

ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM TERMOSSIFÃO DE AÇO INOXIDÁVEL COM RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA

Felipe Mercês Biglia, felipebiglia@gmail.com¹
Victor Vaurek Dimbarre, victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br²
Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br¹
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville, CEP 81.280-340, Curitiba, PR, Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, CEP 84.017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

Resumo. Os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que utilizam o calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho para intensificar sua troca térmica. Para o presente trabalho foi construído um termossifão em aço inoxidável com diâmetro externo de 19,05mm (3/4"), com a espessura de parede de 1,58mm (1/16") e com comprimento de 1000mm sendo 400mm para o evaporador, 200mm para a seção adiabática e 400mm para o condensador. As tomadas de temperaturas são feitas internamente utilizando termopares do tipo K. Para o resfriamento do condensador foi construído uma camisa para o escoamento forçado de água. O termossifão foi preenchido com água destilada apresentando uma razão de preenchimento de 50% do volume do evaporador. O aquecimento foi realizado por resistências elétricas de cerâmica. O termossifão foi testado experimentalmente na inclinação de 45° com relação a horizontal e sob dissipações de potência variando entre 80W e 200W. 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 foi possível determinar a temperatura média do vapor, a pressão interna para as diferentes cargas térmicas aplicadas e demonstrar o comportamento da resistência térmica para as diferentes condições operacionais.

Palavras-chave: termossifão, escoamento bifásico, análise térmica, experimental.

Abstract. Thermosyphons are passive heat transfer devices that use the latent heat of vaporization to perform more effective heat exchanges. For the present work, a stainless-steel thermosyphon with an external diameter of 19.05mm (3/4") and a wall thickness of 1.58mm (1/16") with a length of 1000mm, 400mm for the evaporator, 200mm for the adiabatic section, and 400mm for the condenser region. Temperatures are taken in-house using K-type thermocouples. For the cooling, a jacket was built for the flow of the refrigerant, being water for the present work. For the filling phase, the device is evacuated through a vacuum pump and then filled through a needle valve, with the chosen filling ratio being 50% of the evaporator volume. Heating is carried out by ceramic heating collars, thus applying different powers. The device was experimentally tested at 45° inclination with respect to horizontal and under power dissipations ranging between 80 and 200W. 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 observed results, it was possible to determine the average temperature of the steam, determine the internal pressure for the different thermal loads applied and graphically demonstrate the behavior of the thermal resistance for the different thermal loads.

Keywords: thermosyphon, two-phase flow, thermal analysis, experimental.

1. INTRODUÇÃO

Os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor com elevada condutividade térmica e com alta eficiência que utilizam do princípio da evaporação e da condensação (calor latente de vaporização) de um fluido de trabalho preenchido em um invólucro. Eles têm por característica ser simples e barato, o que o torna atraente para aplicações térmicas em indústrias (Ritthidech, 1999). Eles constituem-se por um invólucro evacuado e preenchido com

fluido de trabalho, que resulta em pressões baixas em seu interior e por essa razão a temperatura de evaporação dos fluidos de trabalho são inferiores às apresentadas a temperatura ambiente (Faghri, 2014).

Um termossifão é composto por três regiões que são distinguidas por sua operação, exemplificadas na Fig. 1. A região inferior do termossifão é denominada evaporador onde a característica é a absorção de calor pelo fluido de trabalho que se encontra em maior parte na fase líquida. Ao absorver calor da fonte quente o fluido de trabalho começa o processo de evaporação e por advento do gradiente de pressão, o vapor escoa para a região superior do dispositivo, onde se localiza o condensador. Essa região tem por característica principal a dissipação do calor que foi absorvido no evaporador. Por ação da gravidade o vapor, que condensado forma um filme de líquido, retorna pelas paredes do termossifão ao evaporador. Entre as regiões do evaporador e do condensador pode ser incluída a seção adiabática que tem por função separar tais regiões e tem por característica não realizar trocas térmicas (Reay, *et al.*, 2014; Mantelli, 2021).

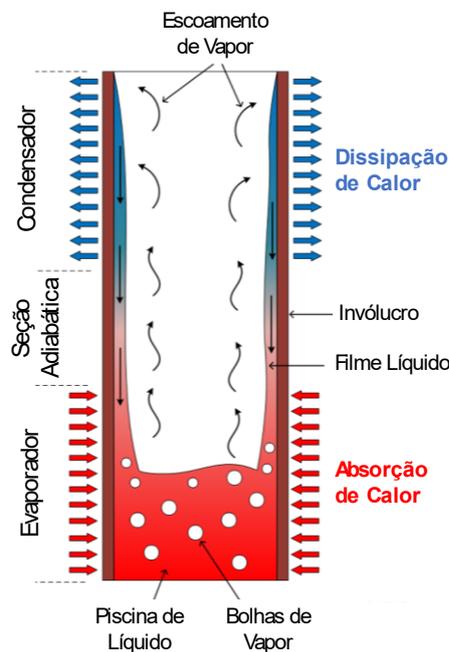


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão (Machado, 2022)

Para o projeto dos termossifões existem dois parâmetros que se destacam, a temperatura de operação e as características geométricas desses dispositivos, com essas informações é possível selecionar o fluido de trabalho e as dimensões físicas e o material do invólucro, fazendo-se necessário que haja compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o invólucro para que não ocorram reações químicas que possam gerar gases não-condensáveis, os quais podem se acumular na região do evaporador e por consequência reduzir seu desempenho térmico (Mantelli, 2021; Zohuri, 2016).

Nesse contexto, no presente trabalho foi construído um termossifão de aço inoxidável e executada uma investigação experimental do seu desempenho térmico através de um aparato experimental. Para obtenção das temperaturas em diferentes pontos do termossifão foram utilizados termopares do tipo K que realizam a leitura direta da temperatura da piscina de líquido, do filme de líquido e do vapor.

2. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas as características do termossifão construído, o procedimento para preenchimento com fluido de trabalho, o aparato experimental utilizado e o procedimento experimental adotado.

2.1. Termossifão

O termossifão foi construído em um tubo de aço inoxidável 304 com diâmetro externo de 19,05mm (3/4"), espessura de parede de 1,58mm (1/16") e comprimento total de 1000mm sendo 400mm para o evaporador, 200mm para a seção adiabática e 400mm para o condensador. No condensador foi acoplada uma camisa para o resfriamento, essa camisa foi construída em tubo de aço inoxidável 304 com diâmetro externo de 44,45mm (1 3/4") com o mesmo comprimento do condensador. Para realizar o preenchimento do termossifão, foi instalada em sua extremidade uma válvula do tipo agulha *Swagelok*TM. Para tomada das temperaturas, foram instalados 7 acessos (3 no condensador, 1 na seção adiabática e 3 no evaporador) para serem conectados termopares do tipo sonda, com acoplamento roscado NPT, do tipo K da *Omega Engineering*TM.

Depois de instalados os termopares, foi realizado um teste de estanqueidade, onde foi inserido ar comprimido, para verificar a vedação das conexões. Esse teste é de suma importância para garantir que não haja vazamento de fluido de trabalho tampouco a entrada de ar no termostato. Após ser aprovado no teste de estanqueidade, foi realizada a limpeza interna do termostato e posteriormente realizado o procedimento de evacuação. Esse procedimento tem como objetivo retirar todos os gases presentes no interior do termostato, acarretando na redução da pressão de trabalho, para tal, o mesmo ficou conectado a uma bomba de vácuo *EOS Value™* modelo *i260SV*, utilizando graxa de vácuo *Dow Corning™* nas conexões entre a mangueira de silicone, a bomba de vácuo e a válvula, conforme apresentado na Fig. 2.



Figura 2. Detalhes do mecanismo de preenchimento (Autoria própria, 2023)

Tendo sido evacuado o termostato, o processo de preenchimento pode ser iniciado, para isso a válvula foi fechada e a mangueira foi desconectada da bomba de vácuo e conectada à estação de preenchimento, onde foi possível inserir apenas o fluido de trabalho no volume desejado para o interior do termostato, para a realização desse trabalho foi utilizado a razão de preenchimento de 50% que compreende à metade do volume da região do evaporador. Por fim, a válvula foi fechada, garantindo que sejam mantidos constantes os quantitativos de pressão interna e volume de fluido de trabalho, no dispositivo.

2.2. Aparato e Procedimento Experimental

O aparato experimental utilizado nesta investigação, apresentado na Fig. 3, foi composto por um termostato de aço inoxidável, uma fonte de alimentação *Keysight™* E36232A, um banho ultratermostatizado *Limatech™*, um sistema de aquisição de dados *Keysight™* DAQ970A com um multiplexador de 20 canais e um computador *Dell™*.

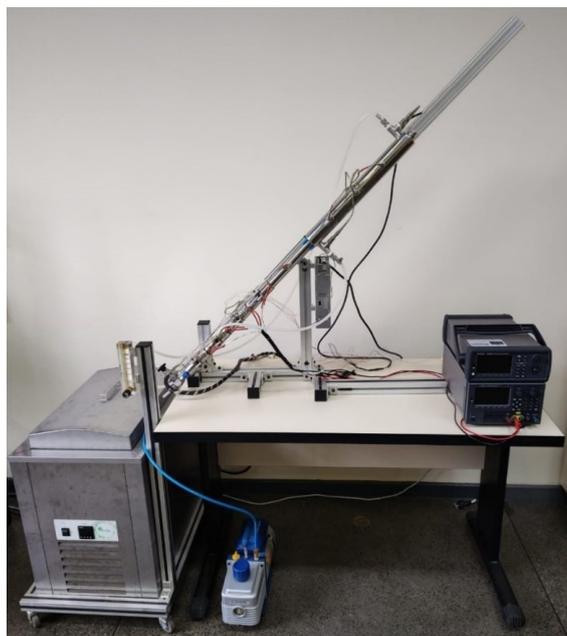


Figura 3. Aparato experimental (Autoria própria, 2023)

Durante a realização dos testes experimentais, o evaporador foi aquecido através do efeito Joule, onde há dissipação de potência elétrica da fonte de alimentação através das resistências de cerâmica, sendo as cargas térmicas aplicadas no intervalo de 80W até 200W. Para o resfriamento do condensador o banho ultratermostatizado fornecia um escoamento

forçado de água com vazão volumétrica de 0,5L/min e temperatura de 18,0°C±0,5°C. As cargas térmicas foram aplicadas com o intervalo de tempo de 1200 segundos e o termossifão foi mantido a uma inclinação de 45° com a horizontal.

Para a análise térmica foram consideradas a distribuição de temperatura ao longo do tempo, a temperatura de operação ($T_{op} = T_{adiab}$) e a diferença de temperatura entre evaporador e condensador a partir da resistência térmica (R_{th} - Eq. (1)):

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

sendo que, q representa a carga térmica aplicada, T_{evap} a temperatura média no evaporador e T_{cond} a temperatura média no condensador.

As incertezas experimentais relacionadas com os instrumentos de medição utilizados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Incertezas experimentais (Autoria própria, 2023)

Parâmetro	Instrumento de Medição	Incerteza	Unidade
Água de Resfriamento	Banho Ultratermostatizado	±0,5	°C
Comprimento	Escala milimetrada	±0,5	mm
Diâmetro	Paquímetro	±0,025	mm
Potência	Fonte de Alimentação	±1%	W
Temperatura	Termopar do tipo K	±0,25	°C

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta o comportamento da distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão de aço inoxidável. Como pode ser observado, as maiores temperaturas estão localizadas na região do evaporador onde há a dissipação de calor e as menores temperaturas registradas estão presentes no condensador, onde o resfriamento está sendo realizado pela camisa por convecção forçada de água. Os resultados apresentados demonstram o comportamento esperado para um termossifão. Podem ser notadas algumas variações nas temperaturas em função de alguns fenômenos internos ao termossifão, sendo representadas pelas instabilidades, resultantes do desequilíbrio entre a quantidade de fluido condensado e evaporado.

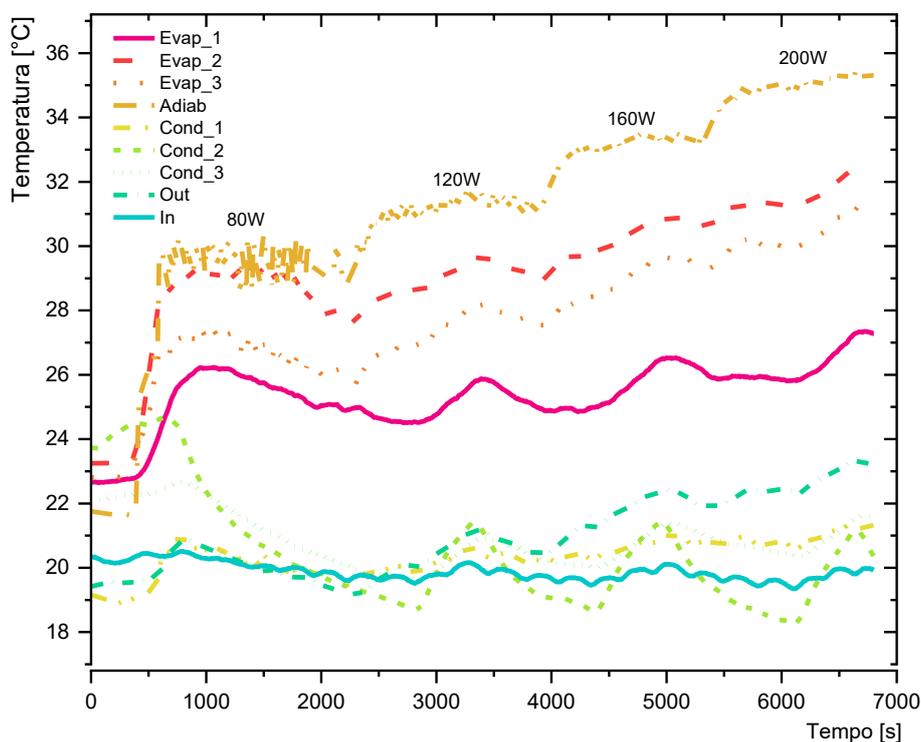


Figura 4. Distribuição de temperaturas em função do tempo (Autoria própria, 2023)

A Figura 5 apresenta os resultados referentes a resistência térmica para as diferentes cargas térmicas aplicadas no termossifão de aço inoxidável. O comportamento apresentado pela curva indica o correto funcionamento do dispositivo, tendo em vista que ao analisar a definição da resistência térmica (Eq.(1)), nota-se que a resistência térmica de um termossifão é inversamente proporcional ao valor da carga térmica aplicada (Dimbarre, 2021).

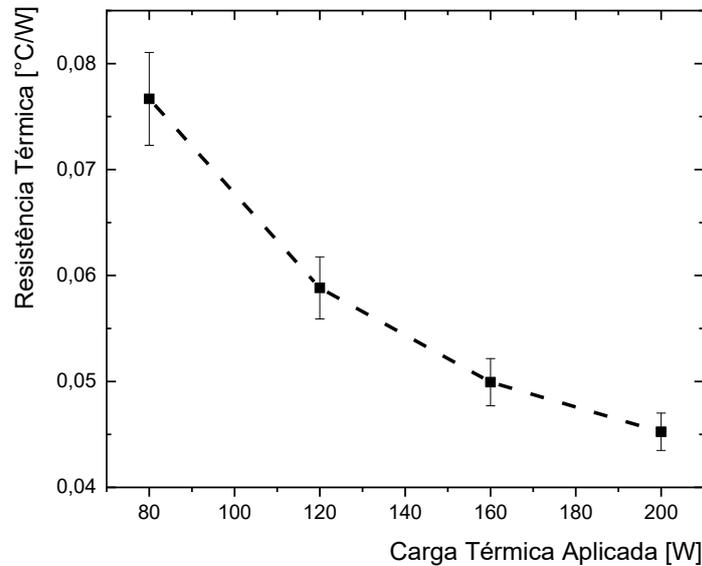


Figura 5. Resistência térmica em função da carga térmica aplicada (Autoria própria, 2023)

A Figura 6 apresenta o comportamento da temperatura operacional do termossifão em função da carga térmica aplicada no evaporador. Tal comportamento é condizente com a literatura (Biglia, *et al.*, 2018), dado que o fornecimento de energia via resistência elétrica (efeito Joule) resulta no acréscimo da temperatura do fluido de trabalho. Ao encontro de tais informações é possível utilizar a temperatura operacional para calcular a pressão interna durante a aplicação das cargas térmicas.

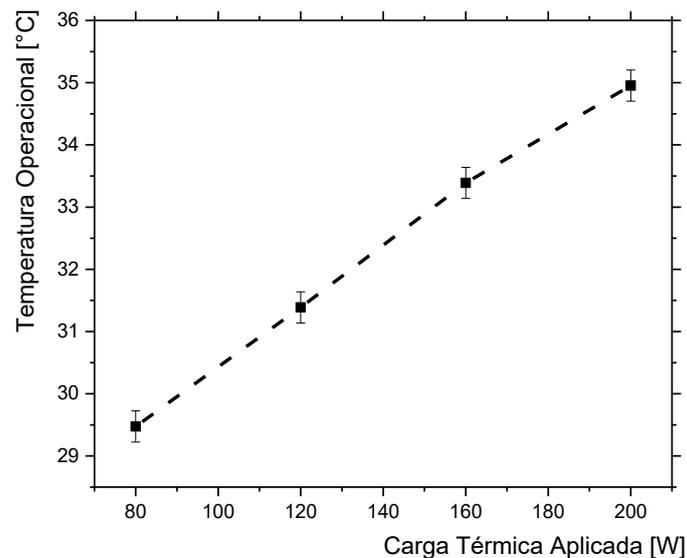


Figura 6. Temperatura operacional em função da carga térmica aplicada (Autoria própria, 2023)

A Figura 7 apresenta a relação entre a pressão interna calculada do termossifão em função da carga térmica aplicada, na qual observa-se que, conforme apresentado na literatura (Krambeck, *et al.*, 2016), ao fornecer uma carga térmica ao fluido de trabalho há uma alteração em sua temperatura que resulta no aumento da pressão de vapor, tendo em vista que o princípio de funcionamento é baseado na troca bifásica, desta forma a pressão interna se mantém constante para as diferentes cargas térmicas.

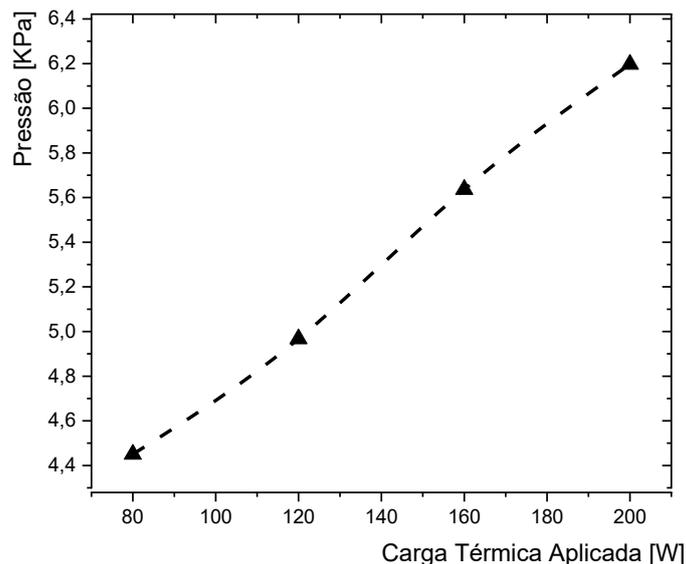


Figura 7. Pressão interna em função da carga térmica aplicada (Autoria própria, 2023)

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi apresentada uma avaliação experimental do funcionamento de um termossifão fabricado em aço inoxidável utilizando água destilada como fluido de trabalho e o resfriamento sendo realizado por convecção forçada de água em uma camisa na seção do condensador.

Para a realização dos experimentos, o evaporador foi aquecido pelo efeito Joule resultante da dissipação de potência elétrica sobre resistências elétricas de cerâmicas presentes no evaporador.

A análise dos resultados foi baseada na distribuição das temperaturas ao longo do tempo, na resistência térmica, temperatura operacional e na avaliação da pressão interna em função da carga térmica.

O termossifão estudado apresentou o comportamento esperado para as condições de trabalho as quais foram submetidas e vão de encontro com os comportamentos apresentados na literatura.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Dimbarre, V. V., 2021. *Investigação experimental do comportamento térmico de termossifões aplicados a coletores solares utilizando nanofluido de óxido de grafeno*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Biglia, F. M., Stremel, G. K., De Marco, F., Krambeck, L., Alves, T. A., 2018. “Influência do Diâmetro e da Inclinação do Termossifão em seu Desempenho Térmico”. In *Revista de engenharia e tecnologia*, v. 10, p. 38-49.
- Faghri, A., 2014. “Heat pipes: review, opportunities and challenges”. In *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1), p. 1-48.
- Krambeck, L., Nishida, F. B., Biglia, F. M., Santos, P. H. D., Alves, T. A., 2016. “Estudo Experimental do Desempenho Térmico de um Termossifão Utilizado no Resfriamento de Equipamentos Eletroeletrônicos”. In *XVI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial*, Goiânia, Anais do XVI CONEMI.
- Machado, P. L. O., 2022. *Desenvolvimento de um Sistema Híbrido Fotovoltaico/Térmico para Geração de Energia Elétrica e Aquecimento de Água utilizando Termossifões*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Mantelli, M. B. H., 2021. “Thermosyphons and heat pipes: theory and applications”. *Springer Nature*, 429 p.
- Reay, D. A., Kew, P. A., McGLEN, R. J., 2014. “Heat pipe: theory, design and applications”. *Butterworth-Heinemann*, United Kingdom, 397 p.
- Zohuri, B., 2016. “Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management”. *Springer Nature*, 539 p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.