AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA CÉLULA-TESTE COM TEMPERATURA CONTROLADA POR TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS PASSIVOS ATRAVÉS DE ANALOGIAS

Fernando da S. Almeida (1); Mariane P. Brandalise (2); Luciano S. Fuso (3); Luis H. R. Cisterna (4); Marcia B. H. Mantelli (5); e Martin O. Mizgier (6).

(1) Arquiteto e Urbanista, Doutorando 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) Engenheiro Mecânico, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, luciano.fuso@labtucal.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina;
(4) Doutor em Engenheira Mecânica, Professor do curso de Engenharia Mecânica, lrodrigues@academicos.uta.cl, Universidad de Tarapacá no Chile;
(5) PhD em Engenheira Mecânica, Professora do Departamento de Engenharia Mecânica, marcia@labtucal.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor.
(6) Doutor em Engenheira Civil, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente, a partir de um estudo de um piloto, o potencial de incorporação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos. Para isso, foi utilizada uma célula-teste integrada com uma serpentina de cobre, que simulou a seção evaporadora de um termossifão bifásico. A temperatura da serpentina foi mantida prescrita e uniforme ao longo de seu comprimento por um banho de temperatura controlada. De forma geral, pôde-se observar que o dispositivo se mostrou capaz de extrair calor de forma passiva de um ambiente fechado. Contudo, em situações onde a diferença de temperaturas entre a serpentina e a célula-teste foi igual ou inferior a 7°C, notou-se certa dificuldade de operação os dispositivos, necessitando elevar a área de transferência de calor. O dispositivo conseguiu reduzir a temperatura do ar interno, sendo que grande parte do calor foi extraído nas duas primeiras horas de teste e, em alguns casos, mais especificamente nos 60 minutos iniciais. Além disso, verificou-se na uma distribuição do ar interno que se repetiu em todos os ensaios realizados, em que as temperaturas se apresentam mais altas nos quadrantes superiores da célula. Com relação à operação da bancada experimental, aconselha-se que os ensaios sejam efetuados em intervalos maiores que, no mínimo, 48h, a fim de se evitar um acúmulo de energia nas paredes da envolvente.

Palavras-chave: Célula-teste, Termossifão bifásico, Resfriamento Passivo, Estratégia bioclimática.

ABSTRACT

The present work aims to experimentally evaluate, based on a pilot study, the potential of incorporating two-phase thermosyphons as a strategy for cooling indoor environments. For this, a test cell integrated with a copper coil was used, which simulated the evaporator section of a two-phase thermosiphon. The coil temperature was maintained prescribed and uniform along its length by a temperature-controlled bath. In general sense, in situations where the temperature difference between the coil and the test cell was equal to or less than 7°C, is was hard to operate the thermosyphon, requiring an increase in the heat transfer area. The device managed to significantly reduce the temperature of the indoor air, with much of the heat being extracted in the first two hours of the test, especially in the initial 60 minutes. In addition, the internal air temperature distribution for, all the tests, showed to have a large temperature level at the quadrants of the cell. Regarding the experimental bench operation, it is advisable that the tests are carried out with an interval between them of at least 48 hours, in order to avoid an accumulation of energy in the walls.

Keywords: Test cell, Two-phase thermosiphon, Passive cooling, Bioclimatic strategy.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o consumo de energia a nível nacional e mundial está aumentando exponencialmente. Estudos indicam que o setor da construção civil é um dos principais responsáveis por tais demandas (Balanço Energético Nacional - BEM, 2021; *International Energy Agency* - IEA, 2021). Em geral, grande parte da energia consumida por edificações é destinada à manutenção do conforto térmico interno (ATHMANI et al., 2022). Evidenciando uma dependência por sistemas mecânicos de climatização, dos quais estes potencializam o consumo de energia em edilícios (SAMUEL; NAGENDRA; MAIYA, 2013). Dessa maneira, pesquisar novas soluções passivas, que reduzam a necessidade de energia para conforto dos usuários, torna-se necessário (DÍAZ-LÓPEZ et al., 2022).

Nesse sentindo, os tubos de calor e termossifões bifásicos são soluções passivas com alta eficiência, no que se refere ao transporte de calor. Tais dispositivos transferem calor, sem a necessidade de consumo adicional de energia, mesmo em situações em que a diferença de temperatura entre as suas extremidades é baixa. Tipicamente, sua condutividade térmica efetiva pode atingir valores de até 700 vezes a condutividade do cobre (JOUHARA et al., 2017; NOIE, 2005), tendendo a homogeneizar temperaturas. De acordo com Mantelli (2021), termossifões podem ser utilizados em aplicações onde a transmissão de energia térmica deva ser altamente eficiente e/ou a distribuição de temperaturas deva ser uniforme. Conforme a aplicação e projeto, termossifões podem se comportar como um tubo cuja temperatura seja prescrita para uma determinada quantidade de calor a ser transportado. Na modelagem destes dispositivos, muitas vezes se recorre ao uso de analogias com circuitos elétricos. Para a predição de seu comportamento térmico, também frequentemente se recorre a métodos numéricos e/ou a pesquisas experimentais, tanto na literatura nacional e quanto internacional (AMANOWICZ, 2020; SARMIENTO et al., 2018; JUNIOR; MANTELLI, 2019; CISTERNA 2014).

De modo geral, os termossifões bifásicos (Figura 1), são formados por um tubo evacuado e preenchido parcialmente por um fluido de trabalho. Geralmente são compostos por três partes principais: evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador deve ser localizado numa posição inferior ao condensador para possibilitar que o fluido condensado possa retornar do condensador ao evaporador, por gravidade. O calor fornecido ao evaporador provoca a geração de vapor nesta região, uma vez que o fluido de trabalho se encontra no estado saturado. Devido à diferença de pressão entre o evaporador e o condensador, o vapor, levemente pressurizado no evaporador, escoa longitudinalmente, atravessando a seção adiabática e atingindo o condensador. Ao entrar em contato com o condensador, região onde calor é removido, o vapor libera calor latente e condensa, sendo que a gravidade provoca o retorno do condensado ao evaporador (Figura 1c). O líquido condensado no retorno ao evaporador forma uma película fina na parede do tubo através da gravidade. Enquanto houver diferença de temperatura entre as seções, o processo de evaporação e condensação ocorrerá de forma cíclica (ZHONG; JI, 2021; AHMED; JUBORI, 2020). O mecanismo de funcionamento de um termossifão está descrito esquematicamente na Figura 1.

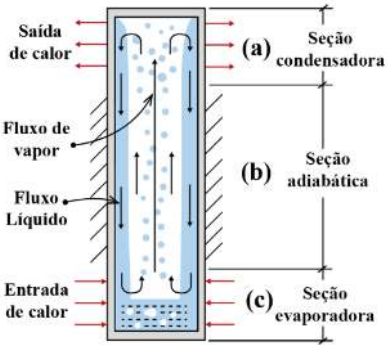


Figura 1 - Termossifão fechado de duas fases assistido por gravidade simples (Adaptado de Ahmed; Jubori, 2020; Zhong; Ji, 2021.)

Esta tecnologia pode ser empregada em soluções para problemas térmicos em variadas áreas da engenharia, tais como: em fornos de cocção e/ou secagem; unidades de resfriamento na indústria de alimentos; na refrigeração de aeronaves, ar-condicionado e leitos de rodovias para evitar que a neve se acumule; em componentes eletrônicos, em trocadores de calor e sistemas de coletores solares para de geração de energia (KUMAR; TIWARI; SAID, 2021; MANTELLI, 2021; BLET; LIPS; SARTRE, 2017).

Recentemente, tem se destacado a aplicação de termossifões e tubos de calor na construção civil. Neste seguimento, estudos liderados por Zhang et al. (2014), desenvolvidos na Universidade de Tianjin Chengjian na China, investigaram, através de experimentos e simulações numéricas e computacionais, o potencial de utilização de tubos de calor implantados na envoltória (do inglês, *Wall Implanted with Heat Pipes* – WIHP), como uma estratégia passiva aquecimento interno. Os resultados obtidos por Sun et al. (2015), Tan e Zhang (2016), Liu et al. (2019), Zhang, Ding e Guo (2019) e Zhang et al. (2022) se mostraram promissores, ou seja, o WITH se mostrou capaz de melhorar o ambiente térmico interno, aproveitando as fontes naturais de aquecimento e resfriamento, mostrando-se como alternativa viável para aplicação na construção civil. Vale salientar que, dentre essas pesquisas, apenas a elaborada por Liu et al. (2019) analisou o WIHP para redução de carga de resfriamento. Além disso, nenhuma das pesquisas realizadas teve como objetivo avaliar as condições térmicas do ambiente interno, dando enfoque para o estudo do processo de transferência de energia térmica do dispositivo em condições estacionárias e dinâmicas.

Uma parceria realizada entre a Universidade de Pisa, na Itália, e a Universidade Federal de Santa Catarina, no Brasil, investigou a aplicação de Termossifões em Paredes (do inglês, *Wall Thermosyphon* – WT) para aquecimento passivo de uma casa pré-fabricada considerando-se as condições climáticas do inverno italiano. A redução do consumo energético foi de cerca de 50% (FANTOZZI et al., 2017) aumentando consideravelmente a temperatura interna da edificação. O WT foi desenvolvido e testado experimentalmente por Bellani et al. (2017). Outro sistema com destaque foi elaborado por Zhang e Li (2019), que mescla os princípios de funcionamento da WIHP e WT, denominado como Parede de Trombe com Tubos de Calor (do inglês, *Trombe Wall Implanted with Heat Pipes* – TIHP). Tal tecnologia teve como objetivo principal avaliar a viabilidade de aplicação do sistema para aquecimento de edificações na China, resultando em dados promissores no que diz respeito a transferência de calor no inverno. Em resumo, observa-se, nos trabalhos acima revisados, um número considerável de trabalhos experimentais e de simulação para o aquecimento do ambiente interno de edificações. Porém, ainda é incipiente na literatura internacional e nacional, quando se trata da análise do termossifão como estratégia de resfriamento de ambientes.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente, a partir de um estudo de um piloto, o potencial de incorporação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos. Para isso, foi utilizada uma célula-teste integrada com uma serpentina de cobre, que simulou a seção evaporadora de um termossifão bifásico. A temperatura da serpentina foi mantida prescrita e uniforme ao longo de seu comprimento por um banho de temperatura controlada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas. Na etapa 1, a célula-teste é projetada, com sua forma e geometria definidas, assim como são escolhidos os materiais a serem empregados na envoltória do modelo. Na etapa 2 é caracterizado o processo de manufatura da serpentina de cobre, que simula, através da prescrição de sua temperatura, o comportamento térmico do evaporador de um termossifão bifásico em circuito. Na etapa 3, a bancada experimental é apresentada de forma detalhada e em conjunto com os demais equipamentos utilizados. Na etapa 4 é definida as variáveis de controle dos testes e a sequência dos experimentos. Por fim, na Etapa 5 é descrito o processo de tratamento dos dados obtidos.

3.1. Caracterização da Célula-teste

Na Figura 2 estão apresentadas as dimensões da Célula-teste, que tem formato cúbico, de 60 cm de aresta interna e 0,36 m² de área. A envolvente (paredes, cobertura e piso) da célula é constituída por três camadas (Figura 3b), com um total de 80 mm de espessura, sendo feitas de chapas de MDF (Painéis de Fibra de Média Densidade) de espessura 15 mm, localizadas nas faces externas e internas do modelo, e, preenchidas por poliestireno com 50 mm de espessura, resultando em uma transmitância térmica de 0,256, 0,258 e 0,254 W/m²K, para as paredes, cobertura e piso, respectivamente. Essa composição foi concebida com o intuito de isolar termicamente o ambiente interno, a fim de se evitar ao máximo trocas térmicas indesejáveis, e, assim, poder avaliar apenas as interações do sistema proposto no ambiente interno.

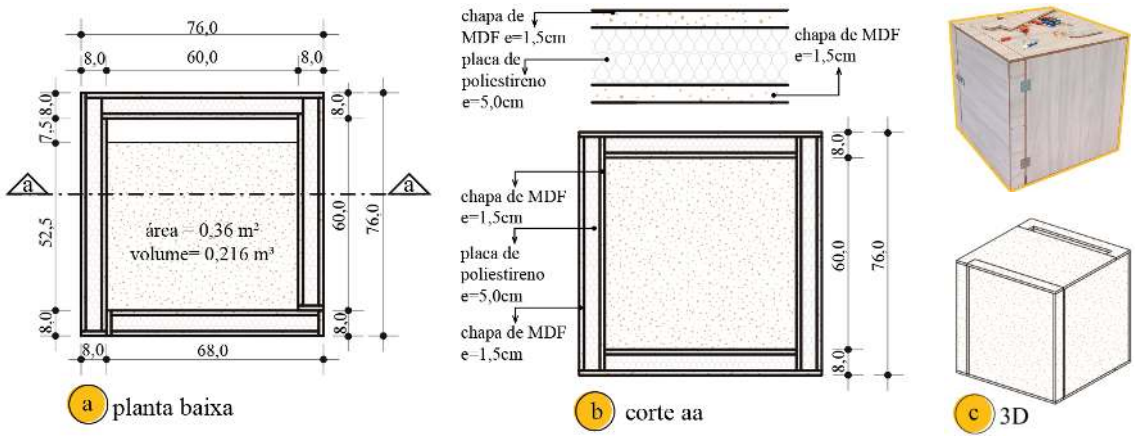


Figura 2 – Representação da célula-teste

Uma porta foi locada em uma das paredes para permitir o acesso aos equipamentos e materiais em seu núcleo. Também foi previsto um vão de abertura no piso e cobertura de 60 cm de comprimento e 7,5 cm de largura, para implantação dos tubos de cobre que simulam a seção evaporadora de um termossifão bifásico em circuito no interior da célula-teste.

3.2 Manufatura da serpentina

Nesta etapa é apresentado o dispositivo de cobre que irá simular o comportamento térmico da seção evaporadora de um termossifão bifásico em circuito. O conjunto possui o formato de uma serpentina (Figura 3), sendo composto por tubos de cobre, 8 de 78 cm e 2 de 10 cm de comprimentos, ambos com 22,22 mm (7/8) de diâmetro externo e parede de 0,79 mm (1/32). Além disso, são utilizadas 16 curvas de cobre de 90° com o mesmo diâmetro dos tubos para formação do circuito. Os tubos foram unidos às curvas e brasados. Por fim, foram realizados testes de estanqueidade.

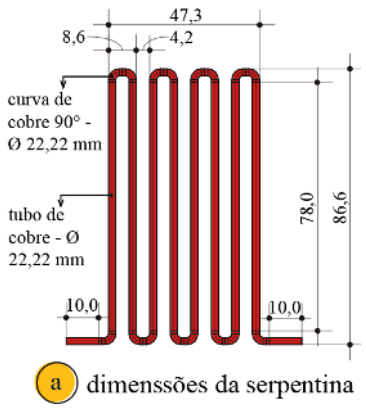


Figura 3 – Serpentina de cobre

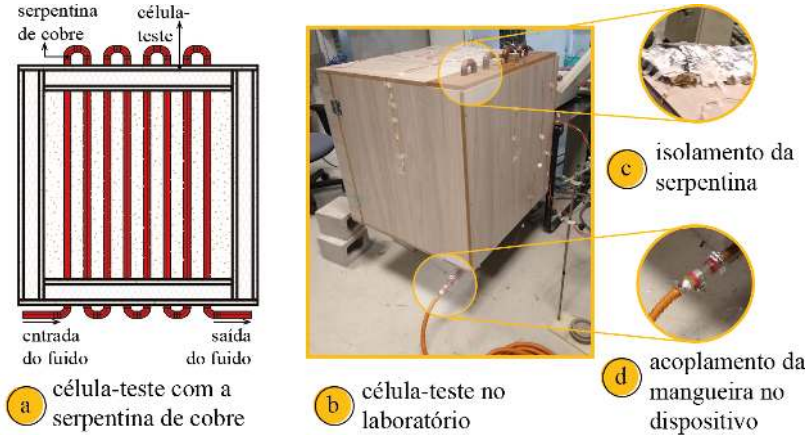


Figura 4 – Incorporação da serpentina de cobre na célula-teste

Após a manufatura da serpentina, foi realizado o acoplamento da mesma à célula-teste, conforme ilustrado na Figura 4. A vedação que ficou em contato com a serpentina de cobre se localiza paralelamente à porta do protótipo, denominada neste trabalho como Parede Fria (PF). Para evitar a troca térmica entre serpentina de cobre e o ambiente externo, instalou-se uma manta de fibra de cerâmica Durablanket® B6 da fabricante Unifrax (Figura 4c), isolando termicamente as superfícies do dispositivo fora da caixa. Na entrada e saída do dispositivo foram instaladas conexões para posteriormente receber mangueiras flexíveis para gás, que possibilitam a circulação de água no interior do da serpentina.

3.3 Bancada de testes

As temperaturas da bancada de testes são medidas por termopares do tipo K da marca Omega®, distribuídos nas superfícies externas, internas e no núcleo central da célula. Foram instalados 5 termopares no centro de cada superfície externa do protótipo. Nas superfícies internas foram alocados 10 termopares, sendo 5 instalados no centro das paredes laterais, cobertura, piso e porta e, 5 na vedação interna da Parede Fria, sendo que um termopar foi colocado no centro e os outros em quatro pontos de equipartição da linha diagonal, utilizando-se do método dos cinco pontos (Figura 5a). Além disso, 15 termopares monitoram a temperatura do ar, estando localizados no núcleo central da célula com a finalidade de se obter a temperatura média do ar interno e a sua distribuição (Figura 5a). Os termopares foram dispostos em três planos, paralelos entre si, os três arranjos seguiram a mesma composição formada para superfície da Parede Fria.

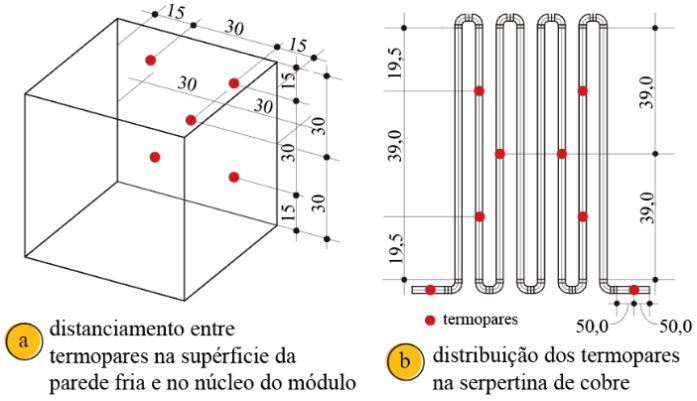


Figura 5- Distribuição dos termopares

Oito termopares foram distribuídos pela serpentina (Figura 5b), um na entrada e outro na saída do dispositivo. Outros dois foram instalados nos centros dos tubos de número 3 e 6. Já os 4 sensores restantes foram empregados nos tubos de número 2 e 7, onde, cada tubo recebeu 2 termopares, locados no ponto médio de 50% do comprimento dos tubos. Todos os termopares foram fabricados com o mesmo comprimento com o objetivo de reduzir falhas nas medições. Os sensores foram calibrados, obtendo-se como precisão de temperatura média ±0,21 °C.

Um banho termostático, modelo Ultra-Kryomat® RUK 40 S, do fabricante Lauda, foi empregado no fornecimento do fluxo da água deionizada, em temperatura prescrita, que circula no interior da serpentina de cobre. O banho termostático de temperatura controlada representa a atuação de uma seção evaporadora de um termossifão bifásico em circuito, que absorve

calor gerado no ambiente e transfere para fora da célula-teste, para dissipar para o ambiente externo através de seu condensador empregando, no presente caso, convecção natural.

Para o fornecimento de calor ao núcleo da célula-teste, foi utilizada uma fonte de alimentação CC, marca Heinzinger® PTN 125-10, conectada a um dissipador de calor aletado de alumínio (resistência elétrica), alocado no centro da célula-teste. O aquecedor empregado tem 35 cm de comprimento, 5,2 cm de largura, 3,5 cm de altura, e tem 32 aletas de 0,5mm de espessura espaçadas entre si, para facilitar a troca térmica.

Um sistema de aquisição de dados da National Instruments®, modelo NI cDAQ-9178 foi empregado para o armazenamento de dados. Leituras de temperatura foram coletadas pelos termopares a cada 30 segundos. O software LabVIEW® foi instalado em um computador de marca HP modelo SK-2800 e utilizado para captação dos dados emitidos pelos sensores ao final de cada ensaio realizado.

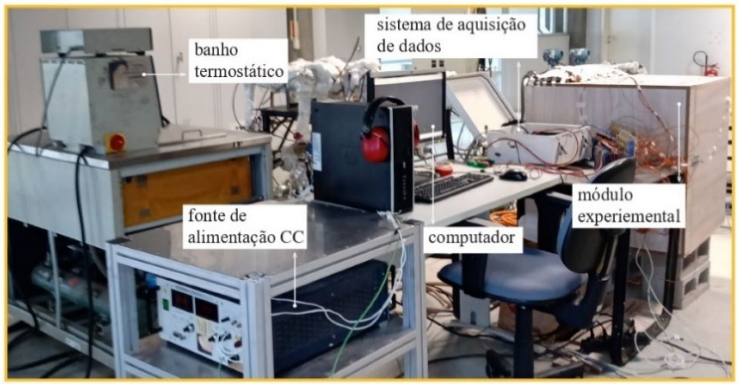


Figura 6 – Bancada experimental

Para averiguar a temperatura do ar externo no entorno da célula-teste, um registrador tipo Termo-Higrômetro digital da marca Onset HOBO® foi usado, localizado a 1m da mesma. Cabe salientar que os experimentos foram realizados em ambiente de laboratório, em condições consideradas estáveis, sendo a temperatura interna (T_{in}) controlada por aparelhos de ar condicionado em níveis próximos de 22°C. Na Figura 6, apresenta-se a bancada com todos os equipamentos supracitados.

3.4 Parâmetros e sequência de testes

Uma vez conhecidos os equipamentos a serem utilizados nos testes, estes foram interligados como mostra a Figura 7, de forma que os testes pudessem ser conduzidos.

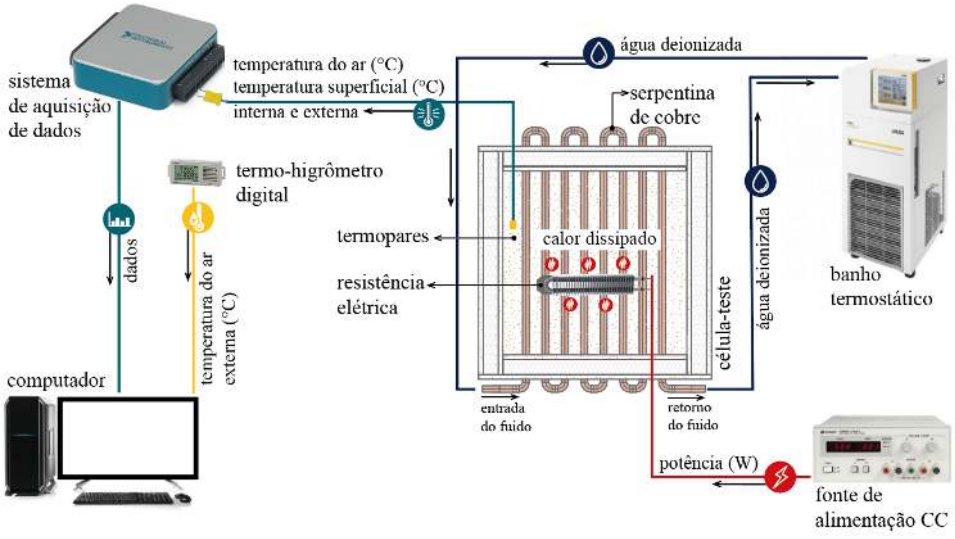


Figura 7 – Layout dos equipamentos usados nos experimentos

A bancada funciona da seguinte forma: a fonte de alimentação CC fornece uma potência controlada a uma resistência elétrica, que dissipa calor no interior da célula-teste. O calor cedido é absorvido pela serpentina, pela qual circula água deionizada, cuja temperatura é controlada por um banho termostático.

As temperaturas captadas pelos termopares instalados são adquiridas e armazenada pelo sistema de aquisição de dados que transmite as informações para o computador que as armazena. Os dados são lidos e tratados com o auxílio do software LabVIEW. Da mesma forma, os dados obtidos pelos Termo-Higrômetros digitais, que registram as temperaturas e umidade relativa do ar interna e externa a célula, são armazenados e tratados.

Para a realização dos testes, os seguintes parâmetros são variados. (1) Temperatura da água deionizada que circula pela serpentina de cobre (localizada próxima à uma parede do cubo experimental), a qual é controlada por um banho termostático. A serpentina retira calor do ambiente. A sua temperatura uniforme simula as condições de um evaporador, em uma aplicação real. O calor absorvido pelo evaporador seria transferido para o condensador do termossifão, onde seria removido para o ambiente. (2) Potência dissipada pela resistência elétrica, que reproduz a carga térmica no interior da célula. As temperaturas da água deionizada variaram em uma escala decrescente de 3°C, sendo a temperatura máxima de 22°C. Adotou-se como carga

térmica interna a potência de 15W para este teste piloto. A combinação destas variáveis resultou em 3 ensaios experimentais, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Variações dos testes a serem realizados

Teste	Temperatura da água deionizada do banho termostático	Potência
E1	22 °C	15 W
E2	19 °C	
E3	16 °C	

Os testes se deram em dois momentos. No primeiro momento, buscou-se caracterizar um ambiente em regime permanente, sem a remoção de calor, denominado como Condição inicial (CI). Desse modo, nas primeiras 15h, apenas a fonte de alimentação CC permaneceu ligada, transmitindo o calor ao interior da célula. Este tempo foi estabelecido considerando-se uma variação de temperatura de 1% em 30min. No segundo momento, durante o teste experimental propriamente dito Condição transiente (CT), além da fonte de calor, o banho termostático também foi acionado, com a consequente circulação de água no interior dos tubos de cobre. Desta forma, calor foi capturado no interior da célula-teste, por 5h (usando o mesmo critério). No total, o este contabilizou 20h.

3.5 Tratamento e análise dos resultados

Os dados obtidos nos ensaios experimentais foram transferidos ao Excel para serem tratados, gerando imagens, diagramas e tabelas. Os principais dados de saída foram as temperaturas e distribuição do ar interno.

Dentre os gráficos gerados tem-se o da distribuição da temperatura do ar interno da célula-teste, que podem ser visualizados através de gráficos 3D. Estes foram produzidos com o auxílio da interpolação dos dados de temperatura do ar. Nesse cenário, a plataforma MatLab foi inserida para produção das imagens, a fim de se ilustrar o comportamento 3D da variável temperatura. As temperaturas variaram de 21 °C a 38°C, onde a cor "azul bic" representa a T_{in} mais baixa e o "vermelho bordô" a mais alta. Tal escala foi estabelecida a partir do conjunto de dados encontrados nos experimentos. Para geração destas ilustrações, foram selecionadas as médias das temperaturas do ar interno da última hora das CI e CT, quando o regime permanente já havia sido atingido.

Outro parâmetro importante estabelecido para avaliar o desempenho do sistema proposto foi a taxa de resfriamento C_r (°C/h), tanto para a temperatura do ar interno, quanto para a temperatura da superfície resfriada interna, calculada a partir da expressão:

$$C_r = \frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{CT} - T_{CI}}{t} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde ΔT é a diferença entra a temperatura média do CT (T_{CT}) e o CI (T_{CI}) em °C e o Δt é dado pelo tempo do ensaio realizado em minutos.

4. RESULTADOS

Afim de se avaliar o potencial de incorporação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos, dois cenários de resultados foram considerados: (1) as temperaturas do ar interno da célula e a taxa de resfriamento em função do tempo; e (2) a distribuição da temperatura do ar interno a célula.

4.1 Variação da Temperatura do ar e da Taxa de resfriamento em função do tempo

Resultados da média de temperaturas do ar interno e da taxa de resfriamento para cada intervalo de 30min em função do tempo, para testes da célula sujeita a 15W de potência elétrica (aquecimento do ar) e temperaturas da serpentina (banho termostático) de 22, 19 e 16 °C, são mostradas na Figura 8. Note-se que, nesta figura, são exibidas as últimas 6h de ensaios, sendo que a primeira hora representa a última hora a Condição Inicial (CI), equivalente aos minutos de 870 a 900. Já as próximas cinco horas são plotadas a Condição Transiente (CT). A Taxa de Resfriamento foi calculada considerando a Equação 1.

Num primeiro momento, nota-se que as temperaturas internas na CI (que representam as temperaturas da condição inicial) não são iguais, uma vez que a temperatura do ambiente de laboratório, mesmo controlada por um aparelho de ar condicionado, varia com as condições climáticas, afetando a temperatura interna da célula. Outra hipótese para tal ocorrido é calor armazenado nas paredes, em virtude de testes anteriores realizados na célula.

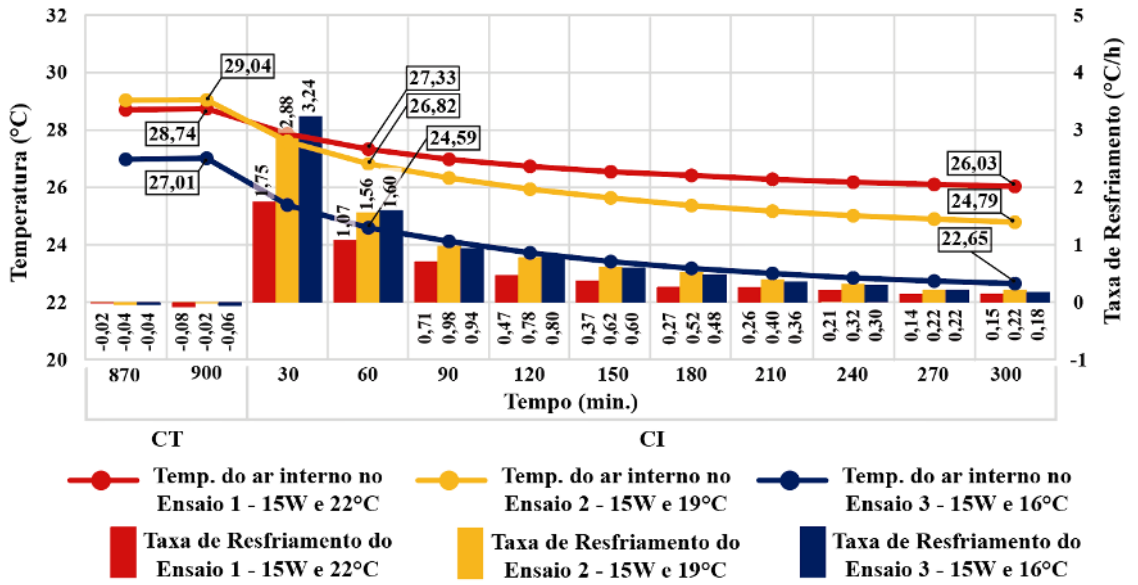


Figura 8 - Variação da temperatura do ar interno e da taxa de resfriamento em função do tempo, para os ensaios 1, 2 e 3, com Q=15W

Porém, estes eventos não invalidam os resultados obtidos, especialmente se for considerado que se trata de um estudo piloto. Nota-se que as temperaturas do ar interno nos testes em Condição Transiente (CT) tendem a se estabilizar com o tempo, em todos os casos avaliados. Percebe-se, ainda, que as taxas de resfriamento no tempo 5h para os Testes em Condições Transientes são bem parecidas para os Ensaios 2 e 3, ou seja, de 0,70 e 0,72 °C/h, respectivamente. Tal condição é explicada por diferenças de temperatura entre o TR e a serpentina de cobre resfriada, onde para E2 foi de 9,76 °C e para E3 de 10,74 °C.

O pior resultado entre os casos testados foi relativo ao Ensaio 1, onde a diferença de temperaturas entre a Condição Inicial e Transiente foi de 2,71 °C e Taxa de resfriamento do ambiente de 0,43°C/h. Como mencionado anteriormente estes valores ressaltam a dificuldade de extração de calor pelo sistema proposto, quando a diferença de temperatura entre o ambiente interno e a serpentina é menor que 7 °C. Outro fator interessante a ser mencionado é que, quando tal diferença de temperatura ocorre, o atraso na queda da temperatura interna é menor, acontecendo após os 60min iniciais de funcionamento do dispositivo.

Destaca-se, ainda, que as temperaturas internas em todos os ensaios tendem a diminuir e se estabilizar, após as 2h horas para os Ensaios 1 e 2, e no Ensaio 3 após a terceira hora. De forma geral, a redução da temperatura do ar na célula foi observada em todos os ensaios, o que possibilita a redução da carga térmica interna e consequentemente o melhor desempenho do ambiente térmico.

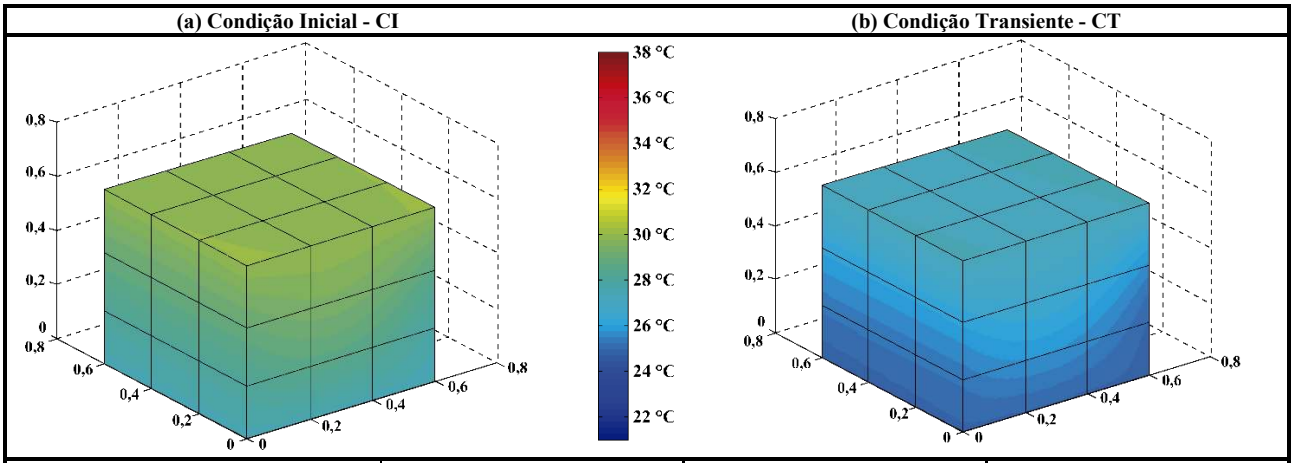
4.2 Distribuição da Temperatura do ar Interno

Apresenta-se, nas Figuras 9, 10 e 11, as distribuições de temperatura do ar interno para os Testes em Condições Iniciais (CI) e Condições Transientes (CT). São também listadas as médias das temperaturas do ar interno na última hora de cada experimento e as temperaturas máximas e mínimas absolutas neste mesmo período. Apresenta-se também, a Taxa de Resfriamento do sistema em °C/h, considerando-se as diferenças das temperaturas médias, a partir do regime permanente ter sido atingido.

Percebe-se nos Ensaios 1 e 2 (Figuras 9 e 10), temperaturas internas bastante semelhantes para os Testes em Condições Iniciais. Nestes mesmos ensaios, observa-se, após o acionamento da circulação de água no interior dos tubos (início dos CT), redução dos gradientes de temperatura, principalmente para o Ensaio 2, onde tanto o quadrante central, quanto o inferior apresentam uma variação de temperatura entre 24 °C e 25°C. Nesse cenário, o ambiente teria uma média de temperatura inferior à escala térmica determinada pela ASHRAE (2017) para a estação do verão, para a realização das atividades humanas.

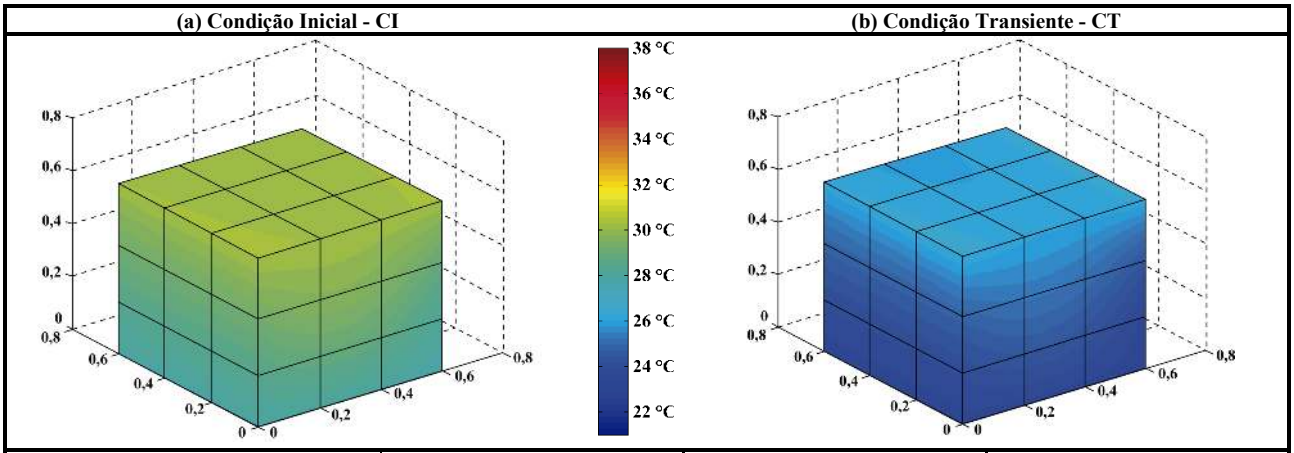
Os resultados de distribuição de temperatura interna para o Ensaio 3, de 15W com temperatura dos tubos a 16°C, são mostrados na Figura 10. Observam-se temperaturas inferiores a 24°C em condições transientes, em toda a célula, com temperaturas mínimas absolutas menores que 21,5 °C. Contudo, a diferença de temperaturas entre CI e CT, de 4,54 °C, é praticamente a mesma observada para o Ensaio 2 (4,28 °C). Portanto, pode-se concluir que há uma certa dificuldade na extração de calor no sistema proposto, quando a temperatura interna da célula, T_{in}, antes da circulação da água iniciar, é abaixo de 27°C.

Como anteriormente citado, todos os resultados de taxa de resfriamento expostos neste Item apresentaram melhor desempenho quando obtidos considerando a média da T_{in} da última hora do Teste Experimental, já em regime permanente. Dentre todos os Ensaios exibidos, os casos E2 e E3 foram os que obtiveram melhores índices, apresentando 0,84 e 0,86 °C/h, respetivamente.



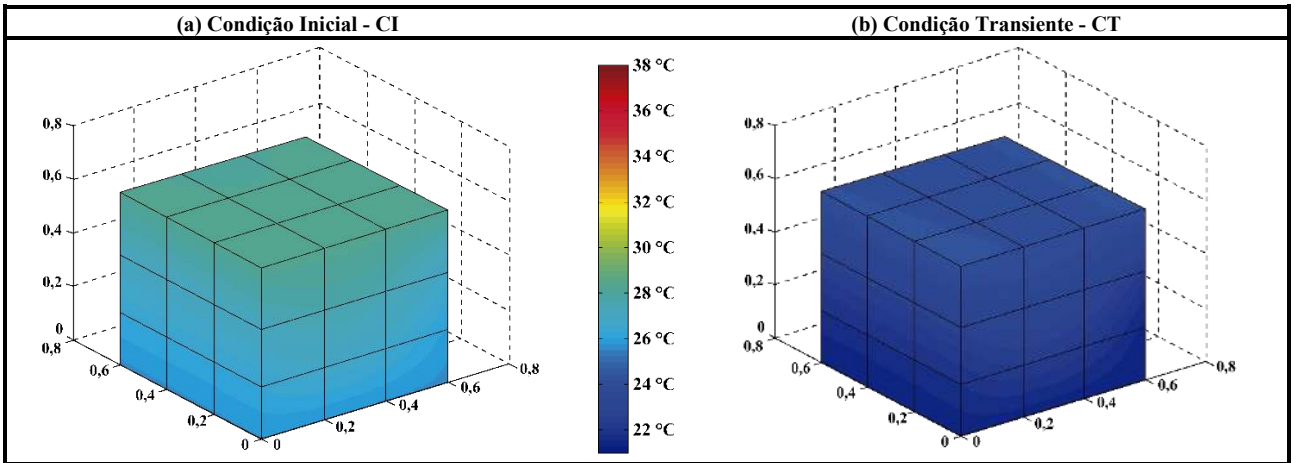
	(a) Condições Iniciais - CI	(b) Condições Transientes - CT	Diferença de Temperatura (ΔT)
Temperatura Média (°C)	28,72	26,07	2,65
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	30,24	27,81	2,43
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	27,36	24,70	2,66
Taxa de Resfriamento (°C/h)	0,53		

Figura 9 - Distribuição da temperatura do ar interno (a) Condições Iniciais e (b) Condições Transientes - Ensaio 1 - 15W e 22°C



	(a) Condições Iniciais - CI	(b) Condições Transientes - CT	Diferença de Temperatura (ΔT)
Temperatura Média (°C)	29,02	24,85	4,18
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	30,60	26,72	3,88
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	27,67	23,39	4,28
Taxa de Resfriamento (°C/h)	0,84		

Figura 10 - Distribuição da temperatura do ar interno (a) Condições Iniciais e (b) Condições Transientes - Ensaio 2 - 15W e 19°C



	(a) Condições Iniciais - CI	(b) Condições Transientes - CT	Diferença de Temperatura (ΔT)
Temperatura Média (°C)	26,99	22,69	4,30
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	28,53	24,71	3,82
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	25,67	21,08	4,54
Taxa de Resfriamento (°C/h)	0,86		

Figura 11 - Distribuição da temperatura do ar interno (a) Condições Iniciais e (b) Condições Transientes - Ensaio 3 - 15W e 16°C

Por fim, uma característica comum em todos Ensaios apresentados, foi o comportamento do gradiente de temperatura em CT e CI. Observou-se que, em Condições Transientes os gradientes de temperaturas foram menores em relação aos Testes em Condições Iniciais (CI), no qual obteve-se maior homogeneidade da temperatura do ar interno na cavidade da célula-teste, após o acionamento da serpentina de cobre. Além disso, outro fator semelhante a se destacar é que temperaturas mais elevadas se encontram nos quadrantes superiores, enquanto as menores temperaturas estavam localizadas nos quadrantes inferiores, tanto para CT quanto em CI.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente, a partir de um estudo de um piloto, o potencial de incorporação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos. Para isso, foi utilizada uma célula-teste integrada com uma serpentina de cobre, que simulou a seção evaporadora de um termossifão bifásico. A temperatura da serpentina foi mantida prescrita e uniforme ao longo de seu comprimento por um banho de temperatura controlada.

Para todos os ensaios, foi observada uma redução da temperatura do ar interno com o acionamento da serpentina resfriada. Os ensaios 2 (15W-19°C) e 3 (15W-16°C) apresentaram os melhores desempenhos, reduzindo respectivamente a T_{in} em 4,28 e 4,30°C no intervalo de 5h. Desse modo, pode-se afirmar que o fator de maior influência é a diferença entre as temperaturas da serpentina de cobre e do ar interno. Ademais, destaca-se a semelhança de comportamento assintótico das temperaturas e das taxas de resfriamento, com o tempo, de forma que as temperaturas internas puderam ser consideradas estáveis após as 2h horas do acionamento das serpentinas.

No que tange à distribuição das temperaturas do ar no interior da célula-teste, pode-se observar que tanto nos TR quanto nos TE, as maiores temperaturas se encontram nas regiões superiores da célula, e as menores nas regiões inferiores. Tal fenômeno era esperado, como resultado da convecção natural em ambientes internos, onde o ar menos denso (quente) tende a subir, ao passo que o mais denso (frio) tende a descer. Além disso, observou-se que em Condições Transientes os gradientes de temperaturas foram menores em relação aos Testes de Condições Iniciais (CI), no qual obteve-se maior homogeneidade da temperatura do ar interno na cavidade da célula teste, após o acionamento da serpentina de cobre.

Concluindo, pode-se afirmar que os resultados apresentados fornecem diretrizes para o futuro projeto e construção de um termossifão em circuito real, possivelmente com o uso de superfícies estendidas para aumentar a área de transferência de calor, e, consequentemente potencializar a performance do dispositivo, especialmente em situações onde a diferença de temperatura entre o evaporador do termossifão e o meio onde está inserido seja inferior a 7°C. Ademais, como estratégia para maximizar a extração de calor, indica-se a localização do termossifão "real" na região da cobertura na célula, uma vez que, como ilustram os resultados, maiores temperaturas são encontradas nas regiões superiores do ambiente interno.

Indica-se ainda que os ensaios sejam efetuados com intervalos de tempo superiores a 48h, a fim de se evitar um acúmulo de calor nas paredes da célula. Além disso, caso os testes virem a ser realizados no mesmo laboratório, se aconselha selecionar dias com condições climáticas semelhantes entre si, com o intuito de evitar a interferência das variações climáticas externas nos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, I. S.; JUBORI, A. M. Al. Assessment of heat transfer and flow characteristics of a two-phase closed thermosiphon. Heat Transfer, v. 50, n. 2, p. 1351-1370, 7 set. 2020. http://dx.doi.org/10.1002/htj.21933.

AMANOWICZ, Ł. Controlling the Thermal Power of a Wall Heating Panel with Heat Pipes by Changing the Mass Flowrate and Temperature of Supplying Water - Experimental Investigations. Energies, v. 13, n. 24, p. 6547, 11 dez. 2020. http://dx.doi.org/10.3390/en13246547.

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATINGREFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard. 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2017.

ATHMANI, W. *et al.* The Potential of Using Passive Cooling Roof Techniques to Improve Thermal Performance and Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Arid Regions. Buildings, v. 13, n. 1, p. 21, 22 dez. 2022. https://doi.org/10.3390/buildings13010021.

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, v. 7, n. 1, p. 57-68, 2019. http://dx.doi.org/10.1615/interfacphenomheattransfer.2019031160.

BLET, N.; LIPS, S.; SARTRE, V. Heats pipes for temperature homogenization: a literature review. Applied Thermal Engineering, v. 118, p. 490-509, maio 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.009.

CISTERNA, L. H. R. Análise de um secador de ervas finas assistido por termossifões. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DÍAZ-LÓPEZ, C. et al. Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. Building and Environment, v. 221, p. 109297, ago. 2022. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109297

EPE. EMPRESA DE PESQUISAENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2021: ano base 2020. Rio de Janeiro: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021. 292 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf. Acesso em: 13 maio 2022.

FANTOZZI, F.; FILIPESCHI, F.; 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, v. 796, p.012043-012054, jan. 2017. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/796/1/012043.

JOUHARA, H.; CHAUHAN, A.; NANNOU, T.; ALMAHMOUD, S.; DELPECH, B.; WROBEL, L.C.. Heat pipe based systems - Advances and applications. Energy, v. 128, p. 729-754, jun. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: toward a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Paris: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Dec. 2021. 41 p. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2021. Acesso em: 1 maio 2022.

JUNIOR, A. A. M.; MANTELLI, M. B. H.. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management. Energy Conversion And Management, v. 202, p. 112219, dez. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219.

LI, Z.; ZHANG, D.; LI, C. Experimental Study on Thermal Response Characteristics of Indoor Environment with Modular Radiant Cooling System. Energies, v. 5012, p.01-13, set. 2020. https://doi.org/10.3390/en13195012.

LIU, C.; ZHANG, Z.; SHI, Y.; DING, Y.. Optimisation of a wall implanted with heat pipes and applicability analysis in areas without district heating. Applied Thermal Engineering, v. 151, p.486-494, mar. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.108.

MANTELLI, M. B. H.. Thermosyphons and Heat Pipes: theory and applications. Springer International Publishing, v. 1, n. 1, p. 1-413, 2021. Springer International Publishing.

NOIE, S. H.. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. Applied Thermal Engineering, v. 25, n. 4, p. 495-506, mar. 2005. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.019.

SAMUEL, D. G. L.; NAGENDRA, S. M. S.; MAIYA, M. P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review. Building and Environment, v. 66, p. 54–64, ago. 2013. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.016.

SARMIENTO, A. P. C.; CISTERNA, L. H. R.; MILANESE, F.H.; MANTELLI, M.B.H. A numerical method for shell and thermosyphon heat exchanger analysis. In: X MINSK INTERNACIONAL SEMINAR “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”. Minsk, Belarus, September, 2018.

SUN, Z.; ZHANG, Z.; DUAN, C.. The applicability of the wall implanted with heat pipes in winter of China. Energy And Buildings, v. 104, p.36-46, out. 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.082.

TAN, R.; ZHANG, Z.. Heat pipe structure on heat transfer and energy saving performance of the wall implanted with heat pipes during the heating season. Applied Thermal Engineering, v. 102, p. 633-640, jun. 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.085.

ZHANG, Z.; DING, Y.; GUO, C.. Dynamic heat transfer performance of the wall implanted with heat pipes and its energy saving characteristics during the heating season. Energy Procedia, v. 158, p. 1155-1160, fev. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.297.

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

ZHANG, Z.; LIU, Q.; YAO, W.; ZHANG, W.; CAO, J.; HE, H.. Research on temperature distribution characteristics and energy saving potential of wall implanted with heat pipes in heating season. Renewable Energy, v. 195, p. 1037-1049, ago. 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.054.

ZHANG, Z; SUN, Z; DUAN, C.. A new type of passive solar energy utilization technology-The wall implanted with heat pipes. Energy And Buildings, v. 84, p.111-116, dez. 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.016.

ZHONG, W.; JI, W.. Applications of coupling thermosyphons with phase change materials: a review. Energy And Buildings, v. 233, p. 110690-110708, fev. 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110690.