

SELEÇÃO DE TERMOSSIFÕES PARA APLICAÇÃO EM UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO

Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@aluns.utfpr.edu.br¹

Vitor Otávio Ochoski Machado, vitmac@alunos.utfpr.edu.br²

Victor Vaurek Dimbarre, victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br¹

Romeu Miqueias Szmoski, rmszmoski@gmail.com¹

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, CEP 84.017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Curitiba, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville, CEP 81.280-340, Curitiba, PR, Brasil

Resumo. Um termossifão é um tubo de calor assistido por gravidade usado para melhorar a transferência de calor em várias aplicações. Neste trabalho foi realizada uma análise térmica de três termossifões distintos para aplicação em um sistema híbrido fotovoltaico/térmico. Os termossifões foram fabricados a partir de tubos de cobre possuindo comprimento total de 840mm. O fluido de trabalho utilizado foi água destilada com uma razão de preenchimento de 50% do volume do evaporador. O evaporador tem comprimento de 650mm, enquanto a seção adiabática e o condensador têm comprimentos de 80mm e 110mm, respectivamente. O condensador foi resfriado por convecção forçada com água, a seção adiabática foi isolada com fibra de vidro e o evaporador foi aquecido por um resistor elétrico. Testes experimentais foram realizados para uma carga de calor de 80 a 140W em uma posição a 25° da horizontal (evaporador acima do condensador). A análise térmica foi baseada na distribuição de temperaturas ao longo dos dispositivos, sua resistência térmica e eficiência energética. O termossifão B, que possui maior diâmetro, apresentou melhores resultados em todos os quesitos da análise térmica nas condições testadas, se mostrando assim a melhor escolha entre os dois termossifões para compor um sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

Palavras chave: Termossifão. Energia Solar. Sistema Híbrido Fotovoltaico/Térmico.

Abstract. A thermosyphon is a gravity-assisted heat pipe used to improve heat transfer in various applications. In this work, a thermal analysis of three different thermosyphons for application in a hybrid photovoltaic/thermal system was performed. Thermosyphons were manufactured from copper tubes having a total length of 840mm. The working fluid used was distilled water with a filling rate of 50% of the evaporator volume. The evaporator has a length of 650mm, while the adiabatic section and the condenser have lengths of 80mm and 110mm, respectively. The condenser was cooled by water forced convection, the adiabatic section was insulated with fiberglass, and the evaporator was heated by an electric resistor. Experimental tests were performed for a heat load of 80 to 140W in a position at 25° from the horizontal (evaporator above the condenser). The thermal analysis was based on the distribution of temperatures throughout the devices, their thermal resistance and energy and energy efficiency. The thermosyphon B, which has a larger diameter, performed better in all the parameters of the thermal analysis in the tested conditions, showing itself as the best choice between the two thermosyphons for the application of thermal control in photovoltaic panels.

Keywords: Thermosyphon. Solar energy. Hybrid Photovoltaic/Thermal System.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas acadêmicas e políticas ambientais evidenciam a busca por novas fontes e tecnologias de exploração de energias renováveis, substituindo o uso de fontes com elevados índices de degradação ambiental (Adams *et al.*, 2018). Dentre as fontes renováveis destaca-se a energia solar, que consiste no aproveitamento da luz e do calor fornecido pela radiação solar para geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, ou energia térmica em coletores solares (Kabir *et al.*, 2018). Apesar de a energia solar possuir, teoricamente, potencial para suprir a demanda energética global por completo, sua participação na matriz energética brasileira no ano de 2019 representou apenas 0,8% do total de energia gerado, porém apresentando um crescimento de 90,2% em relação ao ano anterior (MME, 2019).

Essa baixa contribuição está muito relacionada à eficiência dos dispositivos utilizados para o aproveitamento dessa energia, como por exemplo painéis fotovoltaicos. Fatores como a temperatura superficial do painel fotovoltaico influenciam diretamente em seu desempenho em níveis que dependem das características do painel fotovoltaico, como sua potência máxima, área de superfície e eficiência. Estudos realizados com um painel fotovoltaico de potência nominal de 20W indicam que esse possui um coeficiente de temperatura de $0,9\%/^{\circ}\text{C}$, ou seja, a cada acréscimo de 1°C em sua temperatura superficial, ocorre um decréscimo de $0,9\%$ em sua eficiência energética (Hallal *et al.*, 2020).

Nesse sentido, diversos estudos estão sendo realizados de forma a controlar a temperatura de painéis fotovoltaicos. Dentre esses estudos, Chow *et al.* (2009) investigaram a influência do uso ou não de uma camada de vidro sobre as células solares e Hallal *et al.* (2020) investigaram o uso de ventiladores para resfriamento dos painéis fotovoltaicos. Tubos de calor e/ou termossifões também foram incorporados a painéis fotovoltaicos, como pode ser observado em Akbarzadeh & Wadowski (1996), Pei *et al.* (2010) e Hu *et al.* (2016). Ao aplicar termossifões em painéis fotovoltaicos existem possibilidades de, além de realizar o resfriamento do painel fotovoltaico, utilizar o calor dissipado pelos painéis fotovoltaicos para aquecer um fluido de trabalho, transformando-o em um sistema híbrido fotovoltaico/térmico, elevando ao mesmo tempo a eficiência energética e exérgica do painel fotovoltaico.

Nesse contexto, o presente trabalho visa realizar a seleção de um termossifão para aplicação em um sistema híbrido fotovoltaico/térmico. Para isso, uma comparação entre dois termossifões com diferentes dimensões será realizada a partir de uma análise térmica experimental, considerando a distribuição de temperatura ao longo do dispositivo e a sua resistência térmica.

2. TERMOSSIFÕES

Um termossifão, também denominado tubo de calor assistido por gravidade, é um dispositivo passivo de transferência de calor com condutividade térmica efetiva elevada. É um dispositivo com um ciclo fechado que pode transferir calor de forma rápida e efetiva entre duas fontes (uma quente e outra fria). É composto por um tubo evacuado e preenchido por um fluido de trabalho, transportando energia na forma de calor entre seus extremos a partir do calor latente de vaporização, relacionado com a evaporação e condensação do fluido de trabalho (Reay *et al.*, 2014; Zohuri, 2016).

Esse dispositivo passivo é composto por três regiões com diferentes funções em sua operação e seu funcionamento está ilustrado na Figura 1. O evaporador, região inferior do tubo, é a região em que está contido o fluido de trabalho. Essa região fica em contato com uma fonte quente e, ao absorver calor, o fluido de trabalho inicia o processo de evaporação. Devido ao fato de o interior do tubo ser evacuado, o processo de evaporação ocorre a uma temperatura menor do que ocorreria à pressão atmosférica, uma vez que a pressão no interior do dispositivo atinge valores extremamente baixos em relação ao ambiente externo. Ao evaporar, o vapor do fluido de trabalho, devido à gradientes de pressão, desloca-se pelo centro do tubo até atingir a região superior, denominada de condensador. O condensador fica em contato com uma fonte fria, podendo ser um escoamento de fluido frio, por exemplo. Nessa região o calor absorvido no evaporador e carregado pelo vapor do fluido de trabalho é dissipado para o ambiente externo, ocasionando a condensação do vapor de fluido. Devido à ação da gravidade, o fluido de trabalho condensado retorna à região do evaporador escoando pelas paredes do tubo do termossifão, fechando o ciclo termodinâmico. Entre o evaporador e o condensador está localizada a seção adiabática, uma seção transitória entre essas duas regiões e em que não há troca de calor com o ambiente externo, podendo estar ausente dependendo da aplicação (Reay *et al.*, 2014; Zohuri, 2016; Krambeck *et al.*, 2019).

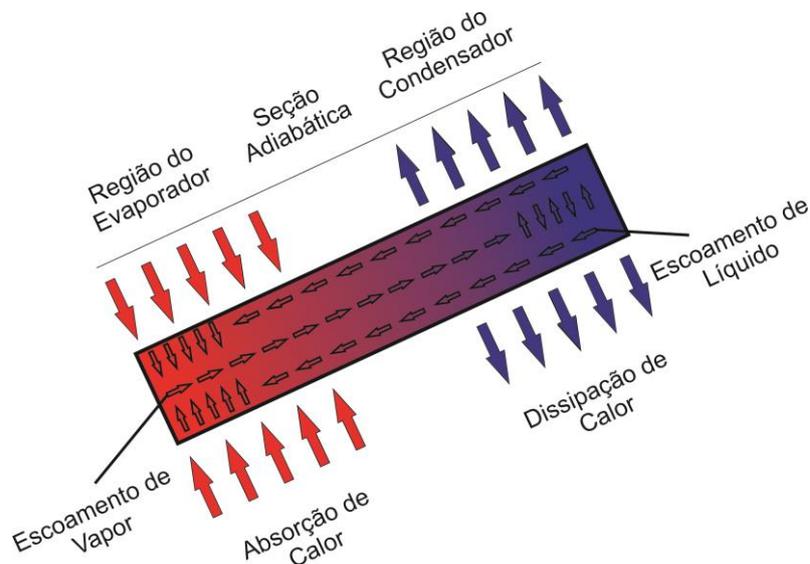


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão

As aplicações dos termossifões são diversas, podendo ser utilizados para recuperação de calor em um sistema de gases de exaustão ou pré-aquecendo o ar em trocadores de calor de caldeira. Também são amplamente utilizados em locais de frio extremo para troca de calor com a parte mais quente do solo, podendo auxiliar na manutenção de estradas em operação no inverno e até em ambientes aquecidos. Além disso, em regiões frias contendo linhas de transporte de óleo, os termossifões atuam captando o calor do óleo do tubo e transferindo-o para o ambiente externo, reduzindo o calor que a base recebe e transfere para o solo, evitando o degelo e a instabilidade da fundação. Os termossifões também são utilizados em coletores solares a vácuo, altamente eficazes e aplicáveis no aquecimento de água para uso diário, ambientes e também piscinas. Outra área de aplicação é a secagem e desidratação de produtos alimentícios e tecidos, além do resfriamento eletrônico (Krambeck *et al.*, 2020, 2021; Nishida *et al.*, 2020).

3. METODOLOGIA

Esta seção, apresenta os equipamentos e procedimentos utilizados para realização desse trabalho.

3.1. Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado nesse estudo é mostrado na Figura 2 e é composto por uma fonte de alimentação *Politerm™16E*, um sistema de aquisição de dados *Agilent™ 34970A* com um multiplexador de 20 canais *Agilent™ 34901A*, um banho ultratermostatizado *Solab™ SL-130*, um *laptop Dell™*, um *nobreak NHS™* e um medidor de vazão de área variável *Omega Engineering™ FL-2051* com válvula reguladora.

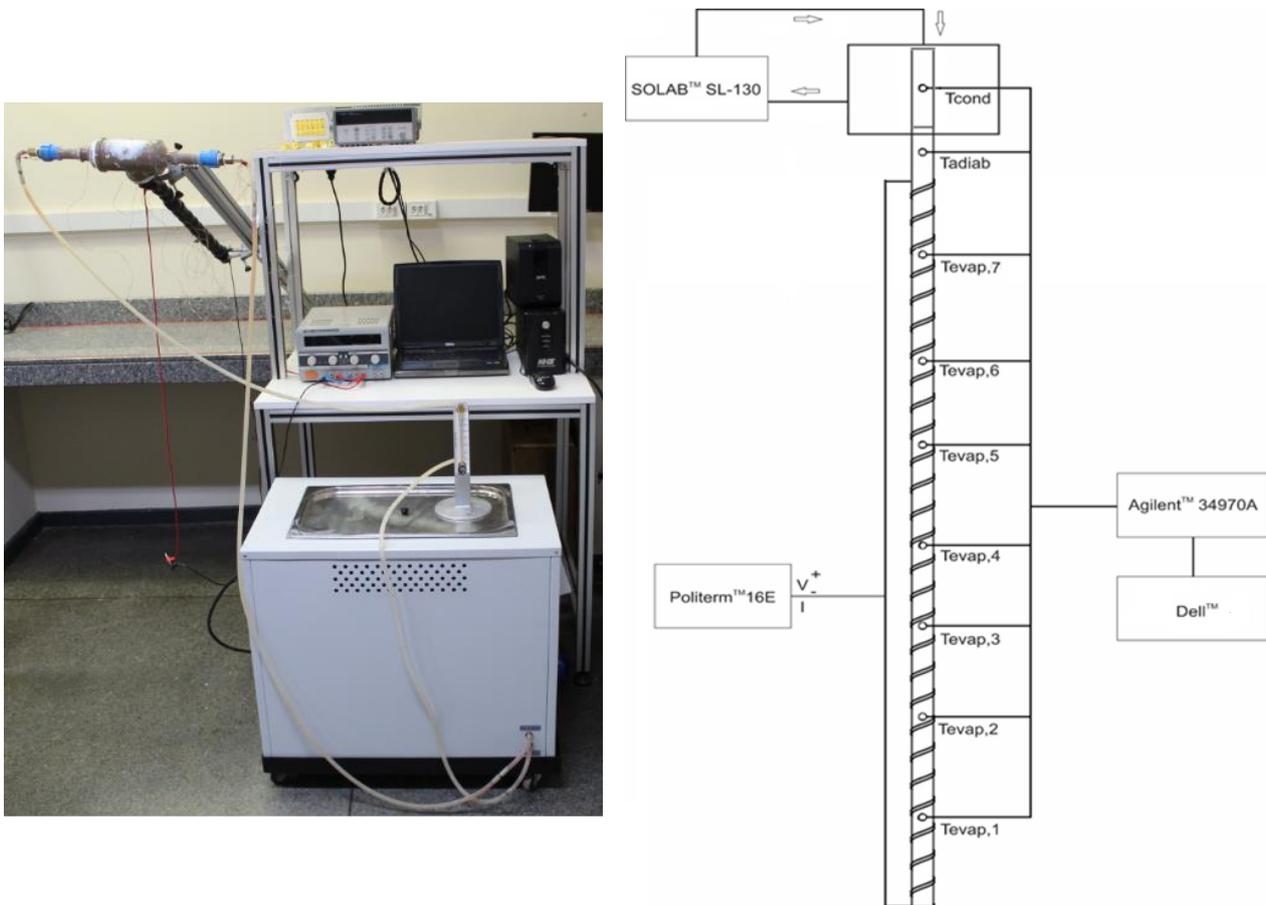


Figura 2. Aparato experimental

O comprimento total das regiões do evaporador e seção adiabática foram cobertas com uma fita *Kapton™* de alta condutividade térmica. Uma fita resistiva *Omega Engineering™* foi enrolada sobre a totalidade do evaporador e conectada à fonte de potência. O condensador foi posicionado no interior de um tê de PVC com 60mm de diâmetro que atua como um *manifold*. O tê, a partir de conexões e mangueiras de silicone, foi conectado ao banho ultratermostatizado, permitindo o escoamento de água sob essa região. Um total de 11 termopares do tipo K *Omega Engineering™* foram responsáveis pela aquisição de dados de temperatura durante os testes experimentais, sete igualmente espaçados no evaporador ($T_{evap,1}$,

$T_{evap,2}$, $T_{evap,3}$, $T_{evap,4}$, $T_{evap,5}$, $T_{evap,6}$, e $T_{evap,7}$), um na seção adiabática (T_{adiab}), um no condensador (T_{cond}), e um na entrada (T_{ent}) e outro na saída (T_{sai}) de água no tê de PVC.

3.2. Procedimento Experimental

Os termossifões foram fabricados a partir de tubos de cobre ASTM B75, possuindo comprimento total de 840 mm. O fluido de trabalho utilizado foi água destilada com uma razão de preenchimento de 50% do volume do evaporador. O evaporador tem comprimento de 650mm, enquanto a seção adiabática e o condensador têm comprimentos de 80mm e 110mm, respectivamente. A metodologia utilizada na construção dos termossifões (preparação, limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e enchimento com fluido de trabalho) foi baseada nas informações contidas em Antonini Alves *et al.* (2018). Os termossifões foram construídos com diferentes diâmetros em suas regiões. A Tabela 1 apresenta as dimensões dos três termossifões analisados.

Tabela 1. Dimensões dos termossifões

Termossifão	Evaporador		Seção adiabática		Condensador	
	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno
A	12,7mm	11,1mm	12,7mm	11,1mm	12,7mm	11,1mm
B	22,2mm	20,6mm	22,2mm	20,6mm	22,2mm	20,6mm

Considerando os testes experimentais, o evaporador foi aquecido pelo efeito *Joule* resultante da dissipação de potência das fontes de potência na fita resistiva. Cargas térmicas de 80 a 140W com passo de 20W foram utilizadas durante os testes. Um escoamento de água com vazão volumétrica de 0,8L/min sobre o condensador foi responsável pela dissipação de calor absorvido pelo termossifão, simulando seu funcionamento durante sua aplicação destinada. A água usada para o processo de resfriamento assim como a temperatura ambiente foram mantidas à $16,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ pelo banho ultratermostatizado e um sistema de ar condicionado *Rhemm*TM. As cargas térmicas foram aplicadas por um tempo de 40 minutos e os termossifões foram mantidos a uma inclinação de 25° com a horizontal (evaporador abaixo do condensador), correspondendo à latitude da cidade de Ponta Grossa/PR/Brasil: $25^\circ 05' 42''$ Sul.

Para a análise térmica foi considerada a distribuição de temperaturas dos termossifões analisados, sua temperatura de operação (T_{adiab}), queda de temperatura entre evaporador e condensador a partir da resistência térmica (R_{th} - Eq. (1)) e eficiência térmica (η_{th} - Eq. (2)). Tratando-se das equações, q representa a carga térmica aplicada, c_p o calor específico a pressão do fluido de resfriamento do condensador do termossifão e \dot{m}_a a vazão mássica de fluido sobre o condensador.

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

$$\eta_{th} = 100 \frac{\dot{m}_a c_p (T_{sai} - T_{ent})}{q}. \quad (2)$$

4. RESULTADOS

A distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão A é apresentada na Fig. 3, ao passo que os resultados obtidos para o termossifão B estão apresentados na Fig. 4.

Ambas as figuras apresentam o comportamento típico e esperado durante os testes de um termossifão. Inicialmente as temperaturas estão em equilíbrio, aumentando posteriormente devido à aplicação da carga térmica, e estabilizando novamente ao atingir o regime permanente.

Como é possível observar, as temperaturas na seção do evaporador foram maiores que na região adiabática, que por sua vez também foram maiores que as temperaturas na região do condensador, o que já era esperado. Além disso, a temperatura da água na saída foi maior do que na entrada durante todo o teste, mostrando coerência com o esperado.

No início do teste, durante a aplicação da carga térmica de 80W, verificam-se alguns picos de temperatura. Esses picos ocorrem pelo fato de que, no início do teste, a região do evaporador que contém o fluido de trabalho apresenta uma maior massa a ser aquecida, apresentando assim menores temperaturas do que a região do evaporador que não apresenta fluido de trabalho, já que os termossifões foram preenchidos com uma razão de preenchimento de 50%. A partir do momento em que se iniciam os processos de evaporação e condensação do fluido de trabalho, as temperaturas da região que apresenta os picos reduzem e começam a apresentar um equilíbrio.

Em geral, comparando as Figs. 3 e 4, observa-se que as temperaturas do termossifão B apresentaram uma estabilidade e consistência maior do que as do termossifão A. Além disso, para todas as cargas térmicas aplicadas, o termossifão B

apresentou menores temperaturas em todas as regiões, sendo um indício que esse dispositivo transfere a energia absorvida no evaporador de forma mais eficiente.

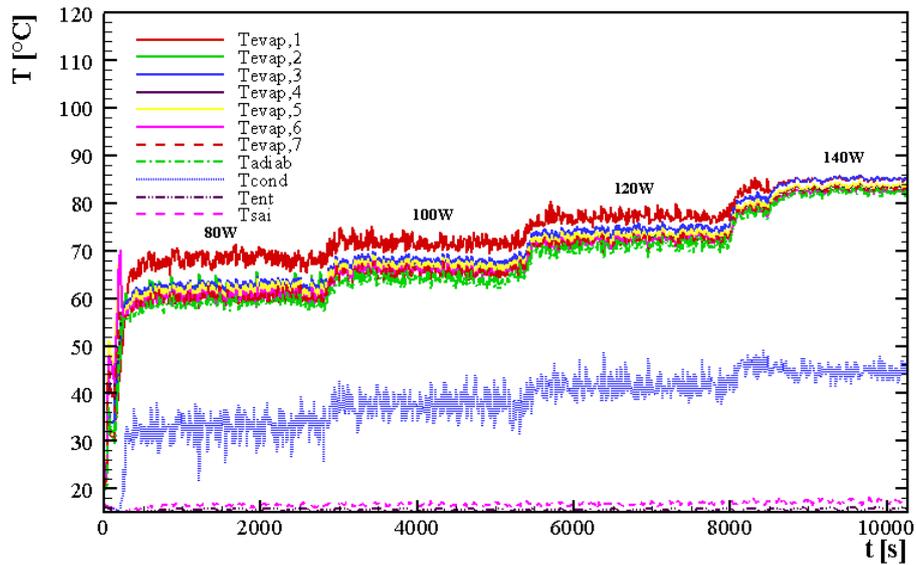


Figura 3. Distribuição de Temperaturas para o Termossifão A

A Fig. 5 apresenta a comparação da temperatura de operação entre os dois termossifões em função da carga térmica aplicada.

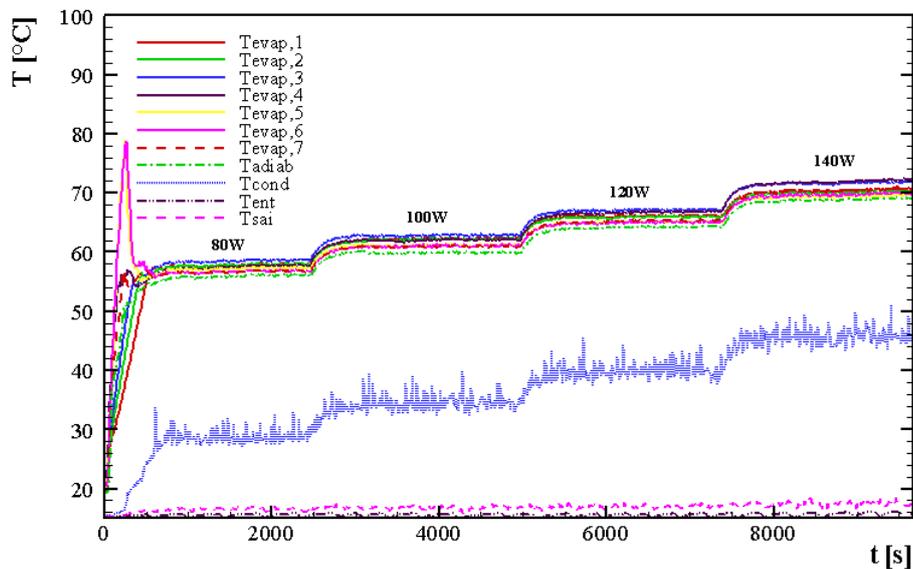


Figura 4. Distribuição de Temperaturas para o Termossifão B

Pela Fig. 5 verifica-se que para todas as cargas térmicas aplicadas o termossifão B apresentou menor temperatura de operação que o termossifão A. Isso é um grande indicador do que o termossifão A possui um pior desempenho térmico, já que é desejável que o dispositivo possa transferir a carga térmica aplicada com a menor temperatura possível, indicando maior eficiência de transferência de calor.

A Fig. 6 apresenta os valores de resistência térmica e sua incerteza experimental para os dois termossifões em função da carga térmica aplicada. A incerteza considerada foi de $1,27^{\circ}\text{C}$ para cada termopar, além de $0,003\text{V}$ e $0,003\text{A}$ para a fonte de potência e $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ para o medidor de vazão.

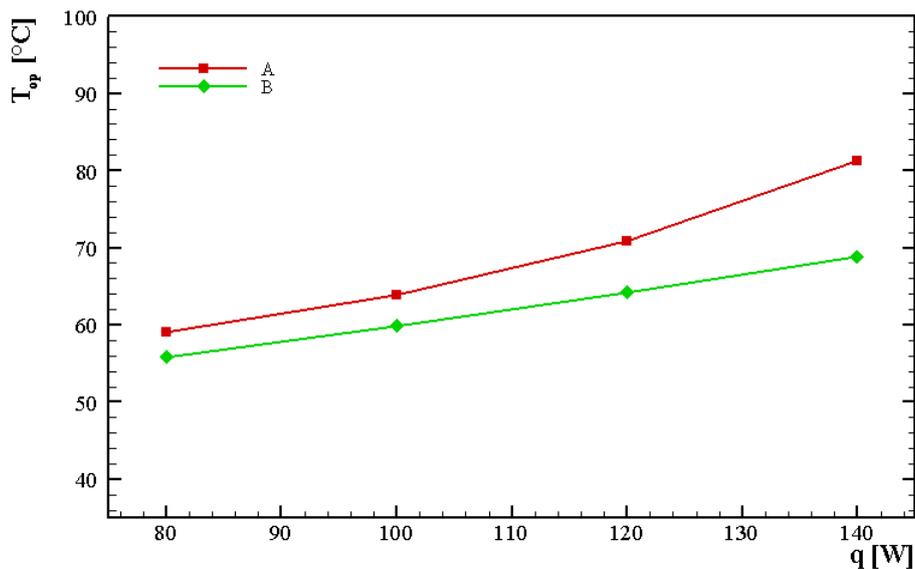


Figura 5. Temperatura de Operação em Função da Carga Térmica Aplicada

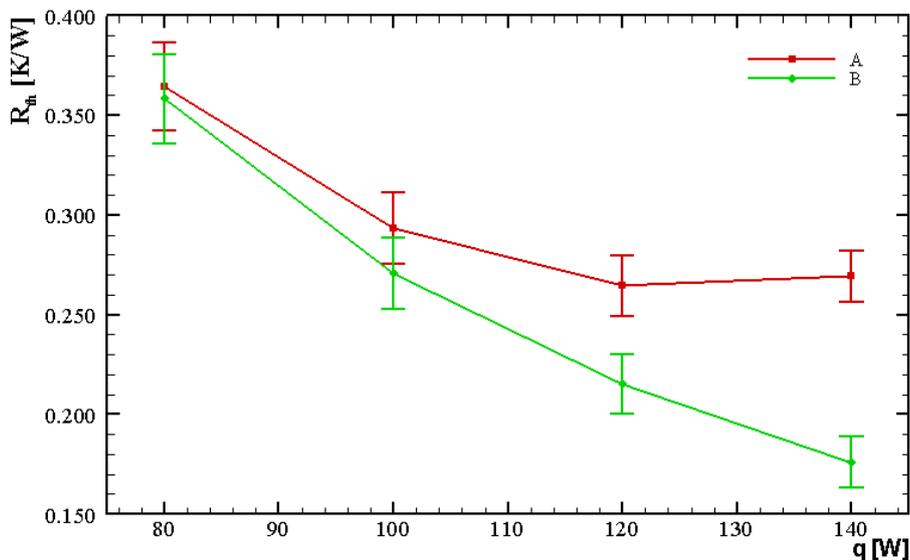


Figura 6. Resistência Térmica em Função da Carga Térmica Aplicada

A partir da Fig. 6 verifica-se que o termossifão B apresentou menores valores de resistência térmica do que o termossifão A. Isso corrobora com os resultados apresentados nas Figs 3 a 5, já que, considerando um mesmo gradiente de temperaturas, quando menor for a resistência térmica, maior a carga térmica dissipada, via Eq. (1), o que indica que o termossifão de maior diâmetro possui melhor desempenho térmico nas condições analisadas.

Por fim a Tab.2 apresenta os resultados de eficiência energética determinados a partir da Eq. (2).

Tabela 2. Eficiência térmica dos Termossifões

Termossifão	Carga Térmica [W]	Fluxo de Calor [W]	η_{th} [%]
A	80,5	55,6	69,0
	100,8	66,9	66,4
	120,3	76,7	63,7
	140,1	92,3	65,9
B	80,17	54,5	67,9
	100,8	70,9	70,4
	120,4	87,2	72,4
	140,1	105,7	75,4

Os resultados apresentados na Tab. 2 vem para confirmar o já observado a partir das Fig.s 3 a 6. Com exceção da primeira carga térmica, o termossifão B apresentou valores maiores de eficiência térmica que o termossifão A. Com a análise dos resultados, conclui-se então que o termossifão B, com maior diâmetro, deve ser utilizado para realizar o controle térmico de um painel fotovoltaico.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi detalhada a análise térmica de dois termossifões feitos com tubos de cobre e preenchidos com água destilada como fluido de trabalho. A análise térmica foi baseada na distribuição de temperaturas ao longo dos dispositivos, temperatura de operação, resistência térmica e eficiência energética.

Os testes experimentais consistiram em simular a operação dos termossifões em um ambiente de laboratório, dissipando calor na região do evaporador dos termossifões a partir da dissipação de potência em uma fita resistiva (efeito *Joule*), e resfriando o condensador a partir de escoamento de água em sua superfície.

Como resultado, em todos os parâmetros analisados dentro da análise térmica, o termossifão B, que apresenta maior diâmetro, obteve melhor desempenho. Isso quer dizer que o termossifão apresentou menores temperaturas em todas as suas regiões, menor temperatura de operação, menor resistência térmica e maior eficiência energética para todas as cargas térmicas dissipadas. Dessa forma, conclui-se que o termossifão B é o mais recomendado para uso no controle térmico de painéis fotovoltaicos, já que apresenta melhor desempenho na transferência de calor do que o termossifão A.

6. 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/Câmpus Ponta Grossa.

7. REFERÊNCIAS

- Antonini Alves, T., Krambeck, L., Santos, P.H.D., 2018. *Heat Pipe and Thermosiphon for Thermal Management of Thermoelectric Cooling*. In: Aranguren, P. (org.). *Bringing Thermoelectricity Into Reality*. InTech, London, 2018. p. 353-374.
- Adams, S., Klobodu, E.K.M., Apio, A., 2018. "Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth". *Renewable Energy*, Vol. 125, p. 755-767.
- Akbarzadeh, A., Wadowski, T., 1996. "Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, p. 81-87.
- Chow, T.T., Pei, G., Fong, K.F., Lin, Z., Chan, A.L.S., Ji, J., 2009. "Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover". *Applied Energy*, Vol. 86, p. 310-316.
- Hallal, J., Hammoud, M., Moussa, T., 2020. "Experimental optimization of the Si photovoltaic panels cooling system on maximum allowable temperature criteria". *Renewable Energy Focus*, Vol. 35, p. 178-181.
- Hu, M., Zheng, R., Pei, G., Wang, Y., Li, J., Ji, J., 2016. "Experimental study of the effect of inclination angle on the thermal performance of heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) systems with wickless heat pipe and wire-meshed heat pipe". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 106, p. 651-660.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A.A., Kim, K.H., 2018. "Solar energy: potential and future prospects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, p. 894-900.
- 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.
- Mistério de Minas e Energia (MME), 2019. *Resenha Energética Brasileira*, exercício de 2018, (preliminar). MME, Brasil.
- Nishida, F.B., Krambeck, L., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2020. "Experimental investigation of heat pipe thermal performance with microgrooves fabricated by wire electrical discharge machining (wire-EDM)". *Thermal Science*, Vol. 24, p. 701-711.
- Pei, G., Zhang, T., Yu, Z., Fu, H., Wang, J., Ji, J., 2010. "Comparative study of a heat pipe PV/T and a water-thermosiphon PV/T". In *Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference - APPEEC 2010*. Chengdu, China.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R.J., 2014. *Heat Pipe: Theory, Design and Applications*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam.

P.L.O. Machado, V.O.O. Machado, V. V. Dimbarre, R.M. Szmoski, P.H.D. Santos, T. Antonini Alves
Seleção de Termossifões para Aplicação em um Sistema Híbrido Fotovoltaico/Térmico

Zohuri, B., 2016. *Heat Pipe Desing and Technology: Modern Applications for Practical Thermal Management*. Springer Nature, Switzerland.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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