REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE AVALIAÇÕES EVOLUTIVAS MULTIOBJETIVO PARA APLICAÇÃO DE PCM EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS TERMOENERGÉTICAS

Rodrigo Karini Leitzke (1); Maria Augusta Guisso Gonzaga (2); Anderson Priebe Ferrugem (3); Eduardo Grala da Cunha (4)

(1) Mestrando em Arquitetura e Urbanismo, Cientista da Computação, rodrigokarinileitzke@gmail.com, Universidade Federal de Pelotas, R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, (53) 3284-5500

(2) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, mariaguisso@outlook.com, Universidade Federal de Pelotas, R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, (53) 3284-5500

(3) Mestre, Cientista da Computação, apferrugem@gmail.com, Universidade Federal de Pelotas, R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, (53) 3284-5500

(4) Doutor, Arquiteto, eduardogralacunha@yahoo.com.br, Universidade Federal de Pelotas, R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, (53) 3284-5500

RESUMO

Dentre as problemáticas da construção civil nacional, pode-se destacar a necessidade de mecanismos que contribuam com a regulagem da temperatura dos ambientes internos em situações com baixos níveis de capacidade térmica na composição de seus fechamentos, em especial no caso das construções leves. Como uma das tecnologias de contorno desta situação, os Materiais de Mudança de Fase (ou *Phase Change Materials* - PCM), estão sendo utilizados na composição de edifícios em diferentes contextos climáticos ao redor do mundo. O uso do PCM como armazenador de calor latente faz com que o seu processo de mudança de fase atue a partir das condições de temperatura na qual este material está exposto. Temperaturas elevadas fazem com o material entre na fase de fusão, armazenando calor latente enquanto se liquefaz. Temperaturas baixas fazem com que o material entre na fase de congelamento, liberando calor latente para os ambientes enquanto se solidifica. Contudo, por se tratar de uma tecnologia nova no contexto da construção nacional, este trabalho visa apresentar contribuições cientificas a partir de um protocolo de revisão sistemática de literatura (RSL) com enfoque no processo de simulação computacional evolutiva, observando as tecnologias de PCMs testados, bem como as ferramentas computacionais de simulação e de inteligência artificial adotadas nas produções. Os principais resultados desta revisão apontam para uma predominância do método de simulação como instrumento de avaliação do comportamento dos PCMs em edifícios, além da baixa quantidade de trabalhos que discutem o tema no Brasil.

Palavras-chave: PCM, Simulação de edifícios, Análises evolutivas.

ABSTRACT

Among the problems of the national civil construction, it is possible to highlight the need for mechanisms that contribute to the regulation of the temperature of the internal environments in situations with low levels of thermal capacity in the composition of its closures, especially in the case of light constructions. As one of the circumvention technologies of this situation, phase change materials (PCM), are being used in the composition of buildings in different climatic contexts around the world. The use of pcm as a latent heat store makes its phase change process start from the temperature conditions in which this material is exposed. High temperatures cause the material to enter the melting phase, storing latent heat while it liquefies. Low temperatures cause the material to enter the freezing phase, releasing latent heat to the environment while it solidifies. However, as it is a new technology in the context of national construction, this work aims to present scientific contributions with a focus on the evolutionary computational thermoenergetic simulation process, observing the tested pcm technologies, as well as the computer simulation and artificial intelligence tools adopted in productions that considered the use of these materials in buildings. The main results of the review point to a predominance of the simulation method as an instrument to assess the behavior of PCMs in buildings, in addition to the low number of studies that discuss the subject in Brazil.

Keywords: PCM, Buildings simulations, Evolutionary analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os PCMs são compostos que armazenam calor latente quando liquefazem e liberam este calor quando solidificam. O armazenamento de energia deste tipo de material funciona com a alteração da sua fase, caracterizando um processo endotérmico que reorganiza as moléculas e pausa a curva de aquecimento até o encerramento da etapa de fusão do material. Ao resfriar se observa o oposto, o PCM libera energia continuamente sem que varie a sua temperatura até o momento da solidificação completa do material. Na mudança de estado sólido para líquido pode ocorrer dilatação, já na mudança de estado líquido para solido, contração. As variações no volume do PCM podem ou não ser ignoradas, dependendo do tipo PCM de utilizado (MEHLING, 2008).

Considerando a sua utilização em fechamentos edificados, quando corretamente aplicado, respeitando as especificações de calor específico, massa, e sistema de circulação do ar, este efeito de armazenar energia no aquecimento e de liberar energia no resfriamento causa um fenômeno que retarda e minimiza variações de temperatura no ambiente. Ainda, pode gerar uma economia no consumo de energia elétrica por conta do atraso nos gastos em horários de pico, visto a redução no uso de resfriadores no verão e de aquecedores no inverno (MAVRIGIANNAKI, 2016).

A configuração dos PCMs envolve pelo menos seis variáveis: as faixas de temperatura de fusão e solidificação, calor específico, densidade quando sólido, densidade quando líquido e a capacidade térmica. Como estratégias para avaliar a combinação destas variáveis junto aos diferentes tipos de PCMs que podem ser aplicados em um fechamento, apresentam-se na literatura duas abordagens com discussões que avaliam estes cenários por meio de protótipos em modelos físicos ou através de simulações computacionais.

A análise por meio de simulação computacional, ainda que restrita quanto as variações dos fenômenos físicos em relação ao meio em que está inserida, permite com que os PCMs sejam avaliados considerando uma ampla variação de suas composições. Através da simulação é possível testar a aplicação dos PCMs em diferentes estratégias de ventilação, climatização, características do edifício, variações nas condições de contorno e climas.

Embora a simulação computacional execute as avaliações pretendidas de forma eficaz e em tempo hábil, análises mais complexas como, por exemplo, identificar o PCM ideal para o fechamento de um determinado edifício em um contexto climático específico, resultam na necessidade da realização de inúmeras simulações dentro de um contexto pré-definido. Como contorno podem ser utilizadas estratégias de parametrização, otimização e ferramentas de inteligência artificial (IA) para a obtenção de dados de saída mais precisos em intervalos de tempo menores.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar a execução de um protocolo de RSL para produções que discutem a inserção dos PCMs no contexto da simulação computacional de edifícios, buscando identificar os contextos climáticos, as tecnologias de PCMs, as ferramentas computacionais de simulação térmicas e energéticas e os recursos de IA utilizados.

3. MÉTODO

O método do trabalho pode ser apresentado em quatro etapas. A primeira etapa consistiu na elaboração do protocolo de revisão e na identificação das produções analisadas através das bases de produções científicas, considerando a combinação dos termos de busca. Na segunda etapa as produções identificadas e filtradas pelo protocolo de RSL foram fichadas e relacionadas. Na terceira etapa foi realizada a relação entre as produções lidas e a identificação dos pontos de interesse para o objetivo deste trabalho. Na quarta e última etapa foi elaborada uma análise crítica acerca dos pontos apresentados.

A constituição do protocolo baseou-se no método de RSL de Kitchenham et al. (2009) que determina como elementos de composição do protocolo o objetivo, questões de pesquisa, palavras-chave, sinônimos, bases de artigos científicos, termos de busca (*strings*), critérios de inclusão e critérios de exclusão.

O objetivo da RSL foi estipulado como: “Identificar a características de configuração e avaliação das produções que utilizam PCMs na composição de fechamentos edificados por intermédio de simulações computacionais evolutivas.”. Como questão principal da pesquisa de revisão: “Os PCMs podem minimizar os efeitos da falta de massa térmica em fechamentos externos verticais quanto ao consumo de energia elétrica?”, como questões específicas: “Quais são os tipos de PCMs mais adequados para construção civil?”, “Quais são as melhores composições químicas de PCMs para prática construtiva?”, “Quais estratégias de otimização são consideradas nas produções que avaliam por simulação a aplicação de PCMs em fechamentos?”, e por fim,

“Quais algoritmos e parâmetros são combinados com a simulação térmicas e energéticas para avaliação das diferentes tecnologias de PCMs?”.

A Tabela 1 abaixo apresenta as palavras-chave e os sinônimos considerados para elaboração dos termos de busca.

Tabela 1 – Palavras-chave e sinônimos considerados para elaboração dos termos de busca.

Palavras-chave	**Sinônimos**
PCM	phase change materials; latent heat storage materials; LHS
Building energy simulation	building simulation; energy simulation
Optimization	optimize; optimizing; streamline; evaluation
Multi-objective Evolutionary Algorithms	MOEA; pareto-front based algorithm
Thermal inertia	thermal capacity; thermal mass
Energy consumption	electricity consumption

As bases de artigos científicos Science@Direct e SCOPUS foram consideradas escolhidas, sendo ambas internacional e vinculadas com periódicos de alto fator de impacto. Nenhuma base nacional foi considerada em função da ausência de produções para parte das *strings* de busca estipuladas, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Termos (*strings*) de busca para os pontos de interesse do trabalho.

STR1 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Optimization" OR "optimize" OR "evaluation")
Comentário STR1: String sobre otimização de PCMs em simulações termoenergeticas.
STR2 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Multi-objective Evolutionary Algorithms" OR "pareto-front based algorithm")
Comentário STR2: String sobre algoritmos evolutivos em simulações termoenergéticas com PCMs
STR3 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials" OR "LHS") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("Thermal inertia" OR "thermal capacity" OR "thermal mass")
Comentário STR3: String sobre a inércia térmica em simulações termoenergéticas com PCMs
STR4 ("PCM" OR "phase change materials" OR "latent heat storage materials" OR "LHS") AND ("Building energy simulation" OR "building simulation" OR "energy simulation") AND ("energy consumption" OR "electricity consumption")
Comentário STR4: String sobre o consumo de energia em simulações termoenergéticas com PCMs

Após as buscas pelas duas bases um total de 159 produções foram identificadas considerando a presença dos termos de busca, sendo nestas aplicadas um filtro de leitura dos *abstracts* para considerar ao final da aplicação do protocolo um total de 68 produções que foram lidas e fichadas. Para o detalhamento e discussão foram identificadas as produções que porventura se repetiram em duas ou mais *strings* de busca, bem como nas duas bases de dados para o mesmo termo de pesquisa. Desta forma, as produções apresentadas no item a seguir fazem parte do grupo de produções alinhadas com a temática do objetivo deste trabalho.

4. PRODUÇÕES EM DESTAQUE

A partir da problemática do consumo de energia em edificações na China, Cai et al. (2021) apresentam uma revisão bibliográfica sobre as possibilidades de implantação de PCMs em envoltórias. Quatro pontos principais foram destacados pelos autores: os parâmetros de otimização, os objetivos de otimização, os métodos de otimização e os modelos de transferência de calor utilizados. Os autores fazem uso do produto da revisão bibliográfica para realizar uma descrição textual dos diversos métodos, locais e informações descritas. A partir desse apanhado, foram geradas tabelas apontando dados para cada um dos quatro pontos principais observados. Quanto aos parâmetros de otimização para os materiais em mudança de fase, a temperatura dos pontos de fusão e solidificação durante a mudança de fase é, segundo os autores, o parâmetro mais importante quanto ao afeito de sua variação na aplicação de composição dos fechamentos, sendo os limites destas variáveis sensíveis ao contexto climático.

Para os objetivos de otimização da envoltória, a maior parte das pesquisas estão voltadas para economia de energia da edificação, para o controle dos picos de demanda energética e para a avaliação do

fluxo de calor do edifício. Cabe destaque também para otimizações na ótica da conservação de energia, utilização de energia térmica, aspectos mecânicos, econômicos e ambientais.

Os Métodos de otimização (baseados em simulação), destacam o uso das ferramentas MATLAB, ANSYS e FLUENT, combinadas com os métodos método de entalpia 1D e método de capacidade de calor 1D, como principais tecnologias adotadas nas pesquisas que avaliam os PCMs, ainda que exista a ressalva de que, embora os modelos de transferência de calor 1D possuem boa precisão, os fenômenos de super resfriamento e convecção natural do PCM podem não ser bem representados. Para a seleção de otimização de parâmetros de mudança de fase, a maioria dos pesquisadores estuda apenas a otimização de um ou dois parâmetros.

A escolha dos objetivos de otimização voltados para performance térmica e energética predominam as avaliações, de todo modo, são sugeridos novos objetivos relativos a performance mecânica, econômica e ambiental, visto que as produções com avaliações multiobjetivos são apontados como de importância significativa para trabalhos futuros.

Os autores apontam que a seleção/escolha de PCM pode ser considerada um problema de otimização, ainda que os PCMs micro encapsulados parafínicos, aplicados nas paredes externas ou placas de revestimento em gesso tenham sido os mais recorrentes entre os trabalhos analisados, os quatro pontos observados pela pesquisa bibliográfica realizada são necessários na consideração deste problema.

Quando definido o parâmetro de mudança de fase ótimo, as pesquisas apresentam apenas este caso, o que pode não ser aplicável para outros modelos. Assim sendo, a revisão auxilia os pesquisadores na escolha do PCM com parâmetros de mudança de fase apropriados para melhoria de características energéticas e de conforto térmico. Por fim, restam dúvidas sobre a implementação das tecnologias em PCM em larga escala sob o ponto de vista econômico global.

Bagheri-Esfeh, Safikhani e Motahar (2020) propõem um novo método para otimizar a especificação dos PCMs, visando solucionar o problema relativo à aplicação da tecnologia nos períodos de calor e de frio, partindo da premissa de que as produções consideram soluções apenas para o período frio. O estudo realiza uma otimização de dois objetivos, identificando a partir das simulações os pontos ótimos de Pareto.

O objetivo principal de minimizar as cargas de resfriamento e aquecimento em uma edificação residencial em Tehran - Irã, considerando a aplicação de PCMs.

Quanto as tecnologias utilizadas, foram realizadas modelagens numéricas, redes neurais artificiais e o algoritmo de otimização multiobjetivo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II). O *EnergyPlus* (EP) foi utilizado como instrumento para o treinamento da rede neural. Após a obtenção dos dados de saída da rede, a execução do modelo evolutivo apontou para os casos ótimos de Pareto, indicando que pontos de fusão e solidificação entre 22 e 29°C, bem como fechamentos com um maior nível de isolamento térmico, mesmo em cenários com baixa inércia térmica, contribuem com a redução das demandas energéticas da edificação.

Cascone, Capozzoli e Perino (2018) propuseram uma análise para otimização multiobjetivo em um *retrofit* energético em edifícios de escritórios com adição de PCM nos fechamentos opacos. O estudo considerou duas condições climáticas na Itália onde as edificações estudadas estão inseridas (Csa e Cfa). Para o *retrofit*, foram consideradas as seguintes mudanças: adição de PCM e isolamento nas paredes externas, troca das janelas com mudança de posição dos elementos de sombreamento de internos por externos, instalação de sistema de ventilação mecânica, reforma do sistema de aquecimento e refrigeração, instalação de controle de iluminação (*dimming lighting control*). As intervenções para a parte interna e externa das paredes foram realizadas por meio de um modelo paramétrico. Como ferramenta de simulação o *EnergyPlus* 8.0.0 foi escolhido para análise energética. Para necessidades energéticas relativas a aquecimento e resfriamento, o sistema foi modelado com *IdealLoadsAirSystem* com capacidade auto dimensionada para as duas condições. O Algoritmo de *ConductionFiniteDifference* foi adotado para modelagem das paredes com PCM e o modelo de *ConductionTransferFunction* foi usado para a ausência do PCM a fim de reduzir o tempo de cálculo. Para realização das otimizações, o Algoritmo Evolutivo NSGA-II, implementado através da linguagem de programação *Python* foi utilizado, encontrando ao final da execução os valores para Pareto *front*. A partir dos resultados, foram utilizados para investigação dois objetivos de comparação para aplicação do PCM nas partes interna e externa das paredes quanto ao consumo de energia e custo global, visando ampliar a investigação de três objetivos: redução de gastos energéticos para aquecimento, resfriamento e custo de investimento. Os autores concluem que a aplicação do PCM tem melhor performance energética quando na parte interna das paredes para os dois contextos climáticos italianos. Na análise biobjetivos, o consumo de energia primário foi reduzido com o aumento de espessura do PCM, ainda que economicamente o PCM se mostre inviável quando analisado junto ao custo global. Por fim, o calor latente e as temperaturas de fusão e solidificação foram apontados como aspectos de grande influência para indicar a eficiência do PCM.

Markarian e Fazelpour (2019) adotam uma estratégia de otimização multiobjetivo para encontrar o tipo e localização do PCM ideais a fim de minimizar cargas de aquecimento e resfriamento em cinco cidades do Irã com climas distintos. O estudo foi feito através de simulação das edificações com o software *DesignBuilder*, sendo adotado em seguida o uso de um algoritmo multiobjetivo para otimização de performance energética com mudanças de tipo e localização do PCM. Por fim, as otimizações foram analisadas a partir de objetivos ambientais e econômicos na ótica da avaliação de riscos. Os algoritmos *conduction finite difference algorithm – CondFD* e o método evolutivo proposto pelo algoritmo NSGA-II foram utilizados. Os PCMs considerados para o estudo possuem disponibilidade comercial e obtidos em catálogos das manufatureiras. Quanto aos resultados, a aplicação de PCM apresentou benefícios ambientais que o colocam a frente de materiais de isolamento, no entanto, mostra-se ainda como uma tecnologia economicamente inviável no Irã. A integração do PCM para os climas árido, semiárido e temperado apresentou viabilidade de aplicação e se mostrou benéfica para economia energética. Para todos os climas, o uso de PCM resultou em economia de eletricidade. Além disso, também houve redução de pegada de carbono anual.

Song et al. (2018) realizaram um estudo sobre a aplicação de PCM como um sistema de armazenamento de energia térmica para uma edificação. Para aplicação na envoltória foram consideradas as aplicações de PCM nas paredes junto ao gesso de revestimento, como argamassa de reboco, concreto e tijolo, em coberturas incorporado em forros de gesso, cobertura com múltiplas camadas integrado a laje com sistema de aquecimento solar, somado ao uso de placas fotovoltaicas, em pisos concretados com sistema de aquecimento por radiação, como também embutido no piso e somado com sistema de resfriamento. Para otimização de equipamentos utilizados nas edificações junto aos sistemas de refrigeração, aquecimento e de ventilação. Os autores consideraram PCMs parafínicos e ácidos orgânicos binários com tecnologias para aplicação, avaliando o comportamento a partir dos softwares ANASYS, CFD, *EnergyPlus*, FEM, PLUENT e TRNSYS. Os resultados mostram que as temperaturas ideais para maximização de geração da energia térmica deram-se com a variação de temperatura da mudança de fase do PCM entre 10~39°C nos componentes da envoltória e entre -15.4~77°C em equipamentos.

Liu et al. (2020) apresentam uma otimização de PCM estabelecida em níveis micro e macro encapsulados, com uso de nano tubos de carbono e tiras metálicas. O experimento consiste na aplicação de parafina líquida nos nano tubos de carbono para encontrar a razão entre as quantidades dos dois elementos de forma a melhorar a condutividade térmica do composto, identificando assim o aparecimento de rotas de transferência de calor que indicam as melhorias no processo de armazenamento de calor. Já para as tiras metálicas foram otimizados os parâmetros geométricos, fazendo com que o processo de transferência de calor fosse mais rápido e homogêneo. A parede composta analisada com painel de PCM otimizado apresentou melhorias quanto a temperatura da face interna e maior valor de pico para transferência de calor, apresentando maior estabilidade térmica, sobretudo na solução micro encapsulada.

Kuznik et al. (2015) apresentam uma metodologia com o objetivo de identificar soluções de composições projetuais para aplicação de PCM. O foco do trabalho é na redução energia para aquecimento, visto que é o aspecto responsável pelo maior consumo de energia na Europa, contexto climático de avaliação do trabalho. Segundo os autores, a metodologia desenvolvida para o caso de aquecimento também é válida para redução de resfriamento. A premissa básica é que a aplicação desejada parta de uma consideração cuidadosa quanto a definição das características do material, desta forma, para análise de comportamento térmico e requerimentos para aquecimento, foi utilizado um modelo de residência de baixas necessidades energéticas (*low-energy*) localizado em Chambéry, França. Em seguida, foi realizada a modelagem numérica para parede de PCM é integrada a parte interna da parede. Dos resultados obtidos quanto as propriedades térmicas do PCM, os autores destacam que o calor latente apresenta influência na redução da demanda de aquecimento anual, a condutividade térmica afeta o armazenamento e a liberação de calor, influenciando também o consumo de energia. Os resultados para otimização obtidos pelo consumo anual de aquecimento apresentam 23% de redução de energia, aplicadas propriedades especificas para a parede com PCM. Houve ainda uma maximização de capacidade de armazenamento de calor e de condutividade.

5. ANÁLISE CRÍTICA DAS PRODUÇÕES DESTACADAS

Quanto ao conjunto de produções em destaque para o protocolo de RSL realizado, apresentadas na seção 4 deste trabalho, algumas condições de relação podem ser apontadas, bem como situações de amplitude do ponto de vista geográfico e de contextos para aplicação dos PCMs.

Iniciando pelo contexto climático, as aplicações e testes por simulação com relação a localização dos experimentos se mostraram amplas no sentido da diversidade de climas e características. Embora os PCMs tenham um conhecido papel de atendimento satisfatório em construções situadas em climas predominantemente frios, diferentes trabalhos aqui apresentados apontam para possibilidade de aplicação do

material como um elemento capaz auxiliar nas condições internas dos ambientes, tanto nos períodos frios quanto nos períodos quentes, agindo como um armazenador de calor latente não apenas no ponto de vista do fornecimento da carga térmica necessária para suprir a ausência que o fechamento porventura necessite, mas também como um material capaz de absorver a carga interna nos períodos de sobreaquecimento destes mesmos ambientes. Essa situação demonstra a viabilidade de uso destes materiais em diferentes contextos climáticos, inclusive em localidades com estações do ano bem definidas e grande amplitude térmica diária.

Quanto as tecnologias de PCMs utilizadas, observa-se um predomínio dos PCMs parafínicos, em especial os micro encapsulados. A aplicação deste PCM pôde ser observada constantemente na composição das paredes, sendo testada em revestimentos, como também no próprio elemento de vedação.

Para questão das ferramentas de simulação os softwares *ANSYS, EnergyPlus* e *DesignBuilder* foram os mais recorrentes nas produções destacadas, sendo o instrumento de otimização mais frequente o algoritmo evolutivo NSGA-II em combinação com avalição uni objetivo, biobjetivo e multiobjetivo para os pontos de Pareto.

6. CONCLUSÕES

Conforme o objetivo deste trabalho, que buscava apresentar a execução de um protocolo de RSL para identificação de produções científicas com enfoque na temática da inserção dos PCMs no contexto da simulação computacional de edifícios, buscando identificar os contextos climáticos, as tecnologias de PCMs, as ferramentas computacionais de simulação térmicas e energéticas e os recursos de IA utilizados, pode-se observar que as informações requeridas como parte da RSL foram obtidas através da análise do recorte de produções apresentadas neste trabalho.

Ainda que algumas informações tenham sido observadas de forma comum entre as produções, os trabalhos sugerem (sobretudo os de revisão de literatura) a necessidade de ampliação dos cenários de avaliação dos PCMs na composição de elementos da construção civil, sendo a simulação computacional uma aliada na identificação dos impactos térmicos e energéticos da aplicação destes componentes no desempenho dos edifícios.

Este trabalho se posiciona como um ponto de partida para promoção da discussão acerca dos PCMs no contexto nacional e busca trazer direcionamentos preliminares para identificação e uso desta tecnologia construtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGHERI-ESFEH, Hamed; SAFIKHANI, Hamed; MOTAHAR, Sadegh. Multi-objective optimization of cooling and heating loads in residential buildings integrated with phase change materials using the artificial neural network and genetic algorithm. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101772, 2020.

CAI, Ruonan et al. Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes**. Journal of Building Engineering**, p. 101979, 2020.

CASCONE, Ylenia; CAPOZZOLI, Alfonso; PERINO, Marco. Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates. **Applied energy**, v. 211, p. 929-953, 2018.

KITCHENHAM, Barbara et al. Systematic literature reviews in software engineering–a systematic literature review**. Information and software technology**, v. 51, n. 1, p. 7-15, 2009.

KUZNIK, Frédéric et al. Phase change material wall optimization for heating using metamodeling. **Energy and Buildings**, v. 106, p. 216-224, 2015.

LIU, Yan et al. Micro-/macro-level optimization of phase change material panel in building envelope**. Energy**, v. 195, p. 116932, 2020.

MARKARIAN, Elin; FAZELPOUR, Farivar. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, p. 481-496, 2019.

MAVRIGIANNAKI, A.; AMPATZI, E. Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.60, pp. 852–866, 2016.

MEHLING, L. F. CABEZA. **Basic thermodynamics of thermal energy storage**. In: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heat and cold storage with PCM, 1 ed. volume 308, Springer, Berlim, Alemanha, 2008.

SONG, Mengjie et al. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776-793, 2018.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.