

VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE TERMOSSIFÃO BIFÁSICO PARA RESFRIAMENTO PASSIVO DE AMBIENTES INTERNOS

FEASIBILITY OF THE APPLICATION OF A TWO-PHASE THERMOSYPHON FOR PASSIVE COOLING OF INTERNAL ENVIRONMENTS

 Fernando da Silva Almeida ¹

 Mariane Pinto Brandalise ²

 Luciano Serconek Fuso ³

 Luis Hernán Rodríguez Cisterna ⁴

 Marcia Barbosa Henriques Mantelli ⁵

 Martin Ordenes Mizgier ⁶

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, fernando.almeida@labtucal.ufsc.br

² Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, mariane.brandalise@labtucal.ufsc.br

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, luciano.fuso@labtucal.ufsc.br

⁴ Universidade de Tarapacá, Arica, Chile, lrodriguez@academicos.uta.cl

⁵ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, marcia@labtucal.ufsc.br

⁶ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, martin.ordenes@ufsc.br

Contribuição dos autores:

FSA: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **MPB:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação e visualização. **LFS:** conceituação, investigação e metodologia. **LHRC:** conceituação, investigação, metodologia, supervisão, validação. **MBHM:** conceituação, administração de projeto, supervisão e escrita - rascunho original. **MOM:** conceituação, administração de projeto, supervisão e visualização.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Arthur Santos Silva 

Resumo

Pesquisas evidenciam que está em curso um aquecimento global irreversível até o fim deste século. Tal elevação de temperaturas do planeta aumenta ainda mais a necessidade de resfriamento de ambientes internos em edifícios, onde deve se empregar tecnologias mais efetivas em termos de consumo de energia. Neste contexto, métodos de arrefecimentos passivos devem ser investigados. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação de termossifões bifásicos como estratégia para resfriamento de ambientes internos. Para isso, por meio de um estudo experimental, foi utilizada uma célula-teste, integrada com uma serpentina de cobre que simulou a seção evaporadora de um termossifão. A temperatura da serpentina foi mantida prescrita e uniforme ao longo de seu comprimento por um banho de temperatura controlada. No geral, pôde-se observar que o dispositivo se mostrou capaz de extrair calor de forma passiva do ambiente, reduzindo significativamente a temperatura do ar interno. Grande parte do calor foi extraído na primeira hora e, em alguns casos, na primeira hora e meia de testes. Contudo, a transferência do calor interno foi deficiente em situações em que a diferença de temperaturas entre a serpentina e a célula foi igual ou inferior a 7°C. A distribuição da temperatura do ar interno mostrou ser similar para todos os ensaios realizados, sendo mais alta nos quadrantes superiores da célula. Além disso, velocidade de estabilização das temperaturas das superfícies internas reduziu quando a temperatura da serpentina de cobre aumentou.

Palavras-chave célula-teste, termossifão bifásico, resfriamento passivo, estratégia bioclimática.

Abstract

Research shows that the world faces global warming, which is expected to be irreversible by the end of this century. With the temperature elevation, the need to cool internal ambient in buildings increases, and new energy-saving technologies must be employed. Thus, investigating and proposing new passive cooling methods is needed. The present study aims to evaluate the feasibility of applying two-phase thermosyphons to cool indoor environments. For this, a test cell integrated with a copper coil, which simulated the evaporator section of a thermosyphon, was experimentally studied. A temperature-controlled thermal bath kept the coil temperature at a prescribed and uniform temperature along its length. Overall, the device was able to extract heat passively. The device managed to reduce the temperature of the indoor air significantly. Much of the heat was extracted in the first hour of the test and, in some cases, in the initial first and half hours. However, less heat was removed when the temperature difference between the coil and the cell was equal to or less than 7°C. A similarity in the internal air temperature distributions in all tests was observed, with a higher temperature level at the upper quadrants of the cell. The speed of stabilization of the temperatures of the internal faces coincided when the temperature of the copper coil increased.

Keywords: test cell, two-phase thermosyphon, passive cooling, bioclimatic strategy.

How to cite this article:

ALMEIDA, F. S.; BRANDALISE, M. P.; FUSO, L. S.; RODRÍGUEZ CISTERNA, L. H.; MANTELLI, M. B. H.; MIZGIER, M. O. Viabilidade da aplicação de termossifão bifásico para resfriamento passivo de ambientes interno. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, n. 00, p. e023021, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8672200>

Submitted 01.02.2023 – Approved 17.08.2023 – Published 05.09.2023

e023021-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023021, 2023, ISSN 1980-6809



Introdução

O acelerado crescimento da população mundial está elevando a demanda global de energia (Kumar; Tiwari; Said, 2021; Alizadeh; Sadrameli, 2016). Segundo estudos desenvolvidos pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), cerca de 40% da energia consumida no mundo está relacionada às edificações. No Brasil, o setor residencial utiliza 27,6% de toda a energia elétrica produzida no país (EPE, 2021), o que eleva as emissões de gases de efeito estufa, propiciando alterações climáticas no globo terrestre. De acordo com estudos elaborados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Allen *et al.*, 2021), espera-se um aquecimento global irreversível que ultrapassará os 1,5 e 2,0 °C até o fim deste século.

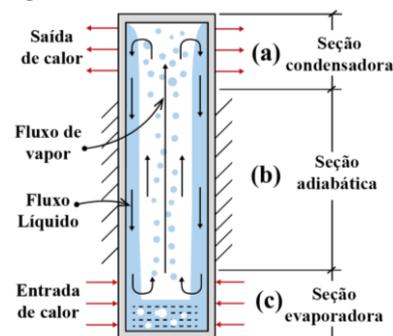
Tal fenômeno eleva a necessidade de resfriamento em edifícios, onde, de maneira geral, utilizam soluções ativas de climatização. Por isso, investigar e propor novos métodos e tecnologias passivas, que colaborem com a economia de energia e a redução da carga de resfriamento dos edifícios, torna-se uma necessidade visando a redução do impacto ambiental associado à construção e uso dos edifícios (Nurlybekova; Memon; Adilkhanova, 2021).

Nesse sentido, os tubos de calor (do inglês, *Heat pipes* – HP) e termossifões bifásicos (do inglês, *Two-phase thermosyphons*) são dispositivos desenvolvidos para o transporte passivo e com alta eficiência de energia térmica. Por operação passiva se entende a transferência de calor, sem a necessidade de consumo adicional de energia. Tipicamente, para uma determinada geometria, a condutividade térmica efetiva de um termossifão pode atingir valores de até 700 vezes a condutividade do cobre (Jouhara *et al.*, 2017; Noie, 2005), mesmo quando sujeitos a baixas diferenças de temperatura.

De acordo com Mantelli (2021), termossifões podem ser utilizados em aplicações que requerem eficiência na transmissão de energia térmica e/ou uniformidade na distribuição de temperaturas. Na modelagem matemática destes dispositivos, muitas vezes se recorre ao uso de analogias com circuitos elétricos (Robinson; Sharp, 2015; Rodríguez Cisterna, 2014). Métodos numéricos e/ou a pesquisas experimentais são comumente empregados por grupos de pesquisadores no Brasil e no mundo, para a predição do comportamento térmico de termossifões (Amanowicz, 2020; Sarmiento; Rodríguez Cisterna; Milanese; Mantelli, 2018; Junior; Mantelli, 2019).

De modo geral, os termossifões bifásicos (Figura 1), são formados por um tubo evacuado e preenchido parcialmente por um fluido de trabalho. São compostos por três regiões principais: evaporador, seção adiabática e condensador. 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, escoia 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 se condensa (Figura 1c). O líquido condensado forma uma película fina sobre a parede do tubo que escoia na direção do evaporador sob a ação da gravidade. Assim, o evaporador deve ser localizado numa posição inferior ao condensador. Enquanto houver uma diferença de temperatura entre as seções, mesmo que pequena, o processo de evaporação e condensação ocorre de forma cíclica (Zhong; Ji, 2021; Ahmed; Jubori, 2020; Mantelli, 2021).

Figura 1 - Termossifão fechado de duas fases assistido por gravidade simples



Fonte: 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 elétrica (Kumar; Tiwari; Said, 2021; Mantelli, 2021; Blet; Lips; Sartre, 2017).

Recentemente, a aplicação de termossifões e tubos de calor na construção civil tem se destacado em sistemas de aquecimento solar e de água, além de serem implantados em elementos verticais e horizontais para aquecimento e resfriamento direto e indireto de espaços internos, corroborando com a climatização e armazenamento de energia. De acordo com Alizadehdakhel, Rahimi e Alsairafi (2010), estes dispositivos são promissores para a incorporação em edifícios devido a: simplicidade de projeto, alta taxa de transmissão de calor, transferência de energia térmica unidirecional (funcionam como um diodo térmico), baixo custo, variados arranjos geométricos, baixo custo de manutenção etc.

Ainda na área da construção civil, estudos liderados por Zhang, Sun e Duan (2014), desenvolvidos na Universidade de Tianjin Chengjian, na China, investigaram, experimental e numericamente, o potencial de utilização de tubos de calor implantados na envoltória (do inglês, *Wall Implanted with Heat Pipes – WIHP*), como uma estratégia passiva para o aquecimento de ambientes internos. Os resultados obtidos por Sun, Zhang e Duan (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 foi capaz de melhorar o ambiente térmico interno, aproveitando as fontes naturais de aquecimento e resfriamento, apresentando-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 WITH para redução de carga de resfriamento. Além disso, em geral, os trabalhos deram enfoque ao estudo do processo de transferência de energia térmica do dispositivo em condições estacionárias e dinâmicas, não objetivando avaliar as condições térmicas do ambiente interno por meio de células-teste.

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*) em uma casa pré-fabricada, considerando o inverno italiano, ou seja, para o aquecimento passivo. A redução do consumo energético foi de cerca de 50% (Fantozzi *et al.*, 2017) aumentando consideravelmente a temperatura interna da edificação. Um protótipo do WT foi desenvolvido e testado experimentalmente por Bellani *et al.* (2019). 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). O estudo destes pesquisadores teve como objetivo principal avaliar a viabilidade da aplicação do sistema para aquecimento de edificações na China, resultando em dados promissores no que diz respeito à transferência de calor no inverno.

Em resumo, observa-se nos trabalhos acima citados, um número considerável de pesquisas experimentais e de simulações com o objetivo de aquecer o ambiente interno de edificações. Porém, ainda é incipiente, na literatura internacional e nacional, análises do termossifão como estratégia de resfriamento de ambientes internos, bem como a avaliação das condições térmicas de células-teste com tais dispositivos.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos. Para isso, por meio de um estudo experimental, foi utilizada uma célula-teste integrada com uma serpentina de cobre, que simulou a seção evaporadora de um termossifão. A temperatura da serpentina foi mantida prescrita e uniforme ao longo de seu comprimento por um banho de temperatura controlada.

Materiais e método

Esta pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas, como ilustrado na Figura 2. Na etapa 1, a célula-teste foi projetada, determinando-se sua geometria e materiais empregados na envoltória do modelo. Na etapa 2 foi caracterizado o processo de manufatura da serpentina de cobre, que simulava, por meio da prescrição de sua temperatura, o comportamento térmico do evaporador de um termossifão bifásico em circuito. Na etapa 3, a bancada experimental foi detalhada e escolhidos os demais equipamentos utilizados. Na etapa 4 foram definidas as variáveis de controle dos testes e a sequência dos experimentos. Por fim, na Etapa 5 foi descrito o processo de tratamento dos dados obtidos.

Figura 2 – Etapas do Método



Fonte: os autores.

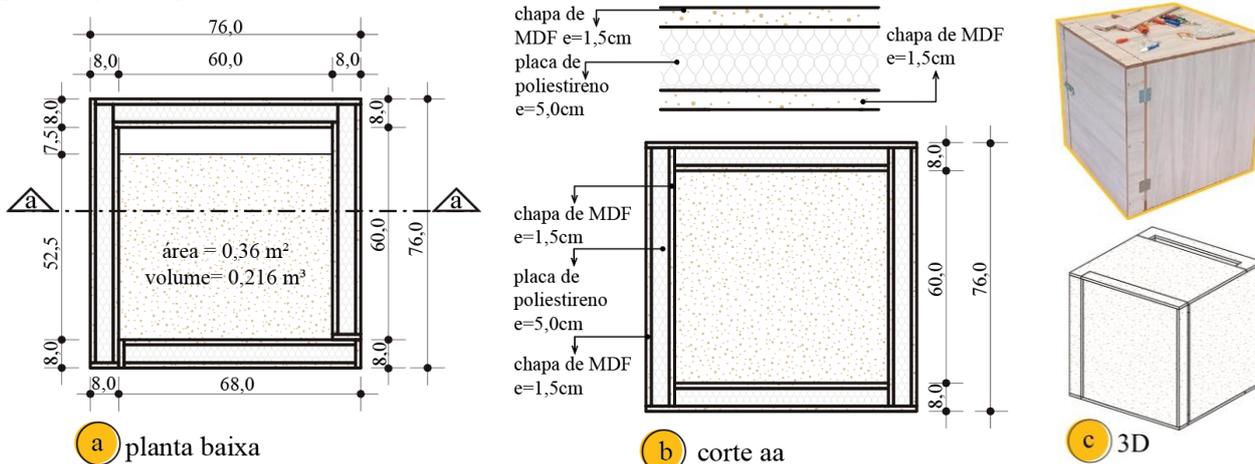
Caracterização da Célula-teste

Para avaliar a viabilidade da aplicação de termossifões bifásicos para arrefecimento de ambientes internos foi construída uma célula-teste em escala reduzida. Células-testes de pequeno porte também foram utilizadas por diversos pesquisadores para avaliação de ambientes térmicos internos (Gong *et al.*, 2022; Blasi, Krüger, 2019; Yang *et al.*, 2018). Esta estratégia é adotada nas fases iniciais de projetos pois requer menores custos financeiros, possibilita mais arranjos experimentais, permite variadas dinâmicas de testes, facilitam o acesso à instrumentação (melhor qualidade de dados coletados), proporciona condições ambientais internas mais homogêneas, dentre outros fatores (Cattarin; Causone; Kindinis; Pagliano, 2016).

Na Figura 3 estão apresentadas as dimensões da célula-teste. De formato cúbico, a célula possui 60cm de aresta interna e 0,36 m² de área em cada face. A envoltória (paredes, cobertura e piso) da célula é formada por três camadas (Figura 3b), composta de: chapas de MDF (Painéis de Fibra de Média Densidade) de espessura 15mm,

localizadas nas faces externas e internas do modelo, preenchidas por poliestireno com 50mm de espessura, com um total de 80mm de espessura. As condutividades térmicas das paredes verticais, cobertura e piso são de 0,256, 0,258 e 0,254 W/mK, respectivamente. Esta composição das chapas foi concebida com o intuito de isolar termicamente o ambiente interno do externo, a fim de se evitar ao máximo trocas térmicas indesejáveis, permitindo a avaliação apenas das interações térmicas da serpentina no ambiente interno.

Figura 3 - Representação da célula-teste



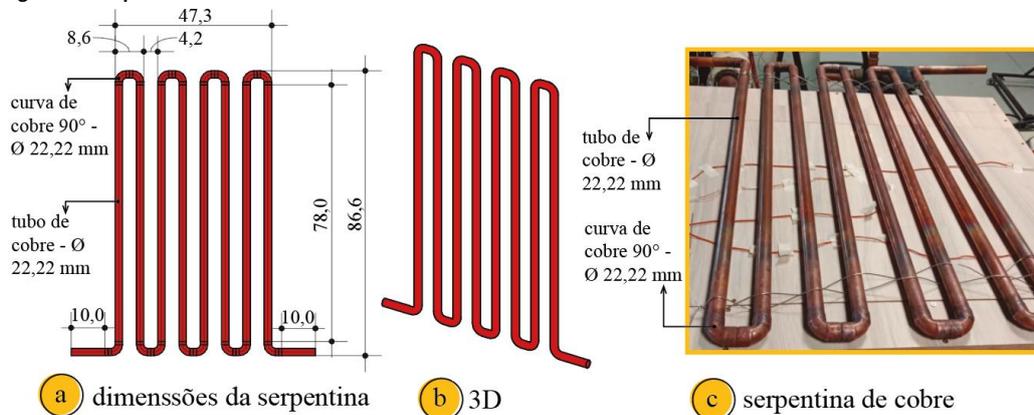
Fonte: os autores.

Uma porta foi alocada em uma das paredes, para permitir o acesso ao interior da célula-teste. Também foi previsto um vão de abertura no piso e cobertura de 60cm de comprimento e 7,5cm de largura, para implantação dos tubos de cobre que simularam a seção evaporadora de um termostifão bifásico.

Manufatura da serpentina

Nesta etapa é apresentado o dispositivo de cobre que simulou o comportamento térmico da seção evaporadora de um termostifão. O conjunto possui o formato de uma serpentina (Figura 4) de 763,8cm de comprimento, sendo composto por tubos de cobre, 8 de 78cm e 2 de 10cm de comprimentos, ambos com 22,22mm (7/8) de diâmetro externo e parede de 0,79mm (1/32). Além disso, foram utilizadas 16 curvas de cobre de 90° de mesmo diâmetro dos tubos para formação do circuito. Os tubos foram unidos às curvas e brasados. Por fim, foram realizados testes de estanqueidade.

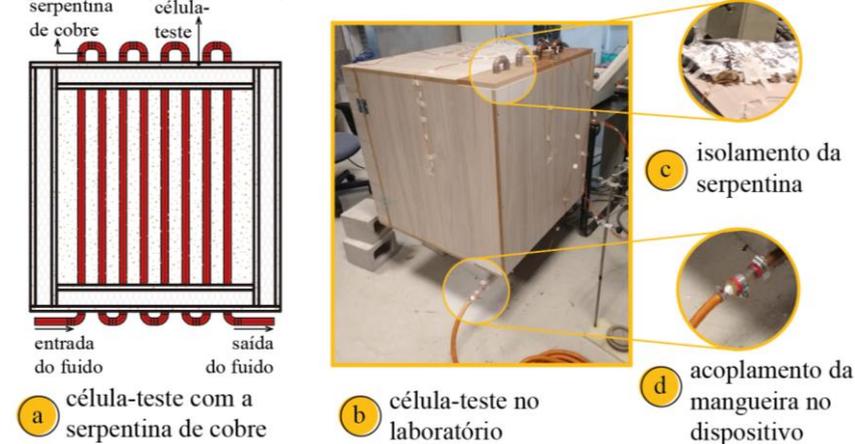
Figura 4 – Serpentina de cobre



Fonte: os autores.

Após a manufatura da serpentina foi realizado o acoplamento da mesma à célula-teste, conforme ilustrado na Figura 5. Com o intermédio de uma máquina de corte com jato d'água foi realizado o corte de duas chapas de madeira pinus com 7,5 de largura, 60cm de comprimento e 8 furos centrais de 25mm de diâmetro, formando pentes que posteriormente permitiram a acomodação do dispositivo na célula-teste, além de vedar o vão deixado na etapa de manufatura. A serpentina de cobre foi instalada próxima à parede vertical posterior à porta de acesso, denominada de Superfície Fria (SF).

Figura 5 – Incorporação da serpentina de cobre na célula teste



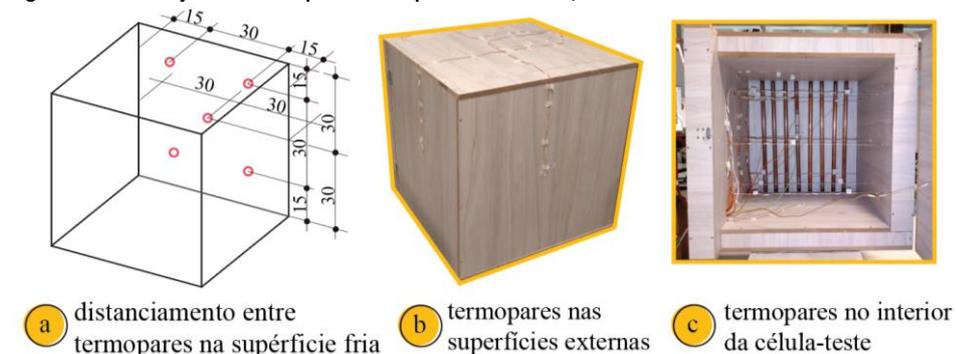
Fonte: os autores.

Para evitar a trocas térmicas indesejadas entre a serpentina de cobre e o ambiente externo instalou-se uma manta de fibra de cerâmica (Figura 5c), cuja resistência térmica era de cerca de $5,55 \text{ m}^2\text{K/W}$, isolando termicamente as superfícies do dispositivo fora da caixa. Na entrada e saída da serpentina foram instaladas conexões para receber mangueiras flexíveis que possibilitaram a circulação de água.

Bancada de Testes

As temperaturas da bancada de testes foram medidas por termopares do tipo K, distribuídos nas superfícies externas, internas e no núcleo central da célula. Foram instalados 5 termopares no centro de cada superfície externa do protótipo (ver Figura 6b). Nas superfícies internas, foram alocados 10 termopares, sendo 5 instalados no centro das paredes laterais, cobertura, piso e porta. Outros 5 foram instalados na superfície fria, sendo que um termopar foi colocado no centro e os outros em quatro pontos nos centros das linhas diagonais, ver Figura 6a (Zhu; Yang; Chen; Sun, 2019; Wei et al. 2019).

Figura 6 – Distribuição dos termopares nas superfícies externas, internas e no núcleo da célula-teste

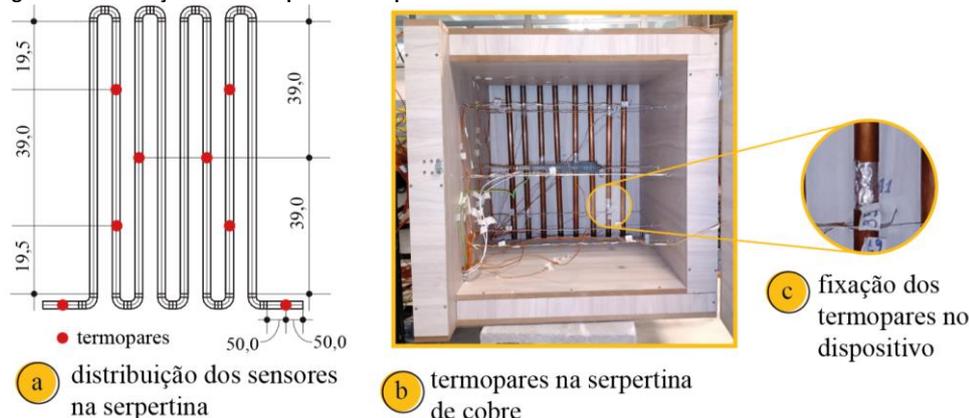


Fonte: os autores.

Além disso, 15 termopares monitoram a temperatura do ar ambiente, com a finalidade de se obter a temperatura média do ar interno e a sua distribuição, Figura 6c. Estes termopares foram dispostos em três planos, paralelos entre si, em arranjos iguais ao utilizado na superfície fria.

Oito termopares foram distribuídos pela serpentina (Figura 7a), sendo dois deles localizados na entrada e saída. Outros dois foram instalados nos centros dos tubos de número 3 e 6. Já os 4 sensores restantes foram alojados nos tubos de número 2 e 7, no qual, cada um recebeu 2 termopares, conforme ilustrado na Figura 7a. As cabeças dos termopares foram recobertas com fita de poliamida para protegê-los da influência de cargas elétricas pontuais. Na sequência, os termopares foram posicionados na serpentina e fixados por meio de fita adesiva de alumínio.

Figura 7– Distribuição dos termopares na serpentina



Fonte: os autores.

Todos os termopares foram fabricados com o mesmo comprimento com o objetivo de reduzir falhas nas medições. Além disso, calibrou-se os sensores, para isto foram mergulhados em um béquer com água destilada, no qual, neste mesmo recipiente foi inserido um termômetro de precisão de bulbo (mercúrio) com menor resolução de escala de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em seguida o aparato foi locado em um banho térmico de temperatura controlada. Para este estudo optou-se pela calibração dos sensores na faixa de 15 a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, variando a temperatura em uma escala de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a cada 20 minutos. Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados e os resultados obtidos foram tratados posteriormente. Obtendo-se como incerteza $\pm 0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$, para um nível de confiança de 95%.

Um banho termostático 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 absorveria calor gerado no ambiente e o transferiria para fora da célula-teste, para dissipar para o ambiente externo por meio de seu condensador, no presente caso, por convecção natural. Para aferição da vazão volumétrica do fluido de resfriamento foi utilizado um rotâmetro de alta exatidão. Neste trabalho a vazão de $2,06\text{ l/min}$. foi empregada em todos os ensaios.

Para o fornecimento de calor ao núcleo da célula-teste foi utilizada uma resistência elétrica localizada no centro da célula-teste, conectada a um dissipador de calor aletado de alumínio, alimentada por uma fonte de corrente contínua (CC). O aquecedor tem 35 cm de comprimento, $5,2\text{ cm}$ de largura, $3,5\text{ cm}$ de altura e 32 aletas de $0,5\text{ mm}$ de espessura uniformemente espaçadas entre si. As potências térmicas dissipadas na célula foram determinadas pela multiplicação entre a tensão $U\text{ (V)}$ e a corrente $i\text{ (A)}$

aplicadas. Na Tabela 1 apresentam-se as tensões e correntes utilizadas nos ensaios, assim como as taxas volumétricas de geração de energia, obtidas pela multiplicação entre a potência empregada e o volume interno da célula-teste.

Tabela 1 – Tensões, correntes, potências e taxas volumétricas utilizadas nos ensaios

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Taxa Volumétrica (W/m ³)
27,4	0,73	20	4,32
30,5	0,82	25	5,4

Fonte: os autores.

Um sistema de aquisição de dados foi empregado para o armazenamento de dados. As leituras de temperatura foram coletadas pelos termopares a cada 30 segundos. O software LabVIEW foi instalado em um computador e utilizado para captação dos dados emitidos pelos sensores ao final de cada ensaio realizado.

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. Para averiguar a temperatura do ar externo no entorno da célula-teste, um registrador tipo Termo-Higrômetro digital foi usado, localizado a 1m da mesma. Na Tabela 2, visualizam-se as temperaturas do ambiente, lidas a cada ensaio.

Tabela 2 – Resultados de temperatura ar externo para cada ensaio

Teste	Temperatura do ar externo (°C)
E1	21,92
E2	22,03
E3	22,71
E4	21,95
E5	21,48
E6	21,69

Fonte: os autores.

Na Figura 8, apresenta-se a bancada com todos os equipamentos supracitados.

Figura 8 – Bancada experimental

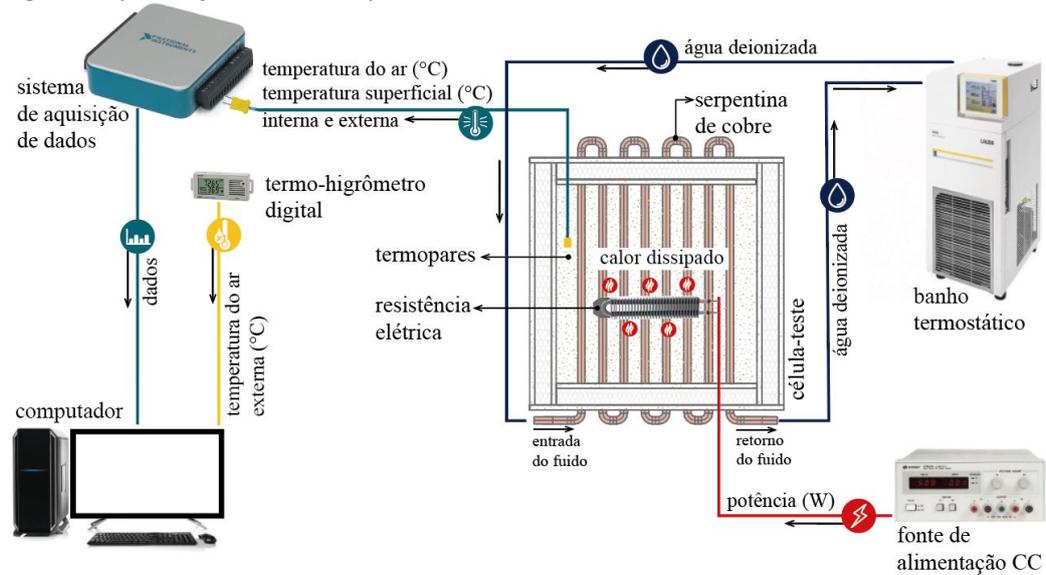


Fonte: os autores.

Parâmetros e sequência de testes

Uma vez conhecidos os equipamentos a serem utilizados foram interligados, como mostra a Figura 9, de forma que os testes pudessem ser conduzidos.

Figura 9 - Representação da dinâmica experimental



Fonte: os autores.

A bancada funcionou da seguinte maneira: a fonte de alimentação CC forneceu uma potência controlada a uma resistência elétrica que dissipou calor no interior da célula-teste. O calor cedido foi absorvido pela serpentina, pela qual circulou água deionizada, cuja temperatura foi controlada por um banho termostático. As temperaturas captadas pelos termopares instalados foram adquiridas e armazenadas pelo sistema de aquisição de dados, que transmitiu as informações para o computador que as armazenou. Os dados foram lidos e tratados com o auxílio do software LabVIEW. Da mesma forma, os dados obtidos pelos Termo-Higrômetros digitais, que registraram a temperatura do ar externa à célula, foram armazenados e tratados.

Para a realização dos testes os seguintes parâmetros foram variados: (1) Temperatura da água deionizada que circula pela serpentina de cobre (localizada próxima a uma parede do cubo experimental), controlada por um banho termostático; e (2) Potência dissipada pela resistência elétrica, que reproduziu 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. Num primeiro momento a carga térmica de 25W foi testada a fim de se visualizar a temperatura atingida em regime permanente. Notou-se então que o valor encontrado seria representativo para um ambiente interno na estação de verão. Desse modo, duas escalas decrescentes de 5W foram empregadas nos ensaios. A combinação destas variáveis resultou em 6 ensaios experimentais, conforme mostra a Tabela 3. Nesta mesma Tabela é possível ainda visualizar a temperatura média do fluido na entrada da célula-teste.

Tabela 3 - Variações dos testes a serem realizados

Teste	Temperatura do fluido do banho termostático (°C)	Temperatura média do fluido na entrada na célula-teste (°C)	Potência (W)
E1	22	21,99	25
E2	19	19,02	
E3	16	16,15	
E4	22	21,94	20
E5	19	19,07	
E6	16	16,13	

Fonte: os autores.

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 15 horas 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 um intervalo de tempo de 30min. No segundo momento, dito como 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, o calor foi capturado no interior da célula-teste, por 5h (usando o mesmo critério de variação de temperatura). No total, cada teste contabilizou 20h.

Tratamento e análise dos resultados

Os dados obtidos nos ensaios experimentais foram tratados com o *software* Excel, utilizado também para a geração de imagens, diagramas e tabelas. Os principais dados de saída foram as temperaturas do ar interno e das superfícies internas.

Para a visualização da distribuição da temperatura do ar interno da célula-teste são empregados gráficos 3D, obtidos com o auxílio de um polinômio de interpolação de décimo quarto grau, utilizando o *software* MATLAB. As temperaturas variaram de 21 °C a 38°C, na qual 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 empregadas as médias das temperaturas do ar interno da última hora das condições iniciais e transientes.

Dados referentes à distribuição de temperatura da Superfície Fria (SF) também foram tratados com o uso do *software* MatLab, empregando um polinômio de interpolação de quarto grau. Foi definido um gradiente de temperatura de exposição das imagens entre 19 e 35 °C, na qual a coloração “azul bic” representa a menor T_{in} e o “vermelho bordô” a mais elevada. Assim como na distribuição da temperatura do ar interno, foi utilizada a última hora dos Ensaios em CI e CT.

Outro parâmetro importante usado na avaliação do 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, calculada a partir da expressão:

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

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

Resultados

A fim de se avaliar a viabilidade da aplicação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos, três cenários de resultados foram considerados:

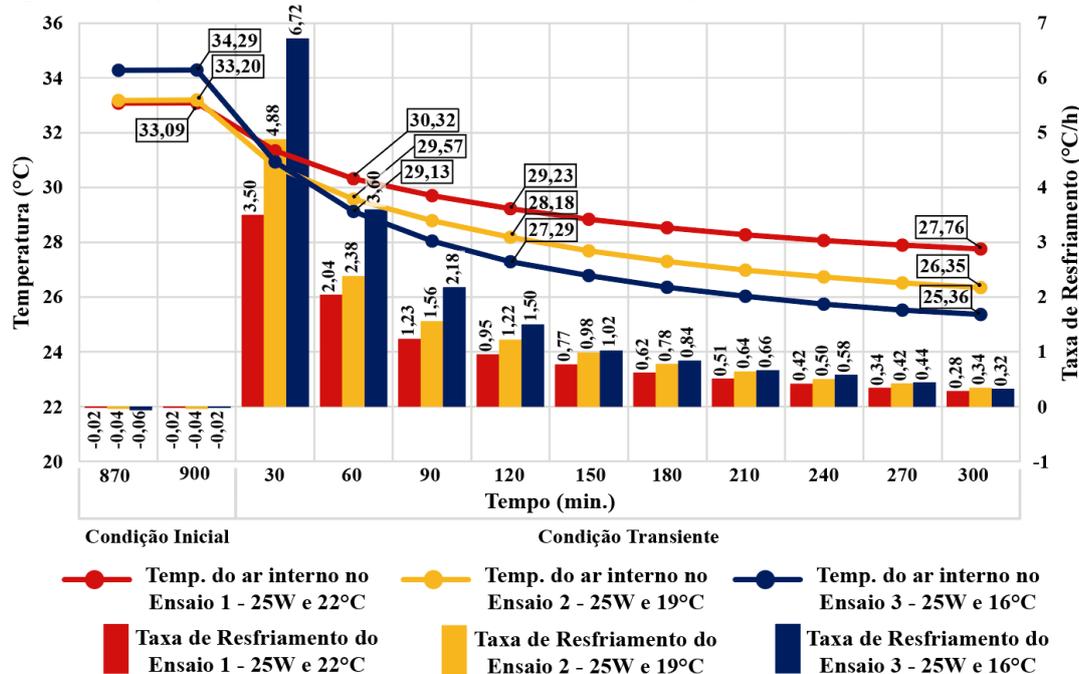
- (1) Temperaturas do ar interno da célula e a taxa de resfriamento em variação em função do tempo;
- (2) Distribuição da temperatura do ar interno a célula-teste;
- (3) Caracterização das temperaturas da SF em comparativo com os dados obtidos da temperatura superficial interna da parede oposta (SO), além da distribuição da temperatura na superfície fria.

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 20W e 25W de potência elétrica (aquecimento do ar) e temperaturas da serpentina (banho termostático) de 22, 19 e 16 °C, são mostradas nas Figuras 10 e 11. Nestas figuras são exibidos dados relativos às últimas 6h de ensaios, sendo que a primeira hora representa a última hora dos testes em Condição Inicial (CI), equivalente aos minutos de 870 a 900. Já as próximas cinco horas são plotadas os testes em Condições Transientes (CT). As Taxas de Resfriamento foram calculadas a partir a Equação 1.

Na Figura 10 são apresentados os resultados dos Ensaios 1, 2 e 3, que correspondem às temperaturas do banho termostático em 22, 19 e 16 °C para a potência fixa de 25W. É possível observar nesta imagem uma redução exponencial significativa da temperatura do ar interno para ambos os testes após o banho termostático ser acionado. Na primeira 1h. de ensaio houve a maior redução da temperatura do ar interno, para os três casos experimentados e, depois, uma diminuição mais suave durante o restante do período experimental.

Figura 10 - Variação da temperatura do ar interno e da taxa de resfriamento para os Ensaios 1, 2 e 3, com Q=25W



Fonte: os autores.

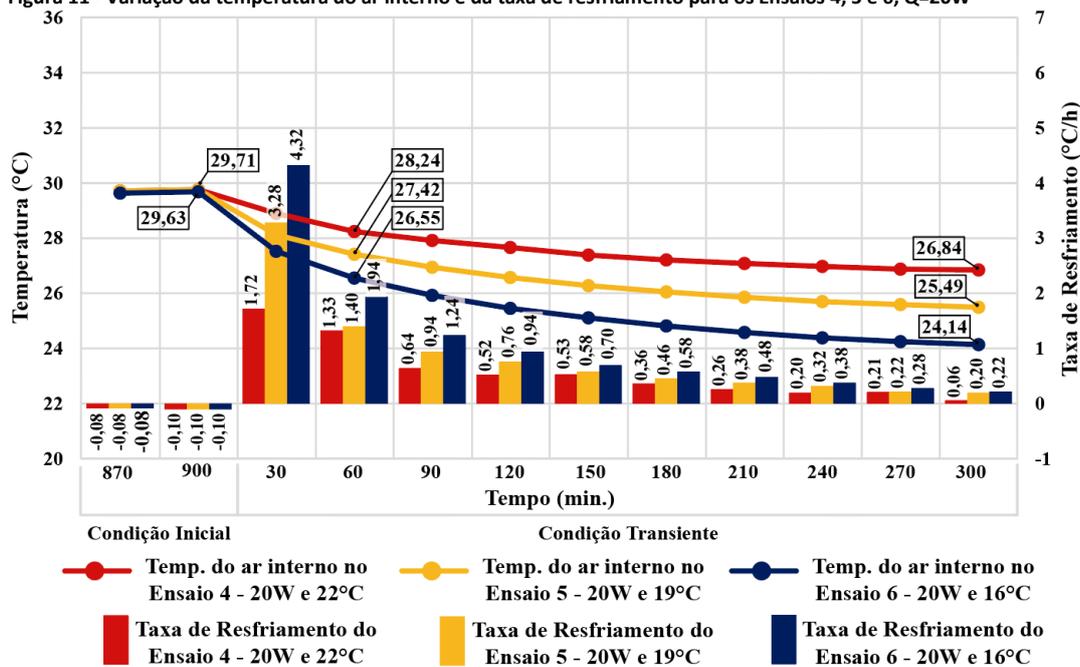
Outro ponto relevante a ser observado é relativo às taxas de resfriamento. Na primeira hora de acionamento do sistema mais de 50% do calor foi extraído da célula teste, enquanto a remoção do calor restante foi diluída nas outras 4 horas de teste. Percebe-se também, que na última hora de testes CT, a taxa de resfriamento tende a ser nula, uma vez que a variação da temperatura do ar interno, de 0,28, 0,34 e 0,32 °C/h para os Ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, também tendeu a zero neste período.

Dentre os casos observados na Figura 10 o Ensaio 3 foi o que apresentou o melhor desempenho, sendo que a temperatura do ar interno foi reduzida em 8,93 °C, no intervalo de tempo de 5h. Tal performance já era esperada, uma vez que a temperatura do fluido de circulação é a menor entre as três selecionadas, o que possibilitou maior remoção de energia térmica, devido à maior diferença de temperaturas entre o ambiente interno e a serpentina de cobre, neste caso de 18,29 °C. Vale lembrar que as

trocas de calor convectivas internas são diretamente proporcionais às diferenças de temperatura entre serpentina e o ambiente.

Dados relativos aos Ensaios 4, 5 e 6, para a potência fixa de 20W e para os mesmos três níveis de temperaturas do banho termostáticos, são mostrados na Figura 11. Nota-se que os valores das médias das T_{in} nos últimos 30 min. das CIs apresentaram basicamente os mesmos, variando entre 29,68 e 29,76 °C. Desta forma, as variações de temperatura do ambiente interno ocorreram em função apenas da capacidade de resfriamento da serpentina, como observado decorrer das 5 horas da CTs.

Figura 11 - Variação da temperatura do ar interno e da taxa de resfriamento para os Ensaios 4, 5 e 6, Q=20W



Fonte: os autores.

De forma semelhante aos testes da Figura 10, grande parte da extração de calor do ambiente interno também ocorreu na primeira hora de funcionamento do dispositivo, porém, com taxas inferiores às dos testes com 25W. Mais uma vez a maior remoção de calor foi observada quando a temperatura do banho termostático estava em 16°C (Ensaio 6) com a temperatura interna da célula-teste passando de 29,68 para 24,14 °C, enquanto para o Ensaio 4 (20W e 22°C) esta diferença de temperatura interna foi a menor, de 2,87 °C.

A temperatura do ar interno se mostrou estável, com variações inferiores a 0,20 °C a partir da quarta hora do teste CT, no Ensaio 4. Evidencia-se claramente a dificuldade em se reduzir a temperatura do ar interno quando se têm diferenças de temperatura entre o dispositivo e o ambiente inferiores a 7°C, embora os Ensaios 5 e 6, ainda assim, apresentaram resultados bastante favoráveis.

Para potencializar a *performance* do sistema quando as diferenças de temperatura entre o meio e o dispositivo são pequenas, recorre-se frequentemente ao aumento da área de transferência de calor na seção evaporadora, com a adição de superfícies estendidas, as aletas. O uso de aletas melhora a eficiência térmica do conjunto de termossifões em aplicações reais, especialmente envolvendo ambientes gasosos e convectivos, pois, com uma área maior de troca de calor, o evaporador (ou serpentina, nesse caso) é capaz de absorver maior calor do ambiente. As aletas são mais efetivas em ambientes gasosos (Bergman; Lavine; Incropera; Dewitt, 2014), como é o presente caso. Há variados

modelos de aletas. Nesse sentido, tais soluções poderiam ser uma alternativa viável para melhorar o desempenho do sistema proposto em situações em que a diferença de temperatura entre a serpentina de cobre e o ambiente interno é igual ou inferior a 7°C.

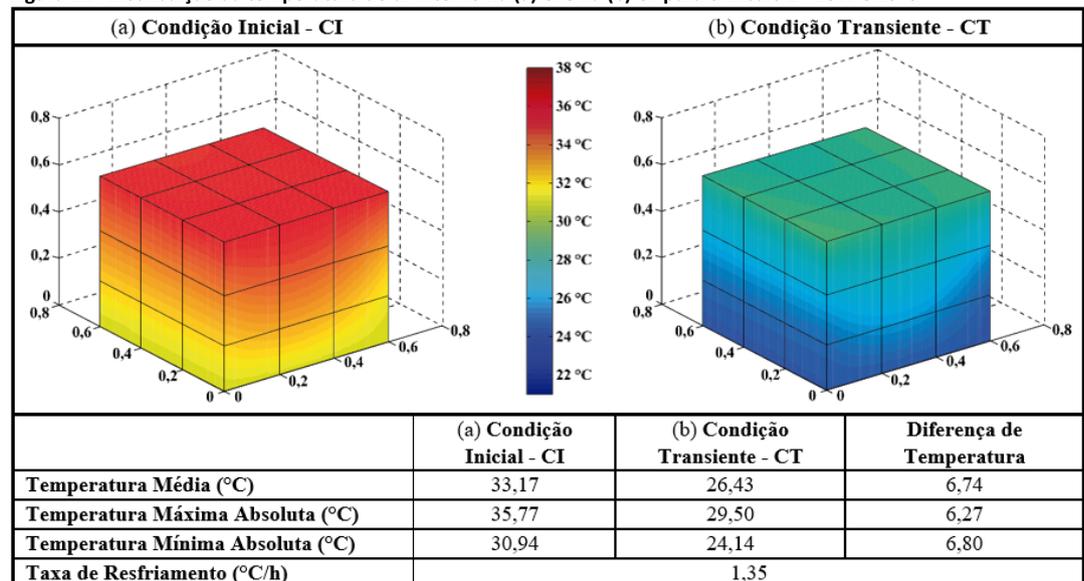
Distribuição da temperatura do ar interno

Apresentam-se nas Figuras 12 e 13 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. Além disso, ilustra-se a Taxa de Resfriamento do sistema em °C/h, considerando as diferenças das temperaturas médias, a partir do regime permanente ter sido atingido.

Nesta avaliação dois Ensaios (E2 25W-19°C e E4 20W-16°C) foram selecionados. Buscaram-se os casos que apresentaram mais peculiaridades entre as simulações realizadas e que resultassem em maiores diferenças de temperatura dos tubos resfriados e a temperatura do ambiente térmico.

Na Figura 12 são exibidos os resultados do Ensaio 2 com 25W de potência e 19°C de temperatura do banho termostático. Nesta, visualiza-se tanto para CI (Figura 12a) quanto para CT (Figura 12b), que as temperaturas mais elevadas se encontram nos quadrantes superiores da célula. Este fenômeno, esperado, tendo em vista que o ar quente é mais leve que o frio e tende a se localizar nas regiões mais altas do ambiente, foi comum para todos os testes realizados. Porém, uma maior variação das temperaturas é observada na CI em comparação com CT, cujas temperaturas apresentam-se mais homogêneas. Observa-se, assim, que a aplicação da serpentina próxima à parede causou ao ambiente maior dispersão do calor em todos os quadrantes da célula-teste na CT. Esta condição foi observada em todos os outros testes, com exceção do E3 (25W e 16°C), que apresentou, no quadrante superior, uma variação da temperatura de apenas 2°C.

Figura 12 - Distribuição da temperatura do ar interno na (a) CI e na (b) CT para o Ensaio 2 - 25W e 19°C



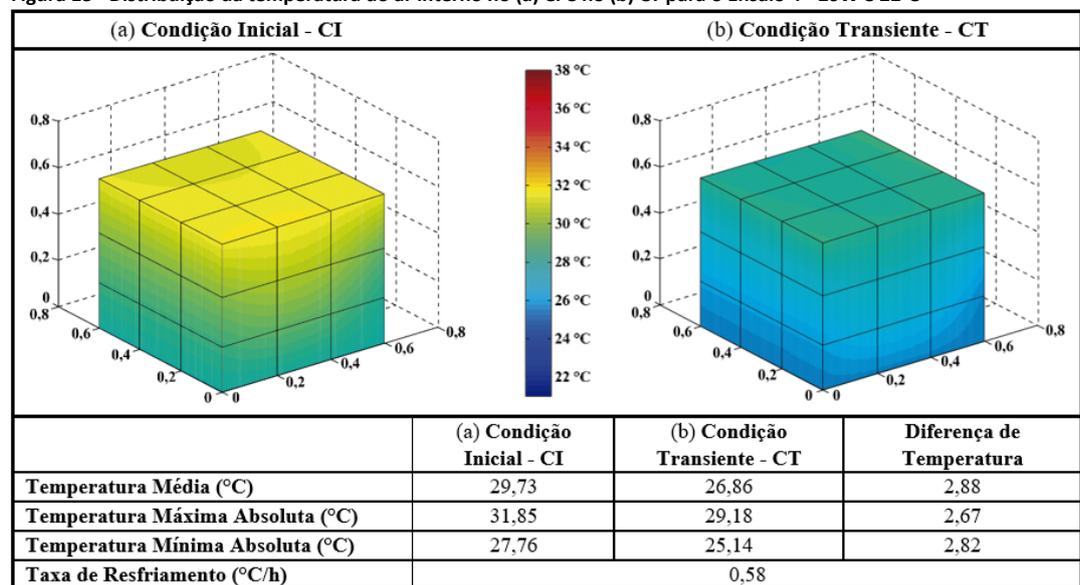
Fonte: os autores.

Dentre os casos realizados com a potência de 25W, o Ensaio 3 (25W e 16°C), apresentou a maior temperatura absoluta na CI de 37,14 °C. Por outro lado, nos Ensaios E1 (25W e 22°C) e E2 (25W e 19°C), as máximas temperaturas absolutas foram de 35,61 e 35,77 °C, praticamente equivalentes, o que propicia a estes testes uma comparação mais precisa

na CT, cujas diferenças de temperatura entre o ar interno na CI e a temperatura da serpentina de cobre, foram de 11,92 e 14,58 °C, para E1 e E2, respectivamente. Dessa forma, é possível dizer que o Teste E1 obteve melhor desempenho, uma vez que este não apresentava a maior variação de temperatura, sendo capaz de reduzir a T_{in} em 5,26 °C nas 5h da CT.

Apresentam-se, na Figura 13, os resultados da CI e CT para o Ensaio E4 com 20W de potência e temperatura do termostato de 22°C. Observou-se neste ensaio, o menor desempenho dentre os 6 testes realizados, quando consideradas as taxas de resfriamento, que neste teste foi de 0,58 °C/h. Já os casos com melhores performances foram E2, E3 (25W) e E6 (20W) cujas taxas foram de 1,35, 1,77 e 1,09 °C/h, respectivamente. Nos ensaios com 20W, em condições transientes, observa-se nos quadrantes superiores e centrais temperaturas entre 22 e 26°C. Para ambientes térmicos internos, estes resultados podem ser considerados satisfatórios, pois estão dentro da faixa de conforto, conforme estabelecido por inúmeras pesquisas e normativas na área.

Figura 13 - Distribuição da temperatura do ar interno no (a) CI e no (b) CT para o Ensaio 4 - 20W e 22°C



Fonte: os autores.

No Ensaio 6 (E6), observou-se a maior diminuição de temperatura do ar interno em comparação aos Ensaios 4 e 5. A diferença das temperaturas do ar interno entre E4 e E5 (5,45 e 4,20°C, respectivamente), foi de 1,25°C. Nota-se que, no E3, há uma diferença de temperaturas entre a T_{in} e a temperatura prescrita nos tubos semelhante à observada no E6, porém a redução da temperatura interna foi menor que 1,5°C, o que pode caracterizar uma certa ineficiência do sistema, mesmo para diferenças de temperatura superiores a 10°C.

Por fim, uma característica comum nos ensaios realizados, têm-se o comportamento do gradiente de temperatura nas CI e CT. Observou-se que em grande parte dos resultados na CT obteve-se gradientes de temperaturas maiores em relação as CI, com exceção aos Ensaios 3 (25W-16°C) e 4 (20W-22°C), que tiveram na CT 5,80 e 4,04°C, enquanto para CI obtiveram 6,13 e 4,09°C, respectivamente.

Comportamento térmico das superfícies internas

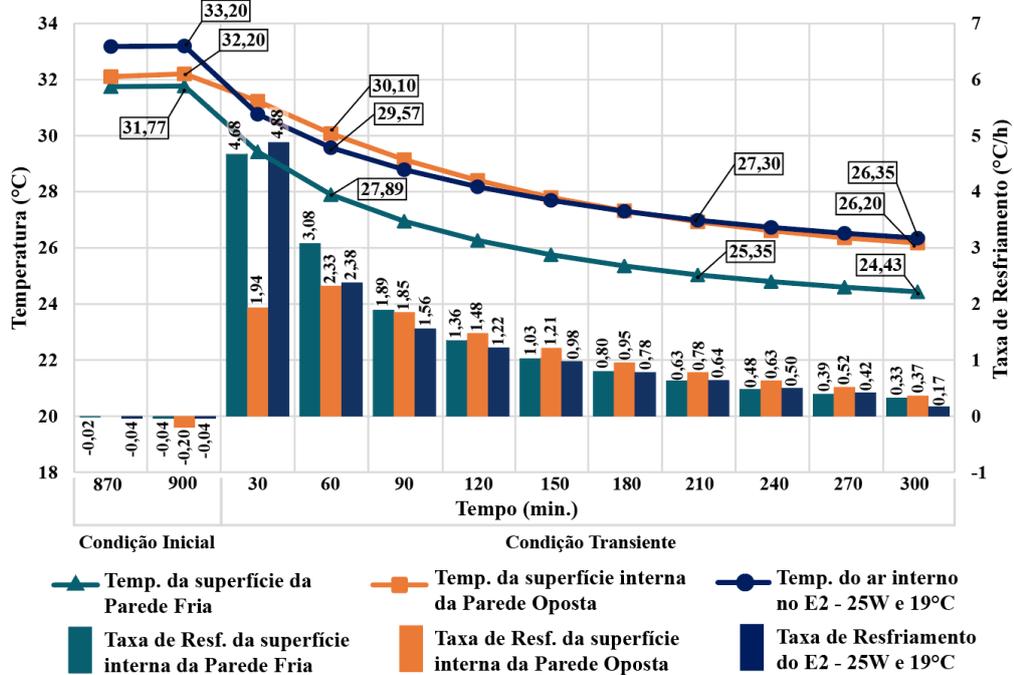
Apresenta-se neste item o comportamento térmico da superfície fria (SF), localizada próxima à serpentina de cobre, paralela à porta (Superfície Oposta - SO) da célula-teste. Duas análises são realizadas: num primeiro momento a variação da temperatura das SF

e SO são comparadas entre si em função do tempo, considerando a última hora da CI e as 5h da CT; na sequência a distribuição de temperatura na SF na CI e CT são apresentadas, no intuito de visualizar o gradiente de temperatura na SF em regime permanente. Assim, como no item anterior, dois ensaios foram selecionados para esta análise: E2 (25W e 19°C) e E4 (20W e 16°C).

Nas Figuras 14 e 15 o comportamento das superfícies SF e SO em função do tempo são exibidas, assim como a temperatura do ar interno e as taxas de resfriamento a cada intervalo de 30min., para ambos os parâmetros.

No Ensaio 2 (Figura 14) nota-se uma diferença significativa na temperatura das duas superfícies no decorrer das 5h da CT. Destaca-se uma resposta bastante semelhante entre a temperatura da superfície interna oposta e temperatura do ar interno da célula-teste. Contudo, as taxas de resfriamento entre estas duas situações são diferentes nos primeiros 30 min, após o sistema ser ligado, no qual tem-se 4,88 °C/h para T_{in} e 1,94 °C/h para SO, enquanto as temperaturas do ar interno e da superfície interna da parede fria apresentam níveis equivalentes neste mesmo intervalo. Esse comportamento também foi encontrado nos demais ensaios simulados.

Figura 14 - Comportamento Térmico das superfícies internas Fria e Oposta no Ensaio 2 - 25W e 19 °C

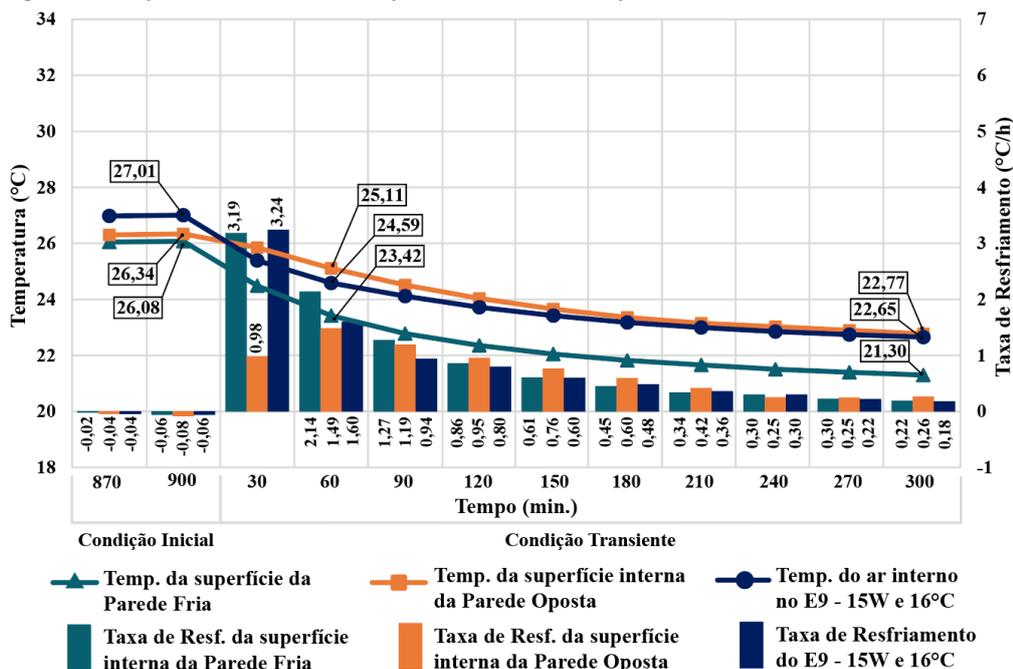


Fonte: os autores.

Em contraposição ao Ensaio 2, no Ensaio 4 (Figura 15), nota-se que as temperaturas das SF e SO se estabilizam mais rapidamente, sendo o regime permanente atingido próximo aos 120min na CT e, nas últimas 3h, as temperaturas permaneceram praticamente constantes. É também identificado, na SO, um relativo atraso na queda de temperatura nos primeiros 30 min na CT. Porém, nos minutos seguintes, a taxa de resfriamento nesta mesma superfície se eleva. De um modo geral, pode-se afirmar que as maiores trocas térmicas entre a serpentina de cobre e a superfície fria resultaram em melhor desempenho no resfriamento do ambiente, em todos os testes.

Em geral, é notado que a velocidade de estabilização das temperaturas das faces internas reduziu quando a temperatura da serpentina de cobre aumentou. Este resultado concorda com pesquisas experimentais sobre resposta térmica de superfícies internas verticais com tubos de calor (Krajčík et al., 2021; Li; Zhang; Li, 2020).

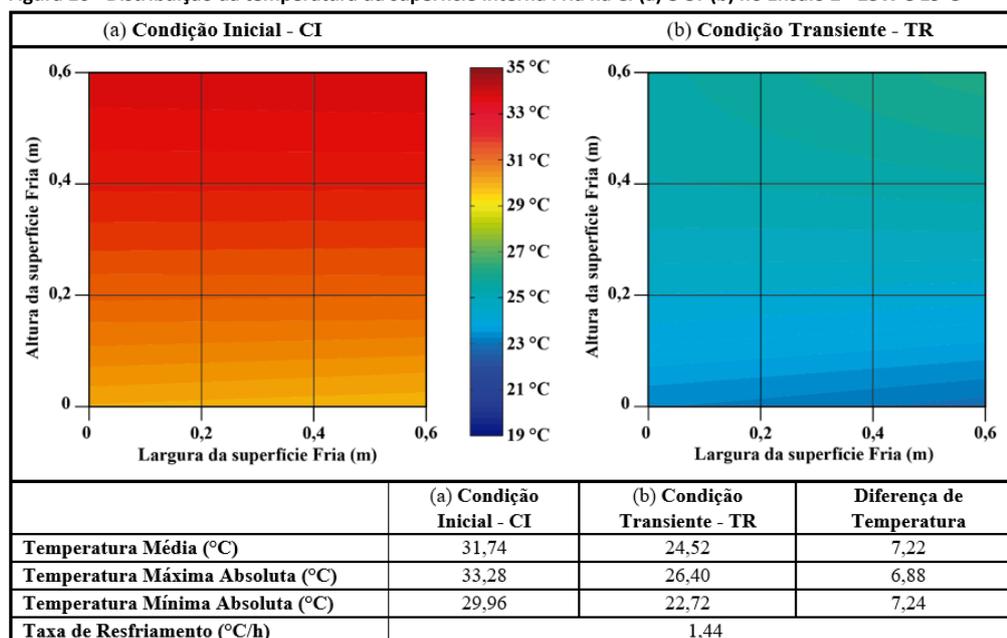
Figura 15 - Comportamento Térmico das superfícies internas Fria e Oposta no Ensaio 4 - 20W e 22 °C



Fonte: os autores.

As Figuras 16 e 17 mostram a distribuição da temperatura da SF, assim como as taxas de resfriamento da superfície, para CT, empregando-se a Equação 1. No Ensaio 2 - 25W e 19°C (Figura 16), observa-se uma maior uniformidade da temperatura superficial da SF para o teste em CT (Figura 16b) em comparação a CI (Figura 16a). Esta uniformidade se deve à interação da serpentina de cobre (corpo frio), que era mantida a uma temperatura constante com a superfície interna da parede, que estava em temperaturas mais elevadas. Em ambas as superfícies, observam-se menores temperaturas na região esquerda dos gráficos, área na qual se localiza a entrada da água que circula pela serpentina de cobre. A taxa de extração de calor superficial interna da SF, foi de 1,44 °C/h, superior à variação da temperatura do ar em E2.

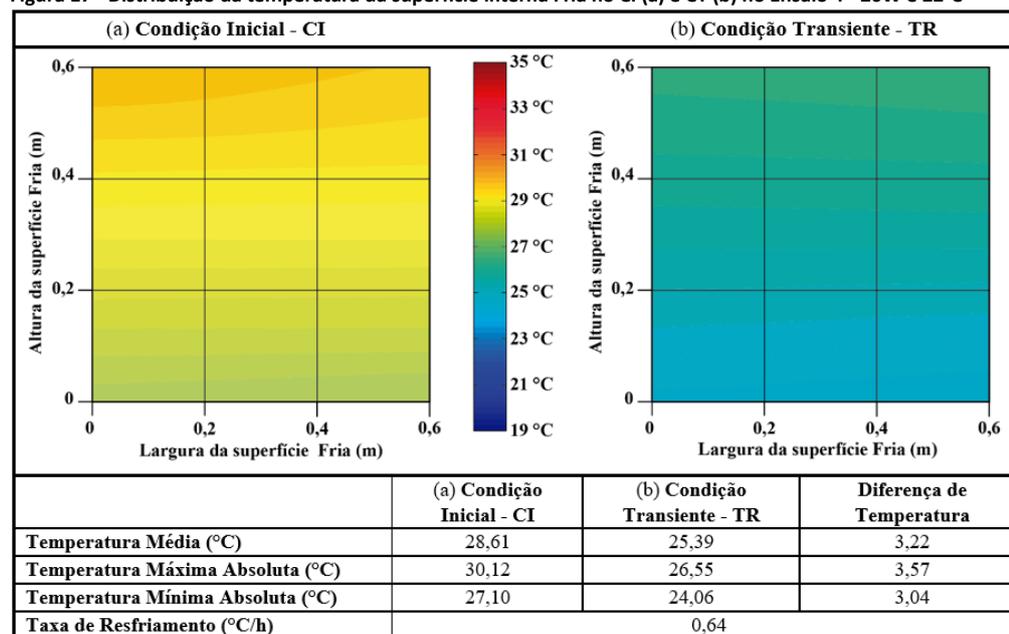
Figura 16 - Distribuição da temperatura da superfície interna Fria na CI (a) e CT (b) no Ensaio 2 - 25W e 19°C



Fonte: os autores.

Assim como no Ensaio anterior (E2) observou-se grande homogeneidade nas temperaturas na CT para o E4 - 20 W e 22 °C (Figura 17), em comparação com a CI. Entretanto, neste ensaio, a taxa de resfriamento superficial foi menor que no teste E2, tendo em vista a diferença de temperatura entre a serpentina de cobre e a temperatura superficial interna da vedação em contato com o dispositivo. Desse modo, é possível destacar que a *performance* do dispositivo é reduzida com a diminuição da diferença entre temperaturas da serpentina (que representa o evaporador em um termossifão) e a temperatura das superfícies internas do ambiente.

Figura 17 - Distribuição da temperatura da superfície interna Fria no CI (a) e CT (b) no Ensaio 4 - 20W e 22°C



Fonte: os autores.

No geral, acompanhando a distribuição da temperatura do ar, observa-se que os maiores níveis de temperaturas se encontram nos quadrantes superiores da superfície fria, enquanto as menores estão situadas nos quadrantes inferiores. Outro ponto comum entre os Ensaios é o efeito gerado pela serpentina de cobre na superfície fria, cujo resfriamento foi maior que o do ar ambiente, devido ao contato direto entre o corpo frio e a superfície, propiciando maiores trocas de calor.

Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, a partir de um estudo experimental, a viabilidade da aplicação de termossifões bifásicos como estratégia para o arrefecimento de ambientes internos. Com base nos resultados experimentais realizados, as principais conclusões são apresentadas.

Observou-se uma redução da temperatura do ar interno nos 6 Ensaios, após o acionamento do fluxo de água fria pela serpentina usada como elemento para o resfriamento do ar interno de uma célula-teste, mostrando que o sistema proposto tem grande potencial para o arrefecimento de ambientes. Os Ensaios 2 (25W-19°C), 3 (25W-16°C) e 6 (20W-16°C) obtiveram os melhores desempenhos, reduzindo a temperatura interna, T_{in} , em, respectivamente, 6,83, 8,93 e 5,49°C, após 5h de testes na Condição Transiente. Além disso, observou-se que o fator que mais influenciou no desempenho do sistema foi a diferença entre as temperaturas da serpentina de cobre e do ar interno à célula-teste. Ademais, como aspecto relevante e comum em ambos os ensaios,

destaca-se a semelhança de comportamento das curvas e das taxas de resfriamento ao longo do tempo, caracterizando uma estabilidade das temperaturas internas após aproximadamente 1h de acionamento do sistema nos Ensaio 1, 2 e 3. Nos demais testes esta estabilidade foi alcançada após as 1h30min. De forma geral, a redução da temperatura do ar na célula-teste foi visualizada em todos os ensaios, resultando na redução da carga térmica do ambiente interno;

Quanto à distribuição das temperaturas do ar no interior da célula-teste, observou-se que, tanto nos testes em Condição Inicial quanto em Condições Transientes, as temperaturas mais elevadas se encontram nos quadrantes superiores, enquanto as menores temperaturas localizam-se nos quadrantes inferiores. Notou-se também, uma maior uniformidade de temperaturas dos quadrantes superiores depois que o sistema de resfriamento era acionado. Nos ensaios com 20W, em Condição Transiente, obteve-se nos quadrantes superiores e centrais, temperaturas entre 22 e 26°C, resultados satisfatórios com relação ao conforto térmico. Além disso, foi observado que praticamente todos os resultados nas Condições Transientes apresentaram gradientes de temperaturas maiores que na Condição Inicial, com exceção dos Ensaio 3 (25W-16°C) e 4 (20W-22°C), cujas temperaturas, na Condição Transiente foram de 5,80 e 4,04°C, enquanto que, para as Condições Iniciais, foram de 6,13 e 4,09°C, respectivamente;

Com relação ao comportamento térmico da superfície fria, verificou-se que a velocidade de estabilização das temperaturas das faces internas reduziu quando a temperatura da serpentina de cobre aumentou. Outro aspecto comum nos ensaios é a resposta térmica mais rápida da Superfície Fria em relação à Superfície Oposta. Como supracitado, este comportamento se justifica pelo contato direto desta superfície aquecida com a serpentina (corpo frio), proporcionando maior taxa de extração de calor da superfície. A temperatura da superfície oposta e do ar ambiente também foram afetadas, na qual a temperatura da superfície próxima à serpentina de cobre foi mais reduzida quando comparada à carga extraída da temperatura do ar.

A partir das principais conclusões apresentadas nota-se a viabilidade de aplicação do sistema para arrefecimento de ambientes internos. Nesse sentido, algumas reflexões podem ser feitas. Para potencializar a *performance* do dispositivo em situações na qual a diferença de temperatura entre a seção evaporadora de um termossifão e o meio em que está inserida for inferior a 7°C, a utilização de superfícies estendidas (aletas) seria conveniente para aumentar a área de transferência de calor. Ademais, como as regiões superiores do ambiente são mais quentes, indica-se que os termossifões sejam instalados próximos à cobertura. Outra estratégia seria a proposição de um sistema de circulação de ar natural na cavidade da célula teste, no qual aumentaria o coeficiente convectivo interno e melhoraria o desempenho do sistema.

Assim, como indicação de trabalhos futuros, sugere-se a construção de um termossifão bifásico em circuito aletado, a ser instalado na cobertura, com o intuito de se analisar o desempenho para redução da carga térmica de ambientes. A influência de parâmetros na *performance* dos termossifões, tais como: como inclinação, taxa de enchimento, tipo de fluido, dentre outros, também devem ser estudadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento recebido para o desenvolvimento deste trabalho junto ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Agradecem, também, ao Laboratório de Tubos de Calor (Labtucal) do curso de Engenharia Mecânica da UFSC pela parceria nesta pesquisa.

Referências

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

ALIZADEH, M.; SADRAMELI, S. M. Development of free cooling based ventilation technology for buildings: thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 619-645, May 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.168>.

ALIZADEHDAKHEL, A.; RAHIMI, M.; ALSAIRAFI, A. A. CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosiphon. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 3, p. 312-318, Mar. 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.002>.

ALLEN, M. R.; MUSTAFA, B.; CHEN, Y.; CONINCK, H.; CONNORS, S. *et al.* **An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>. Acesso em: 1 maio 2022.

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, Dec. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/en13246547>.

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 thermosiphon for passive solar heating of buildings. **Interfacial Phenomena and Heat Transfer**, v. 7, n. 1, p. 57-68, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1615/interfacphenomheattransfer.2019031160>.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. D.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 672 p.

BIASI, J. A.; KRÜGER, E. L. Estudo do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e019023, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653908>.

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

CATTARIN, G.; CAUSONE, F.; KINDINIS, A.; PAGLIANO, L. Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 606-625, Feb. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.012>.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021**: ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021. 268 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.; FILIPPESCHI, 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, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/796/1/012043>.

GONG, Q.; KOU, F.; SUN, X.; ZOU, Y.; MO, J.; WANG, X. Towards zero energy buildings: a novel passive solar house integrated with flat gravity-assisted heat pipes. **Applied Energy**, v. 306, part A, p. 117981, Jan. 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117981>.

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, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 1 maio 2022.

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, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>.

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, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219>.

KRAJČÍK, M.; ŠIMKO, M.; ŠIKULA, O.; SZABÓ, D.; PETRÁŠ, D. Thermal performance of a radiant wall heating and cooling system with pipes attached to thermally insulating bricks. **Energy and Buildings**, v. 246, p. 111122, Sept. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111122>.

KUMAR, A.; TIWARI, A. K.; SAID, Z. A comprehensive review analysis on advances of evacuated tube solar collector using nanofluids and PCM. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 47, p. 101417, Oct. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101417>.

LI, Z.; ZHANG, D.; LI, C. Experimental Study on Thermal Response Characteristics of Indoor Environment with Modular Radiant Cooling System. **Energies**, v. 13, n. 19, p. 5012, Sept. 2020. DOI: <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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.108>.

MANTELLI, M. B. H. **Thermosyphons and Heat Pipes: theory and applications**. New York: Springer, 2021. p. 1-413.

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

NURLYBEKOVA, G.; MEMON, S. A.; ADILKHANOVA, I. 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**, v. 219, p. 119587-119596, Mar. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.119587>.

ROBINSON, B. S.; SHARP, M. K. Reducing unwanted thermal gains during the cooling season for a solar heat pipe system. **Solar Energy**, v. 115, p. 16-32, May 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.011>.

RODRÍGUEZ CISTERNA, L. H. **Análise de um secador de ervas finas assistido por termossifões**. 2014. 284 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/132425>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SARMIENTO, A. P. C.; RODRÍGUEZ CISTERNA, L. H.; MILANESE, F.H.; MANTELLI, M.B.H. A numerical method for shell and thermosyphon heat exchanger analysis. In: MINSK INTERNACIONAL SEMINAR "HEAT PIPES, HEAT PUMPS, REFRIGERATORS, POWER SOURCES", 10. Minsk. **Proceedings [...]**. Minsk: National Academy of Sciences of Belarus, 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, Oct. 2015. DOI: <https://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, June 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.085>.

WEI, H.; CAIRIU, Y.; JICHUN, Y.; BENDONG, Y.; ZHONGTING, H.; DONGMEI, S.; XIANGHUA, L.; MINGHUI, Q.; HONGBING, C. Experimental study on the performance of a novel RC-PCM-wall. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 297-310, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.001>.

YANG, L.; QIAO, Y.; LIU, Y.; ZHANG, X.; ZHANG, C.; LIU, J. A kind of PCMs-based lightweight wallboards: Artificial controlled condition experiments and thermal design method investigation. **Building and Environment**, v. 144, p. 194-207, Oct. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.020>.

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, Feb. 2019. DOI: <https://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, May 2019. DOI: <https://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, Aug. 2022. DOI: <https://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, Dec. 2014. DOI: <https://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, Feb. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110690>.

ZHU, L.; YANG, Y.; CHEN, S.; SUN, Y. Thermal performances study on a façade-built-in two-phase thermosyphon loop for passive thermo-activated building system. **Energy Conversion and Management**, v. 199, p.112059-112075, Nov. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112059>.

1 Fernando da Silva Almeida

Arquiteto e Urbanista. Doutorando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Endereço postal: Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC/UFSC – Campus Trindade – CP 470 - CEP 88040-970 – Florianópolis (SC).

2 Mariane Pinto Brandalise

Arquiteta e Urbanista. Mestra em Arquitetura e Urbanismo. Doutorando em Arquitetura e Urbanismo pela

Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço postal: Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC/UFSC – Campus Trindade – CP 470 - CEP 88040-970 – Florianópolis (SC).

3 Luciano Serconek Fuso

Engenheiro Mecânico. Mestrando em Engenharia Mecânica, pela Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço postal: Departamento de Engenharia Mecânica, Bloco A3, 3º Andar – CTC/UFSC – Campus Trindade – CP 470 - CEP 88040-900 – Florianópolis (SC).

4 Luis Hernán Rodríguez Cisterna

Engenheiro Mecânico. Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor Associado na Universidad de Tarapacá no Chile. Endereço postal: Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida 18 de Setembro 2222, CEP 1000000, Arica-Chile.

5 Marcia Barbosa Henriques Mantelli

Engenheira Mecânica. Doutorado em Engenharia Mecânica pela University of Waterloo, Canadá. Professora Associada na Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço postal: Departamento de Engenharia Mecânica, Bloco A3, 3º Andar – CTC/UFSC – Campus Trindade – CP 470 - CEP 88040-900 – Florianópolis (SC).

6 Martin Ordenes Mizgier

Engenheiro Civil. Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor Associado na Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço postal: Departamento de Arquitetura e Urbanismo – CTC/UFSC – Campus Trindade – CP 470 - CEP 88040-970 – Florianópolis (SC).