

ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES ALETADOS COM DIFERENTES RAZÕES DE PREENCHIMENTO

Allefe Jardel Chagas Vaz (allefevaz@alunos.utfpr.edu.br), Humberto Ianczkovski (humbertoi@alunos.utfpr.edu.br), Romeu Miqueias Szmoski (rmszmoski@utfpr.edu.br), Rozane de Fátima Turchiello Gómez (turchiel@utfpr.edu.br), Thiago Antonini Alves (antonini@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de Pós-Graduação *Multicampi* em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG), Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), Av. Dr. Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, CEP 84.017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

RESUMO: Termossifões são dispositivos passivos capazes de transferir grandes quantidades de calor por meio do calor latente de vaporização de um fluido de trabalho. Para otimizar a transferência de calor, aletas podem ser acopladas aos termossifões. No presente trabalho, foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de termossifões aletados utilizando água destilada como fluido de trabalho variando a razão de preenchimento em 50%, 100% e 150%. Quanto às características geométricas dos invólucros, os mesmos foram construídos em cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro externo de 12,70mm, diâmetro interno de 11,11mm e comprimento total de 300mm (56mm para o evaporador, 94mm para a seção adiabática e 150mm para o condensador). O evaporador foi aquecido por meio da dissipação de potência em um resistor em fita e o condensador foi resfriado por meio de convecção forçada a ar. Os testes experimentais foram realizados sob cargas térmicas de 10W a 80W. Os termossifões apresentaram desempenho satisfatório se comportando de forma esperada para dispositivos desse tipo. Ainda, o termossifão com razão de preenchimento 100% apresentou o melhor desempenho térmico dentre as razões de preenchimento testadas.

PALAVRAS-CHAVE: TERMOSSIFÕES, DESEMPENHO TÉRMICO, ALETAS, RAZÃO DE PREENCHIMENTO

EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL PERFORMANCE OF FINNED THERMOSYPHONS WITH DIFFERENT FILLING RATIOS

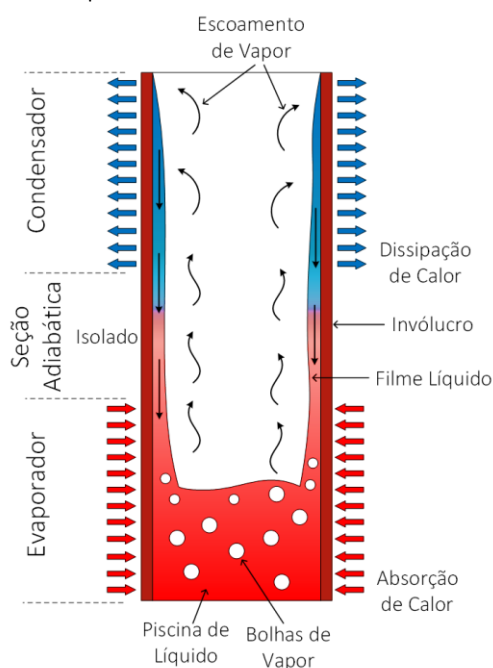
ABSTRACT: Thermosyphons are passive devices capable of transferring large amounts of heat through the latent heat of vaporization of a working fluid. To optimize heat transfer, fins can be attached to thermosyphons. In this work, an experimental investigation was carried out into the thermal performance of finned thermosyphons using distilled water as the working fluid, varying the filling ratio by 50, 100, and 150%. As for the geometric characteristics of the casings, they were made from ASTM B-75 Alloy 122 copper with an outer diameter of 12.70mm, an inner diameter of 11.11mm, and a total length of 300mm (56mm for the evaporator, 94mm for the adiabatic section, and 150mm for the condenser). The evaporator was heated by dissipating power in a tape resistor and the condenser was cooled by forced air convection. The experimental tests were carried out under thermal loads ranging from 10 to 80W. The thermosyphons performed satisfactorily and behaved as expected for devices of this type. In addition, the thermosyphon with a 100% filling ratio had the best thermal performance of all the filling ratios tested.

KEYWORDS: THERMOSYPHONS, THERMAL PERFORMANCE, FINS, FILLING RATIO

1. INTRODUÇÃO

Termossifões são dispositivos eficazes que podem transferir grandes quantidades de energia na forma de calor com pequenas diferenças de temperatura utilizando o calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho. Esse dispositivo é composto de um tubo hermeticamente fechado dividido em três regiões distintas: evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador é a região onde se localiza o reservatório de líquido e onde a adição de calor é feita; a seção adiabática é isolada termicamente e a região do condensador é onde o calor é rejeitado (CHI, 1976; MANTELLI, 2021). O retorno do fluido de trabalho para o evaporador, fato que completa o ciclo termodinâmico, ocorre por ação da força gravitacional nos termossifões (REAY *et al.*, 2018). O princípio de funcionamento de um termossifão é mostrado na Figura 1.

FIGURA 1. Diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão.



Fonte: Machado *et al.* (2023).

Os termossifões apresentam uma alta condutividade térmica, com temperatura praticamente constante, podendo ser várias ordens de magnitude maior do que a condução pura através de um metal sólido, fato qual confere aos termossifões a designação de supercondutores (RAMOS *et al.*, 2016). A capacidade de transferência de calor de sistema contendo termossifões pode ser alterada quando acrescentado superfícies estendidas, comumente conhecidas como aletas, ao dispositivo passivo para aumentar o desempenho do coeficiente de transferência de calor por convecção no condensador. Geralmente, para avaliar o desempenho térmico de um termossifão e outros dispositivos de transferência de calor é usada a resistência térmica (PETERSON, 1994).

1.1. Justificativa

A crescente demanda de aplicações mais eficientes para recuperação de energia e controle de seu desperdício nas indústrias vem sendo observada, devido tanto aos benefícios econômicos assim como ambientais, uma vez que os mesmos são incentivados para que exista um consumo consciente e ecologicamente sustentável (REMELI, 2015). Os processos realizados a altas temperaturas em sistemas de geração de energia acabam perdendo grandes quantidades de energia na forma de calor, como por exemplo, por queima de combustíveis fósseis, e o reaproveitamento desses desperdícios se torna cada vez mais importante (FACHINI, 2023). Neste contexto, os termossifões podem ser utilizados nas indústrias impulsionando avanços de tecnologias mais eficientes e ambientalmente sustentáveis na recuperação de calor e sistemas de conversão de energia, especialmente àqueles que aproveitam o calor residual de baixa qualidade.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar, de forma experimental, o desempenho térmico de termossifões aletados, utilizando água destilada como fluido de trabalho, além de variar parâmetros operacionais como carga térmica e razão de preenchimento, visando encontrar a melhor configuração com uma melhor eficiência térmica do sistema, o que representa uma economia de custos para indústrias e maior preservação do meio ambiente para a humanidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

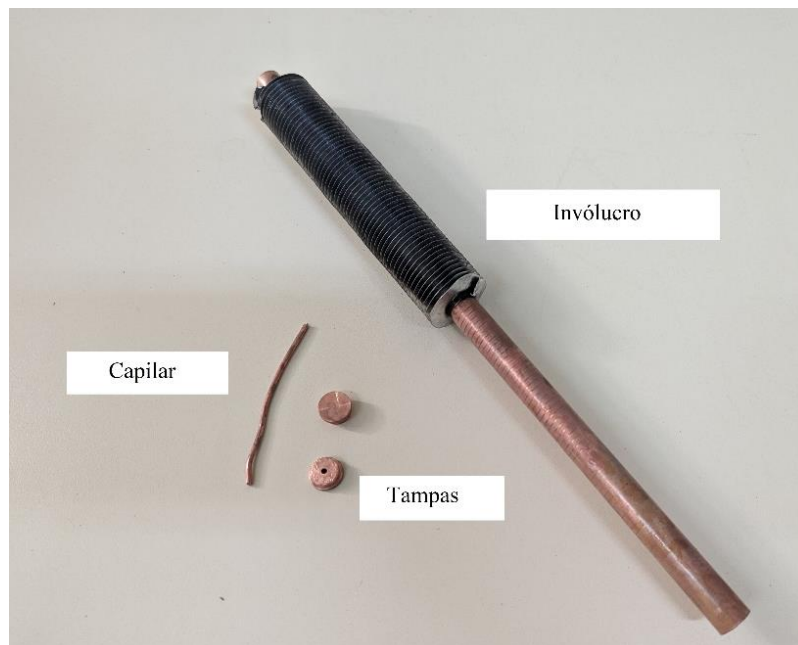
Nesta seção são apresentados em detalhes as características dos termossifões, a metodologia para construção dos termossifões assim como o aparato e procedimento experimental.

2.1. Construção dos termossifões

Os procedimentos realizados para construção e análise experimental desse trabalho foram executados no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) vinculado ao Programa de Pós-Graduação *Multicampi* em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa. Para construção dos termossifões foi utilizada a metodologia adotada por Antonini Alves *et al.* (2018), seguindo os procedimentos de limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento dos termossifões.

Para esse trabalho foram utilizados três termossifões fabricados com tubos de cobre ASTM B-75 Liga 122, com diâmetro de tubo externo de 12,70 mm e com diâmetro de tubo interno de 11,11mm, ainda, possuindo um comprimento total de 300mm, sendo 56mm a região do evaporador e 94mm da seção adiabática. A região do condensador possui 150mm e foi aletada utilizando aletas de alumínio ASTM B-209 Liga 11001200 Tempera H14. Essas aletas são do tipo L, possuem um diâmetro 29mm, passo de 2,3mm e espessura de 0,4mm. As tampas dos termossifões foram obtidas através da usinagem de uma barra maciça de cobre ASTM B-75 Liga 122. Para a realização da evacuação do ar e o preenchimento com o fluido de trabalho uma das tampas foi perfurada e utilizado um capilar com 1mm de diâmetro e 40mm de comprimento. Os componentes para a montagem dos termossifões são mostrados na Figura 2.

FIGURA 2. Componentes dos termossifões.



Fonte: Autoria própria (2024).

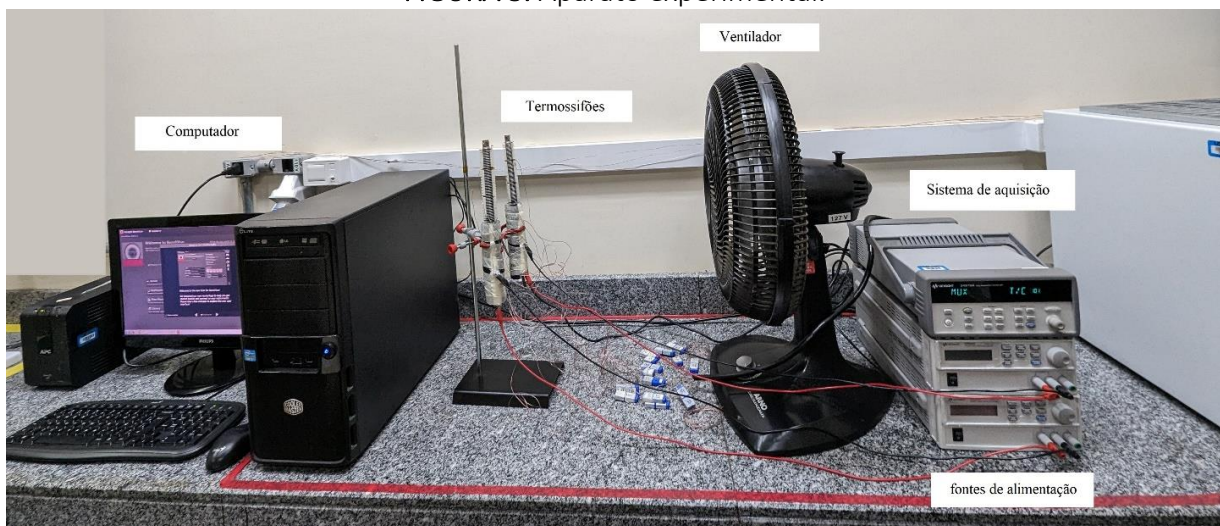
Para remoção das impurezas, garantia da molhabilidade do fluido de trabalho e melhoria da qualidade do vácuo foi feita a limpeza dos invólucros, capilares e tampas. Os componentes foram limpos primeiramente com acetona para retirada das impurezas mais grosseiras, então uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 de 0,1M) foi aplicada por no máximo 1 (um) minuto antes de ser feito o enxague com água destilada. A última etapa da limpeza dos termossifões foi a realização de um banho ultrassônico, onde os componentes permaneceram mergulhados em acetona por 15 (quinze) minutos.

Para montagem dos elementos dos termossifões foi utilizado o processo de brasagem. Através desse processo foi feita a união das tampas ao tubo de cobre, e posteriormente foi aplicado o mesmo processo para fixação do capilar na extremidade. Os termossifões foram submetidos ao teste de estanqueidade. Em seguida, os termossifões permaneceram em processo de vácuo por pelo menos 8 (oito) horas antes de ser feito o preenchimento com o fluido de trabalho. 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). Para o preenchimento dos dispositivos foi utilizada uma bureta graduada e os termossifões foram preenchidos com 50%, 100% e 150% do volume da região do evaporador – correspondendo a um volume de fluido de trabalho de 2,71mL, 5,43mL e 8,14mL, respectivamente.

2.2. Aparato experimental

O aparato experimental, mostrado na Figura 3, foi composto por uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados *Keysight™* 34970A com um multiplexador de 20 canais *Keysight™* 34901A, duas fontes de alimentação *Keysight™* U8002A, um computador, um *nobreak* *APC™*, um ventilador *Arno™* e um suporte universal com garras.

FIGURA 3. Aparato experimental.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os termossifões foram instrumentados para obtenção dos dados experimentais. Primeiramente uma fita termossensível *Kapton™* foi colada nas superfícies dos tubos de cobre. Posteriormente, resistores elétricos *Omega Engineering™* de liga níquel-cromo 80/20 foram enrolados nos evaporadores para que essas regiões sejam aquecidas por meio do Efeito *Joule* e convertam a energia elétrica em calor. Para aquisição das temperaturas submetidas ao sistema,

sensores de temperaturas foram dispostos ao longo dos termossifões. Para cada termossifão foram utilizados cinco termopares do tipo T da *Omega Engineering*TM, dispostos da seguinte maneira: um termopar no centro da região do evaporador, dois termopares igualmente espaçados na região do condensador e um termopar no centro da seção adiabática. Para concluir a instrumentação, uma camada de lã de vidro e um tubo esponjoso blindado foram utilizados para isolar o evaporador e a seção adiabática de cada um dos termossifões testados. Esse isolamento foi necessário para garantir que o fluxo térmico gerado pelos resistores elétricos seja direcionado apenas aos evaporadores dos termossifões.

2.3. Procedimento experimental

O procedimento experimental consiste inicialmente em determinar a velocidade do ar incidente a região do condensador. Para tal, foi utilizado um anemômetro portátil ITAN® 720, de modo a garantir que essa região esteja submetida a uma convecção forçada de ar a $5,0\text{m/s} \pm 0,2\text{m/s}$. A temperatura ambiente do laboratório deve ser ajustada de forma a permanecer em $20,0^\circ\text{C} \pm 2,0^\circ\text{C}$ com o auxílio de um condicionador de ambiente *Rheem*TM com capacidade térmica de 36.000BTU/h. Cargas térmicas de 10W a 80W foram aplicadas no evaporador em incrementos de 10W a cada 900 (novecentos) segundos. A aquisição de dados foi feita utilizando o *software Keysight*TM BenchVue 2020, com um intervalo de 10 (dez) segundos entre cada coleta de dados. Os testes experimentais foram executados três vezes, ou seja, em triplicata, para cada razão de preenchimento avaliada.

2.4. Parâmetros térmicos de interesse

A distribuição de temperaturas ao longo dos termossifões ($T(x)$), a temperatura operacional (T_{op}) e a resistência térmica (R_{th}) foram utilizados para análise térmica dos termossifões.

A resistência térmica pode ser definida como a dificuldade desse dispositivo de transportar calor. Quanto maior a resistência térmica, maior a dificuldade de transportar calor do sistema (KRAMBECK, 2019). A resistência total pode ser obtida através da diferença das temperaturas médias entre as regiões do evaporador e condensador e da carga térmica aplicada no termossifão, foi determinada por:

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

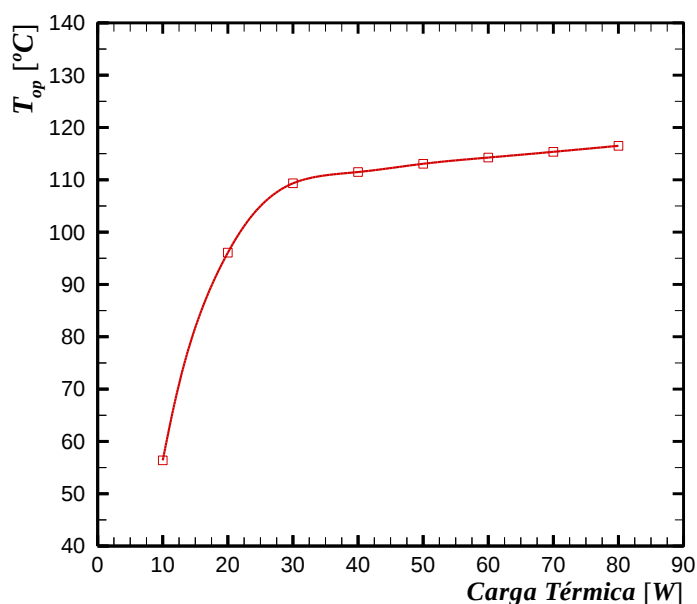
sendo que, T_{evap} é a temperatura média do evaporador, T_{cond} é a temperatura média do condensador e q_{in} é a carga térmica aplicada no termossifão.

3. RESULTADOS

Nesse estudo experimental foi feita uma análise do desempenho térmico de termossifões aletados contendo diferentes razões de preenchimento do fluido de trabalho, 50%, 100% e 150%. Para tal, foram analisadas as distribuições de temperaturas em função do tempo, as temperaturas operacionais e as resistências térmicas dos termossifões.

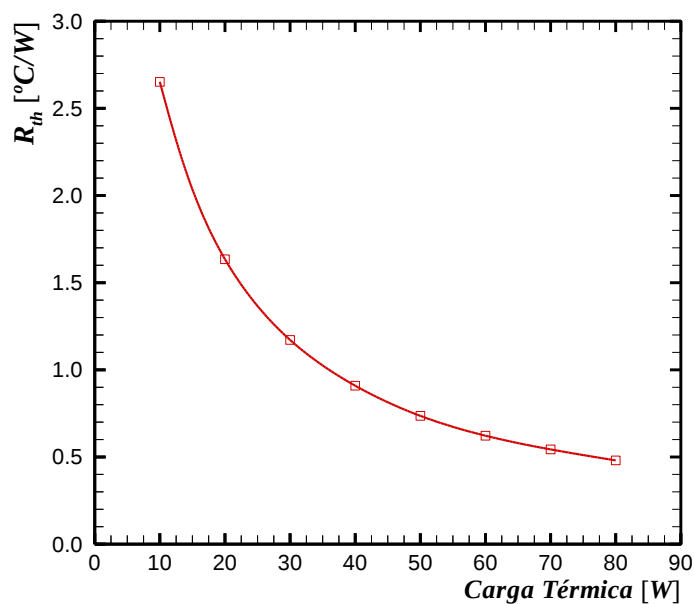
Nas Figuras 4 e 5 são apresentados a temperatura operacional e a resistência térmica do termossifão com razão de preenchimento de 50%, respectivamente. Pode ser observado que a temperatura operacional aumenta com o aumento da carga térmica e que a resistência térmica ficou estável e se comporta de forma adequada uma vez que apresenta um comportamento inversamente proporcional à carga térmica.

FIGURA 4. Temperatura operacional para razão de preenchimento de 50%.



Fonte: Autoria própria (2024).

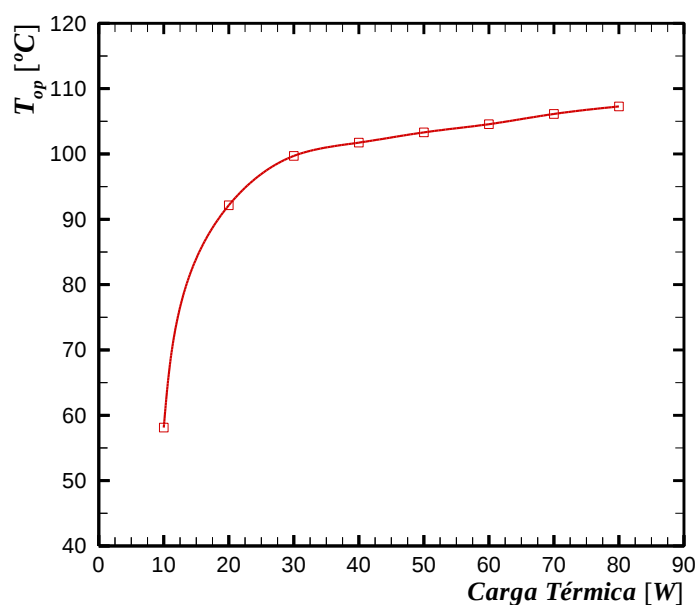
FIGURA 5. Resistência térmica para razão de preenchimento de 50%.



Fonte: Autoria própria (2024).

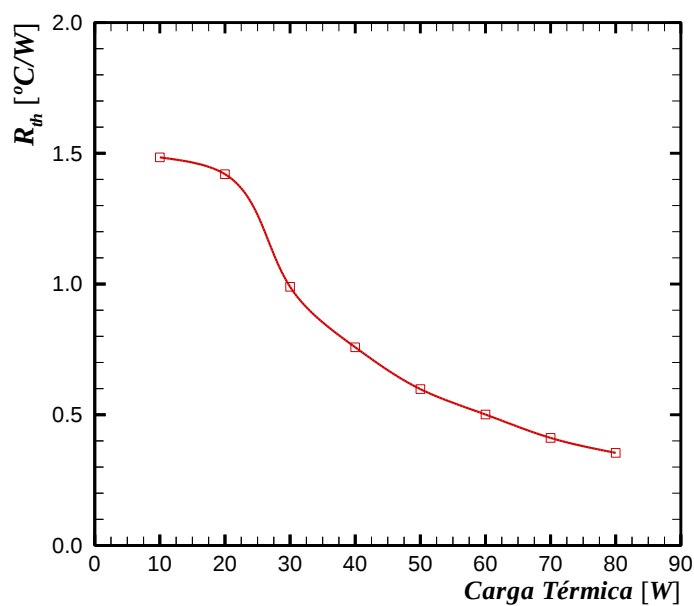
Nas Figuras 6 e 7 são apresentados a temperatura operacional e a resistência térmica do termossifão com razão de preenchimento de 100%, respectivamente, enquanto que nas Figuras 8 e 9 são apresentados a temperatura operacional e a resistência térmica do termossifão com razão de preenchimento de 150%, respectivamente. Os comportamentos da temperatura de operação e da resistência térmica são similares aos do termossifão com razão de preenchimento de 50%.

FIGURA 6. Temperatura operacional para razão de preenchimento de 100%.



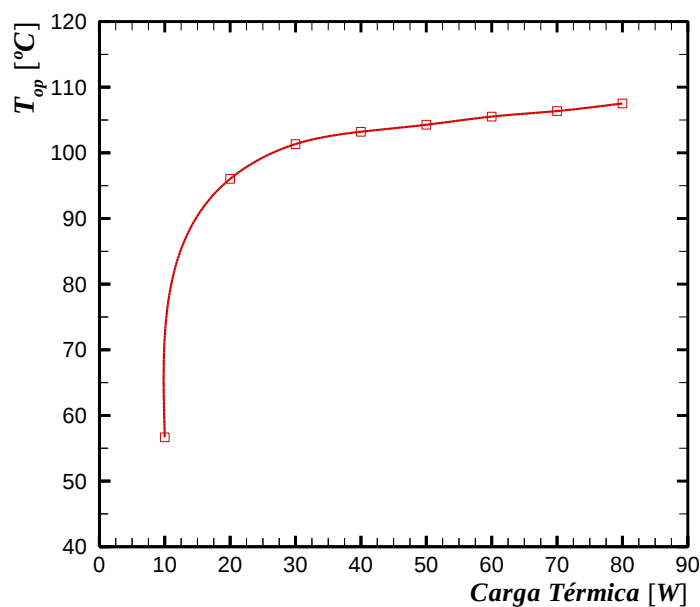
Fonte: Autoria própria (2024).

FIGURA 7. Resistência térmica para razão de preenchimento de 100%.



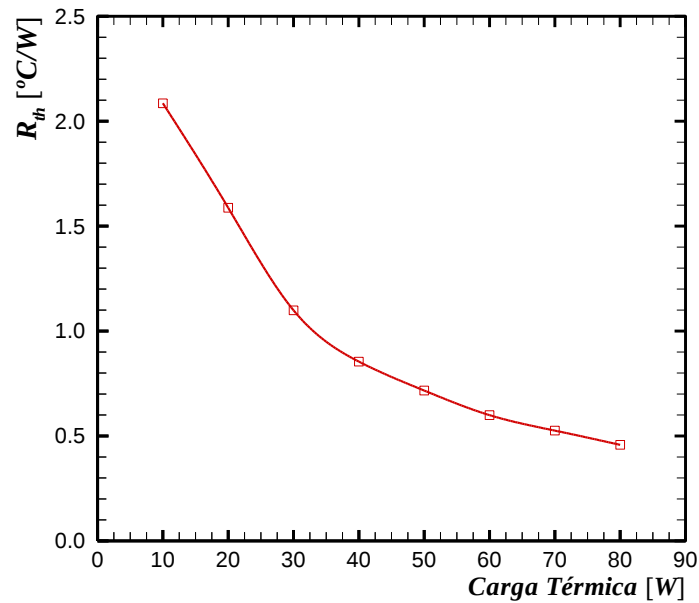
Fonte: Autoria própria (2024).

FIGURA 8. Temperatura operacional para razão de preenchimento de 150%.



Fonte: Autoria própria (2024).

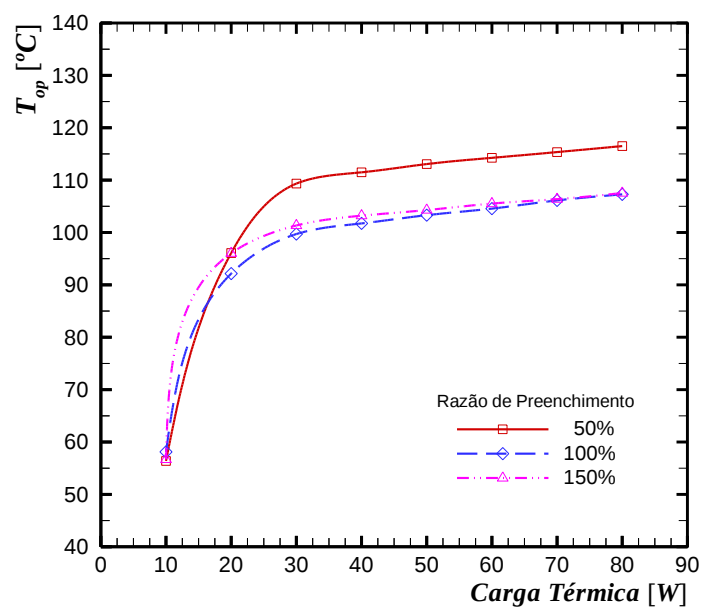
FIGURA 9. Resistência térmica para razão de preenchimento de 150%.



Fonte: Autoria própria (2024).

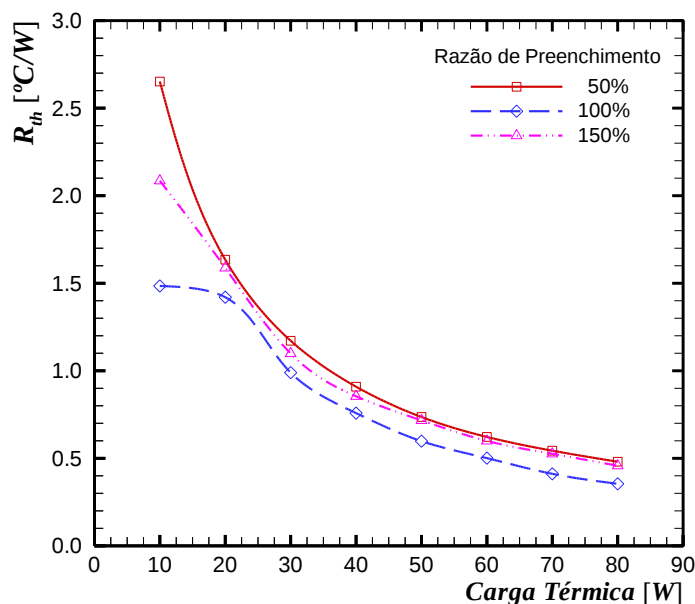
Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas comparações da temperatura operacional e da resistência térmica das razões de preenchimento testadas, respectivamente. Pode ser notado que a temperatura operacional com razões de preenchimento de 100% e 150% são bastante similares enquanto que para resistência térmica o melhor desempenho foi para razão de preenchimento de 100%.

FIGURA 10. Comparação das temperaturas operacionais.



Fonte: Autoria própria (2024).

FIGURA 11. Comparação das resistências térmicas.



Fonte: Autoria própria (2024).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi realizada uma investigação experimental de termossifões aletados utilizando água destilada como fluido de trabalho, variando os parâmetros operacionais como carga térmica e razão de preenchimento. Os termossifões foram arrefecidos por convecção forçada de ar na região do condensador e submetidos a uma dissipação de potência de 10W a 80W com incrementos de 10W, permanecendo por um período de 900s em cada carga térmica. Os resultados experimentais mostraram que os termossifões obtiveram um comportamento adequado e esperado para esse tipo de dispositivo. As razões de preenchimento testadas com relação ao volume do evaporador mostram um comportamento justificável, uma vez que para a razão de preenchimento de 50% a quantidade de fluido de trabalho é pequena demais para alcançar um desempenho que suporte a geometria do dispositivo. Em contrapartida, para a razão de preenchimento de 150%, é o excesso desse fluido de trabalho que causa uma piora no desempenho térmico aproximando a resistência térmica dos valores da menor razão de preenchimento testada. Como conclusão, o termossifão aletado com uma razão de preenchimento de 100% em relação ao volume do evaporador apresentou o melhor desempenho térmico dentre os dispositivos investigados experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado ao acadêmico *Allefe Jardel Chagas Vaz*, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de produtividade em pesquisa ao Prof. *Thiago Antonini Alves* (Processo nº 312367/20228) e pelo apoio financeiro no desenvolvimento de Projeto Universal (Processo nº 409631/2021-3) e à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná pelo apoio financeiro (Convênio nº 129/2022). Agradecimentos também são externados à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação *Multicampi* (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR/*Campus* Ponta Grossa.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ANTONINI ALVES, T.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. D. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: ARANGUREN, P. (Org.). Bringing thermoelectricity into reality. InTech, London, UK, 2018.

CHI, S. W. Heat pipe theory and practice: A sourcebook. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, USA, 242p, 1976.

FACHINI, L. V. G. Recuperação de calor utilizando gerados termoelétricos de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) assistidos por termossifões. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil, 2023.

KRAMBECK, L.; NISHIDA, F. B.; AGUIAR, V. M.; DIAS, P. H. D.; ANTONINI ALVES, T. Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling. *Thermal Science*, v. 23, n. 2 Part B, p. 1151-1160, 2019.

MACHADO, P. L. O.; PEREIRA, T. S.; TRINDADE, M. G.; BIGLIA, F. M.; SANTOS, P. H. D.; TADANO, Y. S.; SIQUEIRA, H.; ANTONINI ALVES, T. Estimating thermal performance of thermosyphons artificial neural networks. *Alexandria Engineering Journal*, v. 79, p. 93-104, 2023.

MANTELLI, M. B. H. Thermosyphons and heat pipes: Theory and applications. Springer, Cham, SWI, 431p, 2021.

PETERSON, G. P. An introduction to heat pipes. Modeling, testing, and applications. Wiley Series in Thermal Management of Microelectronic and Electronic Systems, New York, USA, 1994.

RAMOS, J.; CHONG, A.; JOUHARA, H. Experimental and numerical investigation of a cross flow air-to-water heat pipe-based heat exchanger used in waste heat recovery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 102, p. 1267–1281, 2016.

REAY, D. A.; MCGLEN, R.; KEW, P. Heat pipe: Theory, design and applications. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, NED, 288p, 2018.

REMELI, M. F. B. Simultaneous industrial waste heat recovery and power generation using heat pipe assisted thermoelectric generator. Ph.D. Thesis in Aerospace Mechanical and Manufacturing Engineering - RMIT University, Melbourne, Australia, 2015.

ZOHURI, B. Heat pipe design and technology: Modern applications for practical thermal management. Springer, Albuquerque, USA, 513p, 2016.