

USO DE PCM PARA EDIFICAÇÕES EM REGIÃO DE CLIMA QUENTE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

USE OF PCM FOR BUILDINGS IN HOT CLIMATE: A SYSTEMATIC REVIEW

 **Roberta Bastos de Oliveira** ¹

 **Tomaz Silva Gonzales** ²

 **Michele Tereza Marques Carvalho** ³

¹ Universidade de Brasília, Brasília, MG, Brasil, robertab.o@hotmail.com

² Universidade de Brasília, Brasília, MG, Brasil, gonzales.tomaz@gmail.com

³ Universidade de Brasília, Brasília, MG, Brasil, micheletereza@unb.br

Resumo

O consumo mundial de energia continua a crescer e tem se mostrado crítico quanto ao uso de sistemas de refrigeração em países de clima quente. O desempenho térmico da envoltória do edifício exerce considerável influência nas condições ambientais internas e no conforto do usuário. Esse artigo tem como objetivo identificar, selecionar, avaliar e sintetizar informações sobre o uso de PCMs (materiais de mudança de fase) em edificações em países de clima quente como estratégia para um bom desempenho térmico, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Enfatiza-se os tipos de materiais, seus critérios de seleção e formas de incorporação e aplicação, assim como, identifica-se lacunas e tendências de pesquisa. A escolha do tema deve-se à observância de uma tendência de pesquisas internacionais voltadas para o uso de PCM em edificações por meio de uma análise prévia de artigos. Os artigos mapeados pela RSL demonstraram o grande potencial que os PCMs têm na redução do consumo energético das edificações em países de clima quente. A partir das discussões é possível reforçar a ideia de que os parâmetros climáticos e as propriedades termofísicas do PCM são essenciais nas escolhas de projeto, entretanto ênfase igual deve ser dada a estratégias passivas que podem atuar em conjunto, além da disponibilidade do material e dos recursos financeiros, bem como os objetivos de interesse. Reforça-se o princípio de que cada projeto é único, mas que os resultados podem servir como referência inicial para outras análises.

Palavras-chave: Edificações. PCM. Desempenho térmico. Clima quente. Revisão sistemática

Abstract

World energy consumption continues to grow and has been critical for cooling systems in hot climate countries. The thermal performance of the building envelope has a considerable influence on indoor environmental conditions and user comfort. This article aims to identify, select, evaluate and synthesize information on PCMs (phase change materials) in buildings in hot climate countries as a strategy for good thermal performance through a Systematic Literature Review (SLR). The types of materials, their selection criteria and forms of incorporation and application are emphasized, as well as gaps and research trends. The theme's choice is due to the observance of an international research trend focused on using PCM in buildings through a prior analysis of articles. The articles outlined by the SLR demonstrated the great potential that PCMs have in reducing buildings' energy consumption in hot climate countries. According to the discussions, it is possible to reinforce that the PCM's climate parameters and thermophysical properties are essential in design choices. Still, equal emphasis should be placed on passive strategies that can work together, in addition to the availability of material and financial resources and the objectives of interest. It reinforces the principle that each project is unique but can guide other analysis by initial references.

Keywords: Buildings. PCM. Thermal performance. Hot climate. Systematic review.

Contribuição dos autores:

RBO: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, programas, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **TSG:** conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, programas, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **MTMC:** conceituação, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - revisão e edição.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Declaração de conflito: declara não haver

Editor(es) Responsável:

Letícia de Oliveira Neves 

How to cite this article:

OLIVEIRA, R. B. de; GONZALES, T. S.; CARVALHO, M. T. M. de. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021001, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8658590>



Introdução

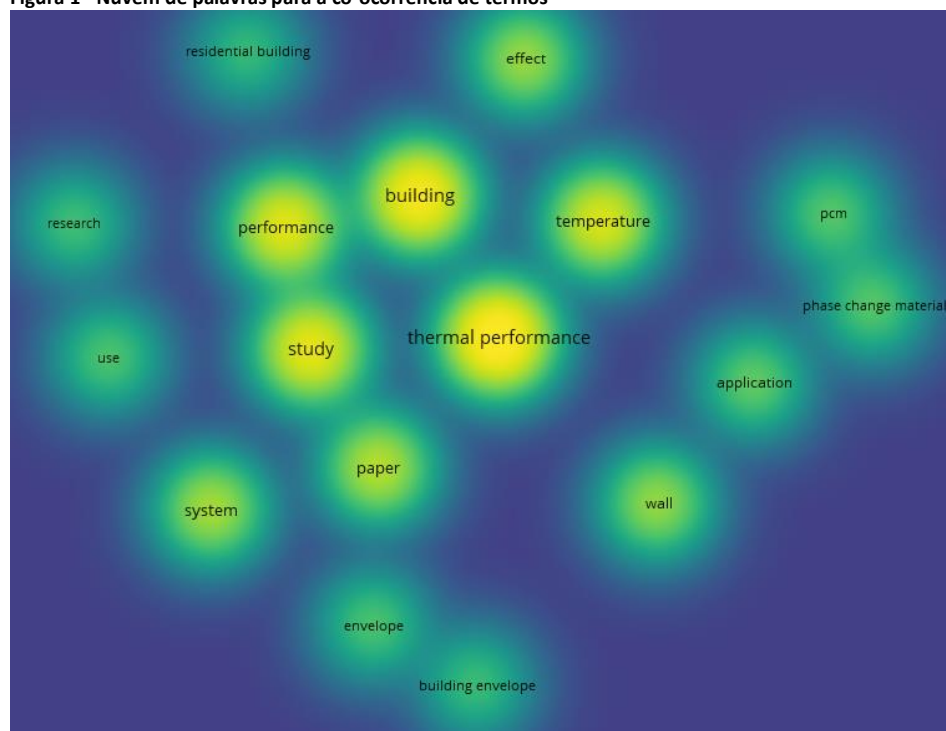
O consumo mundial de energia continua a crescer e a manutenção dos suprimentos representa um grande desafio para os governos, especialmente nos países em desenvolvimento que exigem grandes investimentos e capacidade de geração para atender à crescente demanda (BORGSTEINA; LAMBERTS, 2014). Os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia primária do mundo. Nos países de clima quente, mais de 50% da energia do edifício é gasta no sistema de refrigeração (NAZI *et al.*, 2017). Climas quentes e úmidos têm uma faixa de temperatura de 18 °C a 38 °C, sem grandes diferenças entre as estações e entre o dia e a noite. Dessa forma, segundo Madhumathi e Sundarraja (2014), a principal função do edifício é moderar os efeitos de aquecimento diurno do ar externo, apresentando um desafio para os arquitetos e engenheiros na concepção de “casas passivas”. Nesse sentido, o desempenho térmico da envoltória do edifício exerce influência na manutenção das condições ambientais internas (NATEPHRA *et al.*, 2017) e, conseqüentemente, no gasto de energia elétrica.

Por meio de uma busca prévia na base de dados Scopus, identificou-se uma tendência de pesquisas internacionais voltadas para o uso do “*phase change material*” (materiais de mudança de fase - PCM). Materiais de mudança de fase apresentam uma capacidade de armazenamento térmico substancialmente maior que os convencionais (BRITO *et al.*, 2017). Sofrem mudanças cíclicas de estado quando expostos a determinadas condições ambientais, absorvendo ou dissipando grande quantidade de calor (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Tendo em vista a necessidade de construções com eficiência energética e bom desempenho térmico, os PCMs se apresentam como alternativa para aplicação na envoltória das edificações visando a estabilidade térmica das mesmas, sendo apontados por Marin *et al.* (2016) como promissores. Segundo Brito *et al.* (2017), a utilização de PCMs em edificações é maior no hemisfério norte, havendo poucas informações sobre seu uso em edificações em países tropicais. Entretanto, sabe-se que essas regiões de clima quente e úmido enfrentam o desafio quanto ao consumo de energia do ar-condicionado, fator ponderado por Madhumathi e Sundarraja (2014).

Diante desse cenário, o objetivo deste artigo é identificar, selecionar, avaliar e sintetizar informações sobre o uso de PCMs em edificações por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), visando fornecer informações que subsidiem a melhoria do desempenho térmico em países de clima quente. Enfatizou-se os materiais mais estudados, a forma de aplicação nas edificações, os principais resultados obtidos e as possíveis lacunas e seus desdobramentos.

Materiais e método

A escolha do tema deve-se à identificação de uma tendência de pesquisas internacionais voltadas para o uso do PCM. Esse resultado foi constatado com a nuvem de palavras gerada pelo programa VOSviewer para a co-ocorrência de termos, exposta na Figura 1, a partir dos 246 artigos encontrados com a *string* de busca: “thermal performance” AND (hous#*OR build*)⁽¹⁾ para artigos em inglês no período de 2015-2020 na base de dados Scopus. O processamento seguiu as configurações: dados extraídos do título e resumo; contagem binária que fornece o número de documentos em que o termo ocorre pelo menos uma vez; repetição de no mínimo 25 vezes, aproximadamente 10% dos artigos; 60% dos termos mais relevantes. Os termos em maior destaque apresentam fundo mais amarelado sendo que todos com exceção de “PCM” ou “*phase change material*” são comumente encontrados em títulos de artigos dessa temática e, pela *string* utilizada, já eram esperados.

Figura 1 - Nuvem de palavras para a co-ocorrência de termos

Fonte: os autores.

A partir da tendência identificada, para uma análise mais profunda, parte-se para a aplicação de uma RSL focada na utilização de PCMs em edificações. Segundo Ruschel (2017), uma RSL tem a função de mapear, avaliar criticamente, consolidar e agregar resultados de estudos primários para a identificação de ênfases, tendências e lacunas de pesquisa. Para Gough, Oliver e Thomas (2012), a RSL é importante pois evita o embasamento em pesquisas pontuais que podem apresentar falhas, fornecendo um quadro mais abrangente baseado em vários estudos. Além disso, propicia um contexto das pesquisas anteriores já realizadas a fim de evitar que novas pesquisas sejam desnecessárias, inapropriadas, irrelevantes ou antiéticas.

Esta revisão adotou o delineamento de Kitchenham (2004), que divide a RSL em três fases principais: planejamento (identificação da necessidade da revisão e desenvolvimento do protocolo com os questionamentos da pesquisa); condução da revisão (seleção dos estudos, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão para refinar a amostra); e análise dos resultados (sumarização e discussão dos principais resultados). A identificação da necessidade da revisão foi feita por meio da nuvem de palavras já descrita. Para o desenvolvimento do protocolo e a condução da revisão o *software* StArt foi utilizado, programa nacional, de uso livre e gratuito, que permite a categorização dos artigos, aspectos considerados importantes para Costa, Logsdon e Fabricio (2017). Por meio desse *software* é possível estabelecer o protocolo de pesquisa, importar os artigos das bases de dados, aplicar os métodos de inclusão e exclusão e classificá-los conforme o interesse (FABBRI *et al.*, 2016). Segundo Hernandez *et al.* (2012), apesar de melhorias necessárias e inerentes a qualquer *software*, o StArt ajuda na condução da RSL e facilita a aplicação de seu processo, se comparado ao trabalho manual.

Optou-se pela escolha da base de dados Scopus, pois Chadegani *et al.* (2013) afirmam que essa base cobre um número superior de periódicos ao de outras bases, atualizando diariamente suas publicações. Além dessa, como é de interesse a inclusão de artigos nacionais, utilizou-se também a base de dados SciELO. A pesquisa na base de dados Scopus foi realizada com a seguinte *string* de busca e operadores booleanos: "TITLE-

ABS-KEY ((pcm OR "phase change material") AND ("building" OR "house") AND (therm*) AND (tropical OR arid OR (hot W/4 climat*)))". Para a SciELO: "(materia*) AND ("mudança de fase") AND (edificaç*)". Tais *strings* foram desenvolvidas buscando responder às principais perguntas da pesquisa, que são:

- Quais os materiais investigados para os países de clima quente?
- Qual a metodologia para avaliação do desempenho térmico da edificação?
- Quais os resultados obtidos para o desempenho termoenergético?

A busca não foi limitada a nenhum intervalo temporal, para que se pudesse determinar a partir de quando foram iniciadas as publicações científicas, de acordo com as *strings* selecionadas, e sua evolução, retornando assim 99 artigos (98 artigos da Scopus e 1 artigo da SciELO).

A etapa de inclusão e exclusão de artigos alinou-se ao contexto dos questionamentos principais, direcionados para investigar a associação entre PCM e edificações em climas quentes, e não apenas uma análise das características físico-químicas desses materiais. Com isso, artigos que relacionem o comportamento térmico interno e/ou desempenho energético da edificação com o uso de PCMs, no contexto climático tropical ou árido, foram incluídos, caso contrário foram excluídos.

Na primeira etapa de triagem, artigos duplicados foram identificados automaticamente pelo StArt (06 artigos) e, após confirmação manual, removidos. Após isso, os artigos foram avaliados pelo seu título e resumo, buscando primariamente excluir os que possuíam as seguintes características:

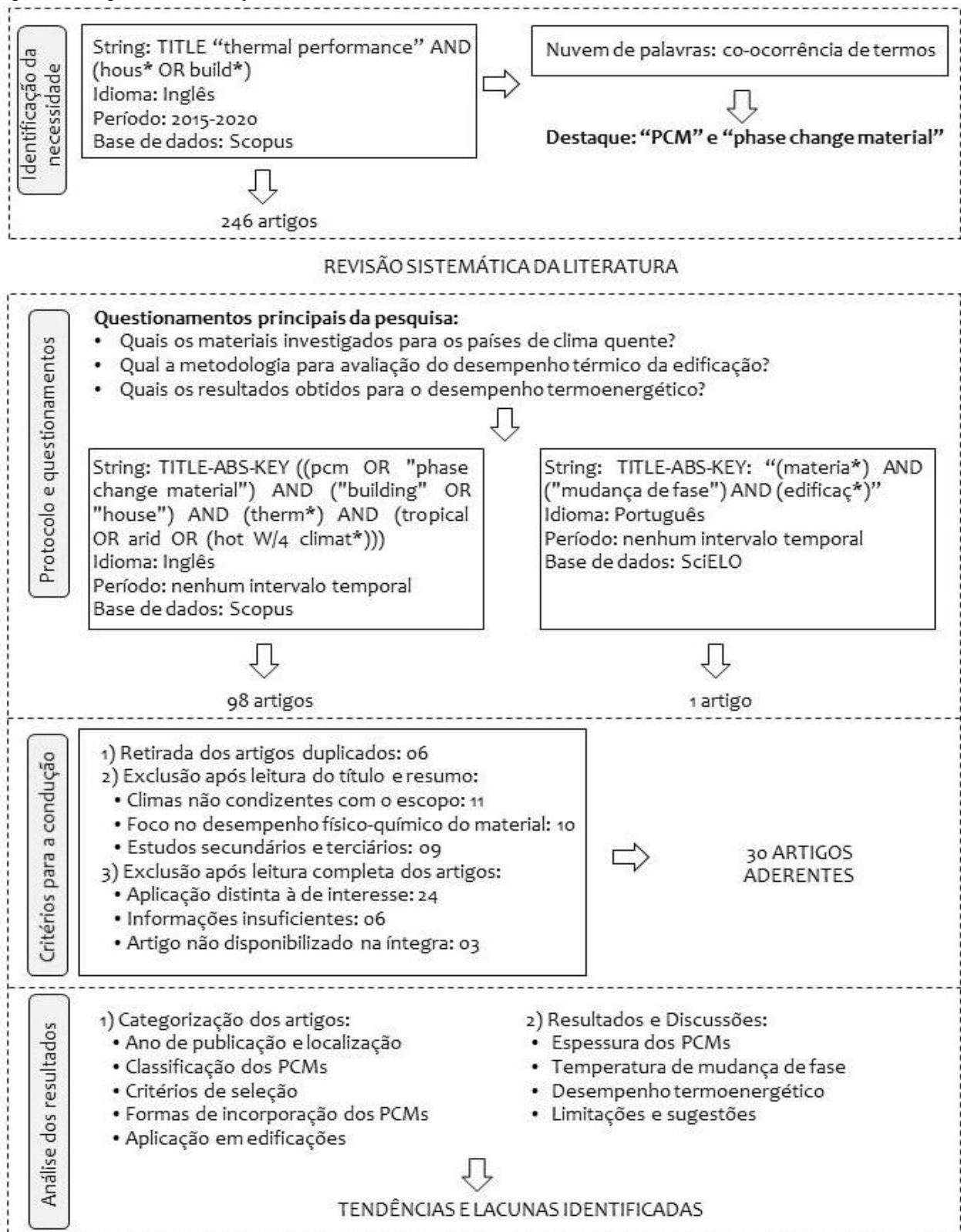
- Climas não condizentes com o escopo do trabalho (11 removidos);
- Limitado ao desempenho físico-químico do material (10 removidos);
- Estudos secundários e terciários (09 removidos).

Após essa primeira iteração, restaram 63 artigos aptos para avaliação de sua elegibilidade. Assim, a etapa seguinte ocorreu com a leitura do corpo do artigo, selecionando os artigos segundo parâmetros mais específicos. Os critérios para remoção foram:

- Aplicações distintas ao envelopamento de edificações (24 removidos);
- Informações insuficientes sobre o desempenho termoenergético da edificação (06 artigos).
- Acesso ao corpo do artigo não disponibilizado (03 artigos).

As aplicações distintas referem-se aos artigos relacionados à climatização de edificações, porém com o uso de PCMs em elementos desvinculados ao envelope da construção, como partes internas de condicionadores de ar ou outras soluções ativas. Também foram excluídos trabalhos que não ofereciam informações mínimas de desempenho termoenergéticos. Assim, após a inclusão e exclusão e avaliação de título, resumo e corpo do artigo, 30 artigos estiveram de acordo com todos os critérios estabelecidos pelo protocolo de revisão, aptos para a etapa de extração de dados e síntese qualitativa. A Figura 2 apresenta um fluxograma com as etapas, ações e critérios adotados, para um melhor entendimento. O Quadro 1 resume os 30 artigos aderidos.

Figura 2 – Fluxograma com a condução da RSL realizada



Fonte: os autores.

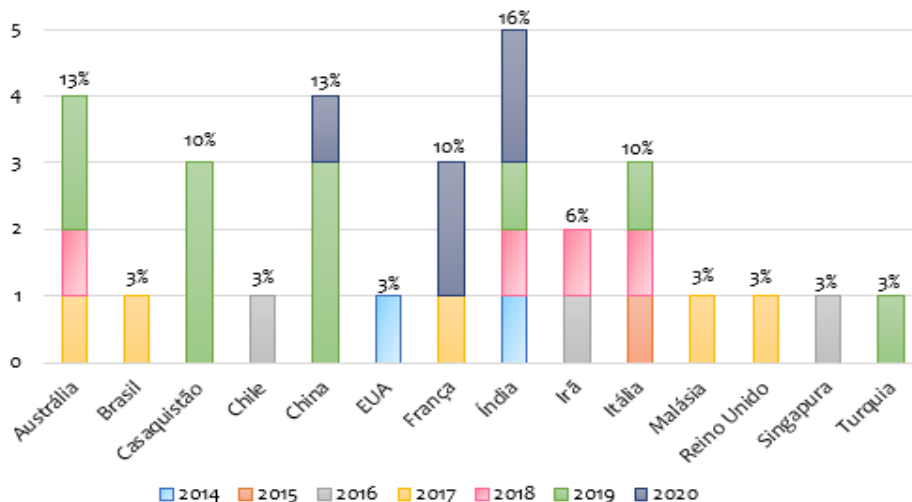
Quadro 1 –Resumo dos artigos selecionados

Referência	Local de análise	Material estudado	Tipo	Temperatura de fusão (°C)
Madhumathi e Sundarraja (2014)	Índia	PEG (polietileno glicol) E600 e ácido cáprico	orgânicos	21-25
Biswas <i>et al.</i> (2014)	EUA	Nano folhas de grafite expandida	orgânico	21
Guarino <i>et al.</i> (2015)	Itália	Energain 60% parafina	eutético	23
Marin <i>et al.</i> (2016)	Chile	Placa de gesso + 18% Micronal	eutético	25
Lei, Yang e Yang (2016)	Singapura	Não especificado	-	28
Solgi, Fayaz e Kari (2016)	Irã	Não especificado (variação da temperatura de fusão)	orgânico	29
Brito <i>et al.</i> (2017)	Brasil	parafina	orgânico	22-34
Guichard <i>et al.</i> (2017)	Ilha da Reunião	Energain 60% parafina	eutético	24
Akeiber <i>et al.</i> (2017)	Iraque	40 % Resíduo de petróleo bruto e 60% parafina	eutético	26
Nazi <i>et al.</i> (2017)	Malásia	BioPCMBBlanket M182/Q29	orgânico	29
Solgi <i>et al.</i> (2017)	Irã	parafina	orgânico	27
Solgi, Memarian e Moud (2018)	Irã	BioPCM	orgânico	29
Memarian <i>et al.</i> (2018)	Irã	Energain 60%parafina	eutético	29+21
Saikia, Azad e Rakshit (2018)	Índia	ZNH (hexahidrato de nitrato de zinco)	inorgânico	32-36
		ácido cáprico	orgânico	
Iommi (2018)	Itália	polietileno de alta densidade e parafina	eutético	34-43
Yan <i>et al.</i> (2019)	China	RT28 (parafina)	orgânico	26-28
		grafite expandido		
Hu e Yu (2019)	China	Energain 60% parafina - DuPont	eutético	22
Ji <i>et al.</i> (2019)	China	Não especificado	-	-
Solgi <i>et al.</i> (2019a)	Austrália	BioPCM	orgânico	25
Solgi <i>et al.</i> (2019b)	Austrália	BioPCM	orgânico	-
Sovetova, Memon e Kim (2019)	Oriente Médio	BioPCM	orgânico	27-32
Köse e Manioğlu (2019)	Turquia	BioPCM/M27/Q23	orgânico	27
Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019)	Mali, Tailândia, Brasil, Tanzânia, Índia, Moçambique e Indonésia	Não especificado	-	25-29
Rathore e Shukla (2019)	Índia	SavE OM37	inorgânico	35-40
Piselli, Castaldo e Pisello (2019)	Ítalia e Emirados Árabes	Parafina	orgânico	25-44
Nematchoua <i>et al.</i> (2020)	Madagascar	BioPCM	orgânico	20-30
Saikia <i>et al.</i> (2020)	Índia	RT-27 (parafina)	orgânico	30-36
		Ácido cáprico	orgânico	
		hexa-hidrato de cloreto de cálcio	inorgânico	
		RT-23 (parafina)	orgânico	
		n-octadecano	orgânico	
Nematchoua, Vanona e Orosa (2020)	Madagascar	BioPCM	orgânico	-
Rathore, Shukla e Gupta (2020)	Índia	OM37	orgânico	29-39
Mao e Yang (2020)	China	Não especificado (variação da temperatura de fusão)	-	26-30

Fonte: os autores.

A Figura 3 mostra a distribuição das publicações por ano e por país para os 30 artigos selecionados. No contexto escolhido dos artigos aderentes, as publicações mais antigas são datadas de 2014 (2 artigos). A maior parte das publicações datam de 2019 (10 artigos), seguidas de 2020 e 2017 (5 artigos). Tendo em vista que novas publicações de 2020 ainda podem surgir e que 2019 teve uma expressiva contribuição, nota-se uma crescente tendência para a investigação e aplicação de PCMs nas edificações em regiões de clima quente. Dos 30 artigos, 16 foram publicados nos últimos dois anos.

Figura 3 – Números de publicações por ano e por país em relação aos artigos selecionados



Fonte: os autores.

Quanto à localização geográfica dos autores, destaca-se as publicações da Índia (16%) seguidas por Austrália e China (13%). A maioria dos autores teve como objeto de estudo a região climática do seu próprio país, com exceção de Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019), que analisaram sete regiões, e Akeiber *et al.* (2017) que estudaram outra região diferente do país de origem mas ainda no contexto de clima quente.

Materiais de mudança de fase

Classificação

Os materiais de mudança de fase podem agir como uma espécie de reservatório quase isotérmico de calor. À medida que a temperatura aumenta, os PCMs mudam de fase com uma reação endotérmica. Com a queda de temperatura, os PCMs liberam o calor acumulado com uma reação exotérmica (SOARES *et al.*, 2013). Nesse sentido, podem auxiliar no equilíbrio do desempenho termoenergético de uma edificação.

São classificados com base no estado em que mudam de fase. De acordo com Zhou, Zhao e Tian (2012), os do tipo sólido-líquido são mais adequados para armazenamento de energia térmica, sendo divididos em: orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Os orgânicos são compostos por parafina, ácidos graxos ou por componentes biodegradáveis; os inorgânicos possuem componentes metálicos ou hidratos de sal; os eutéticos são a mistura de dois PCMs, sejam eles orgânicos ou inorgânicos.

A classificação dos PCMs utilizados não foi mencionada por alguns autores, para tanto contou-se com o resumo apresentado por Raoux (2009). Dentre os artigos identificados, 20 deles estudaram a aplicação de PCMs do tipo orgânico, com destaque para o BioPCM (8 artigos), e cinco não mencionaram o tipo, focando apenas na variação de temperatura de fusão de acordo com o interesse. Alguns autores avaliaram mais de um tipo: Saikia, Azad e Rakshit (2018) com um orgânico e um inorgânico, Yan *et al.* (2019) com dois orgânicos e Saikia *et al.* (2020) com quatro orgânicos e um inorgânico.

Critérios de Seleção

A escolha do PCM deve se basear nas características termodinâmicas, cinéticas e nas propriedades físico-químicas, com vantagens e desvantagens para cada tipo, resumidas por Zhou, Zhao e Tian (2012) e Soares *et al.* (2013). De um modo geral, como aspectos positivos para a seleção de um PCM devem ser observados: disponibilidade em uma faixa de temperatura ampla, baixa condutividade térmica, alto calor de fusão, baixa

mudança de volume, baixo grau de inflamabilidade, não ocorrência de super-resfriamento ou corrosão, além do baixo custo para aquisição e aplicação.

A escolha do material pode ser relacionada à disponibilidade do mesmo na região de estudo, como no caso de Solgi *et al.* (2019b) que retratam a utilização do BioPCM em todas as zonas bioclimáticas da Austrália. Pode-se também inferir que o aspecto econômico tenha influência. Madhumathi e Sundarraja (2014) fizeram uma comparação de custo entre os PCMs comerciais na Índia, sendo o polietileno glicol (PEG), BioPCM e PCM com cloreto de cálcio os mais acessíveis, contrastando com as parafinas, nove vezes mais caras. Ressalta-se, contudo, que a seleção do PCM deve também se basear nas suas qualidades físicas, químicas, cinéticas e térmicas, visto que a fase de seleção é o fator mais crítico e determinará a sua eficiência no controle da temperatura (ARANDA-ÚSON *et al.*, 2013).

Formas de incorporação dos PCMs

As temperaturas de congelamento e derretimento dos PCMs tendem a mudar ligeiramente quando incorporados nos materiais de construção civil (WAHID *et al.*, 2017). Essa incorporação pode ser feita de três maneiras principais, segundo Hawes, Feldman e Banu (1993): incorporação direta, imersão e encapsulamento (micro ou macro). A incorporação direta é a técnica mais simples e resume-se na inserção do PCM em pó ou líquido no gesso ou concreto, por exemplo, podendo, no entanto, ocasionar incompatibilidade ou vazamento durante a mudança de fase. A segunda técnica consiste na imersão do material de construção, como gesso ou tijolo, no PCM derretido para absorção nos poros internos, o que também pode causar vazamento, prejudicando seu uso a longo prazo. Por fim, no encapsulamento o PCM é envolto por uma camada que pode evitar o problema de vazamento. No macroencapsulamento tem-se tubos, esferas ou painéis com revestimento anticorrosivo e no microencapsulamento a camada consiste em um filme polimérico que proporciona uma maior integração com os materiais de construção.

Quanto à forma de incorporação do PCM nos materiais de construção, a maioria dos artigos não mencionou explicitamente a técnica considerada. No entanto, pode-se deduzir, pela forma de inserção nos modelos simulados, que todos foram considerados como encapsulados, seja por micro ou macroencapsulamento, como em Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019), em que o PCM foi simulado como uma camada da parede e do telhado. Tal fato possivelmente está ligado ao fato de que as técnicas de inserção direta e imersão impedem a simulação do comportamento do PCM numérica ou computacionalmente, uma vez que as propriedades dos materiais se confundiriam com os da construção, impossibilitando as análises e sua comparação com protótipos.

Aplicação em edificações

As formas de aplicações estão relacionadas a como o PCM é inserido no envelopamento das edificações e como se relaciona com os outros elementos construtivos. Nos estudos analisados, os materiais de mudança de fase foram instalados nas paredes, cobertura e pisos, podendo estar posicionados nas camadas interna, externa ou intermediária do envelopamento. O envelopamento também se relaciona com o sombreamento, ventilação e outros elementos do contexto da edificação

Aplicação no envelopamento

Para os casos que utilizaram painéis ou mantas de PCM microencapsulados, o PCM foi predominantemente posicionado entre camadas de outros materiais, por ser mais

flexível e necessitar de melhor ancoragem. Como exemplos, Solgi *et al.* (2019a) usaram uma parede de testes em camadas, sequencialmente com 12 mm de argamassa, 50 mm de poliestireno, 10 mm de BioPCM-24 °C e 12 mm de placa de cimento, da camada externa para a interna. Marin *et al.* (2016), Brito *et al.* (2017) e Guarino *et al.* (2015), implementaram PCM nas envoltórias de edifícios leves, permitindo uma redução nas flutuações diárias da temperatura. Solgi, Fayaz e Kari (2016) apontaram a utilização promissora do PCM no piso, pois atua como uma camada de isolamento e impede a transferência de calor entre o chão e o solo. Em uma análise experimental apenas para a cobertura, Guichard *et al.* (2017) avaliaram o uso de aço galvanizado com uma camada interna de PCM macroencapsulada de 5,26 mm de espessura, com uma temperatura de fusão de 23,4 °C. Uma outra forma de avaliação é apresentada por Guarino *et al.* (2015), que posicionaram cinco camadas de painéis de PCM no lado interior das paredes testadas, cobrindo cerca de 80% da área de superfície da parede. Há também a possibilidade de uso de placas de gesso ou outro material sólido que possibilite o microencapsulamento em seus poros. Essas placas podem ser posicionadas nas camadas mais internas ou externas do envelope. Biswas *et al.* (2014) utilizaram para seu trabalho dois drywalls diferentes contendo PCM (um microencapsulado e outro do tipo nano-PCM), posicionados em uma camada interna de uma parede. Da mesma forma, Marin *et al.* (2016) instalaram uma placa de gesso com PCM microencapsulado nas camadas interiores das paredes externas e de sua cobertura. Ji *et al.* (2019) compararam dois materiais idealizados convencionados como "PCM sólido" e "camada PCM", posicionados na camada exterior das paredes verticais e cobertura. Iommi (2018) constatou uma diminuição nas pontes térmicas para sistemas construtivos secos de madeira, quando usada uma camada de PCM.

Soluções macroencapsuladas de PCM também podem ser selecionadas, quando se utiliza invólucros para conter o material. Tais casos foram mais utilizados em aparatos experimentais, por serem uma solução de baixo custo e de fácil manuseio, o que atrai o interesse de pesquisas acadêmicas experimentais. Madhumathi e Sundararaja (2014) utilizaram PCMs (Polietilenoglicol e ácido cúprico) macroencapsulados em tubos de fibra de vidro e inseridos em tijolos furados de paredes externas usadas em testes. Com uma abordagem semelhante, Rathore e Shukla (2019) e Rathore, Shukla e Gupta (2020) confeccionaram tubos de alumínio para macroencapsular PCM com uma temperatura de transição de fase entre 29,4 °C e 39,1 °C, os quais foram inseridos em uma parede de concreto e em sua cobertura.

Aplicações integradas a outras estratégias passivas

Outras soluções relacionadas à edificação podem estar associadas ao envelopamento da edificação. Muitos sistemas construtivos que utilizam o PCM como acumulador de calor se integram com sistemas mecânicos, como condicionadores de ar, aquecedores de água, trocadores de calor em geral ou mesmo para o resfriamento de placas fotovoltaicas. Porém, este trabalho focou nas soluções passivas estritamente relacionadas com o envelopamento da edificação.

Nematchoua *et al.* (2020) e Nematchoua, Vanona e Orosa (2020) destacam o sombreamento externo como estratégia adicional; Piselli, Castaldo e Pisello (2019) reforçam a observância das propriedades termo-ópticas dos telhados, como refletância e emissividade. Hu e Yu (2019) investigaram a combinação do telhado com revestimento termocrômico e das paredes com PCM, Mao e Yang (2020) enfatizam que o ângulo do telhado também influencia na quantidade de radiação a ser absorvida pelo PCM para auxiliar na transferência do calor. Além disso, a orientação da parede para climas quentes também é importante, fator ponderado por Köse e Manioğlu (2019). Saikia, Azad e Rakshit (2018) avaliaram diferentes orientações para dois tipos de PCM e

afirmam que o desempenho térmico pode ser maximizado se diferentes PCMs forem utilizados em paredes com orientações distintas.

Guichard *et al.* (2017) concluíram que, pela carta psicrométrica de Givoni, com o uso de PCM associado à ventilação natural, o conforto térmico poderia ser alcançado para uma região de clima tropical e úmido. Brito *et al.* (2017) alertam para as proporções de materiais transparentes e opacos, orientações de aberturas envidraçadas e taxa de ventilação. Madhumathi e Sundarraja (2014) também salientam a inclusão da ventilação como parâmetro no modelo de construção. Quanto a ventilação noturna, Nazi *et al.* (2017) determinou que seu uso possuiu melhor desempenho quando associado a PCMs nas paredes externas. A ventilação noturna também é valorizada por Solgi *et al.* (2017, 2019a) como uma técnica produtiva de resfriamento passivo que demonstra um alto potencial de redução de cargas de resfriamento.

Espessura

Todos os autores constataram que a utilização do PCM em edificações de clima quente ocasiona significativas reduções no consumo de energia. Além disso, é praticamente unânime a conclusão de que o aumento da espessura da camada de PCM, independente do seu local de aplicação, contribui para a economia de energia total da edificação. Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) ponderam que, para um volume constante de PCM, a eficiência energética aumentou com uma camada mais fina de PCM e uma maior área de superfície coberta com PCM.

Temperatura de mudança de fase

A temperatura de fusão é essencial para um desempenho otimizado do sistema. Seus valores estão relacionados com o posicionamento do PCM nas camadas de materiais, sua espessura, condições climáticas externas e set-point interno, além de outras características ambientais e construtivas, como orientação da edificação, incidência direta solar e cor da superfície. Ji *et al.* (2019) enfatizam que a seleção do PCM deve ser feita pensando no completo processo de fusão-solidificação, aproveitando ao máximo a capacidade do material para a redução da carga térmica do ambiente. Complementando, Lei, Yang e Yang (2016) concluíram que, para PCMs aplicados nas superfícies externas, a melhor temperatura de transição é a mais baixa desde que permita o processo completo de fusão-solidificação. Para os PCMs aplicados internamente, a melhor temperatura de fusão corresponde à temperatura média das superfícies internas. Além disso, segundo Solgi *et al.* (2019a), com o uso de materiais de isolamento, a temperatura otimizada de fusão para regiões de clima quente e seco fica em torno de 1 °C abaixo da temperatura de set-point. Da mesma forma, Biswas *et al.* (2014) encontraram que temperaturas de set-point próximas à de fusão apresentaram um comportamento melhor para o verão, que possui maiores temperaturas. Assim, Memarian *et al.* (2018) determinaram que, para as estações quentes, a melhor escolha de PCM foi em torno de 29 °C de temperatura de fusão, sendo que Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) encontraram a temperatura para mudança de fase no valor de 26 °C. Brito *et al.* (2017) ponderam, contudo, que um maior valor de capacidade de armazenamento térmico latente pode compensar um ponto de fusão menos adequado.

Desempenho termoenergético

O fator econômico não pode ser ignorado, como ponderado por Ji *et al.* (2019). Sovetova, Memon e Kim (2019) calcularam um período de retorno de 60 anos, avaliado como economicamente viável. Solgi, Memarian e Moud (2018) reiteram, contudo, que por mais que o uso de PCMs leve a uma economia de energia significativa, com os custos de energia e PCMs no Irã o uso desses materiais não se apresenta como econômico.

Alguns autores apresentaram os resultados em termos de redução percentual no consumo energético: Hu e Yu (2019) calcularam de 1% a 7% menos energia se o PCM for posicionado como camada interna; Ji *et al.* (2019) mostraram possível queda de 20,9%; Sovetova, Memon e Kim (2019) indicaram uma redução de temperatura de 2,04 °C, equivalente a uma redução no consumo energético entre 17,97% a 34,26%; Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) um consumo energético menor entre 16,58% a 68,63%; Memarian *et al.* (2018) mensuraram 15% e Akeiber *et al.* (2017) 45%. Rathore e Shukla (2019) identificaram uma redução de temperatura interna do ambiente entre 7,19% e 9,18% e de carga térmica do ambiente em 38,76%. Lei, Yang e Yang (2016) detectaram redução nos ganhos de calor de 21% a 32% com o uso de PCM na envoltória da edificação. Rathore, Shukla e Gupta (2020) mostram uma redução na temperatura de pico interna durante todo o ano, variando de 0,2 °C a 4,3 °C, e uma redução percentual na amplitude térmica interna variando de -2,43 % a 51,3 %.

Limitações e sugestões

Como limitações de pesquisa, de um modo geral os autores ponderam que as análises realizadas não podem ser extrapoladas para outros casos, por serem muito específicas, defendendo assim a necessidade de simulação para cada caso de interesse. Biswas *et al.* (2014) estudaram a influência do PCM apenas em uma parede e apontaram como limitação o fato de não considerarem a edificação como um todo e suas variáveis. Todavia, esse problema já foi solucionado com os artigos mais recentes, pela ampliação das variáveis consideradas e de simulações mais complexas. Nematchoua *et al.* (2020) ressaltam a importância da análise estatística aprofundada dos dados obtidos, e Iommi (2018) afirma que um protótipo real seria o mais seguro para mensuração do desempenho da edificação. Saikia *et al.* (2020) ressaltam que a configuração ideal é significativamente afetada pela localização dos materiais nas paredes e no teto, não sendo possível uma afirmação da situação mais adequada. O foco pode ser no ganho mínimo de calor durante o horário de pico ou ganho mínimo de calor por custo unitário de construção e manutenção.

Conclusão

Os artigos mapeados demonstraram o grande potencial que os PCMs têm na redução do consumo energético das edificações em países de clima quente, como o Brasil, sobretudo no sistema de refrigeração, pela diminuição de carga térmica e manutenção do conforto interno.

A maior utilização de um tipo de PCM muitas vezes está relacionada com a disponibilidade do material nas regiões de estudo, além do custo inferior. A relação custo-benefício pode ser relacionada ao contexto brasileiro, no qual a aquisição desses materiais ainda não é acessível, embora seja comprovada a sua eficiência para climas quentes. Tal fato é reforçado também pelo número de publicações e pela distribuição entre países, já que apenas um artigo nacional foi incluído no contexto desta análise.

Quanto às técnicas de inserção do PCM nos materiais de construção, todos os artigos consideraram o encapsulamento. Deduz-se que a simulação numérica ou com modelos de edificações impedem a consideração de outras formas, como inserção direta ou imersão, devido à forma com que as propriedades são introduzidas na análise.

Além da observância dos parâmetros climáticos e das propriedades termofísicas do PCM, ênfase igual deve ser dada à orientação das fachadas, sendo possível, inclusive, a utilização de mais de um tipo de material de mudança de fase em uma mesma edificação, a depender da fachada em que será exposto. Deve-se avaliar também a

associação de outras estratégias passivas como ventilação noturna, caimento do telhado e sombreamento externo.

Em relação às características físicas, a espessura do PCM exerce grande influência no desempenho térmico, com uma relação diretamente proporcional à sua eficiência, porém aumenta-se o custo. Pondera-se ainda que a temperatura ótima depende de onde o PCM está inserido, se está associado a outros materiais isolantes e também da sua capacidade de armazenamento térmico latente. Entretanto, as informações aqui apresentadas podem e devem ser usadas como referência inicial para estudos dos materiais e técnicas mais apropriados dentro da realidade local.

Uma lacuna identificada e que pode ser melhor explorada dentro da realidade do Brasil é a utilização associação de edifícios leves com os PCMs, abordada dentro do próprio artigo nacional selecionado, uma vez que o perfil de construção atual ainda está propenso a construções mais pesadas. Além disso, outros três hiatos foram identificados: a correlação entre pontes térmicas e PCM, abordada por um único artigo; a utilização de PCMs no piso, apontada como promissora em dois artigos; e a determinação do conforto térmico com o uso de PCM pelos índices PMV e PPD, retratada em um único trabalho. Por fim, sugere-se também a investigação de possíveis aplicações do PCM como acumulador do calor interno a ser dissipado por algum outro dispositivo. Essa aplicação fez parte do protocolo de exclusão, porém as soluções ativas podem enriquecer outras análises.

Reforça-se o princípio de que cada projeto é único, não sendo possível padronizar soluções, pois o contexto regional, a disponibilidade do material e dos recursos financeiros, os objetivos de interesse e a existência das zonas bioclimáticas exercem influência significativa.

Salienta-se, assim, a significância desse trabalho com a identificação das tendências de pesquisa e das lacunas encontradas para a importante relação entre tecnologia e desempenho termoenergético de edificações com o uso de PCMs.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento de bolsa de pós-graduação à primeira autora (Número do processo: 88882.383758/2019-01).

Notas

(1) *indica a possibilidade de variação das palavras mantendo a mesma ideia.

Referências

AKEIBER, H. J. *et al.* Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 48–61. 2017. ISSN 0196-8904. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.043>

ARANDA-ÚSON, A. *et al.* Phase change material applications in buildings: An environmental assessment for some Spanish climate severities. **Science of The Total Environment**, v. 444, p. 16-25. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.012>

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase Change Materials For Building Applications: a state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361-1368, set. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>

BIMAGANBETOVA, M; MEMON, S. A.; SHERIYEV, A. Performance evaluation of phase change materials suitable for cities representing the whole tropical savanna climate region. **Renewable Energy**, v. 148, p.402-416, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.046>

BISWAS, K. *et al.* Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard. **Applied Energy**, v. 131, p. 517–529. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.047>

BORGSTEINA, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bankbranches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82–91. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.028>

BRITO, A. C. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125-145, jan./mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>

CHADEGANI, A. A. *et al.* A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. **Asian Social Science**, v. 9, n. 5, p. 1911-2017. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>

COSTA, H. A.; LOGSDON, L.; FABRICIO, M. M. Flexibilidade em projetos de arquitetura: contribuições a partir de uma revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 3, p. 144-160, set. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650206>

FABBRI, S. *et al.* Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process. In: 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 21, Limerick, 2016. **Anais [...]**. Limerick: ACM/Digital Library, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2915970.2916013>

GOUGH, D.; OLIVER, S; THOMAS, J. **An introduction to systematic reviews**. Londres: Sage Publications Ltd., 2012.

GUARINO, F. *et al.* PCM thermal energy storage in buildings: experimental study and applications. **Energy Procedia**, v. 70, p. 219 – 228. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.118>

GUICHARD, S. *et al.* A complex roof incorporating phase change material for improving thermal comfort in a dedicated test cell. **Renewable Energy**, v. 101, p. 450-461. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.018>

HAWES, D. W.; FELDMAN, D.; BANU, D. Latent heat storage in building materials. **Energy and Buildings**, v.20, p. 77-86. 1993.

HERNANDES, E. *et al.* Using GQM and TAM to evaluate StArt – a tool that supports Systematic Review. **CLEI Electronic Journal**, v.15, n.1, p.3, abr. 2012.

HU, J.; YU, X. Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions. **Solar Energy**, v. 193, p. 866–877, outubro. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.021>

IOMMI, M. The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1450-1460, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.025>

Ji, R. *et al.* Numerical assessing energy performance for building envelopes with phase change material. **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 12, p. 6222–6232. 2019. DOI: <https://doi.org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1002/er.4293>

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele University Technical Report TR/SE-0401**, Department of Computer Science, Keele University, 2004.

KÖSE, E.; MANIOĞLU, G. Evaluation of the performance of a building envelope constructed with phase-change materials in relation to orientation in different climatic regions. **E3S Web of Conferences**, v. 111, n. 201 9. 2019.

LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. -H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. **Applied Energy**, v. 162, p. 207–217. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.031>

MADHUMATHI, A.; SUNDARRAJA, M.C. Energy efficiency in buildings in hot humid climatic regions using phase change materials as thermal mass in building envelope. **Energy and Environment**, v. 25, n. 8, p. 1405-1421. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1260/0958-305X.25.8.1405>

MARIN, P. *et al.* Energy savings due to the use of PCM for relocatable light weight 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>

MEMARIAN, S. *et al.* Single and combined phase change materials: Their effect on seasonal transition period. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 453–472. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.085>

NATEPHRA, W. *et al.* Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. **Building and Environment**, v. 124, p. 194-208. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.004>

NAZI, W. I. W. M. *et al.* P. Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate. **Energy Procedia**, v. 142, p. 2295-2302. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.632>

NEMATCHOUA, M. K. *et al.* Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates. **Solar Energy**, v. 207, p. 458-470. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.110>

NEMATCHOUA, M. K.; VANONA, J. C.; OROSA, J. A. Energy Efficiency and Thermal Performance of Office Buildings Integrated with Passive Strategies in Coastal Regions of Humid and Hot Tropical Climates in Madagascar. **Applied Sciences**, v. 10, n.7, p.2438. 2020. DOI: <https://dx.doi.org.br/10.3390/app10072438>

MAO, Q. YANG, M. Study on heat transfer performance of a solar double-slope PCM glazed roof with different physical parameters. **Energy and Buildings**, v. 223, p. 11041. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110141>

PISELLI, C. CASTALDO, V. L. PISELLO, A. L. How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions. **Solar Energy**, v. 192, p. 106-119. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.047>

RAOUX, S. Phase change materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 39, p. 25-48. 2009. DOI: <https://doi.org.br/10.1146/annurev-matsci-082908-145405>

RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1300-1313. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.130>

RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K.; GUPTA, N. K. Yearly analysis of peak temperature, thermal amplitude, time lag and decrement factor of a building envelope in tropical climate. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101459. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101459>

RUSCHEL, R. C. *et al.* Revisões sistemáticas da Literatura: Parte II. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 4, p. 217-219, dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v8i4.8652036>

SAIKIA, P; AZAD, A. S.; RAKSHIT, D. Thermodynamic analysis of directionally influenced phase change material embedded building walls. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 126, p. 105–117. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.029>

SAIKIA, P. *et al.* Dynamic optimization of multi-retrofit building envelope for enhanced energy performance with a case study in hot Indian climate. **Energy**, v. 197, p. 117263, abril. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117263>

SOARES, N. *et al.* Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 82-103. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>

SOLGI, E. *et al.* The impact of phase change materials assisted night purge ventilation on the indoor thermal conditions of office buildings in hot-arid climates. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 448-497. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.035>

SOLGI, E. *et al.* A parametric study of phase change material behavior when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, v. 147, p. 327-336. 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>

SOLGI, E. *et al.* A parametric study of phase change material characteristics when coupled with thermal insulation for different Australian climatic zones. **Building and Environment**, v. 163, p. 106317. 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106317>

SOLGI, E.; FAYAZ, R.; KARI, B. M. Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. **Renewable energy**, v. 85, p. 725-731. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.028>

SOLGI, E.; MEMARIAN, S.; MOUD, G. N. Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 128-137. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.028>.

SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, v. 189, p. 357-371, abril. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.067>

WAHID, M. A. *et al.* 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>

YAN, T. *et al.* Dynamic simplified PCM models for the pipe-encapsulated PCM wall system for self-activated heat removal. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 144, p. 27-41. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.05.015>

ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, v. 92, p. 593-605. 2012. DOI: <https://doi.org.br/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>

¹ **Roberta Bastos de Oliveira**

Engenheira Civil. Mestranda em Estruturas e Construção Civil na Universidade de Brasília. Endereço postal: Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF – Brasil. CEP 70.910-900

² **Tomaz Silva Gonzales**

Engenheiro Mecânico. Mestrando em Arquitetura e Urbanismo na Universidade de Brasília. Endereço postal: Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF – Brasil. CEP 70.910-900

³ **Michele Tereza Marques Carvalho**

Engenheira Civil. Doutorado em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília. Professora Adjunta na Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Endereço postal: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF – Brasil. CEP 70.910-900