ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Investigação da influência da incorporação de PCMs no conforto térmico em escritórios no Brasil

Investigation of the influence of the incorporation of PCMs on thermal comfort in an office building in Brazil

Érika Adams
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | erika.adams@ufv.br
Caique Alcanfor Ribeiro
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | caique.ribeiro@ufv.br
Matheus Menezes Oliveira
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | matheus.menezes@ufv.br
Caio de Carvalho Lucarelli
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | caio.lucarelli@ufv.br
Joyce Correna Carlo
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | joycecarlo@ufv.br
Beatryz Cardoso Mendes.
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | beatryz.mendes@ufv.br

Resumo

Os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) potencialmente aumentam a inércia térmica de ambientes quando a adoção de materiais pesados, com alta capacidade térmica, é restrita. Ademais, sua utilização pode promover atraso e amortecimento térmico e ampliar o conforto térmico de usuários. Esse artigo objetiva investigar a influência mensal de PCMs em paredes internas de uma tipologia de escritório. Os resultados foram obtidos a partir de simulação termoenergética no EnergyPlus e utilizou um ambiente teórico típico de escritório com aproximadamente 50m² e naturalmente ventilado. Os PCMs avaliados são comercializados pela Rubitherm e apresentam temperaturas de mudança de fase entre 18 e 35°C. Foi analisado o impacto de cada PCM nos níveis de conforto mensal dos usuários em seis cidades nas oito Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBs). Os resultados indicaram uma maior redução das horas em desconforto térmico para o PCM com temperatura de mudança de fase de 21°C em cidades das ZBs 1 a 5. Também foi possível concluir que o efeito do PCM se torna mais expressivo quando as temperaturas médias e mínimas médias mensais alcançam valores próximos ou abaixo de 20°C.

Palavras-Chave: Material de Mudança de Fase. PCM. EnergyPlus. Conforto térmico adaptativo.

Como citar:
ADAMS, E. et. al. Investigação da influência da incorporação de PCMs no conforto térmico em escritórios no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

Phase Change Materials (PCMs) potentially increase the thermal inertia of environments when the adoption of heavy materials with high thermal capacity is restricted. Additionally, their use can promote thermal delay and damping and enhance the thermal comfort of users. This article aims to investigate the monthly influence of PCMs in internal walls of an office typology. The results were obtained from thermo-energetic simulation in EnergyPlus, using a theoretical office environment of approximately 50m², naturally ventilated. The PCMs evaluated are marketed by Rubitherm and have phase change temperatures between 18 and 35°C. The impact of each PCM on the monthly comfort levels of users was analyzed in six cities across the eight Brazilian Bioclimatic Zones (BZs). The results indicated a greater reduction in hours of thermal discomfort for the PCM with a phase change temperature of 21°C in cities within BZs 1 to 5. It was also concluded that the effect of the PCM becomes more significant when the average and minimum average monthly temperatures reach values close to or below 20°C.

Keywords: Phase Change Material. PCM. EnergyPlus. Adaptive thermal comfort.

INTRODUÇÃO

Em um contexto de aquecimento global onde há uma previsão de aumento de 75% do consumo de energia até 2070 [1] faz-se necessário investir em tecnologias que mitiguem os efeitos das altas temperaturas no ambiente construído. Nesse contexto, há a necessidade de aumentar o conforto térmico de forma passiva nos ambientes de permanência prolongada e diminuir o consumo de energético das edificações. Apesar dos avanços relacionados ao aumento da eficiência energética, o setor comercial apresentou, entre os anos de 2013 e 2022, um aumento de 14,7% nesse consumo, totalizando em 14,1% do consumo total de energia elétrica no país [2].

Com o aumento da racionalização da construção civil, principalmente no setor comercial, passou-se a utilizar materiais mais leves, como os fechamentos em *drywall* e *steel frame*. Contudo, grande parte dos materiais que seguem esse padrão apresentam baixa capacidade térmica, o que torna os ambientes mais suscetíveis às mudanças de temperatura, aumentando o consumo energético e o desconforto dos usuários no interior dessas edificações [3].

A baixa capacidade térmica está relacionada ao efeito da inércia térmica, que é uma estratégia passiva de condicionamento das edificações, sendo possível observar essa propriedade em construções mais antigas, as quais eram construídas muitas vezes com materiais pesados, como alvenaria e pedra. No entanto, essa característica tem sido cada vez menos presente nas edificações contemporâneas.

Nesse contexto, os materiais de mudança de fase (em inglês *Phase Change Material* - PCM), podem ser adicionados a novas edificações e em *retrofits*, proporcionando efeitos semelhantes aos obtidos por materiais espessos e pesados, porém, com uma redução de até 14 vezes no peso e volume se comparados aos materiais tradicionalmente associados a alta capacidade térmica [4] [5] [6] [7].

Em essência, os PCMs são materiais que atuam de forma passiva na edificação, armazenando e liberando energia por meio da mudança de fase, de forma a promover atraso térmico em ambientes internos e diminuição da amplitude térmica. Trata-se então de um processo cíclico ocorrido em duas etapas: a absorção de calor, em que o

material passa por um processo de fusão, e a liberação dessa energia, solidificando novamente o PCM. Assim, pode-se relacionar essas etapas diretamente à mudança de temperatura de fase (TMF) [8].

Quando aplicados de forma correta e em locais com características climáticas propícias para o seu uso, os PCMs são capazes de melhorar as condições de desempenho térmico, aumentando as horas de conforto dos usuários de forma passiva, reduzindo a necessidade da utilização de climatização artificial [5].

No entanto, os PCMs apresentam algumas limitações quando analisadas suas condições de uso para o Brasil. Conforme observado por [6], os PCMs apresentam maior número de pesquisas em regiões localizadas no Hemisfério Norte, melhorando suas condições a medida do aumento de sua latitude. Os estudos mais abrangentes sobre a incorporação de PCMs em edificações para os climas brasileiros foram desenvolvidos por [6] [9].

Além desses autores, Almeida, Brandalise e Mizgier [10] estudaram, a partir de simulações no EnergyPlus, a influência do PCM no conforto térmico de uma habitação de interesse social pré-fabricada em três cidades brasileiras, Brasilia (DF), Palmas (TO) e Santa Maria (RS). Os autores classificaram os resultados para conforto como satisfatórios para Brasília e Palmas, com Brasília apresentando melhores resultados, obtendo quase 100% de horas em conforto com a aplicação do PCM 22. Já em Palmas, foi analisada a incorporação do PCM 25 na cobertura e paredes, apresentando 82% em horas de conforto. Por fim, Santa Maria teve como resultado apenas 8% das horas de conforto.

[11] avaliaram a incorporação de PCMs em edificações para 25 cidades em todo o mundo, com destaque para Brasília, considerando a classificação climática de Köppen–Geiger. De forma semelhante,[12] avaliaram 57 cidades, incluindo Brasília, Fortaleza e Manaus. No caso de [11], os autores concluíram que os benefícios da utilização de PCMs em climas tropicais foi insignificante, salvo Brasília, com redução de até 49% no consumo de energia para PCMs com temperatura de mudança de fase (TMF) de 25°C. Os estudos mencionados somados, apresentam análises para apenas 10 cidades brasileiras. Além disso, não houve variações nas condições de contorno, como análise para diferentes orientações solares e condições de ventilação natural. Em relação aos parâmetros de instalação, não houve variação entre a camada de instalação, com parte da análise realizada com espessuras da camada de PCM entre 20cm e 35cm, o que excede as dimensões tradicionalmente utilizadas em paredes nas edificações brasileiras. Em nenhuma das pesquisas foi apresentada uma análise aprofundada e quantitativa em relações aos parâmetros climáticos, em que apenas a temperatura do ar e radiação foram consideradas.

Diante disso, torna-se escassa a disponibilidade de artigos publicados relacionados à incorporação de PCMs em climas quentes e úmidos, como maior parte do Brasil [12] [13].

Mesmo em pesquisas que investigaram o uso de PCMs para o Brasil, como [6] [14] [12] o material foi analisado para um ano completo, desconsiderando as sazonalidades no desempenho geral. Logo, é necessário maiores investigações acerca do desempenho de PCMs em edificações brasileiras que levem em consideração essas características.

OBJETIVO GERAL

Investigar a influência mensal da incorporação de PCMs no conforto térmico em um modelo de edificação de escritório no Brasil.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método utilizado apresenta uma abordagem que mescla aspectos qualitativos e quantitativos, dividido em: (1) modelagem da edificação; (2) escolha do tipo de PCM; (3) escolha das cidades analisadas; e (4) simulação termoenergetica.

SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

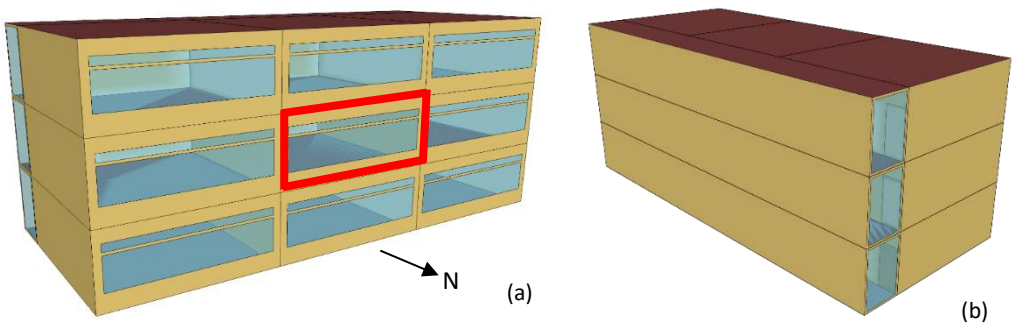
O trabalho realizou simulações termoenergéticas no EnergyPlus versão 9.6.0 para examinar os efeitos passivos mensais dos Materiais de Mudança de Fase (PCM's) em edificações.

O EnergyPlus é uma ferramenta amplamente utilizada para simulação termoenergética de edificações, utiliza como método de cálculo para simulações de PCMs as diferenças finitas (CondFD) que considera a relação entre condutividade térmica e temperaturas em regime transiente de trocas de calor [15].

DEFINIÇÃO DO MODELO, PROPRIEDADES CONSTRUTIVAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O ambiente de escritórios simulado no caso-base, que foi desenvolvido por [16], possui uma área de piso de 49,7m², com um pé-direito de 2,90m e janelas que ocupam 10,3m², correspondendo a 50,3% da área da fachada. Neste modelo, não foram utilizados materiais de mudança de fase (PCM). Foram consideradas 6 pessoas dentro da zona. O ambiente de interesse, destacado em vermelho na Figura 1 a e b, está isolado tanto do solo quanto da cobertura, por zonas adjacentes com dimensões e características idênticas, de forma a diminuir as condições de contorno e as variações térmicas causadas por essas, assim a única ação sofrida no ambiente é a do PCM instalado.

Figura 1 - (a) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b) Edificação simulada, fachada posterior



Fonte: OLIVEIRA (2023).

As paredes internas e externas são leves, em *Drywall* composto por camadas homogêneas de placa cimentícia de 2,5cm, lã de rocha de 7cm e gesso de 1,5cm para criar um ambiente com baixa capacidade térmica, conforme recomendado por [10] [6] [17]. Além disso, paredes leves implicam em uma maior percepção da inércia térmica gerada pelos PCMs, [10] [6] [17]

Os parâmetros adotados na simulação do CB são: Densidade de Carga Interna de Iluminação e Equipamentos (W/m²): 28,62; Transmitância Térmica das Paredes (W/m²K): 0,45; Capacidade Térmica das Paredes (kJ/m²K): 33; Transmitância Térmica do Teto/Piso (W/m²K): 3,73; Capacidade Térmica do Teto/Piso (kJ/m²K): 220; Percentual de abertura em relação à fachada (%): 50,3; Fator Solar do Vidro: 0,80; Absortância das Paredes (α): 0,50.

A esquadria inferior possui 8,40m², com 45% de abertura para ventilação e a superior 1,93m², com 90% de abertura para ventilação. Considerou-se que a esquadria superior permanece aberta entre as 19h e 7h independente da temperatura externa, e a inferior abre quando a temperatura externa atinge 20°C e se fecha gradativamente de acordo com o aumento da temperatura, estando totalmente fechada ao atingir 26°C.

TIPOS DE PCM

Os PCMs selecionados são fabricados pela empresa Rubitherm® Technologies GmbH [18], tendo sido escolhidos os foram escolhidos PCMs orgânicos da linha RT identificados como HC por possuírem maior capacidade de armazenamento de calor latente e TMF mais estável (RUBITHERM, 2022). Estes apresentam resultados positivos para aumento do conforto e eficiência energética em edificações nas pesquisas de [19] [20] [21] [14]. Logo, para esse trabalho, foram selecionados os PCMs orgânicos RT18HC, RT21HC, RT22HC, RT25HC, RT28HC e RT35HC. Os parâmetros de instalação do material seguiram as recomendações de Oliveira (2023). As propriedades dos PCMs selecionados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades dos PCMs

Nome do PCM	Intervalo de fusão e pico de temperatura (°C)	Intervalo de solidificação e pico de temperatura (°C)	Capacidade de armazena-mento de calor (kJ/kg)	Calor específi-co (kJ/kg·K)	Condutivi-dade térmica em ambas as fases (W/(m·K))	Densidade no estado sólido (kg/l)	Densidade no estado líquido (kg/l)
RT21HC	20/23 e 21	21/19 e 21	190	2	0,2	0,88	0,77
RT22HC	20/23 e 22	23/20 e 22	190	2	0,2	0,76	0,70
RT25HC	22/26 e 25	26/22 e 25	210	2	0,2	0,88	0,77
RT28HC	27/29 e 28	29/27 e 27	250	2	0,2	0,88	0,77
RT35HC	34/36 e 35	36/34 e 35	240	2	0,2	0,88	0,77
RT44HC	41/44 e 43	44/40 e 43	250	2	0,2	0,80	0,70

Fonte: Adaptado de [18].

CIDADES AVALIADAS

Para esta análise, foram selecionadas seis cidades brasileiras com temperaturas predominantemente frias no contexto climático brasileiro: Maria da Fé (ZB1) e Bento Gonçalves (ZB1), intermediárias: Campo Grande (ZB6) e Montes Claros (ZB6), e predominantemente quentes: Imperatriz (ZB7) e Teresina (ZB7). Os arquivos climáticos utilizados foram o INMET de 2016.

DADOS DE SAÍDA DE SIMULAÇÃO

Em todos os casos simulados, foram coletados como saída os dados de temperatura externa e interna do ar, temperatura operativa interna e fluxo de ar através das aberturas. Essas variáveis são essenciais para determinar o PHC (porcentual de horas de conforto), conforme definido pelas diretrizes da ASHRAE 55 [22]. Os resultados de conforto foram avaliados apenas durante o período das 8h às 18h, que corresponde ao horário padrão de ocupação de escritórios.

Além das variáveis de saída, foi incluído nos gráficos as temperaturas de bulbo seco externas: (1) médias máximas, obtidas a partir das médias das máximas temperaturas diárias do respectivo mês; (2) médias de todas as temperaturas mensais; e (3) médias mínimas, obtidas a partir das médias das mínimas temperaturas diárias do respectivo mês, obtidas dos arquivos climáticos utilizados.

RESULTADOS

As Figuras 1 a 6 apresentam os resultados de conforto de cada PCM de acordo com os meses do ano para as seis cidades analisadas. Destaca-se que os dados de conforto apresentados foram obtidos a partir da subtração do caso base (CB), sem PCM, com casos com PCMs (PCM 18, 21, 22, 25, 28 e 35). No segundo eixo vertical (a esquerda), são apresentadas as médias das temperaturas máximas, as médias e as médias das temperaturas mínimas. Na parte superior do gráfico, juntamente dos nomes das cidades, é apresentada a temperatura média anual.

A análise das Figuras 1 a 6 será dividida em três grupos: Grupo 1, Maria da Fé e Bento Gonçalves; Grupo 2, Campo Grande e Montes Claros; e Grupo 3, Imperatriz e Teresina. De maneira geral, o desempenho dos PCMs foi superior no grupo 1, com média de aumento do conforto de 21,9%, seguido dos grupos 2, 8,3% e 3, -2,2%. Os resultados encontrados se assemelham aos de [6] [8] [14], os quais obtiveram melhor desempenho de PCMs para cidades brasileiras mais frias, localizadas das zonas bioclimáticas 1 a 5 (ABNT, 2005).

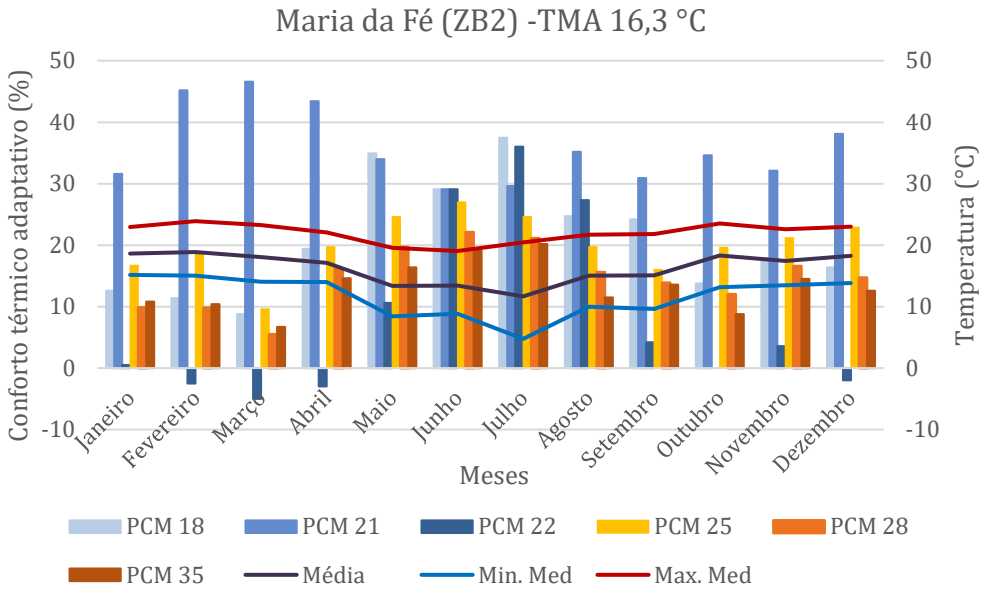
Em relação aos tipos de PCM, o PCM 21 apresentou o melhor desempenho para todas as cidades, obtendo médias anuais de 35,9% para Maria da Fé, 32,5% para Bento Gonçalves, 14,5% para Campo Grande, 14% para Montes Claros, 0,6% para Imperatriz e -0,6% para Teresina, baseado na ASHRAE 55 (2013).

GRUPO 1

Conforme mencionado, as cidades de Maria da Fé (FIGURA 1) e Bento Gonçalves (FIGURA 2), apresentaram os melhores resultados dentre as cidades analisadas. Maria

da Fé registrou um aumento médio de 18,8% no PHC ao longo do ano, já ao considerar somente o PCM 21 houve um aumento médio de 35,9%, com temperaturas mínimas médias sempre abaixo de 15°C e temperaturas médias abaixo de 18°C (FIGURA 1).

Figura 1: Gráfico de Maria da Fé

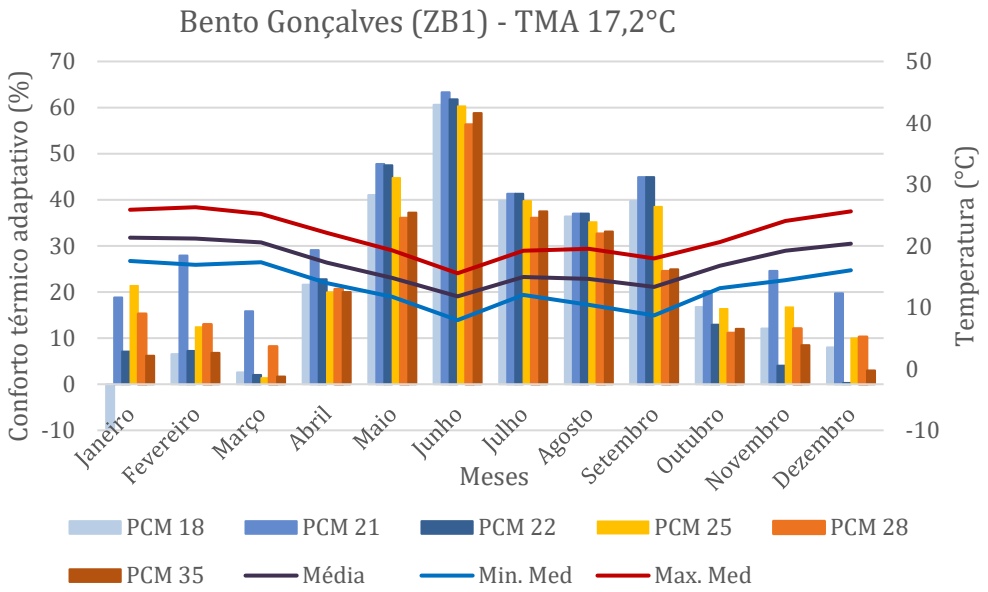


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os demais PCMs apresentaram melhor desempenho para os meses de maio a setembro, média de 30,1% para PCM 18, 21,4% para PCM 22, 22,4% para PCM 25, 18,5% para PCM 28, 16,2% para PCM 35.

Já para Bento Gonçalves, foram encontradas variações entre o desempenho dos PCMs ao longo dos meses do ano. O material apresentou um aumento médio de 25,0% durante o ano, sendo que o PCM 21 apresentou uma melhora de 32,5%, comparado a média de 42,7% nos meses de maio a setembro (FIGURA 2).

Figura 2: Gráfico de Bento Gonçalves



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As diferenças sazonais em Bento Gonçalves podem ser explicadas pelo clima da cidade, com temperaturas médias mínimas e médias superiores a Maria da Fé.

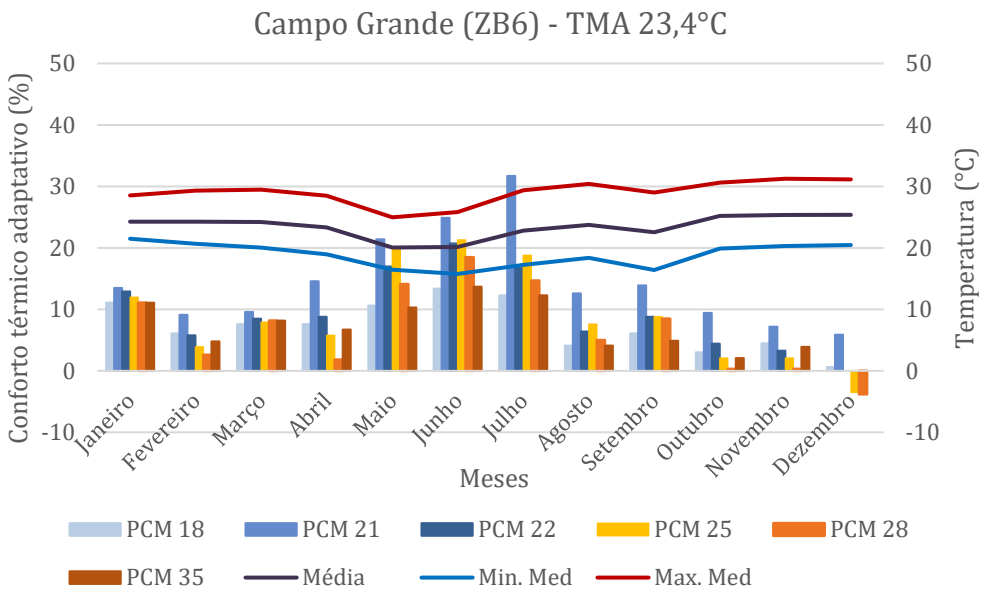
Para as cidades do Grupo 1, foi possível observar que temperaturas médias abaixo de 20°C proporcionaram os melhores desempenhos dos ambientes em relação ao conforto. Esse cenário é corroborado com o desempenho constante dos PCMs para Maria da Fé e desempenho concentrado nos meses de maio a setembro para Bento Gonçalves.

GRUPO 2

Em relação ao grupo 2, a análise para as cidades de Campo Grande e Montes Claros, apresentaram um desempenho inferior do observado no grupo 1. Esse resultado já foi discutido anteriormente e se alinha com pesquisas brasileiras para climas semelhantes.

Para Campo Grande (FIGURA 3) o PCM 21 teve melhorias expressivas no conforto térmico durante o inverno, chegando a mais de 20%, com pico de 30% em julho. Nos demais meses melhorias foram menos significativas, entre 5% e 15%.

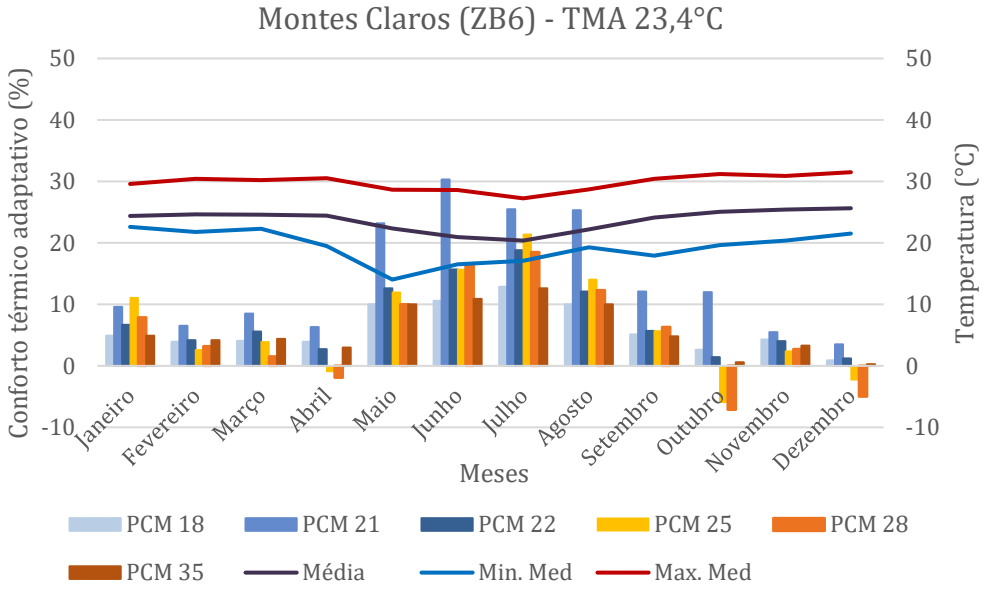
Figura 3: Gráfico de Campo Grande



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os resultados em Montes Claros seguiram desempenho semelhante aos de Campo Grande, com melhores resultados para o PCM 21 e nos meses de maio a agosto (FIGURA 4).

Figura 4: Gráfico de Montes Claros



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

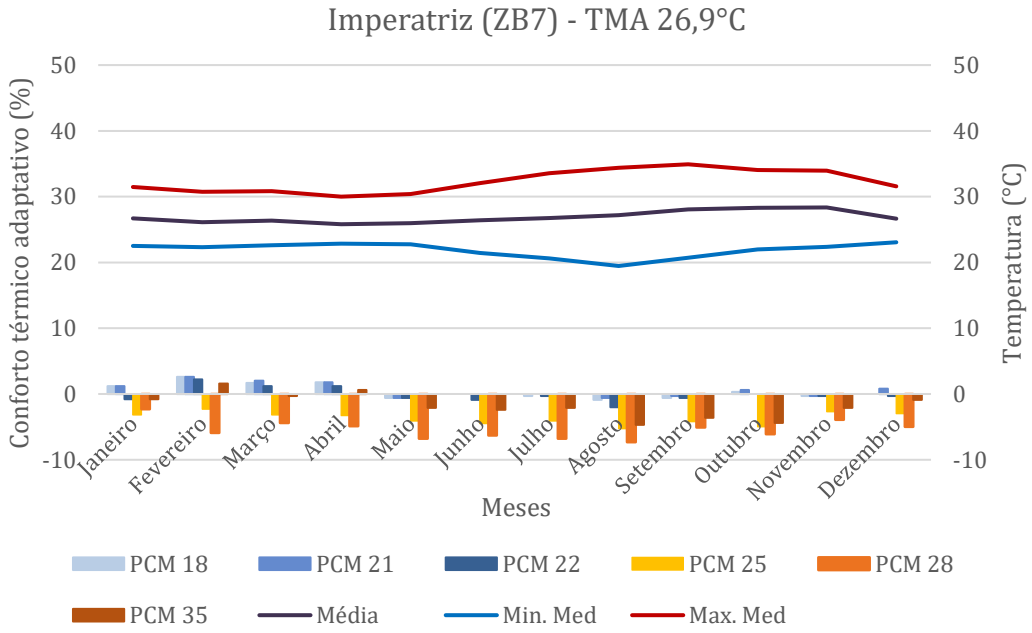
Para as cidades do Grupo 2, foi possível observar que a mesma tendencia observada no grupo 1 se repetiu. Temperaturas médias próximas ou abaixo de 20°C proporcionaram os melhores desempenhos dos ambientes com PCM em relação ao conforto.

Se consideradas as médias anuais das cidades do Grupo 2, o uso de PCMs apresentou resultados limitados, com aumento do PHC anual de 8,9% e 7,6% respectivamente. Novamente, esse resultado é referendado pela bibliografia. Porém, uma análise sazonal permite observar que a análise do desempenho médio anual pode mascarar os resultados obtidos nos meses com temperatura média próxima ou abaixo de 20°C.

GRUPO 3

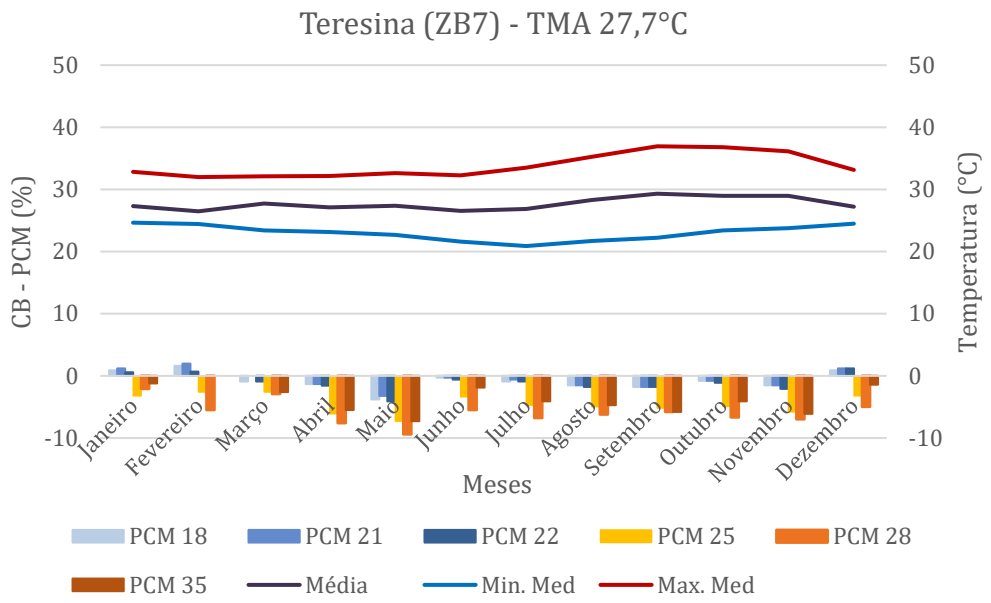
O grupo 3, composto pelas cidades de Imperatriz e Teresina apresentou, de maneira geral, piora no PHC com o uso do PCM. Em Imperatriz e Teresina, o uso dos PCMs 25, 28 e 35 piorou o PHC em todos os meses do ano. Mesmo os PCMs 18 e 21, não apresentaram melhorias no PHC para todos os meses do ano. Nos meses que melhoraram o conforto, apresentaram melhoria limitada, com aumento mensal máximo do PHC de 2,6% e 2% (FIGURA 5 e 6).

Figura 5: Gráfico de Imperatriz



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Figura 6: Gráfico de Teresina



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As cidades do grupo 3, são caracterizadas por temperaturas médias mensais acima de 25,8°C. Mesmo as temperaturas médias mínimas não atingem valores inferiores a 20°C. Logo, diferentemente do grupo 1, com aumento do PHC para todo o ano e do grupo 2, com aumento do PHC para os meses do inverno, o uso de PCMs para as cidades do grupo 3 não é recomendado, mesmo considerando as sazonalidades.

A justificativa encontrada para esse cenário está nas temperaturas médias mensais, que devem ser próximas ou abaixo de 20°C para resultar em aumentos do PHC a partir da incorporação de PCMs. Além disso, as cidades dos grupos 1 e 2 tendem a melhorias acima de 20% no PHC para temperaturas médias mínimas próximas ou abaixo de 19°C.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência da incorporação de diferentes PCMs no conforto térmico em um modelo de edificação de escritório em seis cidades do Brasil. A pesquisa foi realizada a partir de simulação termoenergética no EnergyPlus e analisou os efeitos passivos mensais de seis PCMs orgânicos.

As análises destacaram a importância de considerar as condições climáticas e sazonalidades locais, além da temperatura de mudança de fase (TMF) para a utilização de PCMs como forma de melhorar a porcentagem de horas em conforto térmico (PHC). Para todas as cidades analisadas, o PCM com TMF de 21°C apresentou os melhores desempenhos, com melhoria no PHC acima de 30% nos melhores casos

Em relação ao desempenho relacionado as cidades, em regiões com temperaturas médias e mínimas médias mais baixas e amplitudes térmicas diárias relevantes, como

Maria da Fé e Bento Gonçalves, foram observados benefícios substanciais, com aumento do PHC acima de 20% quando utilizados os PCMs.

Como cenário intermediário, as cidades de Campo Grande e Montes Claros, apresentaram melhorias no PHC nos meses mais frios, de maio a setembro, quando as temperaturas médias ficam próximas ou abaixo de 20°C. As cidades de Imperatriz e Teresina, o desempenho foi considerado limitando, apresentando piora no PHC para quase todos os meses e TMF dos PCMs.

Logo, é possível concluir que o efeito do PCM se torna mais expressivo quando as temperaturas médias e mínimas médias mensais alcançam valores próximos ou abaixo de 20°C, independentemente da cidade analisada. Entretanto, uma análise com mais cidades e mais tipos de PCM é necessária para confirmar os resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Cientifica (PIBIC) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico" (CNPQ) – aviso de financiamento N° 59/2022 – sob o código de processo406426/2022-8.

REFERÊNCIAS

[1] International Energy Agency, IEA. Energy Technology Perspectives 2020. DOI: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020.

[2] Empresa De Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2023: Ano Base 2022. DOI: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023. Acesso em: 06 mai. 2024.

[3] Brito, A. Contribuição Da Inércia Térmica Na Eficiência Energética De Edifícios De Escritórios Na Cidade De São Paulo. 2015. Tese (Doutorado Em Engenharia Mecânica De Energia De Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade De São Paulo, São Paulo, 2015. DOI:10.11606/T.3.2016.tde-13062016-102613. Acesso em: 07 de março de 2024.

[4] Huang, X.; Alva, G.; Jia, Y.; Fang, G. Morphological Characterization And Applications Of Phase Change Materials In Thermal Energy Storage: A Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, V. 72, P. 128–145, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.048.

[5] Wahid, M. A.; Hosseini, S. E.; Hussen, H. M.; Akeiber, H. J.; Saud, S. N.; Mohammad, A. T. An Overview Of Phase Change Materials For Construction Architecture Thermal Management In Hot And Dry Climate Region. Applied Thermal Engineering, V. 112, P. 1240–1259, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032.

[6] Brito, A.; Akutsu, M.; Salles, E.; Castro, G. Características Térmicas De Materiais De Mudança De Fase Adequados Para Edificações Brasileiras. Ambiente Construído, V. 17, N. 1, P. 125–145, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128.

[7] Song, M.; Niu, F.; Mao, N.; Hu, Y.; Deng, S. Review On Building Energy Performance Improvement Using Phase Change Materials. Energy And Buildings, V. 158, P. 776–793, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066.

[8] Pons, V.; Stanescu, G. Materiais Com Mudança De Fase: Análise De Desempenho Energético Para O Brasil. Parc, V. 8, N. 2, P. 127, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228.

[9] Fernando; Mariane Pinto Brandalise ; Martin Ordenes Mizgier. Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, v. 13, p. e022027–e022027, 2022. DOI: https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8666777.

[10] Marin, P.; Saffari, M.; Gracia, A.; Zhu, X.; Farid, M.; Cabeza, L.; Ushak, S. Energy Savings Due To The Use Of PCM For Relocatable Lightweight Buildings Passive Heating And Cooling In Different Weather Conditions. Energy And Buildings, V. 129, P. 274–283, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007.

[11] SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. Applied Energy, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107.

[12] Oliveira, R.; Gonzales, T.; Carvalho, M. Uso De PCM Para Edificações Em Região De Clima Quente: Uma Revisão Sistemática. Parc, V. 12, P. E021001, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066.

[13] OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C.; CARLO, J. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. Ambiente Construído, v. 22, p. 67-111, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610

[14] Oliveira, M. M., D.Sc. Investigação Da Influência Dos Materiais De Mudança De Fase No Conforto Térmico Em Modelo De Escritório Nos Climas Brasileiros. mbiente Universidade Federal De Viçosa, Fevereiro De 2023.

[15] ENERGYPLUS. Engineering reference: EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation - Engineering Reference U.S. Department of Energy, 2020.

[16] Oliveira, M.; Carlo, J. Avaliação Do Conforto Térmico E Renovação De Ar Em Ambientes Com Chaminés Solares. Ambiente Construído, V. 21, N. 1, P. 293-314, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100506.

[17] Solgi, E.; Hamedani, Z.; Fernando, R.; Karib, B.; Skates, H. A Parametric Study Of Phase Change Material Behaviour When Used With Night Ventilation In Different Climatic Zones. Building And Environment, V. 147, N. October 2018, P. 327–336, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031.

[18] RUBITHERM. PCM RT - LINE. Disponível em: https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt. Acesso em 09 de junho de 2024.

[19] Meng, E.; Yu, H.; Zhou, B. Study Of The Thermal Behavior Of The Composite Phase Change Material (PCM) Room In Summer And Winter. Applied Thermal Engineering, V. 126, P. 212–225, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110.

[20] Lee, K.; Medina, M.; Sun, X.; Jin, X. Thermal Performance Of Phase Change Materials (PCM)-Enhanced Cellulose Insulation In Passive Solar Residential Building

Walls. Solar Energy, V. 163, N. February, P. 113–121, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086.

[21] Sharma, V.; Rai, A. Performance Assessment Of Residential Building Envelopes Enhanced With Phase Change Materials. Energy And Buildings, V. 208, P. 109664, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109664.

[22] ANSI/ASHRAE Standard 55-2023 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Ansi.org. Disponível em: https://webstore.ansi.org/standards/ashrae/ansiashraestandard552023?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwxeyxBhC7ARIsAC7dS3-MvsJLoM4sfaG5yE-P-T-IutlDwQEiJypcnT9GprIxovsDdMyyMncaAnRkEALw_wcB. Acesso em: 26 jul. 2024.