

Investigação experimental de um termossifão para aplicação em um coletor solar de alta pressão

Experimental investigation of a thermosyphon for application in a high-pressure solar collector

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. Este trabalho apresenta uma análise térmica de um termossifão construído para a aplicação em um coletor solar de tubos à vácuo de alta pressão. O termossifão possui 1.550 mm de comprimento do evaporador, 70 mm de seção adiabática e 50 mm 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 realizados para vazões de 1 L/min e 0,75 L/min da água de arrefecimento e com potências de 40 W a 80 W dissipadas no resistor. 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 L/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. This paper presents a thermal analysis of a thermosyphon built for application in a high-pressure vacuum tube solar collector. The thermosyphon has 1,550 mm of evaporator length, 70 mm of adiabatic section and 50 mm 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 1 L/min and 0,75 L/min flow rates of cooling water and 40 to 80 W powers dissipated in the resistor. 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 L/min flow rate.

KEYWORDS: Heat pipe. Solar collector. Experimental. Solar energy.

Rogério de Oliveira Souza
rogerio.2016@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Thiago Antonini Alves
antonini@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Pedro Leineker Ochoski Machado
pedmac@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Victor Vaurek Dimbarre
victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 04 set. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

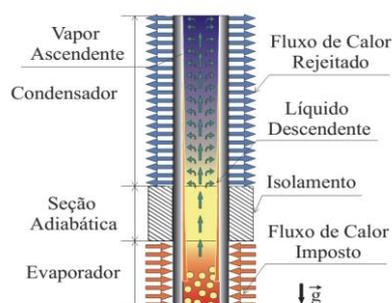
A energia solar é um dos recursos mais abundantes disponíveis na natureza e é uma energia limpa e renovável que contribui com a redução dos danos causados por fontes de energia poluentes. Uma das formas de se aproveitar essa energia é através do uso de coletores solares para o aquecimento de água (ROSA, 2012).

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; BORGES, 2015). Dentre os coletores solares disponíveis no mercado se encontram os coletores solares assistidos por termossifões, também conhecidos como coletores solares à vácuo. Este tipo de coletor utiliza termossifões para aquecer a água, com o intuito de ser mais eficiente que outros tipos de coletores, porém possui custo elevado.

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 (REAY *et al.*, 2014).

Um termossifão 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 (MANTELLI, 2013). A Figura 1 mostra um diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão.

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um termossifão



Fonte: Adaptado de Mantelli (2013).

Nesse contexto, no presente trabalho de iniciação científica foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão construído visando a aplicação em coletores solares para o aquecimento de água.

MATERIAIS E MÉTODOS

O evaporador e a seção adiabática do termossifão foram construídos a partir de um tubo de cobre ASTM B75, Liga 122, com diâmetro interno de 7,35 mm e diâmetro externo de 9,45 mm. Para a construção do condensador foi utilizado um tubo de cobre ASTM B-75, Liga 122, com diâmetro interno de 11,90 mm e diâmetro externo de 12,70 mm. O evaporador possui um comprimento de 1.550 mm, a seção adiabática possui um comprimento de 90 mm e o condensador possui um comprimento de 50 mm. O termossifão foi preenchido utilizando-se água destilada como fluido de trabalho, com uma taxa de preenchimento de 52%.

O método de construção do termossifão foi baseado nos procedimentos apresentados por Antonini Alves *et al.* (2018). 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 esta etapa os componentes foram submetidos a um banho ultrassônico *Kondentech*TM, com exceção do tubo de maior comprimento, 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. Neste processo foi utilizado um maçarico portátil e estanho para garantir a união dos componentes.

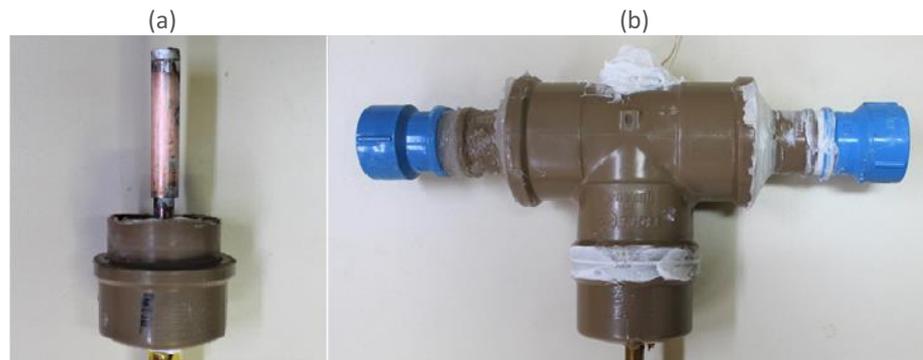
O teste de estanqueidade foi realizado após a montagem do termossifão para garantir a eficiência do processo de brasagem e evitar que houvessem vazamentos no dispositivo. Este teste consiste em mergulhar o termossifão em um recipiente com água e bombear ar dentro do mesmo, com o auxílio de uma bomba 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, neste 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*TM i260SV. O capilar do termossifão foi conectado à bomba de vácuo com o auxílio de uma mangueira, utilizando graxa de vácuo *Dow Corning*TM nas conexões, visando evitar vazamentos durante a evacuação. O processo durou 8 (oito) horas para garantir o vácuo dentro do termossifão, após, a mangueira foi obstruída com o auxílio de um fórceps e a bomba desligada.

O processo de preenchimento foi realizado logo após a evacuação, para isso foi utilizada uma bureta graduada, com resolução de 0,1 mL. 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 *fórceps* 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.

Para o aquecimento da água através do condensador do termossifão, foi construído uma seção envolvendo o condensador do dispositivo. Para tal, foram utilizados tubos 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 soldáveis e silicone para vedar as junções entre conexões.

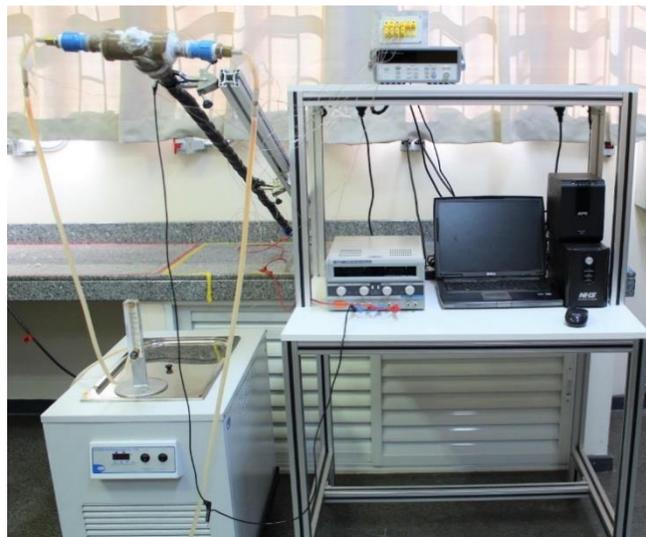
Figura 2 – *Cap* fixado no termossifão (a); Sistema de arrefecimento do termossifão (b)



Fonte: Autoria Própria (2020).

O aparato experimental utilizado para os testes foi composto por um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais *Agilent™* 34901A, um *laptop Dell™*, um *nobreak NHS™*, um *nobreak APC™*, uma fonte de alimentação *Politerm™* 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



Fonte: Autoria Própria (2020).

Para a avaliação do desempenho térmico do termossifão estudado, foram utilizados termopares do tipo K *Omega Engineering™*, que foram fixados na superfície do termossifão e posicionados de modo a medir a temperatura da água antes e depois do contato com o condensador do termossifão. 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. Os termopares foram distribuídos conforme a Figura 4, com o termopar do condensador localizado no interior do sistema de arrefecimento.

Figura 4 – Distribuição dos termopares no termossifão

Evaporador 1	Evaporador 2	Evaporador 3	Evaporador 4	Evaporador 5	Evaporador 6	Adiabático	
22,15	22,15	22,15	22,15	22,15	22,15	24,1	7,5

Fonte: Autoria própria (2020).

O aquecimento do termossifão ocorreu através do uso de uma resistência elétrica *Omega Engineering*TM, ligada a fonte de alimentação. Para evitar perdas de calor da resistência para o ambiente, foi utilizado isolamento térmico aeronáutico *3M*TM revestido de uma camada de polietileno em toda a extensão do evaporador e na seção adiabática que não estava revestida pela resina poliéster.

A análise térmica do termossifão foi realizada para três níveis de potência dissipada na resistência elétrica e para duas vazões volumétricas de água no condensador. O termossifão foi testado em uma inclinação de 25° em relação à horizontal, ângulo correspondente à inclinação utilizada em coletores solares na cidade de Ponta Grossa no estado do Paraná.

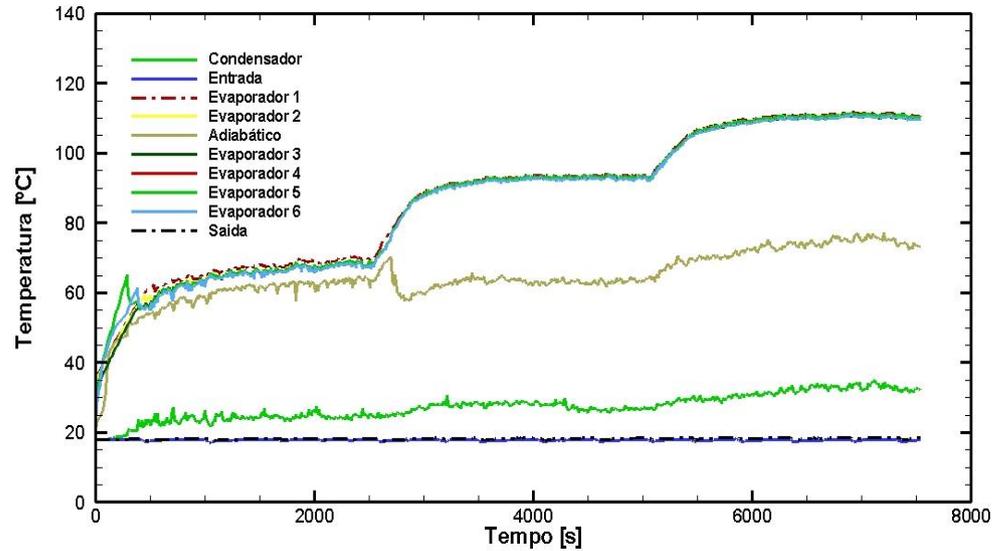
O banho ultratermostatizado foi ligado a vazão de água definida em 1 L/min. Simultaneamente foi iniciado o registro das temperaturas indicadas pelos termopares e a fonte de alimentação foi ligada na potência de 40 W. Após 40 (quarenta) minutos, os termopares haviam apresentado valores constantes de temperatura e o procedimento foi repetido com as potências de 60 W e 80 W sendo dissipadas pela resistência elétrica. Após a realização dos testes, todo o procedimento foi repetido para uma vazão de água de 0,75 L/min.

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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

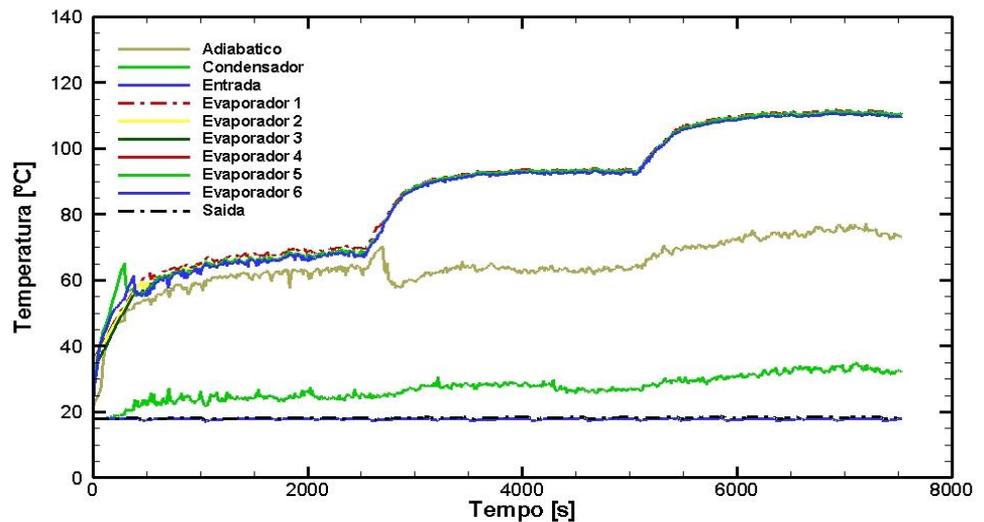
As distribuições de temperaturas para o teste experimental realizado com vazão de 1 L/min são mostradas na Figura 5, enquanto as distribuições de temperaturas do teste experimental realizado com vazão de 0,75 L/min são apresentadas na Figura 6. Em ambos os casos pode ser percebido uma instabilidade nas temperaturas durante a primeira etapa do teste experimental, com uma potência de 40 W 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 temperaturas para vazão de 1 L/min



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – Distribuição de temperaturas para vazão de 0,75 L/min



Fonte: Autoria própria (2020).

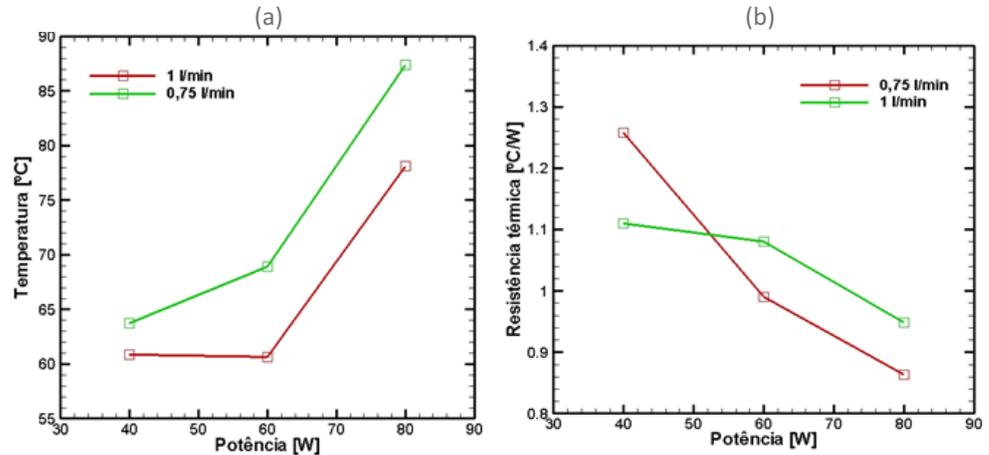
A Figura 7 (a) mostra a temperatura de operação do termossifão, para todas as faixas de potência dissipada no resistor e de vazão volumétrica de água de arrefecimento no condensador. A temperatura de operação é dada pela temperatura da seção adiabática do termossifão e é um dos parâmetros que pode ser usado para a comparação entre termossifões.

A resistência térmica total de um termossifão 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 termossifões. Quanto menor a resistência térmica do termossifão, melhor é o transporte de calor, aumentando a eficiência do dispositivo. A resistência térmica é dada pela Eq. (1):

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

A Figura 7 (b) apresenta os resultados obtidos no cálculo da resistência térmica do termossifão estudado, de acordo com os parâmetros experimentais utilizados.

Figura 7 – Temperaturas de operação (a); Resistência Térmica total (b)



Fonte: Autoria própria (2020).

Pode ser observado que com uma potência dissipada a 40 W, o termossifão apresenta uma resistência térmica menor na vazão de 1 L/min. Para as demais potências a resistência é menor com a vazão de 0,75 L/min. Em ambos os casos, pode ser percebido que a resistência térmica possui a tendência de diminuir conforme se aumenta a potência dissipada.

CONCLUSÕES

O presente trabalho de iniciação científica apresentou uma análise térmica de um termossifão arrefecido à água, para ser aplicado em aquecedores solares de água. O termossifão foi analisado com uma vazão de água de 1 L/min e 0,75 L/min, em seu condensador. Cada teste experimental foi realizado com a potência dissipada no evaporador igual a 40W, 60W e 80W.

A análise térmica foi feita através do registro da temperatura da superfície do termossifão, obtido por meio de termopares do tipo K. Os resultados mostraram que para a vazão de 1 L/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 0,75 L/min para as potências de 60 W e 80 W.

Devido à pandemia do novo coronavírus, SARS-CoV-2, causador da doença COVID-19, não foi possível a aplicação do termossifão em um coletor solar de tubo à vácuo de alta pressão.

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.

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*. London: InTech, 2018. p. 353-374.

MANTELLI, M. B. H. Thermosyphon technology for industrial applications. *In: VASILIEV, L. L.; KAKAÇ, S. (orgs.). Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications*. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 411-464.

MARQUARDT, L. S.; BORGES, V. Y. S. **Desenvolvimento de um coletor solar assistido por termossifões**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10162/1/CT_DAMEC_2016_2_48.pdf. Acesso em: 08 out. 2020.

REAY, D. A.; KEW, P. A.; MCGLEN, R. J. **Heat pipes: theory, design and applications**. 6. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/62073>. Acesso em: 08 out. 2020.