

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE TERMOSSIFÕES APLICADOS A TROCADORES DE CALOR DE ESCOAMENTO CRUZADO

Victor Vaurek Dimbarre, victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br¹
Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br²
Allefe Jardel Chagas Vaz, allefevaz@alunos.utfpr.edu.br¹
Thomas Siqueira Pereira, thomaspereira@alunos.utfpr.edu.br¹
Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br²
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, CEP 84.017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville, CEP 81.280-340, Curitiba, PR, Brasil

Resumo: Os trocadores de calor são dispositivos que facilitam a troca de calor entre dois ou mais fluidos que se encontram a diferentes temperaturas e separados entre si, podendo eles serem das mais diferentes formas, tais como: casco e tubos, serpentina, aletados, placas, tubos concêntricos, entre outros. No presente trabalho foi executada uma investigação experimental da influência da inclinação de trabalho de termossifões aplicados a trocadores de calor de escoamento cruzado. Para isso foram fabricados termossifões em cobre com o diâmetro externo de 9,45mm, diâmetro interno de 7,75mm e comprimento total de 180mm, sendo desses, 60mm para o evaporador, 60mm para a seção adiabática e 60mm para o condensador. Os termossifões foram preenchidos com água destilada com 40% do volume do evaporador, testado experimentalmente em diferentes inclinações de trabalho (0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° com relação à horizontal) sob dissipações de potência variando entre 1W e 11W e seu resfriamento foi realizado por convecção forçada de ar. A análise térmica foi baseada na distribuição de temperaturas ao longo do comprimento, na temperatura de operação e na resistência térmica. Diante dos resultados observados do desempenho térmico, foi possível determinar que a melhor inclinação de trabalho foi a de 67,5° em relação à horizontal, tendo em vista que apresentou menores valores de resistência térmica e temperatura operacional.

Palavras-chave: Tubo de Calor. Trocador de Calor. Escoamento Cruzado. Desempenho Térmico. Experimental.

Abstract. Heat exchangers are devices that facilitate the heat exchange between two or more fluids that are at different temperatures and apart from one another, and they can have several different forms, including shell-and-tubes, serpentine, fins, plates, concentric tubes, among others. In the present work an experimental investigation of slope influence of thermosyphons applied to cross-flow heat exchangers was performed. To that effect, thermosyphons were manufactured in copper with an outer diameter of 9.45mm, an inner diameter of 7.75mm, and a total length of 180mm, of which 60mm are for the evaporator, 60mm are for the adiabatic section, and 60mm are for the condenser. The thermosyphons were filled with distilled water with 40% of the evaporator volume, tested experimentally at different slopes (0, 22.5, 45, 67.5, and 90° in relation to the horizontal) under power dissipations ranging from 1 to 11W and its cooling being performed by air forced convection. The thermal analysis was based on the temperature distribution along the length, on the operating temperature and on the thermal resistance. In view of the results observed for thermal performance, it was possible to determine that the best working slope was 67.5° in relation to the horizontal, given that it presented lower values of thermal resistance and lower operating temperature.

Keywords: heat pipe, heat exchanger, cross-flow, thermal performance, experimental.

1. INTRODUÇÃO

Um problema enfrentado hoje pela indústria energética é a alta dependência de processos realizados a altas temperaturas e que acabam perdendo, durante o processamento de diversos produtos, grandes quantidades de energia na forma de calor. Essas perdas são extremamente relevantes nos processos a base de combustíveis fósseis por exemplo, onde a perda de calor carregado pelos gases de combustão é um grande desafio. Também é tangível na área de produção e logística de energia elétrica, uma vez que a perda de energia térmica em transporte e conversão representa uma parcela grande da energia produzida. Essas perdas representam, economicamente, grandes desvantagens e diminuição da atratividade nessas áreas, além de também existirem impactos ambientais, tanto no excesso de rejeição de calor para o ambiente quanto na degradação indireta gerada pela maior necessidade de energia (Agathokleous *et al.*, 2019; Cullen & Allwood, 2010).

Os trocadores de calor são, de acordo com Bergman *et al.* (2019), equipamentos que facilitam a troca de calor entre dois fluidos escoando em diferentes temperaturas e separados entre si. Esses são essenciais nas mais variadas áreas da indústria que necessitam de controles precisos de temperatura. A eficiência dos trocadores de calor em um processo está diretamente ligada a eficiência do processo como um todo, assim, a otimização e desenvolvimento desse tipo de equipamento melhorando a sua taxa de transferência ou mesmo na compactação do trocador de calor é de extrema importância na diminuição da energia aproveitável rejeitada.

Termossifões são um tipo de tubo de calor no qual, a movimentação interna acontece pela ação da gravidade e devido à diferença de massa específica e de pressão do fluido de trabalho. Um termossifão pode ser dividido em três partes, como na Fig. 1. O *evaporador* é, a região mais abaixo do termossifão, onde o fluido de trabalho está acumulado no estado líquido. É também a região em contato com a fonte quente, o que conseqüentemente causa a mudança de estado do fluido de trabalho que sobe por diferença de pressão, para região superior do termossifão que está em contato com a fonte fria, chamada *condensador*. Nessa parte do termossifão o fluido de trabalho retorna a sua forma líquida e assim desce novamente pelas paredes do invólucro para a região quente. Caso exista, a área do termossifão onde não há troca de calor é chamada de *seção adiabática*, que se localiza entre as regiões do condensador e do evaporador (Mantelli, 2021).

Um termossifão é construído a partir de um tubo oco, constituído de material com boa condutividade térmica. Esse é responsável por resistir a diferença de pressões interna e externa mantendo o fluido de trabalho isolado do exterior, além de conduzir o calor entre o fluido de trabalho e o ambiente com a menor resistência possível. Também é esperado que o contato entre material do invólucro e o fluido de trabalho utilizado não causem reações químicas que possam afetar os resultados. O fluido de trabalho é selecionado levando em consideração as características necessárias no projeto do termossifão, a condutividade térmica, pressão de vapor, temperatura do ponto crítico são alguns dos dados utilizados para relacionar o fluido de trabalho e a faixa de trabalho esperada. Outro dado importante na confecção do termossifão é a razão de preenchimento, que representa a razão entre quantidade de fluido de trabalho e o volume do evaporador (Zohuri, 2016).

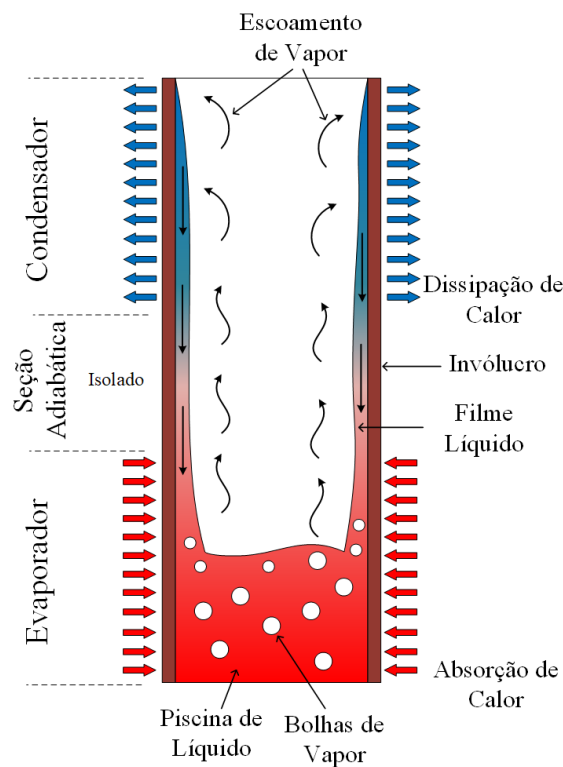


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão.

A aplicação de um termossifão como trocador de calor é facilitada por sua flexibilidade uma vez que esse pode ter as mais variadas dimensões se adaptando facilmente as necessidades de um projeto, além de ter construção simples utilizando materiais de fácil obtenção e para grande parte das aplicações utilizando a água como fluido de trabalho. Além de não utilizar bombeamento externo, essencial em muitos projetos de alta eficiência energética (Reay *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo construir um termossifão em cobre e investigar o funcionamento do dispositivo em diferentes condições de operação com o foco na aplicação em trocadores de calor de escoamento cruzado. Para tal, foi executada uma investigação experimental da influência da inclinação de trabalho desses dispositivos passivos de transferência de calor para diferentes cargas térmicas de aquecimento na região do evaporador.

2. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os equipamentos e os procedimentos utilizados na realização do presente trabalho. As etapas do preparo, limpeza, montagem, teste de estanqueidade, evacuação e preenchimento com fluido de trabalho do termossifão foram realizadas de acordo com as instruções existentes em Antonini Alves *et al.* (2018).

2.1. Características do Termossifão

O termossifão foi construído em tubo de cobre ASTM B-75 com diâmetro externo de 9,45mm, com diâmetro interno de 7,75mm e com comprimento total de 180mm, sendo que cada região (evaporador, seção adiabática e condensador) possui comprimento de 60mm. O termossifão foi preenchido utilizando água destilada como fluido de trabalho, com uma razão de preenchimento (RP) de 40% do volume do seu evaporador. Sob o termossifão foi utilizada uma fita termossensível *Kapton*TM. Na região do evaporador, para simular o aquecimento proveniente do trocador de calor, foi instalada uma fita resistiva de liga níquel-cromo *Omega Engineering*TM. Para a aquisição das temperaturas foram utilizados 6 termopares do tipo K da *Omega Engineering*TM calibrados, sendo que 5 foram posicionados no termossifão (2 no condensador, 1 na seção adiabática e 2 no evaporador) e 1 termopar para determinação da temperatura ambiente. Finalmente, sob as regiões do evaporador e da seção adiabática foi utilizada uma camada de isolamento térmico, sendo composta por uma camada de fibra de vidro e uma segunda camada de tubo de isolamento em poliuretano.

2.2. Aparato e Procedimento Experimental

Para realização desse estudo, o aparato experimental utilizado, mostrado na Fig. 2, foi composto por um ventilador para realizar o resfriamento do condensador do termossifão, uma fonte de alimentação *Keysight*TM U8002A, um sistema de aquisição de dados *Keysight*TM DAQ970A com um multiplexador de 20 canais, um computador *Dell*TM e um *nobreak* *NHS*TM. Para determinação da velocidade do ar, foi utilizado um termoanemômetro digital portátil *Itan*TM 720. A temperatura do ar ambiente durante os testes experimentais foi de $20,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$, mantida com o auxílio de uma unidade de condicionamento de ar *Carrier*TM.

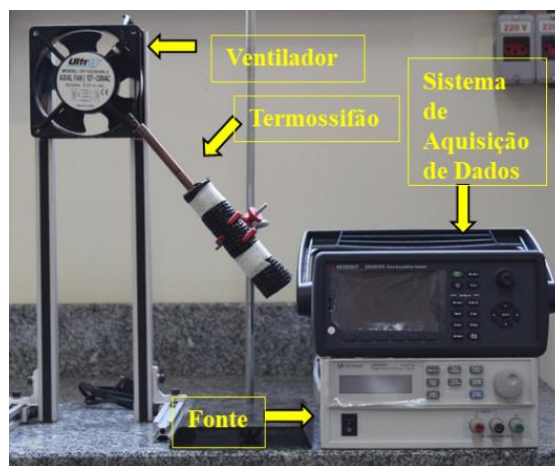


Figura 2. Aparato experimental.

Na execução dos testes experimentais foram utilizadas cargas térmicas de 1W a 11W, com passo de 2W, sendo elas aplicadas na região do evaporador através de uma fita resistiva por meio do efeito Joule, que é a transformação da energia elétrica em energia térmica. Cada carga térmica foi mantida por 800 segundos em um regime *quasi* permanente. Os dados obtidos pelo sistema de aquisição de dados foram visualizados e salvos utilizando o *software Keysight*TM *BenchVue* 2020 com um intervalo de 10 segundos entre cada aquisição de temperatura.

Para a análise térmica foram utilizados os dados da distribuição de temperaturas em cada seção para cada carga térmica aplicada, na temperatura operacional (T_{op}) e na resistência térmica (R_{th}), que pode ser entendida como a dificuldade do dispositivo em transferir calor da região do evaporador para a região do condensador:

$$R_{th} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q_{in}}, \quad (1)$$

sendo que, o T_{evap} é a temperatura média do evaporador, T_{cond} é a temperatura média do condensador e q_{in} é a carga térmica aplicada no termossifão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 3 a 7 são apresentadas as distribuições de temperatura ao longo do tempo considerando diferentes cargas térmicas para cada uma das inclinações de trabalho estudadas. Pode ser notado que as temperaturas são mais elevadas para a inclinação de 0° pelo fato que os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que utilizam da ação gravitacional para o retorno do fluido de trabalho, dessa forma, nessa inclinação há uma dificuldade no encerramento do ciclo, ou seja, do retorno da fase líquida para o evaporador, ocorrendo o fenômeno de *dry out*, que é a operação do evaporador sem fluido de trabalho (Mantelli, 2021).

Um dos parâmetros utilizados para se comparar os termossifões é a temperatura operacional, que corresponde a temperatura da seção adiabática e está representada na Fig. 8. De acordo com a análise realizada pela distribuição da temperatura operacional em função da carga térmica aplicada, o termossifão operando na inclinação de $67,5^\circ$ e de $22,5^\circ$ apresentam temperaturas próximas até a carga aplicada de 5W a partir de então, o termossifão com inclinação de $67,5^\circ$ apresenta as menores temperaturas operacionais.

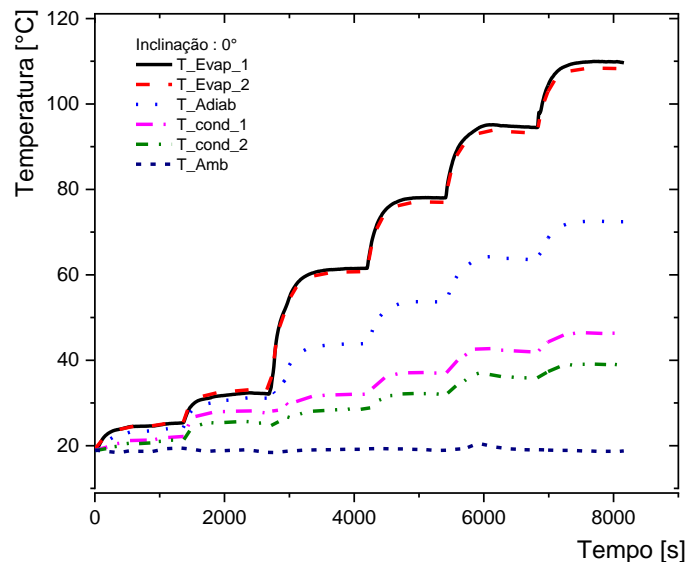


Figura 3. Distribuição ao longo do tempo para inclinação de 0° .

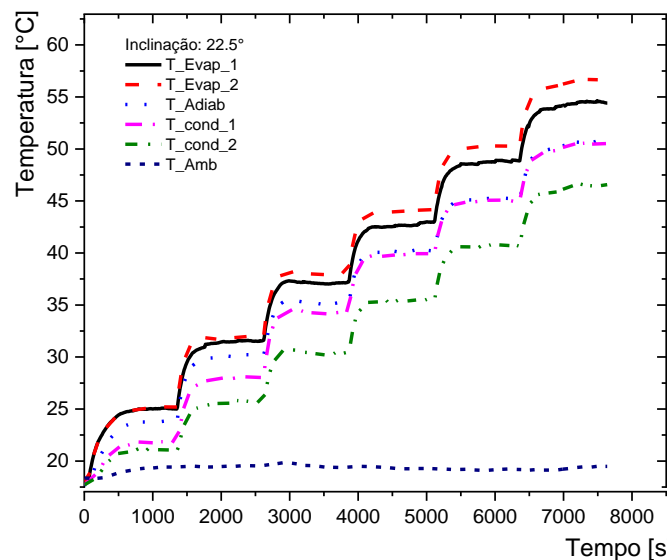


Figura 4. Distribuição ao longo do tempo para inclinação de $22,5^\circ$.

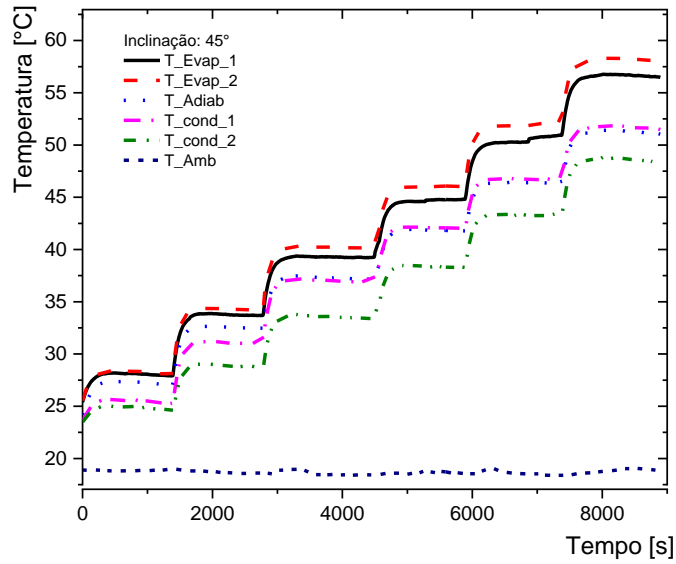


Figura 5. Distribuição ao longo do tempo para inclinação de 45°.

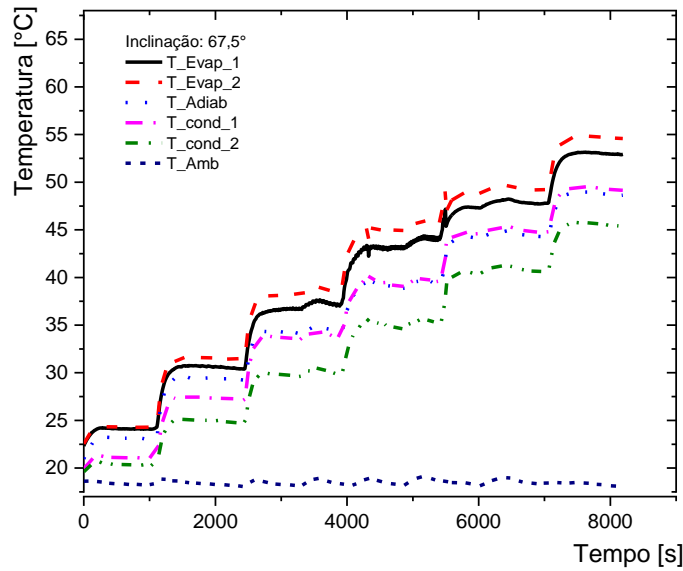


Figura 6. Distribuição ao longo do tempo para inclinação de 67,5°.

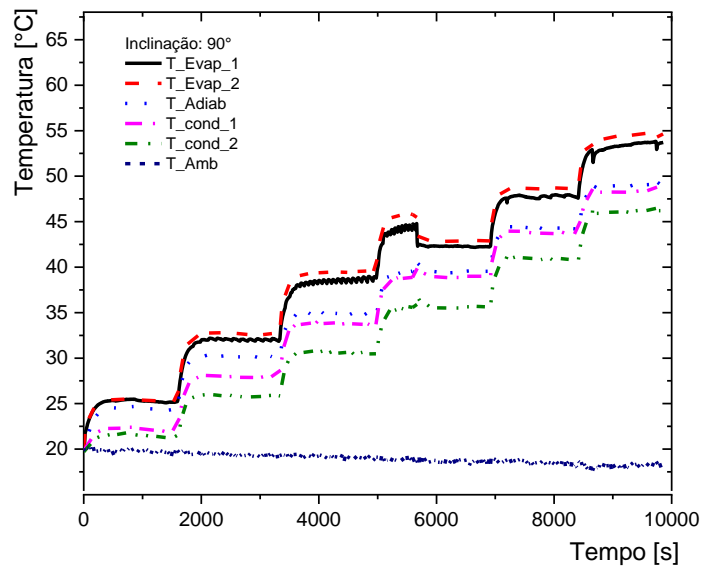


Figura 7. Distribuição ao longo do tempo para inclinação de 90°.

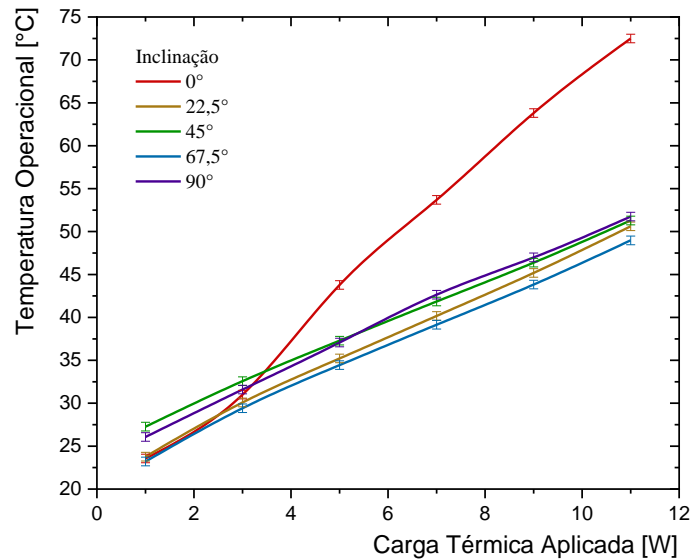


Figura 8. Temperatura operacional em função da carga térmica aplicada para diferentes inclinações.

Finalmente, para uma melhor avaliação do desempenho térmico do termossifão foi realizado, através da Eq. (1), o cálculo da resistência térmica para as diferentes potências aplicadas nos diferentes termossifões, considerando as diferentes inclinações de trabalho estudadas, sendo esse resultado apresentado na Fig. 9. Em concordância com os outros resultados obtidos, o termossifão com a inclinação de 0° apresentou valores coerentes até a aplicação de 5W mas ao ultrapassar essa potência, os valores de resistência térmica calculados são demasiadamente altos e por isso pode concluir que nessa inclinação, não possui uma funcionalidade para o trocador de calor.

Foi possível verificar que para as inclinações de 22,5°, 45° e 67,5° apresentam valores de resistência térmica muito próximos, bem como um comportamento similar para as diferentes cargas térmicas aplicadas, sendo que a menor resistência térmica encontrada foi para a inclinação de 67,5°.

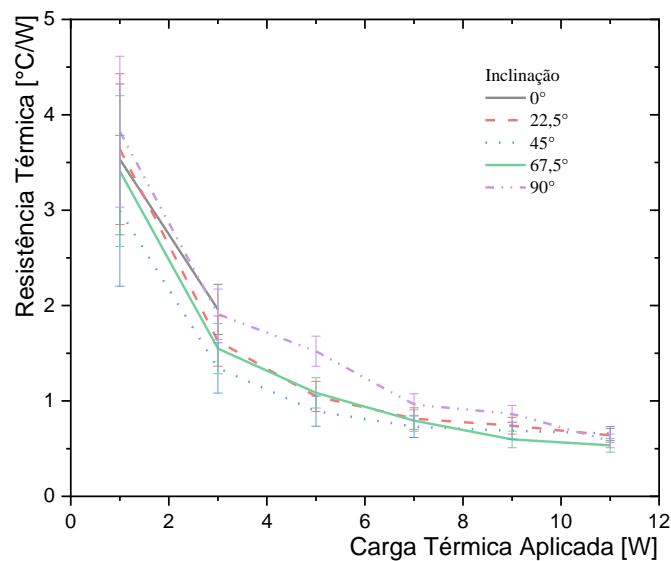


Figura 9. Resistência térmica em função da carga térmica aplicada para diferentes inclinações.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizado uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão de cobre sob diferentes inclinações de trabalho utilizando água como fluido de trabalho e arrefecido através de convecção forçada de ar. O termossifão foi testado nas inclinações de 0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° com relação à horizontal, com a dissipação de cargas térmicas entre 1W e 11W, com passo de 2W. Os resultados mostraram que o termossifão à 67,5° em relação à horizontal apresentou a menor temperatura operacional para as cargas térmicas e a menor resistência térmica para as maiores cargas térmicas em comparação com os outros termossifões testados, sendo assim foi proposta essa inclinação para aplicação em trocadores de calor de escoamento cruzado.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à CAPES, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa.

6. REFERÊNCIAS

- Antonini Alves, T., Krambeck, L., Santos, P.H.D., 2018. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: Aranguren, P. (Org.). *Bringing Thermoelectricity into Reality*. InTech, London, UK.
- Agathokleous, R., Panayiotou, G., Aresti, L., Argyrou, M.C., Georgiou, G.S., Jouhara, H., 2019. “Waste heat recovery in the EU industry and proposed new technologies”. *Energy Procedia*, Vol. 161 pp. 489-96.
- Bergman, T., Lavine, A., 2019. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. LTC, Rio de Janeiro, 8ª edição.
- Cullen, J.M., Allwood, J.M., 2010. “Theoretical efficiency limits for energy conversion devices”, *Energy*, Vol. 35, pp. 2059-2069.
- Mantelli, M. B. H., 2020. *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications*. Springer Nature, 1st edition.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R. J., 2014. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*”. Elsevier, Waltham, USA.
- Zohuri, B., 2016. *Heat Pipe Design and Technology: Modern Applications for Practical Thermal Management*. Springer, 2ed edition.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.