício é ocupado de 1 de março a 30 de junho e de 1 de agosto a 15 de dezembro, de segunda a sexta, das 7:00h às 22:00.

Para análise da influência do permutador no desempenho térmico e energético do edifício, foram criados um caso base e dois cenários para simulação, que foram gerados por meio do *Energy Management System (EMS)*, uma ferramenta de controle do EnergyPlus.

Caso Base (CB): Janelas abertas quando a temperatura interna (Tin) da sala estiver entre 20°C e 24°C e for maior do que temperatura externa. Ar-condicionado acionado quando Tin<18°C e Tin>24°C, com o fechamento das janelas.

Cenário 1 (C1): Ventilação direta permanente por permutador de calor solo-ar + Ar-condicionado (abaixo de 18°C e acima de 24°C). Janelas sempre fechadas.

Cenário 2 (C2): Ventilação permanente por permutador de calor solo-ar + Ar-condicionado (abaixo de 18°C e acima de 24°C) + janelas abertas durante o período noturno.

Para cálculo da ventilação natural nos casos com o permutador de calor, foi utilizado o módulo *Infiltration* do EnergyPlus, com dados horários de trocas de ar inseridos como *schedule* após o cálculo destas pelo *Airflow Network* (AFN). Esse método foi empregado para considerar o cálculo das trocas de ar pelo AFN nas simulações com o EAHE, cuja simulação é incompatível com o AFN.

Resultados

Como a sala 207 possui a maior carga térmica de refrigeração entre as três salas com o permutador de calor, ela foi utilizada para a comparação dos resultados. A Tabela 2 apresenta o número de horas em que o ar-condicionado é ligado durante a semana mais quente e a semana mais fria do ano letivo para a sala 207, o número de horas em que a temperatura interna se encontra fora do intervalo de temperatura considerado como conforto (entre 18°C e 24°C) e a carga térmica média horária para cada semana.

Tabela 2: Desempenho de cada cenário analisado.

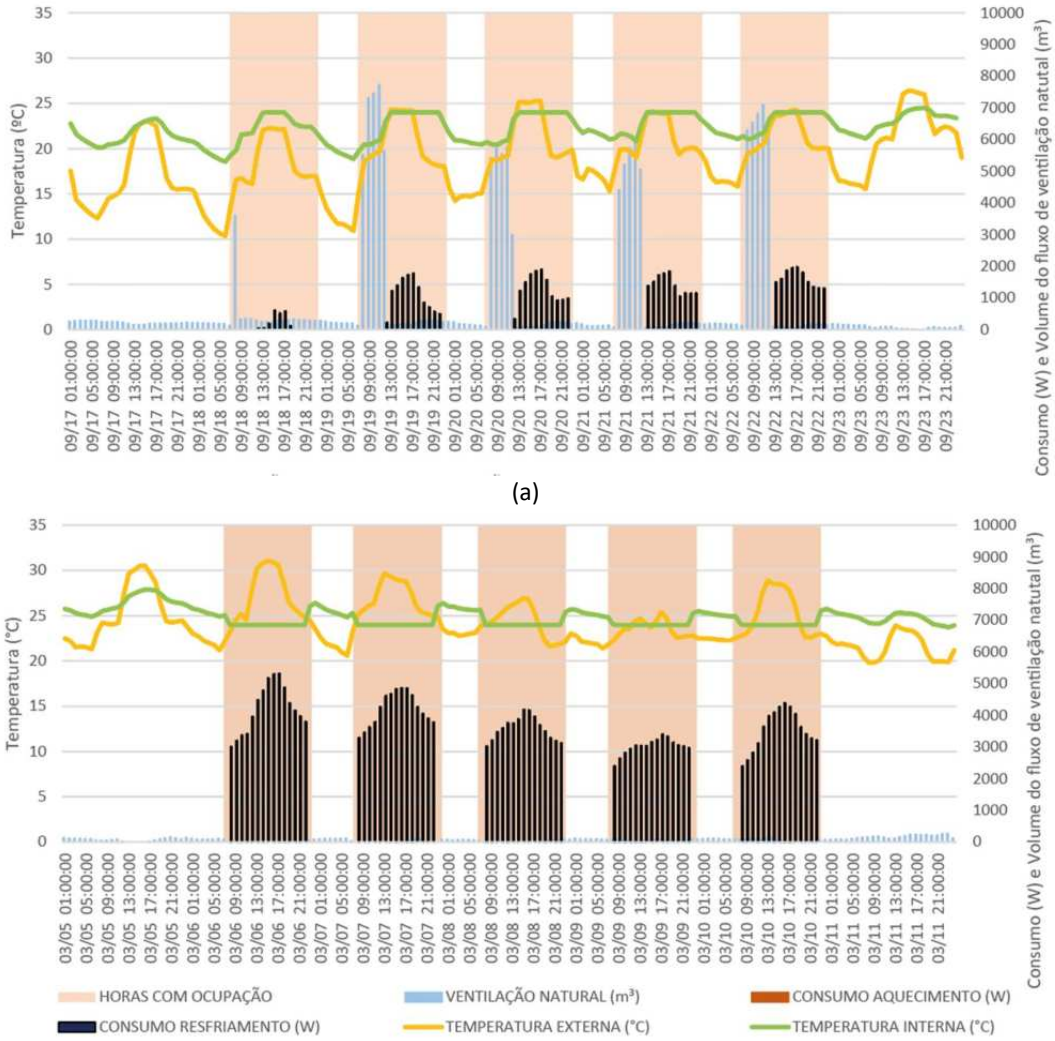
Sala 207		**Horas/semana HVAC ligado**	**Carga térmica média horária (kWh)**
CASO BASE	Semana mais fria do inverno	66	1,08
	Semana mais quente do verão	75	3,71
CENÁRIO 1	Semana mais fria do inverno	31	0,44
	Semana mais quente do verão	75	3,47
CENÁRIO 2	Semana mais fria do inverno	28	0,36
	Semana mais quente do verão	73	3,42

Fonte: As autoras.

Para todos os casos, a carga térmica e, consequentemente, o número de horas com o ar-condicionado ligado, é maior durante a semana mais quente do que na semana mais fria, indicando maior necessidade de refrigeração do que de aquecimento. O cenário que apresentou o melhor desempenho foi o cenário 2 (C2): uma redução de 66,7% da carga térmica em relação ao caso base (CB) para a semana mais fria e de 7,8% para a semana mais quente. O C1 apresentou reduções de 59,3% e 6,5% para a semana mais fria e a semana mais quente, respectivamente.

Para uma análise mais aprofundada, são apresentadas a temperatura do ar no interior da sala, a temperatura externa, a carga térmica de resfriamento e aquecimento e a taxa de renovação de ar, que indica os momentos em que as janelas são abertas para as semanas selecionadas.

Figura 2 - Caracterização do comportamento térmico e energético do CB para a semana mais fria do inverno (a) e a semana mais quente do verão (b).



(a)

(b)

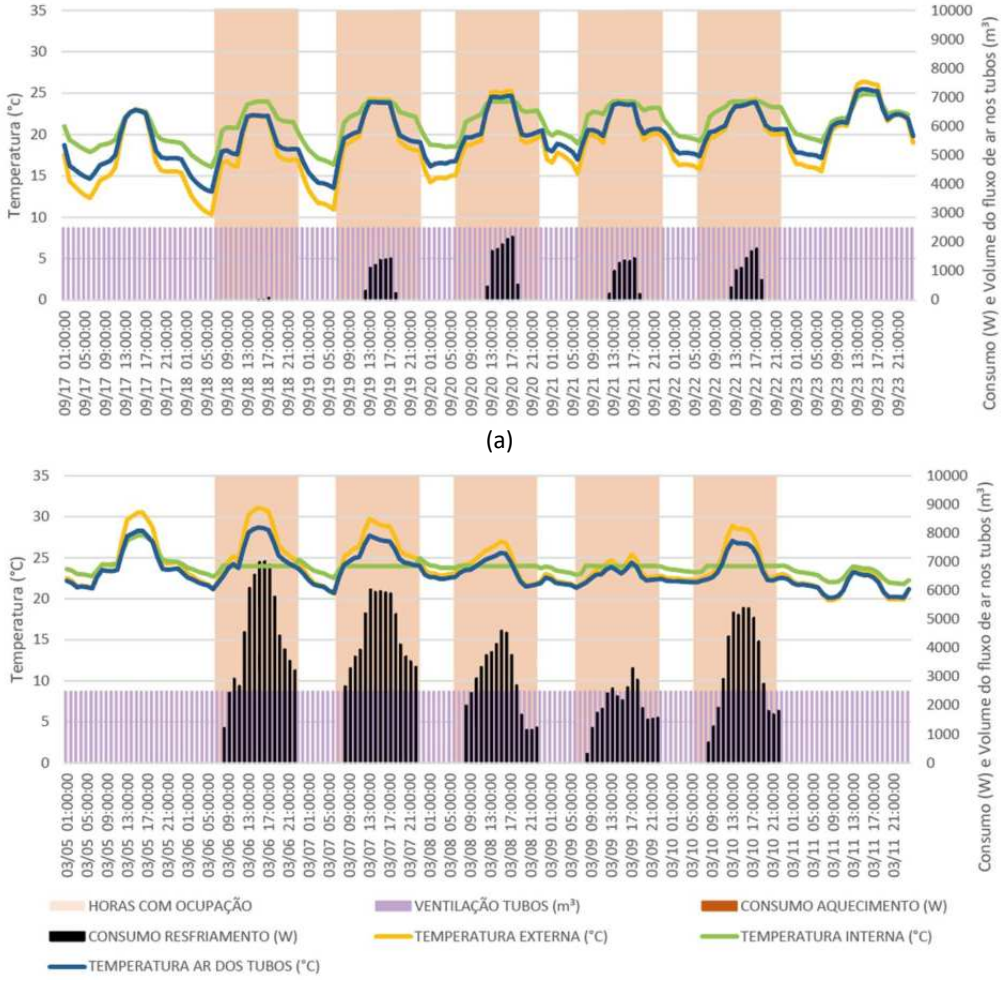
Fonte: As autoras.

Os resultados para o C1 apontam que apenas a ventilação proveniente dos tubos enterrados não é suficiente para a climatização da sala de aula, sendo necessário a utilização do ar-condicionado durante todo o período de ocupação para a semana mais quente (Figura 3b). Entretanto, a carga térmica de resfriamento do ar-condicionado foi menor ao se comparar a mesma semana do CB, evidenciando que os permutadores podem ser mais eficazes do que a ventilação natural pelas janelas para manutenção das condições de conforto determinadas.

Durante a semana mais fria (Figura 3a), a temperatura do ar na saída dos tubos proporciona um amortecimento em relação à temperatura externa do ar quando esta última se encontra inferior a aproximadamente 21°C: fenômeno que acontece principalmente à noite. Nessas ocasiões, a temperatura do ar na saída dos tubos é superior à temperatura externa do ar. Durante os horários de ocupação, o amortecimento da temperatura nos tubos é menor, havendo um aumento máximo de 1,5°C em relação ao ar externo. Com isso, infere-se que a ventilação geotérmica seria mais bem aproveitada para aquecimento durante os dias mais frios. Ainda assim, a tecnologia proporciona uma redução do número de horas em que o ar-condicionado é ligado para resfriamento e da respectiva carga térmica.

No caso da semana mais quente (Figura 3b), o amortecimento da temperatura do ar na saída dos tubos é quase nulo em relação ao ar externo durante os horários de ocupação. Durante os horários de ocupação, apesar de a temperatura do ar nos tubos ainda ser elevada (atingindo 28°C), ocorre um amortecimento máximo de 2,3°C. O ar-condicionado é ligado durante todo o período de ocupação, porém, a carga térmica de resfriamento é menor do que para o CB, indicando uma contribuição do permutador para redução da temperatura interna da sala. O C2, por sua vez, apresentou uma menor carga térmica de resfriamento nas primeiras horas do dia, ao comparar com o mesmo período do C1. Isso ocorre devido à ventilação noturna, que retira o calor do edifício durante a noite, deixando-o com menor carga térmica ao se iniciar o dia. No entanto, a redução da temperatura da sala durante a noite para um valor inferior a 18°C levou à necessidade de aquecimento na primeira hora ocupada do dia mais frio (Figura 4a). O aumento da temperatura do ar interno da sala devido à ocupação e ao aumento da temperatura externa do ar, no momento seguinte, eliminaram a necessidade de aquecimento. A abertura das janelas durante a noite, fez com que a temperatura interna do ar da sala quase se igualasse à temperatura do ar na saída dos tubos. A carga térmica de resfriamento para a semana mais fria do C2 foi inferior à do C1.

Figura 3: Caracterização do comportamento térmico e energético do C1 para a semana mais fria do inverno (a) e a semana mais quente do verão (b).



(a)

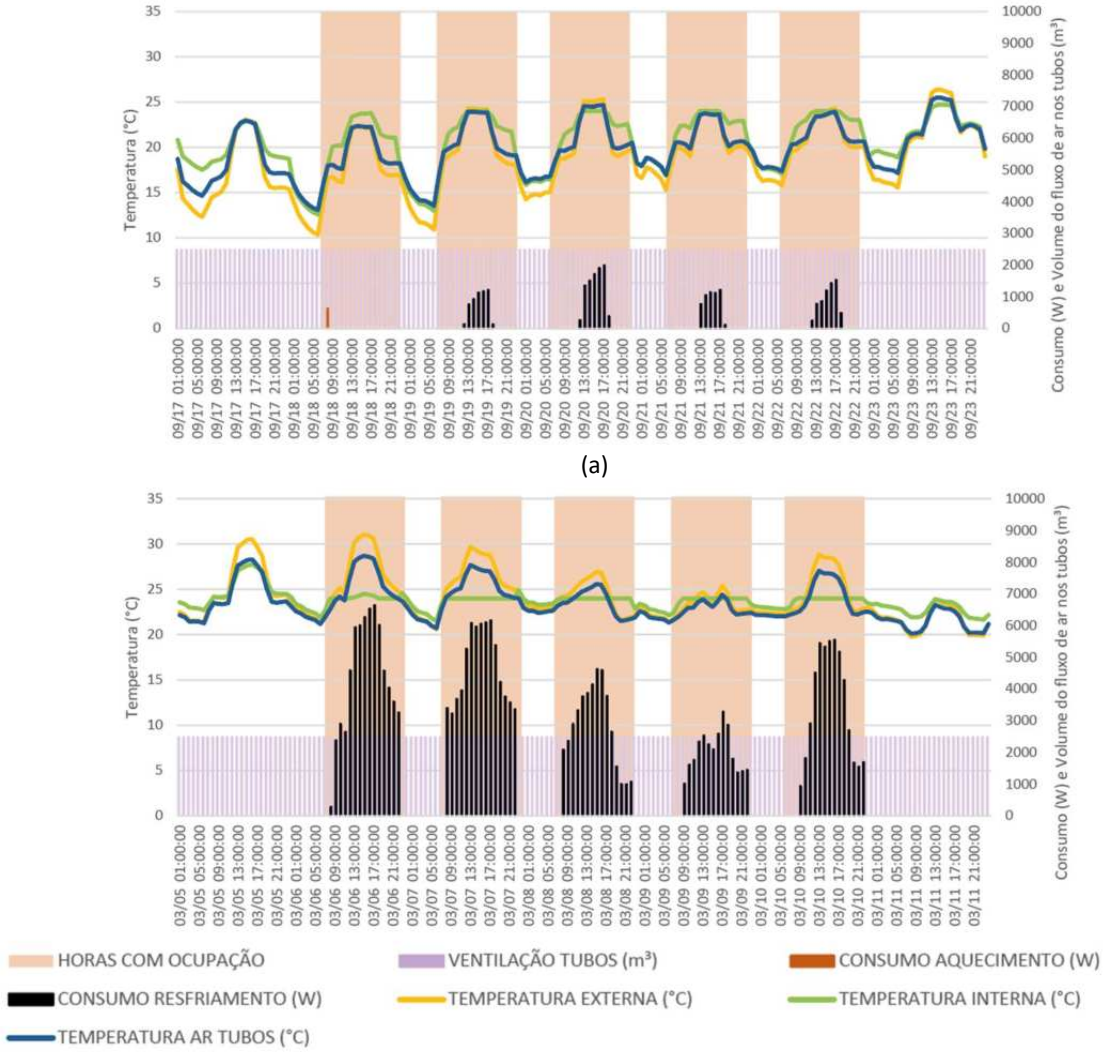
(b)

Fonte: As autoras.

Durante a semana mais quente do ano (Figura 4b), observa-se um comportamento similar da temperatura do ar externo e da temperatura do ar na saída dos tubos durante os horários sem ocupação. Os valores se aproximam da temperatura externa do ar, mostrando um amortecimento pequeno da temperatura do ar na saída dos tubos. Durante os horários de ocupação, há um amortecimento máximo de 2,3°C desta última em relação à temperatura do ar

externo, indicando um potencial de resfriamento do permutador de calor. No entanto, em grande parte dos horários de ocupação, a temperatura do ar na saída dos tubos é superior a 24°C, indicando que a tecnologia isolada não é capaz de proporcionar conforto térmico nas condições estabelecidas, mas que pode contribuir para uma redução da carga térmica.

Figura 4: Caracterização do comportamento térmico e energético do C2 para a semana mais fria do inverno (a) e a semana mais quente do verão (b).



(a)

(b)

Fonte: Autoras.

Quando se analisa a carga térmica anual total, conclui-se que o melhor caso é o cenário 2 (uma redução de 3,3% em relação ao CB). O C1 proporcionou uma redução de apenas 0,5%, no entanto é o melhor caso do para o aquecimento, com uma carga térmica nula (Tabela 3).

Tabela 3: Carga térmica anual de resfriamento e aquecimento dos casos simulados.

Caso simulado	Carga térmica de aquecimento (kWh/m²/ano)	Carga térmica de resfriamento (kWh/m²/ano)	Carga térmica total (kWh/m²/ano)
CB	0,1	64,6	64,7
C1	0	64,3	64,3
C2	0,1	62,4	62,5

Fonte: As autoras.

Conclusões

Ao investigar o desempenho termoenergético do permutador de calor, pode-se concluir que essa tecnologia é pouco eficaz para salas de aula do edifício estudado, considerando-se um cenário de mudanças climáticas para Viçosa-MG. Nessa pesquisa, não foi realizada uma análise de viabilidade econômica de implementação da tecnologia, mas estima-se que uma redução máxima de 3,3% na carga térmica total de resfriamento e aquecimento em relação ao caso base, com ventilação híbrida (ar-condicionado e ventilação natural pelas janelas), não justifica a implementação de um permutador de calor e de um equipamento de ar-condicionado para o edifício, se este último, sozinho, atente satisfatoriamente as cargas de pico – como foi o caso. Para confirmação dessa hipótese, é necessário desenvolver um estudo mais abrangente, envolvendo uma análise econômica que considere os custos de implementação da tecnologia.

No entanto, supõe-se que o caso da combinação da ventilação noturna com o permutador de calor (C2) pode ser aprimorado. A ventilação noturna poderia ser empregada de forma seletiva, de modo a evitar que fosse necessário ligar o ar-condicionado para aquecimento no início da manhã. Além disso, essa pesquisa não analisou diferentes configurações de operação do permutador de calor. Em alguns momentos, a tecnologia pode estar funcionando para aumentar a carga térmica de resfriamento. Deste modo, sugere-se para pesquisas futuras investigar a ventilação noturna seletiva e diferentes configurações de operação do permutador de calor.

Além disso, deve-se ressaltar que a pesquisa foi desenvolvida para um cenário de mudanças climáticas, que não apresenta uma previsão do futuro, mas uma condição possível baseada em uma narrativa socioeconômica que leva a um determinado nível de emissão de gases do efeito estufa (GEE). O IPCC apresenta outros cenários, baseados em níveis inferiores ou superiores de emissão de GEE, que podem conduzir a resultados diferentes dos apresentados. É fato, porém, que as mudanças climáticas vêm contribuindo para um aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa para o caso de Viçosa, como levantado por Silva *et al.* (2024). É consistente então, que, mesmo que atualmente Viçosa esteja classificada como pertencente a uma zona de clima frio (ZB 2M), para ambientes de elevada carga térmica como as salas de aula e um cenário de mudanças climáticas, a necessidade de aquecimento do ambiente seja reduzida.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto 406426/2022-8 - Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico", com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Códigos de Financiamento 88887.677871/2022-00 e 88881.933568/2024-01, e (parcialmente) apoiado pelo Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações** – Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. Rio de Janeiro, 2024, 21p.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. ***The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning*.** 2020.

BRUM, Ruth da Silva; LABAT, Matthieu; LORENTE, Sylvie. Improving the performances of earth air heat exchangers through Constructal design. **International Journal of Energy Research**, p. 1-12, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/er.4835.

IPCC, Working Group II. **Technical Summary**. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate ChangeClimate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge; New York, 2022.

ISO. **ISO 15927-4: 2005**: Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data / Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling, 2005.

RODRIGUES, Eugénio; FERNANDES, Marco S.; CARVALHO, David. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application**. Building and Environment**, *[S. l.]*, v. 233, p. 1–13, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104.

SANTANA, Bruno Garcia; RIBEIRO, Mateus Eduardo Santos. **Avaliação de desempenho de um trocador de calor ar-solo em clima tropical.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SOUZA, Pedro Carmo e. **Effect of natural ventilation on airbone disease infection risk in lecture halls**. Orientadora: Joyce Correna Carlo. 2024. 111 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2024.

SILVA, Mario Alves da.; PERNIGOTTO, Giovanni; GASPARELLA, Andrea; CARLO, Joyce C. Towards Climate, Bioclimatism, and Building Performance - A Characterization of the Brazilian Territory from 2008 to 2022. **Buildings**, v. 14, n. 8, p. 2568, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings14082568.

STONE, Brian *et al.* Climate change and infrastructure risk: Indoor heat exposure during a concurrent heat wave and blackout event in Phoenix, Arizona**. Urban Climate**, [S. l.], v. 36, p. 1–10, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100787.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus: whole building energy simulation program**. Versão 22.1.0. Disponível em: https://energyplus.net. Acesso em 16 de setembro de 2024.