

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TERMOSSIFÃO PARA APLICAÇÃO EM UM COLETOR SOLAR À VÁCUO DE ALTA PRESSÃO

Rogério de Oliveira Souza, rogerio.2016@alunos.utfpr.edu.br¹
Victor Vaurek Dimbarre, victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br¹
Guilherme Antonio Bartmeyer, gabartmeyer@hotmail.com¹
Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@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 (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa, Av. Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa/PR, 84.017-220

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Curitiba, Rua Deputador Heitor Alencar Furtado, 500, Ecoville, Curitiba/PR, 81.280-340

Resumo. Termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que atingem altas taxas de transferência de calor com pequenas diferenças de temperatura utilizando o calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho. Neste trabalho é executada uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão construído para a aplicação em um coletor solar de tubos à vácuo de alta pressão. O termossifão possui 1.550mm de comprimento do evaporador, 70mm de seção adiabática e 50mm de comprimento do condensador. O fluido de trabalho foi a água destilada com uma razão de preenchimento de 52%. O termossifão foi arrefecido à água com o auxílio de um banho ultratermostatizado e o evaporador foi aquecido com um resistor elétrico. Os testes experimentais foram executados para vazões de 0,75L/min e 1,00L/min da água de arrefecimento e com potências de 40W a 80W dissipadas no evaporador. O termossifão foi testado a uma inclinação de 25° da horizontal. Os resultados mostraram que o termossifão operou conforme esperado e que a temperatura de operação é menor para a vazão de 1,00L/min.

Palavras chave: Tubo de Calor. Coletor Solar. Experimental. Energia Solar.

Abstract. Thermosyphons are passive devices of heat transfer that achieve high heat transfer rates with small temperature differences using the latent heat of vaporization from its working fluid. In this work, an experimental investigation of the thermal performance of a thermosyphon built for application in a high-pressure vacuum tube solar collector is performed. The thermosyphon has 1,550mm of evaporator length, 70mm of adiabatic section and 50mm of condenser length. The working fluid was distilled water with a 52% filling ratio. The thermosyphon was water cooled with the help of a thermostated bath and the evaporator was heated with an electrical resistor. The experimental tests were performed for 0.75 and 1.00L/min flow rates of cooling water and 40 to 80W powers dissipated in the evaporator. The thermosyphon was tested at a 25° horizontal inclination. The results showed that the thermosyphon operated as expected and the operating temperature is lower for a 1.00L/min flow rate.

Keywords: Heat Pipe. Solar Collector. Experimental. Solar Energy.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é um dos recursos mais abundantes disponíveis na natureza e é uma energia limpa e renovável que contribui com a redução dos danos causados por fontes de energia poluentes. Uma das formas de se aproveitar essa energia é através do uso de coletores solares para o aquecimento de água (Espírito Santo, 2017).

Em aplicações residenciais, os coletores solares geralmente funcionam como fonte principal de energia no aquecimento da água, juntamente com um sistema auxiliar que pode funcionar com energia elétrica ou com queimadores a gás que suprem a demanda energética, caso necessário (Marquardt e Borges, 2015). Dentre os coletores solares disponíveis no mercado se encontram os coletores solares assistidos por termossifões, também conhecidos como coletores solares de tubos à vácuo de alta pressão. De acordo com Kalogirou (2003), esses coletores solares consistem em um tubo de calor e/ou termossifão dentro de um tubo de vácuo selado, utilizando de uma superfície otimizada para a absorção de irradiação solar e de um mecanismo para a diminuição dos efeitos de convecção e condução na perda de calor do dispositivo.

Chun *et al.* (1999) destacam o impacto do uso de tubos de calor e/ou termossifões em coletores solares de tubos à vácuo de alta pressão, ressaltando as propriedades de altas taxas de troca térmica em pequenos gradientes e em pequenas seções, mostrando o impacto de diferentes formatos, tipos, fluidos de trabalho no desempenho dos dispositivos passivos de transferência de calor nesses coletores solares.

Um termossifão é um dispositivo passivo de transferência de calor que opera através da mudança de fase do seu fluido de trabalho, atingindo altas taxas de transferência de calor com pequena diferença de temperatura (Krambeck *et al.*, 2020). Ele é um tubo fechado formado por três seções diferentes, com características próprias, chamadas de evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador é a seção que recebe calor de uma fonte externa e se situa na parte inferior do termossifão, o calor recebido faz com que o fluido de trabalho se transforme em vapor que, devido à diferença de pressão, irá subir para a região superior do tubo. A região superior do tubo é conhecida como condensador, onde o vapor perde calor para o meio externo e se condensa nas paredes internas do tubo. O líquido condensado flui novamente para a região do evaporador com o auxílio da gravidade, completando o ciclo de mudança de fase do fluido de trabalho. A seção adiabática se encontra entre o evaporador e o condensador e se caracteriza por não haver troca de calor entre o fluido de trabalho e o ambiente externo. Em alguns casos não há seção adiabática no termossifão (Santos *et al.*, 2017; Krambeck *et al.*, 2021). A Figura 1 mostra um diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão. Maiores informações sobre os termossifões podem ser encontradas em Reay *et al.* (2014).

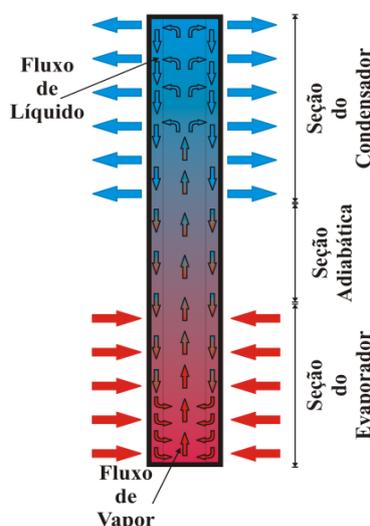


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão (Krambeck *et al.*, 2019)

Nesse contexto, no presente trabalho foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão construído visando a aplicação em coletores solares de tubos à vácuo de alta pressão para o aquecimento de água em residências.

2. MATERIAIS & MÉTODOS

2.1. Montagem do termossifão utilizado

O método de construção e de testes do termossifão foi baseado nos procedimentos apresentados por Antonini Alves *et al.* (2018). O evaporador e a seção adiabática do termossifão foram construídos a partir de um tubo de cobre ASTM B75 com diâmetro interno de 7,35mm e diâmetro externo de 9,45mm. Para a construção do condensador foi utilizado um tubo de cobre ASTM B-75 com diâmetro interno de 11,90mm e diâmetro externo de 12,70mm. O evaporador possui um comprimento de 1.550mm, a seção adiabática possui um comprimento de 90mm e o condensador possui um comprimento de 50mm. O termossifão foi preenchido utilizando-se água destilada como fluido de trabalho, com uma taxa de preenchimento de 52% em relação ao volume total do evaporador.

Como mencionado anteriormente, o termossifão foi composto por um tubo correspondente ao evaporador e a seção adiabática, um tubo correspondente ao condensador, uma união entre estas duas seções, duas tampas e um capilar. Todos os componentes foram limpos com acetona, visando retirar quaisquer impurezas e sujidades presentes em suas superfícies e no interior dos tubos. Após essa etapa, os componentes foram submersos em um banho ultrassônico para garantir a limpeza e a qualidade dos processos subsequentes. Após o processo de limpeza, o termossifão foi montado por meio da brasagem da união dos tubos, das tampas e do capilar em uma das tampas que possuía um furo no centro. Nesse processo foi utilizado um maçarico portátil e estanho para garantir a união dos componentes. O teste de estanqueidade foi realizado após a montagem do termossifão para garantir a eficiência do processo de brasagem e evitar que houvessem vazamentos no dispositivo. Esse teste consiste em mergulhar o termossifão em um recipiente com água e bombear ar dentro do mesmo,

com o auxílio de uma bomba de deslocamento positivo manual. Se houvessem falhas no processo de brasagem o ar bombeado dentro do termossifão faria com que formassem bolhas no local do defeito, nesse caso deve se repetir as etapas de limpeza e montagem do termossifão. Para o processo de evacuação do termossifão, foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV*. O capilar do termossifão foi conectado à bomba de vácuo com o auxílio de uma mangueira, utilizando graxa de vácuo *Dow Corning™* nas conexões, visando evitar vazamentos durante a evacuação. O processo durou oito horas para garantir o vácuo dentro do termossifão, feito isso, a mangueira foi obstruída com o auxílio de um *fôrceps* e a bomba desligada. O processo de preenchimento foi realizado logo após a evacuação, para isso foi utilizada uma bureta graduada, com resolução de 0,1mL. A bureta foi devidamente preenchida com água destilada e foram retiradas todas as bolhas de ar presentes na água. O termossifão foi conectado à bureta por meio do capilar e da mangueira utilizada para a evacuação, a válvula da bureta foi aberta e o fluxo de água foi controlado cuidadosamente pela abertura do *fôrceps* que obstruía a mangueira. Após o preenchimento com a quantidade de fluido de trabalho estabelecida o fluxo de água foi interrompido e o capilar foi prensado com um alicate de pressão para selar permanentemente o termossifão. O capilar foi ainda brasado com estanho, completando a vedação do mesmo.

2.2. Montagem para execução dos testes experimentais

Para o aquecimento da água através do condensador do termossifão, simulando a passagem pelo *manifold* de um coletor solar de tubos à vácuo de alta pressão, foi construída uma seção de testes envolvendo o condensador do dispositivo conforme mostrado na Figura 2. Para tal, foram utilizados tubos de PVC e conexões hidráulicas. O termossifão foi inserido em um furo feito no centro do *cap* soldável, que foi preenchido com resina poliéster, determinando a área de seção adiabática do termossifão e fixando o *cap* no dispositivo como mostrado na Figura 2 (a). As demais conexões foram montadas como mostrado na Figura 2 (b), utilizando seções de tubos PVC e silicone para vedar as junções entre conexões.

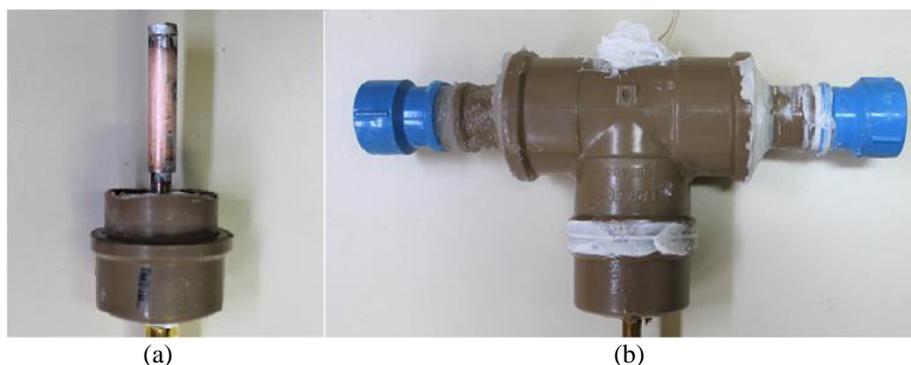


Figura 2. Sistema de arrefecimento do condensador do termossifão

O aparato experimental utilizado para os testes foi composto por um sistema de aquisição de dados *Agilent™ 34970A* com um multiplexador *Agilent™ 34901A*, um *laptop Dell™*, *nobreaks NHS™* e *APC™*, uma fonte de alimentação *Politem™ 16E*, um banho ultratermostatizado *SOLAB™ SL-130* e um rotâmetro de área variável *Omega Engineering™ FL-2051* com válvula reguladora, dispostos em uma bancada experimental e mostrados na Figura 3.

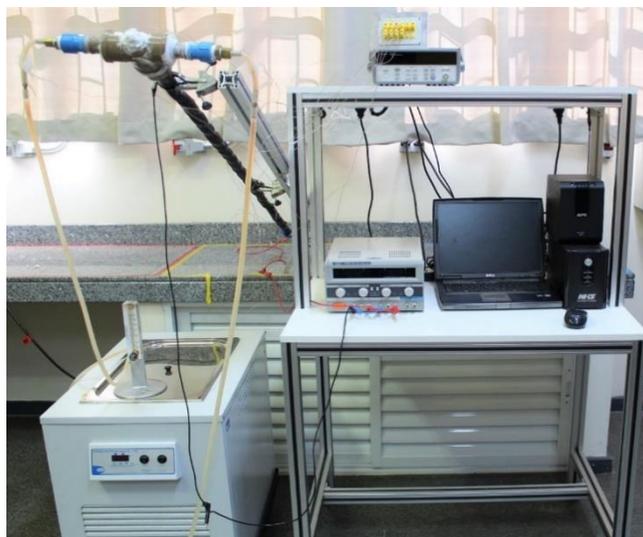


Figura 3. Aparato experimental

O termossifão foi protegido por fita termossensível *Kapton*TM, a irradiação solar foi simulada utilizando uma fita resistiva de liga de níquel-cromo *Omega Engineering*TM enrolada na região do evaporador, todas as regiões do termossifão foram protegidas com isolamento térmico aeronáutico e uma camada de poliuretano, os dados de temperatura foram obtidos utilizando termopares do tipo K *Omega Engineering*TM calibrados e fixados por fitas termossensível *Kapton*TM e isolante *3M*TM. Foram utilizados seis termopares no evaporador, distribuídos de forma equidistante, um termopar na seção adiabática, um termopar no centro do condensador, um termopar na entrada de água e um termopar na saída, após trocar calor com o condensador do termossifão. Os termopares foram distribuídos conforme a Figura 4, com o termopar do condensador do termossifão localizado no interior do sistema de arrefecimento.

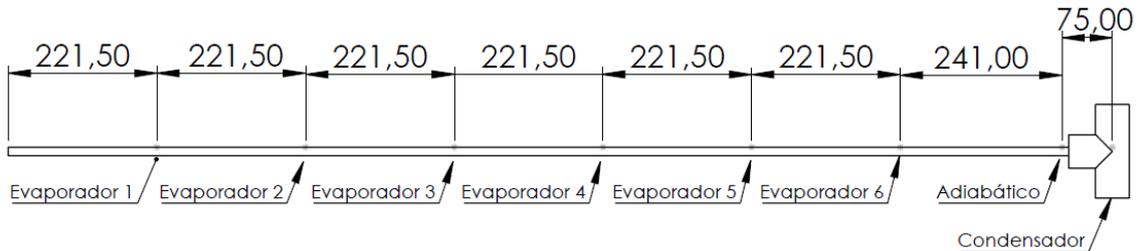


Figura 4. Distribuição dos termopares no termossifão [mm]

O arrefecimento do termossifão foi feito por um escoamento de água na seção de testes que simula o *manifold* de um coletor solar de alta pressão através de um banho ultratermostatizado a uma temperatura de $18,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e vazões volumétricas de 0,75L/min e 1,00L/min, medido pelo rotâmetro de área variável e transportado por mangueiras de silicone. A temperatura ambiente foi mantida por um sistema de ar condicionado *Carrier*TM em $18,0^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, buscando igualar a temperatura do banho ultratermostatizado. O termossifão foi fixado na bancada de perfil de alumínio estrutural por meio de garras, possibilitando diferentes configurações de inclinação. Os testes experimentais foram executados em 25° (correspondendo a latitude da cidade de Ponta Grossa/PR: $25^{\circ}05'42''$ Sul). As cargas térmicas foram obtidas por meio do efeito *Joule* através da fita resistiva utilizando as fontes de potência para controlar a potência. Os ensaios foram realizados alterando as cargas térmicas de 40W, 60W e 80W. A permanência em cada potência foi de aproximadamente 40 (quarenta) minutos, de forma que o regime *quasi* permanente fosse alcançado. Os dados foram registrados a cada 10 segundos pelo *software Agilent*TM *Benchlink Data Logger 3*. A avaliação desses dados posteriormente permitiu o estudo do desempenho térmico do termossifão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

As distribuições de temperaturas para o teste experimental realizado com vazão de 1,00L/min são mostradas na Figura 5, enquanto as distribuições de temperaturas do teste experimental realizado com vazão de 0,75L/min são apresentadas na Figura 6. Em ambos os casos pode ser notado uma instabilidade nas temperaturas durante a primeira etapa dos testes experimentais, com uma potência de 40W sendo dissipada na resistência elétrica, pois o termossifão ainda não havia atingido a temperatura para promover a completa ebulição de seu fluido de trabalho.

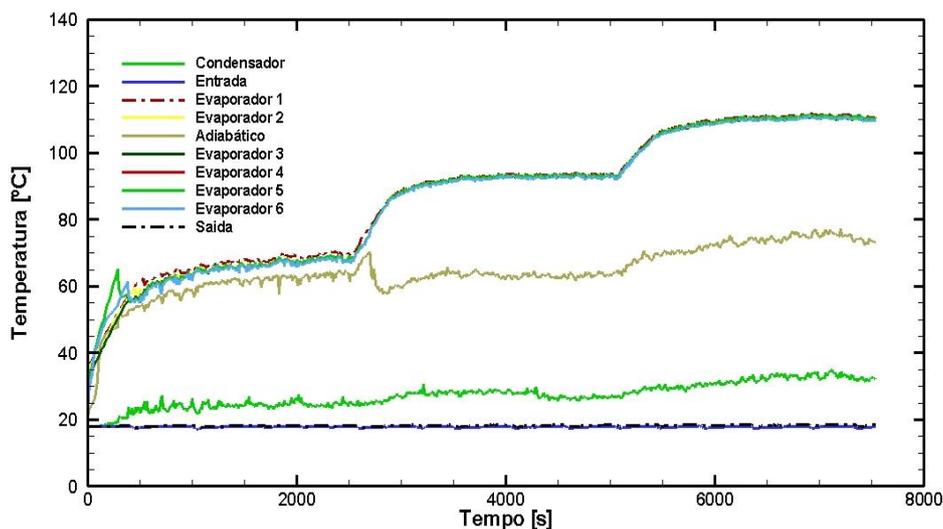


Figura 5. Distribuição de temperatura para vazão volumétrica de 1,00 L/min

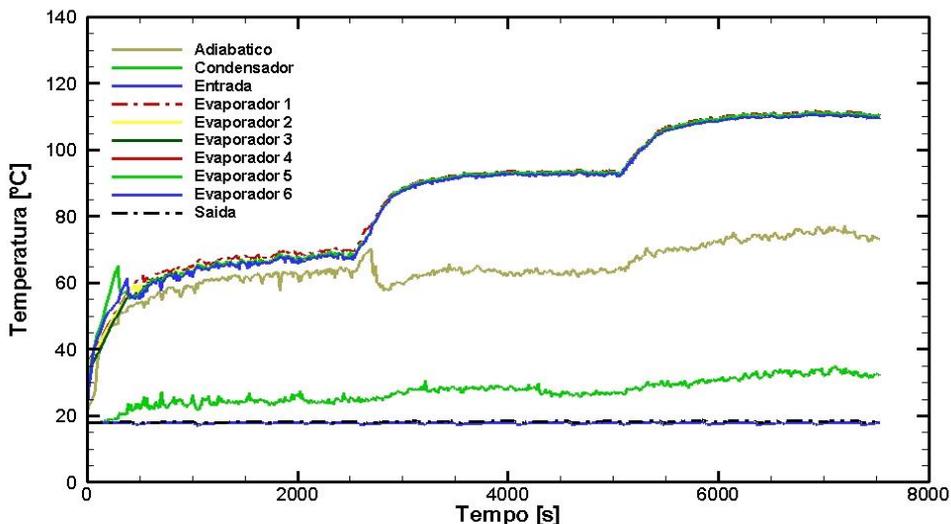


Figura 6. Distribuição de temperatura para vazão volumétrica de 0,75 L/min

A Figura 7 mostra o comportamento da temperatura de operação do termossifão em função da potência dissipada no resistor elétrico parametrizado pela vazão volumétrica de água de arrefecimento no condensador. A temperatura de operação é dada pela temperatura da seção adiabática do termossifão e é um dos parâmetros que pode ser usado para a comparação entre termossifões.

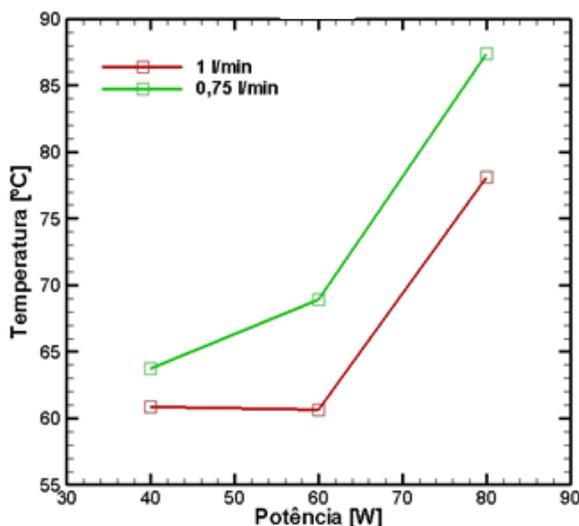


Figura 7. Temperatura de operação *versus* potência dissipada

A resistência térmica total de um termossifão, R_t , pode ser definida como a dificuldade do dispositivo em transferir calor de seu evaporador para o condensador e é um parâmetro para a avaliação de desempenho de termossifões. Quanto menor a resistência térmica do termossifão, melhor é o transporte de calor, aumentando a eficiência do dispositivo passivo de transferência de calor. A resistência térmica pode ser calculada dada pela Eq. (1):

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q} \quad (1)$$

sendo que, q é a dissipação de calor no termossifão, T_{evap} e T_{cond} são as temperaturas médias do evaporador e condensador, respectivamente.

A Figura 8 apresenta o comportamento da resistência térmica total do termossifão em função da potência dissipada no evaporador parametrizado pela vazão volumétrica de água de arrefecimento no condensador. Pode ser observado que com uma potência dissipada a 40W, o termossifão apresenta uma resistência térmica menor na vazão de 1,00L/min. Para as demais potências a resistência térmica do termossifão é menor com a vazão de 0,75L/min. Em ambos os casos, pode ser notado que a resistência térmica possui a tendência de diminuir conforme se aumenta a potência dissipada.

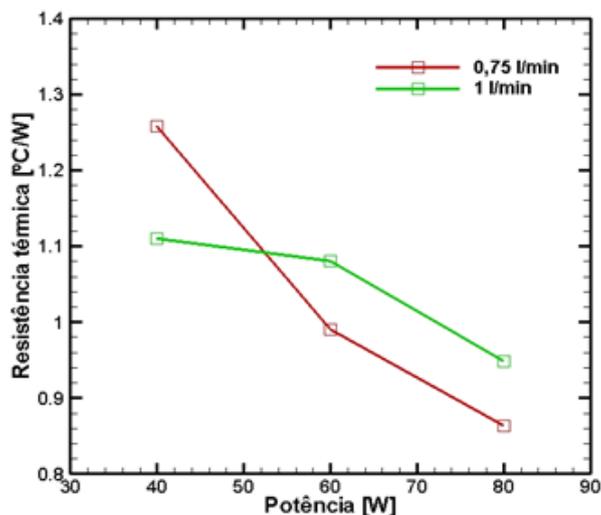


Figura 8. Resistência elétrica versus potência dissipada

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão arrefecido à água que pode ser aplicado em coletores solares de tubos à vácuo de alta pressão. O termossifão foi testado experimentalmente com vazões volumétricas de água de 0,75L/min e 1,00L/min em seu condensador em uma seção de testes que simula um *manifold* de coletores solares de alta pressão. Cada teste experimental foi executado com a potência dissipada no evaporador igual a 40W, 60W e 80W. Os resultados do desempenho térmico mostraram que para a vazão volumétrica de 1,00L/min o termossifão apresentou menores temperaturas de operação em todas as potências aplicadas no evaporador, porém a resistência térmica total é menor com o fluxo de 0,75L/min para as potências de 60W e 80W.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados ao CNPq, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR/Câmpus 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, 2018. p. 353-374.
- Espírito Santo, M., 2017. *Concepção e testes experimentais de um coletor solar assistido por termossifões*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Chun, W., Kang, Y.H., Kwak, H.Y., Lee, Y.S., 1999. "An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, p. 807-817.
- Kalogirou, S., 2003. "The potential of solar industrial process heat applications". *Applied Energy*, Vol. 76, p. 337-361.
- Krambeck, L., Bartmeyer, G.A., Fusão, D., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2020. "Experimental research of capillary structure technologies for heat pipes". *Acta Scientiarum. Technology (online)*, Vol. 42, e48189.
- Krambeck, L., Bartmeyer, G.A., Souza, D.O., Fusão, D., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2021. "Experimental thermal performance of different capillary structures for heat pipes". *Energy Engineering (Print)*, Vol. 118, p. 1-14.
- Krambeck, L., Nishida, F.B., Aguiar, V.M., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2019. "Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling". *Thermal Science*, Vol. 23, p. 1151-1160.
- Marquardt, L.S., Borges, V.Y.S., 2015. *Desenvolvimento de um coletor solar assistido por termossifões*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R.J., 2014. *Heat Pipe: Theory, Design and Applications*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam.
- Santos, P.H.D., Vicente, K.A.T., Reis, L.S., Marquardt, L.S., Antonini Alves, T., 2017. "Modeling and experimental tests of a copper thermosyphon". *Acta Scientiarum. Technology (online)*, Vol. 39, p. 59-68.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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