UMA APRESENTAÇÃO SOBRE TUBOS DE CALOR EM ENVOLTÓRIAS DE EDIFICAÇÕES COMO SISTEMA PASSIVO PARA CONDICIONAMENTO TÉRMICO

Fernando da S. Almeida (1); Mariane P. Brandalise (2); Luis H. R. Cisterna (3); Marcia B. H. Mantelli (4); Martin Ordenes (5)

(1) Arquiteto e Urbanista, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, fernandosilvaalmeida@hotmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina;
(2) Arquiteta e Urbanista, Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, marianebrandalise@yahoo.com.br, Universidade Federal de Santa Catarina;
(3) Doutor em Engenheira Mecânica, Pós-Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, lrodriguez@labtucal.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina;
(4) PhD em Engenheira Mecânica, Professora do Departamento de Engenharia Mecânica, marcia@labtucal.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 9937;
(5) Doutor em Engenheira Civil, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 4974.

RESUMO

O uso de tubos de calor (*Heat Pipe* - HPs) implementadas na envoltória da edificação se apresenta como uma solução passiva de condicionamento ambiental importante, devido à alta eficiência de transferência de calor do sistema. Este documento tem como objetivo fornecer uma revisão de estudos experimentais e teóricos publicados nos últimos dez anos sobre aplicação de tubos de calor na envoltória como sistema passivo. Os resultados do artigo estão divididos em três partes. A primeira consiste nos princípios de operação de paredes implantadas com tubos de calor/termossifões. A segunda etapa refere-se sobre desempenho de vedações com tubos de calor, incluindo-se a resposta térmica das paredes, tubos selecionados, geometria, tipos de fluídos, a proposição das tecnologias, se foram elaboradas para aquecer ou resfriar ambientes, e, qual tipo de sistema de parede integrada com Hps. Por fim, na terceira etapa são abordados estudos sobre o desempenho termoenérgico de ambientes com paredes incorporadas de HPs, climas investigados, materiais implementados nas envoltórias e metodologia utilizada. Considerando os estudos encontrados é possível observar a existência de várias lacunas que relacionam o tema apresentado, principalmente no que se trata de pesquisas experimentais em escala real, o uso do sistema para resfriamento e como barreira térmica na estação de verão, e trabalhos que tratam sobre o conforto térmico de ambientes.

Palavras-chave: tubos de calor, sistema passivo, envoltória, edificação, eficiência energética.

ABSTRACT

The use of heat pipes implemented in envelope of the building as a passive system solution for important environmental conditioning, due to the high heat transfer efficiency of the system. This document aims to provide a review of experimental and theoretical studies published in the last ten years on applications of heat pipes in the envelope of the building as a passive system. The results of the article are divided into three parts. The first consists of the principles of operation of walls implanted with heat tubes / thermosyphons. The second stage refers to the performance of seals with heat tubes, including the thermal response of the walls, selected tubes, geometry, types of fluids, the proposition of the technologies, whether they were designed to heat or cool environments, and, what type of wall system integrated with HPs. Finally, the third stage includes studies on the thermoenergetic performance of environments with embedded HP walls, investigated climates, materials used in the envelopes and applications. Assessing the studies found, it is possible to observe the existence of several gaps that report the presented theme, mainly in what concerns to experimental researches in real scale, the use of the system in cooling and as thermal barrier in the summer season, and papers that deal with the thermal comfort of the environments.

Keywords: heat pipes, passive system, envelope, building, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Com a intensificação dos problemas ambientais como escassez de recursos naturais e aquecimento global, em conjunto com a crescente demanda de energia dos edifícios e a necessidade de diminuir a emissão de gases do efeito estufa, torna-se necessário estudos que busquem alternativas passivas para habitabilidade e conforto térmico (PIGLIAUTILE et al, 2020; XU et al, 2020; NURLYBEKOVA et al, 2021), visto que as edificações são responsáveis por cerca de 36% do consumo energético global (Agência Internacional de Energia - *International Energy Agency* - IEA, 2020). Segundo relatórios da IEA, estima-se que países em desenvolvimento como China, Índia, alguns países da África, Oriente Médio e América Latina, serão responsáveis pela maior parte da demanda de energia dos edifícios no futuro, o que pode agravar ainda mais, pois muitos deles não apresentam de regulamentações energéticas específicas para construções (IEA, 2013). Desta forma, a incorporação de estratégias passivas nas construções para melhorar o desempenho térmico das edificações e reduzir a necessidade de energia com climatização é uma das premissas para os edifícios contemporâneos (SOLGI et al, 2018; BHAMARE et al, 2019; ADILKHANOVA et al, 2021).

Entretanto, o efeito gerado pelas variações climáticas no âmbito da construção civil torna-se complexo com o passar dos anos, principalmente no que tange a incorporação de estratégias passivas. De acordo com Callejas et al. (2021), é esperado um aumento considerável de dias quentes em grande parte das regiões terrestres. Wang e Chen (2014), indicam que nos Estados Unidos da América (EUA), a demanda por resfriamento dos edifícios aumentará, enquanto a de aquecimento tende a reduzir entre as décadas de 2040 a 2080. Os autores ainda salientam que a eficácia de estratégias passivas como a ventilação natural será reduzida. No Brasil por sua vez, tal impacto afetará substancialmente a forma de projetação das edificações. Invidiata e Ghisi (2016) abordaram o comportamento futuro de demanda de energia para edifícios residenciais em três zonas climáticas brasileiras (Curitiba, Zona Bioclimática - ZB 2, Florianópolis ZB 3 e Belém ZB 8), e concluíram que o consumo energético para resfriamento dos ambientes aumentará gradualmente nos próximos 60 anos. O estudo verificou ainda que na cidade de Belém (clima equatorial), a ventilação natural como uma estratégia passiva não será mais capaz de reduzir a temperatura interna adequadamente das edificações. Portanto, pesquisas que tratam sobre novas tecnologias passivas em edificações para climatização passiva de ambientes vêm ganhando cada vez mais destaque, como por exemplo, a utilização de tubos de calor integrados aos edifícios.

Os sistemas de tubo de calor (*Heat Pipe* - HP) são constituídos de um tubo evacuado e preenchido com um fluido de trabalho que altera do estado líquido para o estado gasoso quando submetido a uma diferença de temperatura. Esses sistemas são tecnologias passivas de transferências de calor muito eficientes, por apresentarem uma condutividade térmica muito alta que possibilita o transporte de calor mantendo a temperatura quase uniforme (JOUHARA et al, 2017). De acordo com Duann e Reay (1994) o sistema apresenta uma transferência de calor de 700 vezes maiores do que a transmitância térmica do cobre, devido à eficácia da transferência de calor por ebulição e condensação. Dentre as vantagens dessa tecnologia, pode-se destacar: a alta eficiência na transferência de calor mesmo com distâncias consideráveis e com uma pequena diferença de temperatura; a flexibilidade dos modelos; e facilidade na construção (FAGHRI, 1995). Existem diferentes tipos de tubos de calor. Os tipos de HPs incluem: fechados bifásicos (*Two-phase closed* - TSs); acionados por capilares; anulares; de câmara de vapor (de forma plana); rotativos; carregados a gás; loop HPs; bombeamento capilar; pulsantes; micro e miniatura; e de menisco invertido (SHABGARD et al, 2015). O foco principal desse artigo são trabalhos que pesquisaram tubos de calor sem meio poroso (TSs).

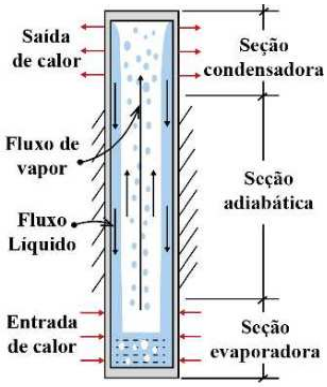

Figura 1 - Termossifão fechado de duas fases assistido por gravidade simples (Zhong e Ji, 2021)

Os termossifões são formados por três partes (figura 1), a seção evaporadora, adiabática e condensadora, onde, o evaporador é instalado abaixo do condensador para possibilitar que o fluido condensado possa retornar à seção de evaporação por gravidade. As trocas de calor destes dispositivos são provocadas pela mudança de fase do líquido na seção evaporadora e condensadora. O fluido de trabalho é evaporado à medida que absorve uma dada quantidade de calor equivalente ao calor latente da vaporização, provocando um aumento da pressão de vapor no interior da cavidade do tubo. A diferença de pressão de vapor, presentes na extremidade do evaporador e condensador, provoca um gradiente de pressão no núcleo de vapor que causa o transporte do vapor para cima até a condensadora. Neste processo, o vapor é convertido em líquido, desprezando seu calor latente de condensação, e elevando a temperatura da extremidade do condensador, dessa maneira, o líquido condensado retorna à seção de evaporação como uma película fina na parede do tubo através da gravidade (AHMED; JUBORI, 2020; ZHONG; JI, 2021), este processo ocorre de maneira cíclica, sem uso de força motriz.

Nas edificações os HPs/TSs são principalmente utilizados em sistemas de aquecimento solar de água e de ar. Existem basicamente três sistemas de coletores solares: coletores solares de placa plana (*Flat plate solar collectors* - FPSC), tubo evacuado (*Evacuated tube solar collectors* - ETSC ou ETC - *Evacuated tube collectors*) e tubo de calor (*Heat pipe solar collectors* - HPSCs). Outra aplicação dos HPs em edificações são os trocadores e dissipadores de calor, conhecidos na literatura como trocador de calor com tubo de calor (*Heat pipe heat exchanger* - HPHX), trocador de calor de termossifão (*Thermosiphon heat exchanger* - TSHX), dissipadores de calor para tubos de calor (*Heat pipe heat sink* - HPHSs) e dissipadores de calor com termossifão (*Thermosyphon heat sink* - TSHSs). Estes dispositivos são incorporados para climatização de ambientes, armazenamento de energia latente para geração de energia solar (SHABGARD et al, 2015).

Alguns estudos de revisão sobre tubos de calor/termossifões em edificações foram realizados. Observa-se considerável número de artigos de revisão que avaliaram a aplicação de HPs em sistemas solares, dentre eles pode-se destacar: Aramesh e Shabani (2020) analisou a lacuna referente aos ETSC com materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials* - PCM); Shafieian et al. (2019), investigou técnicas, métodos e desempenho de sistemas de coletor solar com tubo de calor, inclusivo o uso do coletor solar como estratégia de aquecimento de ambientes. Chopra et al. (2018) investigaram pesquisas que tangem sobre ETC elaborados para aquecimento de água e ar, observando principalmente os processos térmicos que envolvem os sistemas, análises de incertas e tendências recentes. Também foram desenvolvidas revisões sobre outras aplicações dos HPs em edifícios, como a realizada por Jouhara et al. (2017), que pesquisaram o desempenho dos sistemas de tubos de calor e os métodos atuais de CFD usados para validar tais tecnologias. Salienta-se também o estudo feito por Shabgard et al. (2015) que investigaram oportunidades e desafios dos sistemas HPHX e HPHS, além de realizarem uma análise de "redes térmicas".

2. OBJETIVO

Visto o exposto, o objetivo deste trabalho é revisar a aplicação dos tubos de calor e termossifão incorporados as envoltórias de edificações como sistema passivo de condicionamento térmico, uma vez que não foi encontrado na literatura trabalhos de revisão com o propósito de identificar estudos com esta abordagem.

3. MÉTODO APLICADO NA REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi realizada a partir de uma busca sistemática para encontrar o maior número possível de artigos que abordassem esse tema. Sendo assim, tal busca utilizou-se da plataforma Scopus (uma das principais organizações no índice de citações), e no total foram feitas cinco buscas, utilizando os seguintes termos e operadores booleanos para abranger diferentes combinações:

Busca 1: (*Thermosyphon AND Investigation AND Building AND Passive Cooling**)
Busca 2: ("*Wall implanted with heat pipe" AND Heat Pipe AND "Energy Efficiency" AND Building*)
Busca 3: (*Thermosyphon, AND "Energy Efficiency" AND Building AND Wall*)
Busca 4: ("*Heat pipe" AND Building AND "Energy efficiency"*)
Busca 5: ("*Heat pipe" AND Building AND "Thermal Comfort"*)
AND: seleciona os documentos que possuem todas as palavras;
*: substitui diferentes caracteres, por exemplo, *cooling = cooling, cool, cooler*;
": usadas para indicar termos compostos;

O período estabelecido para a pesquisa compreende de 2010 até 2020 e foram analisados apenas artigos em língua inglesa. Em um primeiro momento foram encontrados 322 artigos, sendo 61 artigos de revisão. A partir da leitura dos resumos dos trabalhos alguns artigos foram excluídos por não tratarem do foco principal do estudo. Desta forma, artigos que apresentavam como tema tubos de calor em *data centers*, tubos de calor aplicados em sistemas fotovoltaicos e aquecimento solar, assim como novas composições químicas de PCM utilizados em conjunto com tubos de calor foram excluídos. Em um segundo momento, foram selecionados artigos com base nas referências dos estudos encontrados na primeira busca, no qual foram escolhidos 14 artigos. Dessa forma, após todas as seleções, 79 artigos foram escolhidos, divididos nas seguintes categorias: (1) desempenho térmico HPs passivos; (2) princípios de operação; (3) modelagem numérica do sistema; (4) desempenho de envoltórias com tubos de calor; (5) desempenho termoenergético de edificações com tubos de calor em paredes; (6) HPs na envoltória da edificação integrado com outros sistemas passivos; cabe salientar que inclui-se nesses tópicos estudos experimentais e de simulação computacional. Para esta revisão foram selecionados apenas os artigos das categorias 2, 4 e 5, por serem os temas mais específicos sobre o sistema, além de abordarem a temática de acordo com o evento de envio.

Sendo assim, após o refinamento da pesquisa a amostra foi constituída de 16 artigos e 8 de revisão. Pretende-se em uma etapa posterior dar continuidade a revisão e abordar os demais itens supracitados. A figura 2 ilustra a metodologia utilizada na pesquisa dos artigos deste estudo.

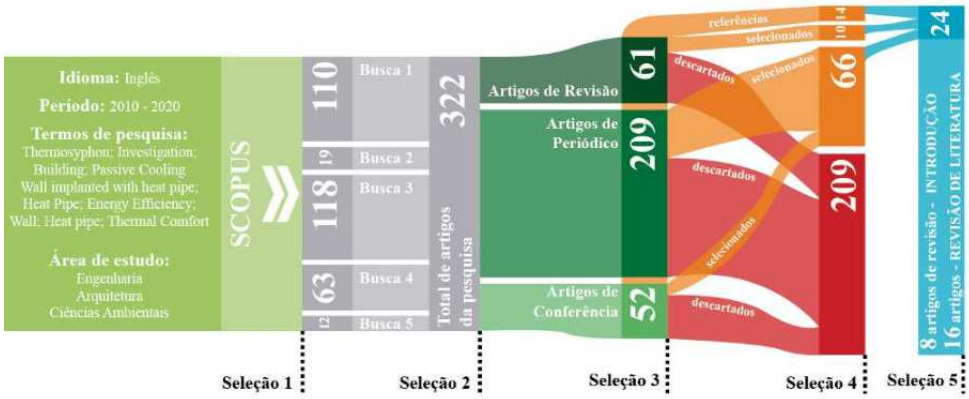

Figura 2 - Metodologia de pesquisa dos artigos

4. RESULTADOS

Os 16 artigos foram divididos em três seções: (1) Princípios de operação de paredes implantadas com tubos de calor/termossifões, consiste na apresentação do funcionamento de diferentes projetos de paredes passivas incorporadas com HPs; (2) Desempenho de vedações com tubos de calor, demonstra propriedades referentes os tubos de calor como a resposta térmica das paredes, tubos selecionados, geometria, tipos fluídos; e por fim, (3) o desempenho termoenergético de ambientes com paredes incorporadas de Hps, nessa parte é exposto estudos que analisam o ambiente, apresentando os climas investigados, materiais empregados nas envoltórias, as metodologias utilizadas e os principais resultados encontrados. Salienta-se que esta tecnologia tem se destacado nos últimos anos e aprofundada por diferentes pesquisadores, entretanto, pesquisas semelhantes foram propostas inicialmente por Varga, Oliveira e Afonso (2002), que construíram painéis com tubos de calor em escala real, utilizados como uma barreira passiva no verão, e Chun, Chen e Kim (2002) que realizaram experimentos com tubos de calor circulares em janelas com aletas giratórias.

4.1 Princípios de funcionamento de paredes implantadas com HPs

Os estudos expostos a seguir incluem a implantação de HPs em paredes convencionais, paredes pré-fabricadas, de vidros, dentre outras. Estes sistemas foram empregados a fim de aquecer ou resfriar ambientes de forma passiva. Tal tecnologia foi pesquisada em diferentes países do mundo, com destaque para China, com três projetos diferentes e Tailândia, Índia, EUA, Itália/Brasil com a proposição de um sistema cada. Destaca-se que estes sistemas podem operar de forma direta ou indireta, utilizando-se da convecção natural ou de reservatórios de água, para absorver ou transmitir calor para ambientes externos ou internos.

Albanese et al. (2012) propuseram a incorporação de tubos de calor em vedações (figura3) a fim de transferir calor indiretamente para o ambiente, utilizando-se de uma tecnologia semelhante à de paredes solares passivas. Os tubos de calor estudados nesta pesquisa transmitem calor em apenas uma direção e necessitam de pequenas diferenças de temperatura entre a seção evaporadora e condensadora para funcionarem, assim como os termossifões. Desse modo, quando o líquido é aquecido na seção inferior (evaporadora), o vapor sobe para a sessão condensadora, onde o vapor é condensado e transfere energia. O líquido condensado volta para o evaporador através da gravidade e o sistema continua de maneira cíclica. Para realização do estudo, foi construído um protótipo, constituído de diferentes materiais, a evaporadora foi fixada a uma placa absorvente de cobre cromada pintada na cor preta, e acoplada a uma estrutura de alumínio vedado por uma face de vidro. A moldura em alumínio foi integrada a uma parede isolante em um ângulo de 4,5 °, e atrás desta vedação estava um tanque de 189,3 litros de água que servia como dispositivo de armazenamento térmico, recebendo a seção condensadora.

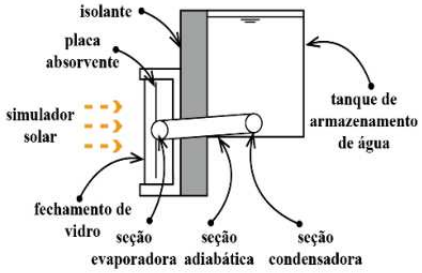

Figura 3 – Operação do sistema com tubos de calor e reservatório de água. (Adaptado de Albanese, et al. 2012).

Já Chotivisarut, Nuntaphan e Kiatsiriroat (2012), construíram uma sala experimental formada por um radiador de termossifões com 48 tubos de cobre. O conceito testado consiste em extrair calor da água de um tanque para gerar água de resfriamento durante a noite, dessa maneira, a água fria pode ser utilizada para resfriar o ambiente durante o dia. Nesse contexto, o sistema proposto funciona como um trocador de calor passivo para diminuir a carga de resfriamento em edificações em dias quentes. A seção de condensação foi preza a uma folha de alumínio de 6,36 m², que funciona como um radiador no período noturno, sendo este

acoplado ao telhado inclinado a 45°. Enquanto a evaporadora foi mergulhada a um tanque de armazenamento de água retangular, totalmente isolado de 1 m³, posicionado a frente da parede da sala. A água para resfriamento no tanque foi alimentada por seis serpentinas instaladas no teto da sala.

A figura 4 ilustra o princípio de funcionamento da tecnologia estuda por Zhang, Sun e Duan (2014). Tal proposta foi denominada de tubos de calor combinados implantados na parede (*Wall Implanted With Heat Pipes-WIHP*). A operação acontece por intermédio de uma válvula de controle inteligente instalada na seção adiabática do sistema dos tubos que calor, que controla a indução do ambiente térmico interno. No inverno, a válvula de controle na parede sul é aberta, permitindo a transferência de calor do exterior para o interior, quando a diferença de temperatura da superfície externa é maior que a interna. Assim, a evaporadora na superfície externa da parede absorve a energia solar para vaporizar, e na sequência libera calor no interior da edificação através da seção condensadora. Já para verão, o sistema proposto está locado na fachada norte por receber menos radiação solar, dessa forma, a válvula norte é aberta e a válvula na parede sul é fechada. Com o objetivo de retirar calor no interior da edificação, a seção evaporadora é locada em contato com a superfície interna e a seção condensadora com a superfície externa. Com isso, o princípio de trabalho do conjunto acontece de maneira semelhante ao proposto para o inverno, quando a temperatura da superfície interna é mais alta que a externa (principalmente à noite), a seção de evaporação absorve calor para vaporizar e, em seguida, o vapor na seção de condensação é condensado para dispersar calor para o exterior do ambiente.

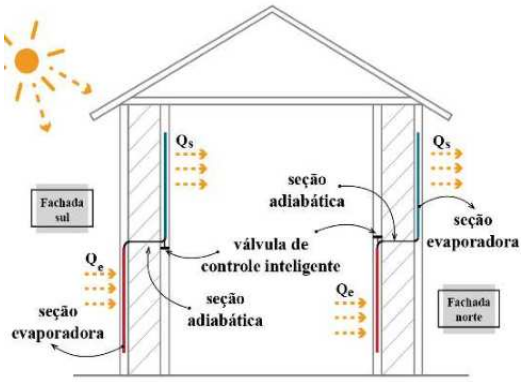

Figura 4 - Funcionamento da WIHP. (Adaptado de Zhang, Sun e Duan, 2014).

Fantozzi et al. (2017), que tinha como objetivo melhorar o desempenho do dispositivo desenvolvido por Sun et al. (2015) e avaliar as demandas de aquecimento para o inverno de uma edificação popular pré-fabricada em Pisa, na Itália. O dispositivo integrado a envoltória, analisado por Fantozzi et al. (2017), consiste em termossifão de parede (*Wall Thermosyphon*-WT), como ilustrado na figura 5. O sistema WT é formado por uma evaporadora (fonte quente), um condensador (fonte fria) e suas seções adiabáticas. O evaporador é soldado na chapa metálica externa a parede, enquanto a condensadora está localizada no espaço oco projetado para troca de ar entre o ambiente interno e externo da habitação. A evaporadora em contato com a chapa metálica transfere o calor proveniente da irradiação solar para a condensadora que por sua vez libera-o no interior da sala. A cavidade presente na parede é conectada tanto no interior quanto no exterior, propiciando trocas de ar. Tal sistema se assemelha ao de uma parede trombe com massa térmica, onde a circulação de ar aquece ou resfria o ambiente interno. Neste caso, quando a temperatura interna supera a temperatura externa, o excesso de calor poderá ser rejeitado pela cavidade oca contida na fachada interna, assim as aberturas externas são abertas e as internas fechadas, já quando a temperatura interna está mais baixa as aberturas de ventilação internas são abertas e as externas são fechadas.

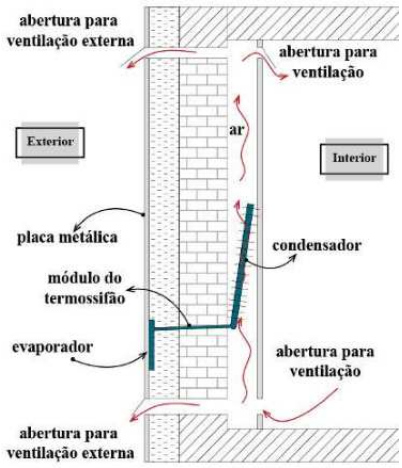

Figura 5 - Funcionamento da TW. (Adaptado de Fantozzi, 2017).

Dehra (2016) pesquisou termossifões retangulares para aquecimento solar passivo de ambientes internos. O dispositivo foi integrado à envoltória da edificação em uma parede interna bem isolada. A seção evaporadora é exposta ao fluxo de calor solar quase estável e uniforme, enquanto a condensadora instalada na parede interna, dissipa o calor dentro do ambiente. Segundo os autores, três diferentes variáveis de temperatura estão interagindo com duas coordenadas espaciais, que são utilizadas para avaliar o fluxo de calor do termossifão. O fluxo de calor é a quantidade vetorial relacionada com à energia cinética, movimentando o fluído (ar) para região de temperatura mais alta para mais baixa, consequentemente aquecendo a edificação quando a temperatura externa for mais alta que a interna.

Por fim, pode-se encontrar na literatura a parede de Trombe implantada com tubos de calor (*Trombe Wall Implanted With Heat Pipes* - TIHP), desenvolvida por Zhang e Li (2019), que mescla os princípios de funcionamento da WIHP e WT. Na TIHP é instalado uma parede cortina de vidro de alta absorção de calor, bem como aberturas superiores e inferiores na parede convencional e de vidro. No inverno, as aberturas inferiores e superiores da parede cortina ficam fechadas e as da parede convencional são abertas, provocando

um efeito estufa entre as duas paredes, e assim a irradiação emitida pela radiação solar sobe. Através da convecção do ar aquecido e o ar interno ocorre a transferência de calor impulsionado pela diferença de densidade. Tal como a WIHP, uma parte do calor é absorvida pela evaporadora é e liberada pela condensadora na sala. Em dias de verão a válvula inteligente é fechada, assim os tubos não podem transferir calor. Além disso, para o verão foram instaladas venezianas refletoras na face externa da parede convencional para refletir o calor da radiação solar para o ambiente externo. Durante o dia as aberturas da parede cortina são abertas, fornecendo convecção do ar quente entre a camada intermediária de ar e o ar externo, já no período noturno, quando a temperatura externa é baixa, as aberturas da parede também são abertas para aumentar a convecção natural do ar interno e externo, diminuindo a carga de resfriamento.

4.2 Desempenho de envoltórias com HPs

O Quadro 1 apresenta um resumo dos trabalhos que discutem o desempenho dos tubos de calor instalados em paredes, contendo o princípio de funcionamento, composição do dos tubos, geometria, tipo de fluído, considerações gerais e se foram projetados para resfriamento ou aquecimento de ambientes. Os três primeiros artigos apresentados no quadro demonstram o uso dos tubos de calor como forma indireta de climatizar o ambiente, onde, a troca de calor acontece entre o reservatório de água e os HPs e depois entre o reservatório e o ambiente. Os autores publicaram uma sequência de artigos buscando compreender e melhorar o desempenho térmico desse sistema. Robinson et al. (2013) analisaram o potencial do sistema com tubo de calor em um protótipo em escala real em uma sala de aula no campus da Universidade de Louisville em Louisville, EUA, durante a primavera, após coletar os dados do experimento foram calculadas a eficiência do sistema e transferência de calor. Com o intuito de melhorar o sistema Robinson e Sharp (2014) propuseram modificações como um absorvedor de cobre, junta soldada entre absorvedor e evaporador, seção adiabática de borracha, isolamento mais espesso e um condensador exposto diretamente ao ar ambiente da sala, o sistema com as alterações foi comparado com o sistema proposto anteriormente.

No segundo estudo foram propostas modificações no sistema a fim de melhorar o desempenho térmico, mantendo-se o número e dimensões dos tubos de calor, porém, foram testadas configurações diferentes do sistema. Dessa maneira, poderia ser interessante analisar composições com diferentes quantidades de tubos de calor visto que este é o principal elemento do sistema. Além disso, nos dois artigos as medições foram realizadas apenas para a estação de aquecimento, mesmo assim os autores consideraram que o sistema poderia sofrer superaquecimento na estação de resfriamento e propuseram um terceiro estudo para solucionar esse problema. Robinson e Sharp (2015) investigaram através de simulação e experimento, a eficiência de alterações de projeto e estratégias de controle, para reduzir os ganhos de calor indesejados da parede com tubo de calor no período do verão. Dentre as estratégias estudadas tem-se: sombreamento; cobertura opaca; uma válvula mecânica; e modificações nas seções do evaporador e do condensador.

Os demais artigos contidos no quadro utilizam os tubos de calor implementados na parede com sistema direto de condicionamento. Li e Zhang (2018) e Zhang, Xie e Cao (2019) analisaram o sistema para resfriamento das edificações enquanto que Liu e Zhang (2019) e Bellani et al. (2019) avaliaram o desempenho térmico da parede implementada com tubo de calor para aquecimento. Li e Zhang (2018) e Zhang, Xie e Cao (2019) analisaram o desempenho de transferência térmica da parede WIHP por simulação numérica através do software Fluent e compararam o desempenho dinâmico de transferência de calor da WIHP com uma parede convencional na estação do verão. Os dois artigos utilizam dados meteorológicos da cidade de Tianjin. Nas duas pesquisas o resultado encontrado em relação ao tempo de trabalho foi semelhante de 770 horas no verão. Li e Zhang (2018) ainda investigaram que a resistência térmica da parede diminui à medida que a condutividade térmica da camada de isolamento aumenta. Observando os artigos salienta-se a importância da análise do desempenho da parede implantada com tubo de calor com o objetivo de resfriamento de ambientes, principalmente em contextos climáticos diferentes aos apresentados.

Liu e Zhang (2019) a partir de um estudo teórico e experimental analisaram as características de resposta térmica da WIHPs, como o tempo de resposta real, aumento de temperatura e distribuição de temperatura em condições reais, com o foco principal no o processo de transferência de calor dinâmico da seção condensadora. Por fim, Bellani et al. (2019) realizaram uma análise dos modelos de resistência térmica utilizados para a determinação do desempenho térmico do termossifão, assim como uma revisão da literatura a respeito das correlações para prever a transferência de calor e coeficientes na seção de evaporação e condensadora. Além disso, apresentaram dados experimentais sobre a distribuição de temperatura e resistência térmica de um protótipo, no qual quatro configurações de teste diferentes foram realizadas, variando o modo de evacuação, entrada de energia e rugosidade do evaporador da parede interna. Importante ressaltar que nos estudos não foram analisados a perda de calor por radiação noturna como por exemplo, temperatura do céu.

Quadro 1 – Resumo das pesquisas que verificaram o desempenho de envoltórias com HPs

Autores	Ano	Resfriamento /Aquecimento	Princípio utilizado	HPs	Fluído	Considerações gerais
Robinson et al.	2013	Aquecimento	Sistema indireto. Tubos de calor mais reservatório de água.	Tubo de cobre, formato equivalente a L, diâmetro interno de 17,55 mm.	R124	A temperatura do reservatório de água alcançou um valor horário de pico de 41°C mesmo quando a temperatura média do ambiente foi de 2°C, demonstrando a eficiência da energia solar no processo de transferência de calor do sistema. Os ganhos de calor da sala atingiram o valor horário médio mais alto que 163W/m².
Robinson e Sharp	2014	Aquecimento	Sistema indireto. Tubos de calor mais reservatório de água.	Tubo de cobre, formato equivalente a L, diâmetro interno de 17,55 mm.	R124	As alterações propostas colaboraram para aumentar os ganhos térmicos no ambiente, sendo que a eficiência máxima média diária para o sistema proposto e do sistema anterior foram de 85,0% e 80,7%, respectivamente. E a temperatura média do ambiente do modelo durante o período de teste foi de 24,6% superior ao modelo anterior.
Robinson e Sharp	2015	Resfriamento	Sistema indireto. Tubos de calor mais reservatório de água.	Tubo circular de cobre, formato equivalente a L, diâmetro interno de 17,55 mm.	R124	A estratégia de controle que apresentou o melhor desempenho térmico através da simulação, que foi baseada na temperatura do ambiente, onde a válvula foi o mecanismo de controle que eliminou significativamente os ganhos de calor indesejados e apresentou maior redução da carga térmica anual. Porém observou no experimento uma pequena quantidade de calor que ainda é transferida mesmo com a válvula fechada.
Li e Zhang	2018	Resfriamento	WIHP	Tubo em polipropileno aleatório, formato H, diâmetro interno de 2,7 mm.	R600a	Constatou-se que a parte superior da parede com HPs apresenta temperaturas superiores que parte inferior. O tempo de resposta térmica da WIHP é mais breve que uma parede comum. A elevação da condutividade térmica da camada de isolamento provoca um aumento da temperatura da superfície interna e da amplitude da WIHP. A transferência de calor durante o verão foi de 50,7kW/m² muito superior a uma parede comum.
Liu e Zhang	2019	Aquecimento	WIHP	Tubo em polipropileno aleatório, formato H, diâmetro interno de 2,7 mm.	R600a	A WIHP demonstrou uma resposta mais rápida às mudanças climáticas, uma transferência de calor mais eficiente em relação a parede comum, a temperatura média da superfície interna aumentou 0,5°C e o coeficiente de aumento da temperatura médio foi de 0,16. A parede absorve parte do calor liberado pelo tubo o que diminui as flutuações da temperatura da superfície interna tornando o ambiente interno mais confortável.
Zhang, Xie e Cao	2019	Resfriamento	WIHP	Tubo em polipropileno aleatório, formato H, diâmetro interno de 2,7 mm.	R600a	A WIHP apresentou um desempenho de resfriamento significativo, na região de Tianjin a temperatura média da superfície de WIHP atingiu 24 ° C, e a transferência de calor média foi de 0,37 W / m² em relação a parede convencional apresentou uma redução de 2°C na temperatura. Em regiões frias, o WIHP norte demonstrou um maior tempo de trabalho na estação de verão, totalizando 770 horas ao longo da estação e uma média de 6,2 horas por dia.
Bellani et al.	2019	Aquecimento	WT	Tubo de cobre, formato equivalente a Y, diâmetro interno de 19,5 mm.	R141b	Pôde ser observado que a resistência térmica efetiva do protótipo de termossifão de parede apresentou valores entre 0,22 e 0,011◦C / W, quando os níveis de entrada de energia foram entre 25 e 200 W. Na condensadora o, a correlação de Kaminaga demonstrou melhores resultados, porém com uma diferença de aproximadamente uma ordem de magnitude em relação aos dados em baixas taxas de transferência de calor. Acredita-se que esta diferença ocorre devido a geometria do protótipo termossifão ser diferente da utilizada na literatura.

4.3 Desempenho termoenergético de edificações com vedações de HPs

O Quadro 2 reúne um resumo dos trabalhos que analisaram o desempenho termoenergético de edificações ou ambientes com paredes implantadas de termossifões/tubos de calor utilizando-se dos princípios de

funcionamento apresentados no item 4.1. No quadro é possível observar o método de análise, local e clima de estudo, composição dos materiais da envoltória e observações gerais obtidas pelos pesquisadores.

Quadro 2 – Resumo dos estudos que verificaram o desempenho termoenergético de edificações com HPs

Autores	Ano	Método de análise	Local/Clima	Parede	Observações Principais
Zhang Sun e Duan	2014	Utiliza-se de dados de radiação solar para realização de um estudo teórico de economia de energia. Validação experimental da WIHP. Modelo matemático estável.	Jinan, China / Clima subtropical úmido - Cwa	Parede típica chinesa[1]	Constatou-se que o dispositivo é uma excelente estratégia de economia de energia. Visto que em um ano típico, a incorporação do WIHP na parede sul reduziria a carga de aquecimento do ambiente em 14,47%.
Sun, Zhang e Duan	2015	Utiliza-se de dados de radiação solar para realização de um estudo teórico de economia de energia. Validação experimental da WIHP. Modelo matemático estável.	157 distritos para aquecimento e 22 sem / Todos os climas do país[2]	Parede típica chinesa[3]	A estratégia mostrou-se mais eficiente na parede sul para aquecimento de ambientes. Dessa maneira, indica-se a aplicação do sistema para eficiência energética de edificações, bem como na melhoria do ambiente térmico, principalmente na região norte da China.
Tan e Zhang	2016	Simulação computacional por meio do *software* TRNSYS para investigação da economia e energia. Validação experimental da WIHP. Modelo matemático estável.	Tianjin, China / Clima continental úmido quente - Dfa.	Parede típica chinesa[3]	A utilização da WIHP na edificação favorece a economia de energia principalmente na estação de aquecimento (inverno), mesmo em bairros que necessitam de menos horas de trabalho do dispositivo.
Fantozzi et al.	2017	Simulação computacional através do *software EnergyPlu*s para análise da economia e energia.	Pisa, Itália / Clima mediterrânico - Csa	Parede pré-fabricada [3]	Verificou-se que com os resultados que a taxa de economia de energia no inverno foi superior a 50%, e a demanda de aquecimento inferior a 20 kWh /m².
Liu et al.	2019	Utiliza-se de dados de radiação solar para realização de um estudo teórico de economia de energia. Validação experimental das formas em H e Z dos HPs e análise numérica do sistema.	Zona HSCW - verão quente e inverno frio na China e Europa Ocidental	Parede típica chinesa[3]	A taxa de economia de energia do H – WIHP na zona HSCW da China mostrou eficiência entre 15 a 25%. Já para as cidades de Londres, Paris, Lyon, Roma e Madrid os resultados chegaram a 10%.
Zhang, Ding e Guo	2019	Utiliza-se de dados de radiação solar para realização do estudo teórico de economia de energia, empregando o modelo matemático dinâmico para obtenção dos dados de transferência de calor. Validação experimental da WIHP.	Tianjin, China /Clima continental úmido quente - Dfa.	Parede típica chinesa[3]	Observou-se que a taxa de economia de energia chegou aos 21,61% para estação avaliada (inverno). Foi verificado também que o WIHP pode reduzir significativamente a perda de calor de uma edificação e melhorar a temperatura da superfície interna da parede.

Dentre os estudos ilustrados acima, observa-se que grande parte das pesquisas analisaram a aplicabilidade da WIHP para melhorar o desempenho termoenergético de edificações, dos quais, quatro delas foram para climas da China, e uma para zona de verão quente e inverno frio na China e Europa Ocidental. Apenas a pesquisa realizada por Fantozzi et al. (2017), investigou o uso do WT para economia de energia em edificações, sendo que nenhuma das análises apurou a utilidade do TIHP, e os sistemas solares passivos propostos por Albanese et al. (2012), Chotivisarut, Nuntaphan e Kiatsiriroat (2012) e Dehra (2016). As investigações realizadas por Zhang et al. (2014), Sun et al. (2015) e Tan e Zhang (2016), utilizam o método proposto por Zhang et al. (2014) para análise de eficiência energética, com a utilização do modelo matemático estável. Enquanto Zhang, Ding e Guo (2019) empregam o modelo dinâmico para o cálculo de transferência de calor do WIHP e obtenção dos dados para a avaliação energética. Já Liu et al. (2019), estuda o desempenho de outros formatos de dispositivos de tubos de calor (formas H e Z), entretanto, se valem do princípio de funcionamento do WIHP.

Observou-se também que Zhang et al. (2014), Sun et al. (2015), Liu et al. (2019) e Zhang, Ding e Guo (2019) utilizou dados de radiação solar das cidades investigadas para análise de economia de energia com aplicação do WIHP, sendo que os resultados de economia de energia foram alcançados por meio de simulações numéricas. Já Tan e Zhang (2016) e Fantozzi et al. (2017), fizeram uso de *softwares* de simulações computacionais como TRNSYS e EnergyPlus, respectivamente. Vale ressaltar que nenhuma das pesquisas foram realizadas com o objetivo principal de quantificar a economia energética de edifícios na

[1] Parede de concreto com 200 a 250 mm de espessura, placas de isolamento térmico na face externa e 20 mm de argamassa e cimento nas superfícies externas e internas da edificação.

[2] Clima subtropical úmido - Cfa e Cwa; Clima continental úmido quente - Dfa, Dwb e Dfb; Clima semi-árido frio - BSk; Clima subártico - Dwc; Clima oceânico subtropical das terras altas - Cwb; Continental úmido - Dwa; Climas desérticos frios - BWk; e Clima de tundra - ET.

[3] Chapas metálicas na face externa da parede, camada de parede pré-fabricada com isolante térmico, porção oca para circulação de ar, e por fim outra placa metálica na parte interna da edificação.

estação de resfriamento. Dessa forma, destaca-se que é incipiente estudos que relacionam a aplicação de HPs em envoltórias para resfriamento passivo, presentes na literatura. Outro fator importante a se considerar é a baixa realização de pesquisas que consideram a integração de sistemas para condicionamento passivo indireto dos ambientes, como a realizada por Albanese et al. (2012) e Chotivisarut, et al. (2012).

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o estado da arte dos tubos de calor incorporados as envoltórias de edificações como sistemas passivos de climatização, categorizados em: princípios de funcionamento de paredes implantadas com Hps, desempenho de envoltórias com Hps e desempenho termoenergético de edificações com vedações de Hps. Os Hps implementados em paredes se apresentam como uma solução passiva de aquecimento e resfriamento de ambientes por apresentarem uma condutividade térmica muito alta mesmo com pequenas diferenças de temperatura. Com esta revisão foi possível perceber que os princípios de funcionamento estão bem desenvolvidos, assim como diferentes métodos numéricos (estável e dinâmico) já foram testados, além de diferentes configurações de envoltória. Porém, mesmo com as vantagens demonstradas, e as inúmeras pesquisas sobre o tema, ainda observa-se lacunas referentes as envoltórias com tubos de calor, principalmente no que tange os benefícios em escala real do sistema, visto que a maioria dos estudos foram realizados em laboratório, além disso, trabalhos que tratam sobre resfriamento e conforto térmico dos ambientes, já que muitas das investigações realizam simulações com base em dados climáticos para estimarem reduções de temperatura, portanto destaca-se pesquisas que possam realizar trabalhos utilizando-se de dados reais em medições. Nota-se ainda a não existência de trabalhos que caracterizam a perda noturna por radiação, como por exemplo através da temperatura do céu, tanto em estudos experimentais quanto de simulações. Para mais, como sugestão de temas futuros para pesquisas, salienta-se que carece de estudos relacionados à viabilidade de integração destes sistemas na envoltória, assim como com técnicas de aquecimento solar e outras estratégias bioclimáticas passivas de condicionamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADILKHANOVA, Indira; MEMON, Shazim Ali; KIM, Jong; SHERIYEV, Almas. A novel approach to investigate the thermal comfort of the lightweight relocatable building integrated with PCM in different climates of Kazakhstan during summertime. **Energy**, [S.L.], v. 217, p. 119390-119405, fev. 2021.

ARAMESH, M.; SHABANI, B.. On the integration of phase change materials with evacuated tube solar thermal collectors. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 132, p. 110135-110153, out. 2020.

ALBANESE, Michael V.; ROBINSON, Brian S.; BREHOB, Ellen G.; SHARP, M. Keith. Simulated and experimental performance of a heat pipe assisted solar wall. **Solar Energy**, [S.L.], v. 86, n. 5, p. 1552-1562, maio 2012.

AHMED, Israa S.; JUBORI, Ayad M. Al. Assessment of heat transfer and flow characteristics of a two-phase closed thermosiphon. **Heat Transfer**, [S.L.], v. 50, n. 2, p. 1351-1370, 7 set. 2020.

BELLANI, P.; MILANEZ, F.; MANTELLI, M. B. H.; FILIPPESCHI, S.; MAMELI, M.; FANTOZZI, F. Theoretical and experimental analyses of the thermal resistance of a loop thermosyphon for passive solar heating of buildings. **Interfacial Phenomena And Heat Transfer**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 57-68, 2019.

BHAMARE, D. K.; RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 198, p. 467-490, set. 2019.

CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; APOLONIO, Raquel Moussalem; GUARDA, Emeli Lalesca Aparecida da; DURANTE, Luciane Cleonice; ROSSETI, Karyna de Andrade Carvalho; ROSETA, Filipa; AMARANTE, Leticia Mendes do. Bermed Earth-Sheltered Wall for Low-Income House: thermal and energy measure to face climate change in tropical region. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 420-439, 4 jan. 2021.

CHOPRA, K.; TYAGI, V.V.; PANDEY, A.K.; SARI, Ahmet. Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications. **Applied Energy**, [S.L.], v. 228, p. 351-389, out. 2018.

CHOTIVISARUT, Nammont; NUNTAPHAN, Atipoang; KIATSIRIROAT, Tanongkiat. Seasonal cooling load reduction of building by thermosyphon heat pipe radiator in different climate areas. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 188-194, fev. 2012.

CHUN, W.; CHEN, K.; KIM, H. T.. Performance Study of a Bi-Directional Thermodiode Designed for Energy-Efficient Buildings. **Journal Of Solar Energy Engineering**, [S.L.], v. 124, n. 3, p. 291-299, 1 ago. 2002.

DEHRA, Himanshu. A mathematical model of a solar air thermosyphon integrated with building envelope. **International Journal Of Thermal Sciences**, [S.L.], v. 102, p. 210-227, abr. 2016.

DUNN, P. D., and REAY, D. A., "Heat Pipes", Pergamon Press, Oxford, 1994.

FAGHRI, A. Heat pipe science and technology. Washington, DC: Taylor & Francis, 1995.

FANTOZZI, F; FILIPESCHI, S; MAMELI, M; NESI, S; CILLARI, G; MANTELLI, M B H; MILANEZ, F H. An Innovative Enhanced Wall to Reduce the Energy Demand in Buildings. **Journal Of Physics**: Conference Series, [S.L.], v. 796, p. 012043, jan. 2017.

IEA (2013), ***Transition to Sustainable Buildings***. International Energy Agency, Paris, 2013. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/745>. Acesso em 08 de janeiro de 2020.

IEA (2020), ***Global Status Report for Buildings and Construction 2020***. International Energy Agency, Paris, 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf>. Acesso em 08 de janeiro de 2020.

INVIDIATA, Andrea; GHISI, Enedir. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 130, p. 20-32, out. 2016.

JOUHARA, H.; CHAUHAN, A.; NANNOU, T.; ALMAHMOUD, S.; DELPECH, B.; WROBEL, L.c.. Heat pipe based systems - Advances and applications. **Energy**, [s.l.], v. 128, p. 729-754, jun. 2017.

LI, Z.; ZHANG, Z. Dynamic heat transfer characteristics of wall implanted with heat pipes in summer. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 170, p.40-46, jul. 2018.

LIU, Chang; ZHANG, Zhigang. Thermal response of wall implanted with heat pipes: experimental analysis. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 143, p. 1687-1697, dez. 2019.

LIU, Chang; ZHANG, Zhigang; SHI, Yapeng; DING, Yi. Optimisation of a wall implanted with heat pipes and applicability analysis in areas without district heating. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 151, p. 486-494, mar. 2019.

NURLYBEKOVA, Gauhar; MEMON, Shazim Ali; ADILKHANOVA, Indira. Quantitative evaluation of the thermal and energy performance of the PCM integrated building in the subtropical climate zone for current and future climate scenario. **Energy**, [S.L.], v. 219, p. 119587-119601, mar. 2021.

PIGLIAUTILE, Ilaria; CHÀFER, Marta; PISELLO, Anna Laura; PÉREZ, Gabriel; CABEZA, Luisa F.. Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 147, p. 1663-1675, mar. 2020.

OMRANY, H. et al. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 62, p.1252-1269, set. 2016.

ROBINSON, Brian S.; CHMIELEWSKI, Nicholas E.; KNOX-KELECY, Andrea; BREHOB, Ellen G.; SHARP, M. Keith. Heating season performance of a full-scale heat pipe assisted solar wall. **Solar Energy**, [S.L.], v. 87, p. 76-83, jan. 2013.

ROBINSON, Brian S.; SHARP, M. Keith. Heating season performance improvements for a solar heat pipe system. **Solar Energy**, [S.L.], v. 110, p. 39-49, dez. 2014.

ROBINSON, Brian S.; SHARP, M. Keith. Reducing unwanted thermal gains during the cooling season for a solar heat pipe system. **Solar Energy**, [S.L.], v. 115, p. 16-32, maio 2015.

SHABGARD, H.; ALLEN, M. J.; SHARIFI, N.; BENN, S. P.; FAGHRI, A.; BERGMAN, T. L.. Heat pipe heat exchangers and heat sinks: opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 89, p. 138-158, out. 2015.

SHAFIEIAN, Abdellah; KHIADANI, Mehdi; NOSRATI, Ataollah. Theoretical modelling approaches of heat pipe solar collectors in solar systems: a comprehensive review. **Solar Energy**, [S.L.], v. 193, p. 227-243, nov. 2019.

SOLGI, Ebrahim; HAMEDANI, Zahra; FERNANDO, Ruwan; SKATES, Henry; ORJI, Nnamdi Ezekiel. A literature review of night ventilation strategies in buildings. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 173, p. 337-352, ago. 2018.

SUN, Zhijian; ZHANG, Zhigang; DUAN, Caixia. The applicability of the wall implanted with heat pipes in winter of China. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 104, p.36-46, out. 2015.

TAN, Ronghua; ZHANG, Zhigang. Heat pipe structure on heat transfer and energy saving performance of the wall implanted with heat pipes during the heating season. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 102, p. 633-640, jun. 2016.

VARGA, Szabolcs; OLIVEIRA, Armando C; AFONSO, Clito F. Characterisation of thermal diode panels for use in the cooling season in buildings. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 227-235, mar. 2002.

WANG, Haojie; CHEN, Qingyan. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 82, p. 428-436, out. 2014.

XU, Ling; DAI, Linchuan; YIN, Linzhi; SUN, Xiaoyu; XU, Wei; YANG, Rui; WANG, Xin; ZHANG, Yinping. Research on the climate response of variable thermo-physical property building envelopes: a literature review. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 226, p. 110398-110411, nov. 2020.

ZHANG, Zhigang; DING, Yi; GUO, Chunmei. Dynamic heat transfer performance of the wall implanted with heat pipes and its energy saving characteristics during the heating season. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 158, p. 1155-1160, fev. 2019.

ZHANG, Zhigang; LI, Zengrui. Heat transfer performance of the Trombe wall implanted with heat pipes during daytime in winter. **Science And Technology For The Built Environment**, [S.L.], v. 25, n. 7, p. 935-944, 20 maio 2019. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/23744731.2018.1538901.

ZHANG, Zhigang; SUN, Zhijian; DUAN, Caixia. A new type of passive solar energy utilization technology-The wall implanted with heat pipes. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 84, p.111-116, dez. 2014.

ZHANG, Zhigang; XIE, Guanxiang; CAO, Tiantian. Dynamic heat transfer analysis of the wall implanted with heat pipes in summer. **Advances In Building Energy Research**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 403-423, 19 mar. 2019.

ZHONG, Wei; JI, Wenhui. Applications of coupling thermosyphons with phase change materials: a review. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 233, p. 110690-110708, fev. 2021.