XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável

Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Análise da incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCMs) em edificações de escritório naturalmente ventiladas para Viçosa/MG

Analysis of the incorporation of PCMs in naturally ventilated office buildings for Viçosa/MG

OLIVEIRA, Matheus Menezes
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | Brasil | matheus.meneses@gmail.com
LUCARELLI, Caio de Carvalho
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | lucarelli.caio@outlook.com
MARQUES, Raquel de Fátima Saith
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | Brasil | raquel.saith@ufv.br
MAGALHÃES, Thaís de Souza
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | Brasil | thais.s.magalhaes@ufv.br
PEREIRA, João Pedro Martins
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | Brasil | joao.pereira4@ufv.br
CARLO, Joyce Correna
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa/MG | Brasil | joycecarlo@ufv.br

Resumo

Os PCMs funcionam como materiais armazenadores de energia na forma de calor latente e possuem potencial para aumentar o conforto térmico de usuários e eficiência energética de edificações. O objetivo desse artigo é analisar o uso de PCMs para o conforto em escritórios na cidade de Viçosa/MG. Para isso, foi utilizada simulação no EnergyPlus para materiais disponíveis no mercado considerado suas variações de instalação e da geometria do ambiente. A incorporação de PCMs apresentou melhorias no conforto e o tipo do PCM e a capacidade térmica das paredes da edificação se mostraram os fatores de maior impacto no desempenho.

Palavras-chave: PCM. Escritório. Simulação Termoenergética. EnergyPlus. Conforto Térmico.

Como citar:

OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C. MARQUES, R.; MAGALHÃES, T.; PEREIRA, J.; CARLO, J. Análise da incorporação de PCMs em edificações de escritório naturalmente ventiladas para Viçosa/MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

Abstract

PCMs work as energy storage materials in the form of latent heat and present the prospect of increasing the user's thermal comfort and overall building energy efficiency. This paper examines the application of PCMs for achieving thermal comfort in an office space in Viçosa/MG. We employed thermal simulations using EnergyPlus and adopted market-ready materials altering diverse installation, application, and geometric parameters. The PCMs' incorporation enhanced thermal comfort in most cases. We also emphasize the PCM type and the thermal capacity of building walls as the factors with the greatest influence in the performance.

Keywords: PCMs. Office buildings. Thermo-energetic simulation. EnergyPlus. Thermal comfort.

INTRODUÇÃO

As edificações consomem mais de 30% da energia elétrica gerada no planeta e são responsáveis por um incremento no gasto de eletricidade médio de 2,5% ao ano desde 2010 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Há uma demanda energética significativa para climatização de edificações comerciais com o intuito de proporcionar conforto térmico aos usuários nos países em desenvolvimento, especialmente em locais com clima quente e parcialmente úmido (ÜRGE-VORSATZ et al., 2015; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Nacionalmente, os setores residencial, comercial e público consomem 51,2% da energia gerada (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Nesse contexto, a inércia térmica é uma estratégia passiva de climatização que é recomendada para edificações situadas em locais com amplitude diária da temperatura do ar externo e incidência de radiação solar intensa. Em situações em que se deseja aumentar a inércia térmica de ambientes com fechamentos leves, a literatura sugere como uma das opções, o uso de materiais inteligentes (FERREIRA; NÓVOA; MARQUES, 2016). Nessa classificação, os Materiais de Mudança de Fase (em inglês *Phase Change Materials* - PCMs) funcionam como elementos passivos integrados ou adicionados a componentes construtivos das edificações.

Os PCMs possuem alta capacidade de armazenamento de energia em calor latente, com potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à externa. Comparados a componentes construtivos tradicionalmente associados à alta capacidade térmica, como materiais rochosos e argila, os PCMs possuem baixos volume e massa para capacidades térmicas equivalentes. Quando adequadamente empregados, aumentam as horas em que os usuários sentem conforto e reduzem a necessidade de climatização artificial (WAHID et al., 2017; SONG et al., 2018).

Poucas pesquisas foram realizadas sobre a influência do uso de PCMs em edificações no Brasil. Brito et al. (2017), analisaram a capacidade de armazenamento térmico e temperatura de fusão de PCMs para a melhoria do desempenho térmico de edificações brasileiras. Os autores utilizaram simulações termoenergéticas no EnergyPlus com PCM teóricos e disponíveis no mercado. Os autores concluíram que o PCM disponível no mercado acarreta pequena mudança no desempenho térmico das edificações. Por outro lado, os PCMs teóricos, com ponto de fusão de 30 °C e 34 °C,

apresentaram resultados positivos, principalmente para as zonas bioclimáticas mais frias. Brito et al. (2017) alertam para necessidade de analisar a resposta térmica do caso base, sem PCMs, já que nas zonas mais quentes a inércia térmica adicional proporcionada pelos PCMs pode piorar as condições de conforto térmico.

Saffari et al. (2017) avaliaram as temperaturas de fusão ideais de PCMs para aplicação em edificações residenciais em 57 cidades de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Dentre as cidades analisadas, destacam-se Brasília, Manaus e Fortaleza. Os resultados mostram que em climas com necessidade de resfriamento, as melhores temperaturas de fusão para redução do consumo anual de energia são de 24 °C a 28 °C. Em climas com necessidade de aquecimento, a faixa de temperatura ideal é de 18 °C a 22 °C. Em climas que demandam aquecimento e resfriamento, os pontos de fusão podem estar entre os picos de temperatura máximos e mínimos.

Ademais, autores como Brito et al. (2017) e Bai et al. (2020), apresentaram situações em que o uso de PCMs pode piorar o desempenho térmico, enquanto Sharma e Rai (2020) concluíram que o uso de isolantes térmicos apresentou maior vantagem se comparado ao uso de PCMs.

Bai et al. (2020) e Brito et al. (2017), ainda reforçam a necessidade de avaliar o clima externo, pois sua influência é significativa para o desempenho do PCM. Saffari et al. (2017), apontaram que condições de contorno como elevação em relação ao nível do mar, radiação solar, umidade relativa e perfil dos ventos influenciaram no desempenho de PCM, mesmo entre cidades classificadas com o mesmo clima.

Portanto, o objetivo desse artigo é analisar a influência de PCMs no conforto térmico em escritórios na cidade de Viçosa/MG a partir de variações construtivas e de instalação dos PCMs.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho aplica simulações termoenergéticas com o programa EnergyPlus versão 9.3, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2, disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e desenvolvido para análise energética de edificações, simulação de desempenho térmico/energético com estimativas de cargas térmicas, trocas de energia, temperaturas do ar, superficiais, internas, ventilação, radiação, entre outros (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009).

O EnergyPlus é considerado a ferramenta mais difundida para investigar os efeitos passivos de PCMs em edificações (SAFFARI et al., 2017) e já foi utilizado em pesquisas para os climas brasileiros (BRITO et al., 2017; SAFFARI et al., 2017). O EnergyPlus utiliza como método de cálculo a condução de diferenças finitas (CondFD) que relaciona condutividade térmica e temperatura em regime transiente de trocas de calor (ENERGYPLUS, 2020).

Como parâmetros gerais, foi utilizado o *HeatBalanceAlgorithm* com o algoritmo global de transferência de calor CondFD. Em *HeatBalanceSettings*, no campo *DifferenceSchemes* foi selecionada a opção *FullyImplicitOrder* com a constante 0.3 e

20 cálculos por hora, como indicado por Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012). Para inserção das propriedades específicas dos PCMs, foi adotado o método de histerese do material conforme discutido e recomendado por Al-Janabi e Kavgic (2019).

Os PCMs testados são orgânicos e fabricados pela empresa alemã Rubitherm (RUBITHERM, 2022). Foram selecionados quatro PCMs, RT22HC, RT25HC, RT28HC e RT35HC, com as respectivas propriedades apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades dos PCMs.

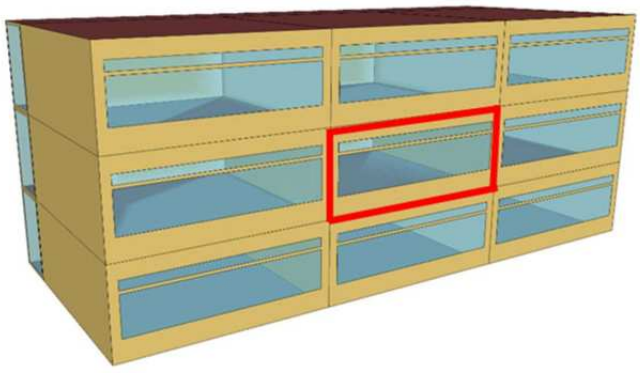
Nome do PCM	Intervalo de fusão e pico de tempe-ratura (°C)	Intervalo de solidifica-ção e pico de tempe-ratura (°C)	Capaci-dade de armaze-namento de calor (kJ/kg)	Capa-cidade espe-cífica (kJ/kg K)	Condu-tividade térmica em ambas as fases (W/(mK))	Densi-dade no estado sólido (kg/l)	Densi-dade no estado líquido (kg/l)
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

Fonte: Adaptado de Rubitherm (2022).

As simulações foram realizadas para o clima de Viçosa/MG com o arquivo climático TMY3 (GUIMARÃES, 2016). O município de Viçosa (20,75° S e 42,88° O) se encontra na Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005) e é classificado por Köppen-Geiger como quente e temperado (Cwa) com verões quentes e úmidos e invernos frios a amenos.

Os ambientes simulados serão baseados no modelo adotado por Oliveira e Carlo (2021) para análise de escritórios. Os autores elaboraram o modelo a partir de um levantamento que considerou geometrias, propriedades dos componentes e cargas internas apresentadas em pesquisas nos ENTACs e ENCACs no período de 2007 a 2017. O ambiente possui geometria de 7,05m x 7,05m, 49,7m² de área de piso, pé-direito de 2,90m e janelas com área de 10,3m², sem contato com o solo ou com a cobertura, cercado por zonas adjacentes de mesmas dimensões e características (Figura 01). As propriedades utilizadas como dado de entrada na simulação estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 1: Modelo do caso base com percentual de abertura na fachada de 50%. Zona de analise destacada em vermelho.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Tabela 2: Parâmetros adotados na simulação

Densidade de Carga Interna de Iluminação e Equipamentos (W/m²)	28,62
Transmitância Térmica do Teto/Piso (W/m²K)	3,73
Capacidade Térmica do Teto/Piso (kJ/m²K)	220
Fator Solar do Vidro	0,80

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Embora as simulações tenham considerado as 8760 horas do ano, apenas os índices de conforto térmico dos usuários de 8h às 18h foi avaliado. Para determinar as horas em conforto térmico, foi adotado o índice adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). Logo, em todas as simulações foram solicitadas como dados de saída a temperatura de bulbo seco externa, temperatura operativa interna e fluxo do ar nas zonas térmicas.

A edificação foi simulada com ventilação natural e sem uso de ar condicionado. A abertura e fechamento das esquadrias se deu por diferença entre a temperatura do ar interna e externa. A partir de 20°C de temperatura do ar externa, as esquadrias se abriam e começaram a fechar gradativamente até os 26°C, quando se fecham totalmente.

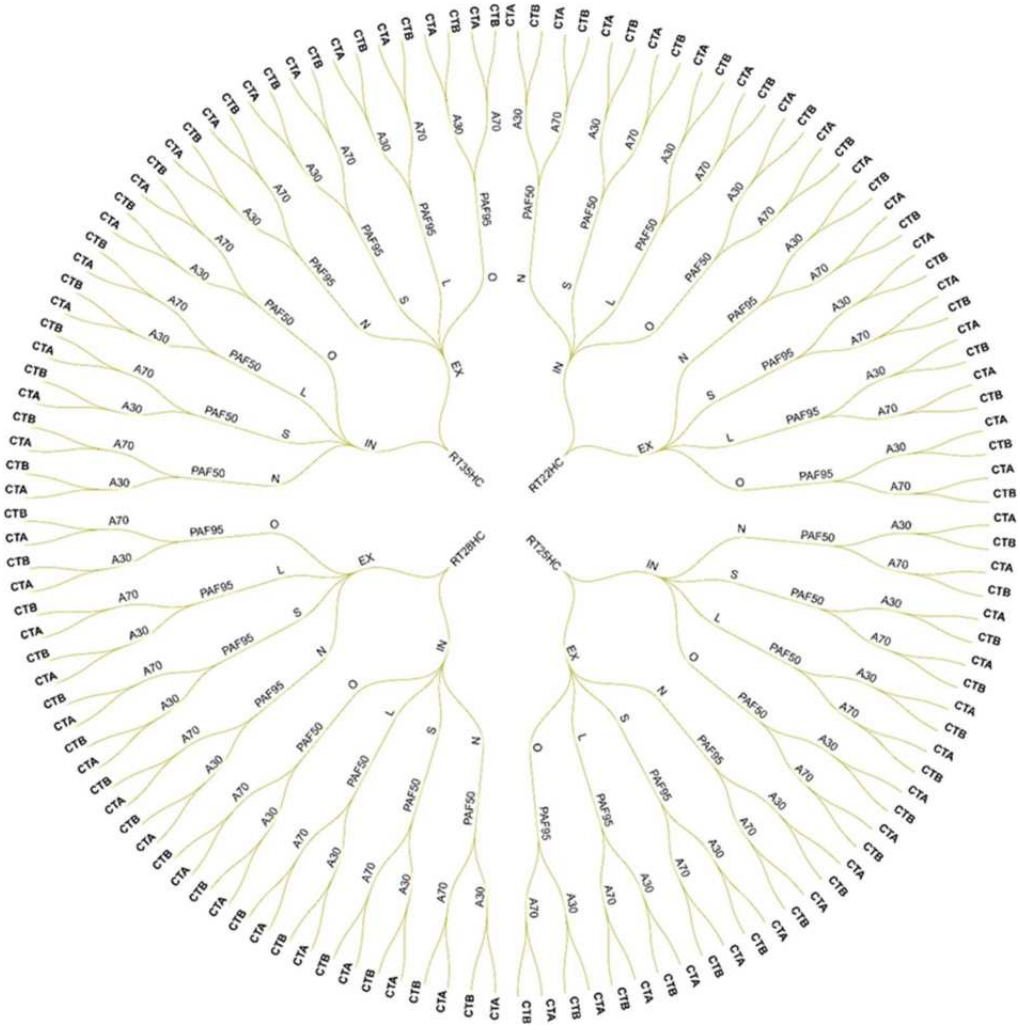
Foram realizadas variações nas características construtivas e na absortância das paredes, na área das aberturas voltadas ao ambiente externo e na orientação solar. Em relação aos PCMs, foram considerados os 4 tipos apresentados na Tabela 1, com incorporação próxima ao ambiente interno e próxima ao meio externo (Tabela 3). A combinação nos parâmetros resultou em 32 casos base, que correspondem a edificação sem PCM, e de 256 casos com PCMs (Tabela 3 e Figura 2).

Tabela 3: Parâmetros analisados.

Capacidade térmica das Paredes	**Absortância das Paredes**	**Percentual das aberturas em relação a fachada (PAF)**	**Tipos de PCMs**	**Camada de instalação na parede**	**Orientação solar**
CTB (Drywall) Placa de gesso (1,2cm); Lã de rocha (9cm); Placa cimentícia (1cm) CT= 33kJ/m²K e U= 0,45 W/m²K	**A30** α de 30%	**PAF50** Área da abertura correspondente a 50%, 10m²	**22** RTHC22	**IN** PCM instalado na face interna da parede	**N** Norte
			25 RTHC25		**S** Sul
CTA (Alvenaria) Argamassa interna (2,5cm); Bloco de concreto (14x19x39cm); Argamassa externa (2,5cm) CT= 272kJ/m²K e U 2,69 W/m²K	**A70** α de 70%	**PAF95** Área da abertura correspondente a 95%, 20m²	**28** RTHC28	**EX** PCM instalado na face externa da parede	**L** Leste
			35 RTHC35		**O** Oeste

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 2: Combinação dos parâmetros analisados e número de casos simulados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os 256 casos simulados comparativamente aos respectivos caso base, sem PCM. As porcentagens representam o aumento ou decréscimo de horas em conforto obtidas dos casos simulados subtraídas da porcentagem das horas em conforto obtidas dos casos base. Portanto, valores positivos representam aumento do número de horas em conforto, enquanto porcentagens negativas representam redução do conforto.

Na Tabela 4, os resultados positivos estão em escala de verde, quando maior o valor do conforto, mais escuro o verde. De forma semelhante, os resultados negativos estão em escala de vermelho, quanto maior a redução no conforto, mais escuro o vermelho. Os casos com valores de 0% ocorrem devido à redução do número de casas decimais.

Tabela 4: Aumento ou redução da porcentagem de horas em conforto comparado aos casos base.

				22		25		28		35			22		25		28		35	
				IN	EX	IN	EX	IN	EX	IN	EX		IN	EX	IN	EX	IN	EX	IN	EX
CTB (*Drywall*)	α30	PAF50	N	10%	1%	14%	0%	**15%**	2%	8%	1%	CTA (Alvenaria)	-2%	-1%	0%	-3%	0%	1%	**-4%**	-1%
			S	9%	1%	12%	1%	13%	2%	7%	1%		-1%	0%	1%	-1%	1%	1%	-3%	-1%
			L	10%	1%	13%	1%	15%	2%	7%	1%		-1%	-1%	0%	-2%	1%	1%	-3%	-1%
			O	9%	1%	10%	1%	13%	2%	6%	1%		-2%	-1%	-1%	-2%	1%	1%	**-4%**	-1%
		PAF95	N	10%	1%	13%	1%	12%	1%	8%	1%		-1%	0%	1%	3%	-1%	1%	-3%	0%
			S	10%	2%	13%	2%	10%	1%	7%	1%		0%	1%	2%	1%	0%	1%	-2%	1%
			L	9%	1%	11%	1%	10%	1%	7%	1%		-1%	0%	1%	0%	0%	1%	-2%	0%
			O	8%	1%	10%	1%	9%	1%	6%	1%		-2%	-2%	-1%	-2%	-2%	-1%	**-4%**	-2%
	α70	PAF50	N	10%	1%	14%	1%	**18%**	2%	8%	1%		-1%	0%	1%	-1%	4%	5%	-3%	0%
			S	11%	2%	13%	1%	**16%**	3%	8%	1%		0%	0%	2%	0%	4%	5%	-2%	0%
			L	11%	2%	14%	1%	**18%**	3%	9%	1%		-1%	0%	2%	0%	5%	5%	-2%	0%
			O	9%	2%	11%	1%	**15%**	2%	7%	1%		0%	0%	1%	-1%	6%	4%	-2%	0%
		PAF95	N	10%	2%	15%	1%	14%	2%	8%	1%		-1%	0%	1%	0%	0%	1%	-2%	0%
			S	10%	2%	14%	2%	12%	2%	8%	1%		0%	1%	2%	1%	1%	2%	-2%	1%
			L	9%	1%	13%	1%	13%	1%	7%	1%		0%	1%	2%	0%	1%	2%	-2%	0%
			O	9%	2%	11%	1%	11%	1%	7%	0%		0%	0%	1%	0%	1%	2%	-2%	0%

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os PCMs RT25HC e RT28HC apresentaram os melhores desempenhos para ambas capacidades térmicas, principalmente para CTB/IN com média de 12,5% e 13,4%, respectivamente. Foi obtido aumento de 18,1% nas horas em conforto para RT28HC/IN/CTB/α70/PAF50/N, representando o melhor resultado. Os PCMs RT22HC e RT35HC também apresentaram melhorias nas condições de conforto para CTB/IN em menor escala, com valores médios de 9,5% e 7,4% respectivamente.

Em análise visual e quantitativa da Tabela 4 é possível perceber que os resultados são consistentemente melhores para aplicações em ambientes de baixa inércia térmica e, sobretudo, para camadas internas. Foi possível identificar uma melhora de 11,0% nas horas de conforto no CTB em relação ao CTA. O uso de PCMs em CTB amplia as condições de conforto em todos os casos analisados, mesmo em aplicações na camada externa, com valores médios de 1,3%.

Em oposição, os PCMs simulados para CTA apresentaram resultados negativos, e o uso do material piorou o conforto em 48,4% dos casos. Nessas situações, o aumento da inercia térmica, causada principalmente pelo RT35HC piorou em até 4,2% as condições de conforto para RT35HC/IN/CTA/α30/PAF50/O. Os resultados obtidos para CTB coincidem com recomendações de Brito et al. (2017) e Auzeby et al. (2016) que também obtiveram melhor desempenho em edificações com PCMs que inicialmente apresentem baixa inercia térmica.

Os melhores efeitos obtidos para as temperaturas de fusão de 25°C e 28°C também condizem com os valores apresentados por Saffari et al. (2017). Os autores recomendaram temperaturas de fusão entre 24°C e 28 °C para redução da necessidade

de resfriamento, situação predominante para os modelos e intervalo de horários simulados (8h-18h).

Os resultados alcançados com RT28HC também confirmam os encontrados por Brito et al. (2017), que propuseram PCMs teóricos com ponto de fusão da ordem de 30 °C para edificações situadas nas zonas bioclimáticas 1 a 5. Os autores justificam o uso de PCMs teóricos pois não foram encontrados PCMs comerciais com as características necessárias para garantir o desempenho térmico no contexto analisado. Atualmente, a indisponibilidade de PCMs reais não corresponde à realidade de mercado. Acredita-se que o período de cinco anos entre a publicação de Brito et. al (2017) e o presente estudo tenha revertido o cenário da falta de PCMs para os climas brasileiros.

Em relação as aberturas, as diferenças entre PAF50 e PAF95 resultaram em influencias pouco significativas, continuamente melhores para aplicações internas e com média de 0,45% de aumento nas horas em conforto para PAF50. O maior aumento comparativo foi de 5,7% para RT28CH/IN/CTB/α70/PAF50. Para os casos com melhor desempenho geral (CTB, RT25HC e RT28HC) o PAF50 influenciou de forma mais significativa no aumento das horas em conforto, principalmente para RT28HC. A justificativa para esse resultado é que no PAF95, há a substituição de área de paredes por área envidraçada com consequente redução na quantidade de PCM.

As maiores absortâncias das paredes (α70) resultaram em melhorias médias pouco significativas no desempenho, com aumento de 1,1% nas horas em conforto. O maior destaque foi para o grupamento α70 e RT28HC, que ampliou as horas em conforto em 3,4% se comparado ao α30 para a mesma condição. Em contrapartida, α30 resultou no pior caso para RT35HC/CTA, com redução média de 2,5% no conforto e maior valor máximo geral de desconforto.

Em relação a orientação solar, a fachada norte apresentou o maior número em horas de conforto em quase todos os casos para CTB. A combinação entre maior incidência de radiação solar direta e maior absortância solar demonstra que, para os casos e clima simulado, a radiação é um parâmetro importante para analises de PCMs em edificações. O aumento do conforto térmico para casos com maior incidência de radiação solar direta também ocorreu na pesquisa de Saffari et al. (2017). Os autores identificaram que, dentre outros parâmetros ambientais, a incidência de radiação proporciona resultados superiores no desempenho dos PCMs, mesmo entre cidades classificadas como mesmo agrupamento climático.

CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo analisar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico em ambientes de escritório para Viçosa/MG. Foram realizadas simulações termoenergéticas no EnergyPlus, aplicando como parâmetros de simulação diferentes características construtivas, configurações geométricas, posicionamento dos PCMs e orientação solar. Foram adotados quatro PCMs orgânicos disponíveis no mercado, RT22HC, RT25HC, RT28HC e RT35HC, fabricados pela empresa Rubitherm.

A partir das simulações, é possível afirmar que a incorporação de PCMs em edificações naturalmente ventiladas e com fechamentos leves em Viçosa/MG apresentou casos com melhorarias do conforto térmico de usuários em ambientes de escritórios.

Dentre todas as variáveis avaliadas, o tipo do PCM, que corresponde entre outras características, a temperatura de fusão e capacidade de armazenamento de calor, foi o fator mais impactante. Como exemplo, um aumento de máximo de 18% das horas em conforto térmico foi obtido para baixa capacidade térmica das paredes e com uso dos PCMs RT25HC e RT28HC quando comparados ao caso base, sem PCM. Na sequência, o parâmetro de maior influência foi a capacidade térmica das paredes. Os ambientes simulados com baixa capacidade térmica apresentaram resultados em média 11% maiores que os ambientes com alta capacidade térmica.

A área das esquadrias, a absortância das paredes externas e a orientação solar também influenciaram, embora de forma menos significativa, nas horas em conforto. Foi possível concluir que a radiação solar incidente e sua absorção pelas paredes é um dos parâmetros ambientais mais relevantes para associação entre PCMs e edificações no contexto analisado.

Embora apresentadas as vantagens da incorporação de PCMs para o recorte apresentado, indica-se mais análises e simulações com diferentes parâmetros. Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de diferentes condições de ventilação natural, com diferentes configurações de abertura e fechamento das esquadrias. Além disso, é necessário analisar outras geometrias, condições de contorno e outras tipologias de ambientes com baixa capacidade térmica para verificar se os resultados encontrados nesse artigo representam adequadamente as vantagens do uso de PCMs em edificações para Viçosa/MG.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001**.** Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) – Demanda Universal 001/2021 Código de Financiamento APQ-00266-21 e PIBIC/FAPEMIG 2021-2022.

REFERÊNCIAS

[1] AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus A case study. Applied Thermal Engineering. v.162, p. 114222, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222

[2] AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE. Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2020.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiros e diretrizes construtivas para habitação unifamiliar de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

[4] AUZEBY, M.; WEI, S.; UNDERWOOD, C.; TINDALL, J.; CHEN, C.; LING, H.; BUSWELL, R. Effectiveness of using phase change materials on reducing summer overheating issues in UK residential buildings with identification of influential factors. Energies, v. 9, n. 8, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/en9080605

[5] BAI, L.; XIE, J.; FARID, M. M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. Building and Environment, v. 169, p. 106531, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106531

[6] Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Balanço Energético Nacional 2021 – Ano base 2020. Relatório Síntese 2021. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. 73 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Aceso em: fev. 2022.

[7] 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

[8] ENERGYPLUS. Engineering reference. EnergyPlusTM Version 9.3.0 Documentation - Engineering Reference, p. 1744, 2020.

[9] FERREIRA, A.; NÓVOA, P..; MARQUES, A. Multifunctional material systems: a state-of-the-art Review. Composite Structures, v. 151, p. 3-35, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.028

[10] GUIMARÃES, Í. B. Análises de incertezas e sensibilidade de arquivos climáticos e seus impactos em simulações computacionais termo energéticas. 2016. 95 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

[11] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy technology perspectives 2017: Flagship report. [S. l.: s. n.], 2017. Available at: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017.

[12] MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon; MATOS, Michele. Apostila Do Curso Básico Do Programa Energyplus. Florianópolis, p. 24, 2009. Available at: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf.

[13] OLIVEIRA, M. M.; CARLO, J. C. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. Ambiente Construído, v. 21, n. 1, p. 293–314, 2021.

[14] RUBITHERM GMBH. Rubitherm Phase Change Materials. Disponível em: < https://www.rubitherm.eu/>. Acesso em: 23/01/2022.

[15] 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: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107

[16] SHARMA, V.; RAI, A. C. 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

[17] 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: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066

[18] TABARES-VELASCO, P.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. Building and Environment, v. 54, p. 186-196, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.019.

[19] ÜRGE-VORSATZ, D.; CABEZA, L.; SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; PETRICHENKO, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 41, p. 85–98, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039.

[20] 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