

INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICOS DE TERMOSSIFÕES ALETADOS PARA APLICAÇÃO NO CONTROLE TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Thomas Siqueira Pereira, thomaspereira@alunos.utfpr.edu.br
Johnson Ruo Ting Hung, johnsonhung21@gmail.com
Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br
Romeu Miqueias Szmoski, rmszmoski@utfpr.edu.br
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa, Av. Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa/PR, 84.017-220

Resumo. Painéis solares fotovoltaicos são dispositivos usados para converter de modo direto a irradiação solar em energia elétrica. Apesar de ser uma alternativa conhecida e versátil, essa tecnologia ainda apresenta uma eficiência reduzida que dificulta sua rentabilidade. Neste trabalho foi feito um estudo sobre parâmetros de operação de termossifões que serão utilizados como sistema de arrefecimento para um painel solar fotovoltaico com objetivo de aumentar sua eficiência. O termossifão proposto foi fabricado e testado experimentalmente para ter seu desempenho avaliado e realizar uma seleção de inclinação com melhor desempenho para a finalidade desejada. Além disso, foram testadas três inclinações distintas durante a operação desse dispositivo passivo de transferência de calor, 17, 25 e 35° com a horizontal (evaporador abaixo do condensador). A comparação entre as diferentes inclinações de trabalho foi realizada com base em uma análise térmica. O funcionamento de um termossifão foi simulado aquecendo o evaporador a partir do efeito Joule resultante da dissipação de potência em uma fita resistiva metálica, e resfriando o condensador a partir de convecção natural em uma superfície aletada. A análise térmica foi baseada na distribuição de temperatura ao longo do dispositivo, sua temperatura de operação e sua resistência térmica. A inclinação de 35° foi selecionada como a inclinação de melhor desempenho entre as testadas, considerando-se a destinação dos dispositivos.

Palavras chave: Energia Solar. Painel Fotovoltaico. Termossifão. Controle Térmico.

Abstract. Photovoltaic solar panels are devices used to directly convert solar radiation into electrical energy. Despite being a well-known and versatile alternative, this technology still suffers from reduced efficiency that hinders its profitability. In this work, a study was carried out on thermosiphon operating parameters that will be used as a cooling system for a photovoltaic solar panel in order to increase its efficiency. The proposed thermosiphon was manufactured and tested experimentally to have its performance evaluated and to perform a selection of slope with best performance for the desire application. In addition, three different slopes were tested during the operation of this passive heat transfer device, 17°, 25° and 35° with the horizontal (evaporator below the condenser). The comparison between the different working slopes was performed based on a thermal analysis. The operation of a thermosiphon was simulated, in which the evaporator was heated from the Joule effect resulting from the power dissipation in a metallic resistive tape, and the condenser was cooled from natural convection on a finned surface. The thermal analysis was based on the temperature distribution throughout the device, its operating temperature and its thermal resistance. The slope of 35° was selected as the slope with best performance among all tested, taking into account the use conditions of the devices.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Panel. Thermosyphons. Thermal Control.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir de fontes com impactos menores no meio ambiente tornou-se um dos assuntos com maior presença no meio científico. Dentre estas fontes se destaca a conversão fotovoltaica de energia solar em painéis fotovoltaicos, os quais têm grande potencial de utilização, mas que ainda são limitadas. O aumento da temperatura de superfície do painel fotovoltaico faz com que esses painéis operem com uma eficiência ainda menor do que a prevista, sendo então necessários métodos de resfriamento desses dispositivos visando uma melhora em seu desempenho (Akbarzadeh & Wadowski, 1996). Um exemplo disso é o painel *Siemens*TM SM46 de 46W e eficiência de 9%, que apresentou uma perda de cerca de 0,41% da eficiência do painel para cada acréscimo de 1°C na sua temperatura ótima de operação (Tinoco *et al.*, 2018).

Nesse contexto, uma das possíveis soluções seria o uso de termossifões. Um termossifão é definido como um tubo de calor assistido por gravidade usado para melhorar a transferência de calor em várias aplicações (Krambeck *et al.*, 2019). Sua principal característica é uso de calor latente de vaporização de um fluido de trabalho para transferir calor em altas taxas por distâncias consideráveis com pequena diminuição de temperatura. Suas vantagens são flexibilidade, construção simples e fácil controle sem potência de bombeamento externo (Reay *et al.*, 2014).

O termossifão consiste basicamente em um tubo metálico evacuado e preenchido por um fluido de trabalho, podendo ser separado em três regiões (Fig. 1), sendo estas: o *evaporador*, região inferior do tubo que é aquecido por uma fonte quente, submetendo o fluido de trabalho a um processo de evaporação; o *condensador*, região superior do tubo onde o há a perda de energia na forma de calor e o fluido é condensado retornando para o evaporador por gravidade e recomeçando o processo; além da *seção adiabática* que está localizada entre duas regiões anteriores. Nessa seção, não há transferência de calor entre o termossifão e o ambiente. Em alguns casos, a seção adiabática está ausente (Mantelli, 2013).

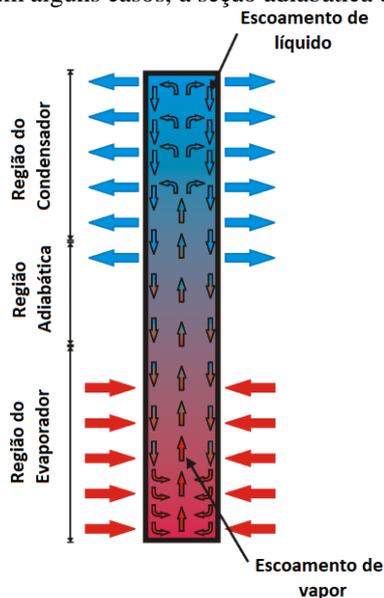


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão (Aguiar *et al.*, 2018)

Visando o resfriamento de painéis fotovoltaicos e verificação da influência da temperatura em seu desempenho, pode ser proposto a construção de um aparato experimental (Fig. 2) contendo dois painéis fotovoltaicos de mesmas especificações técnicas, um operando de forma convencional e outro operando em conjunto de termossifões. Os termossifões possuem a função de absorver o calor do painel e dissipá-lo para o meio externo a partir de convecção natural em seu condensador, que será aletado de forma a aumentar a troca térmica. Barras chatas de alumínio serão colocadas em contato com a parte de trás do painel fotovoltaico, possuindo furos ao longo de seu comprimento. A região do evaporador dos termossifões serão inseridas nas furações das barras chatas de forma a absorver o calor transferido pelo painel.

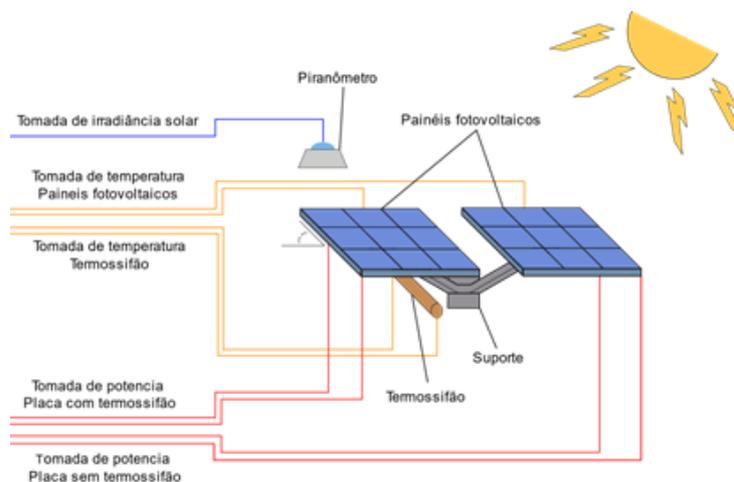


Figura 2. Aparato contendo painéis fotovoltaicos e termossifões

Para isso, torna-se necessário a execução de testes experimentais em termossifões acerca de seus parâmetros operacionais visando a identificação das condições de operação que apresentam melhor desempenho em relação à troca térmica. Estudos prévios (Machado *et al.*, 2019) foram realizados comparando-se o desempenho de um termossifão convencional e outro em que a região do condensador continha aletas metálicas.

Nesse trabalho são realizados estudos que considerem outros parâmetros como razão de preenchimento (razão entre volume de fluido de trabalho e volume do evaporador) e inclinação. Um dos parâmetros a se levar em conta na operação de painéis fotovoltaicos é a sua orientação. De preferência, os painéis devem ser posicionados voltados à direção Sul, com inclinação com a horizontal próxima ao valor da latitude da região, podendo ser igual ao valor da latitude, ou então a esse valor somado de 10 a 15° (Reis, 2018).

Dessa forma, o presente estudo tem como intuito realizar a análise térmica da influência da inclinação de um termossifão aletado em seu desempenho. Para isso, levando-se em consideração a latitude Ponta Grossa/PR/Brasil 25°05'42" Sul, são realizados testes experimentais nas inclinações de 17, 25 e 35° com a horizontal, com evaporador abaixo do condensador, comparando-se a distribuição de temperaturas ao longo do dispositivo, temperatura de operação e também resistência térmica.

2. METODOLOGIA

2.1. Características do Termossifão

O termossifão foi fabricado a partir de um tubo de cobre ASTM B-75, liga 122, com diâmetros externo e interno de 9,45 mm e 7,35 mm, respectivamente, e comprimento de 500 mm. O evaporador possui comprimento de 310 mm, uma região adiabática de 20 mm e um condensador de 170 mm. Aletas de alumínio em espiral foram instaladas na região do condensador. O fluido de trabalho usado foi água com uma taxa de enchimento de 50% do volume do evaporador. A Tab.1 mostra as principais características do termossifão aletado. A metodologia durante os testes experimentais foi baseada em Antonini Alves *et al.* (2018).

Tabela 1. Características do Termossifão fabricado

Características	Termossifão
Diâmetro Interno [mm]	7,35
Diâmetro Externo [mm]	9,45
Evaporador [mm]	310
Região Adiabática [mm]	20
Condensador [mm]	170
Fluido de Trabalho	Água
Razão de Preenchimento [%]	50
Volume de Fluido de Trabalho [mL]	6,60

2.2. Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para os testes experimentais, mostrado na Fig. 3, é composto por uma fonte de alimentação *Agilent*TM U8002A, um sistema de aquisição de dados *Agilent*TM 34970A com um multiplexador de 20 canais, um *laptop Dell*TM e um suporte universal com garra.

Uma fita *Kapton*TM de elevada condutividade térmica e baixa condutividade elétrica foi enrolada sobre as seções do evaporador e região adiabática. No evaporador foi enrolada uma fita resistiva metálica, conectada posteriormente à fonte de potência. O evaporador e a região adiabática foram isolados do ambiente externo utilizando isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno. Termopares do tipo T *Omega Engineering*TM foram utilizados para coleta de dados de temperatura, sendo posicionados cinco termopares no evaporador ($T_{evap,1}$, $T_{evap,2}$, $T_{evap,3}$, $T_{evap,4}$ e $T_{evap,5}$), um termopar na seção adiabática (T_{adiab}) e dois termopares no condensador ($T_{cond,1}$, $T_{cond,2}$), além de um responsável pela aquisição da temperatura do ambiente (T_{amb}).

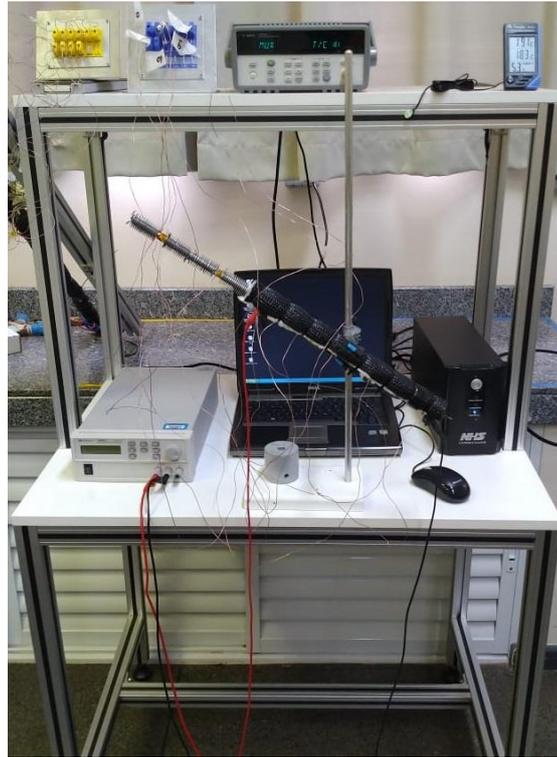


Figura 3. Aparato Experimental

2.3. Procedimento Experimental

Em relação aos testes experimentais, o aquecimento do evaporador foi realizado a partir do efeito *Joule* resultante da dissipação de potência elétrica na fita resistiva metálica, ao passo que o resfriamento do condensador foi realizado a partir de convecção natural. Três inclinações distintas foram investigadas, 17, 25 e 35° com a horizontal. Cargas térmicas de 5, 10 e 15W foram dissipadas na região do evaporador, ao passo que o ar ambiente foi mantido a $17,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ a partir de um sistema de ar condicionado *Rhemm*TM. As cargas térmicas foram mantidas por cerca de 30 minutos, permitindo a entrada do sistema em regime permanente, ao passo que a coleta de dados de temperatura foi realizada a cada 10 segundos pelo sistema de aquisição de dados.

A partir da coleta de dados de temperatura, foi possível a obtenção das temperaturas médias de cada seção do termossifão em função da carga térmica dissipada em regime permanente. As temperaturas do evaporador e condensador são utilizadas para a determinação da resistência térmica do termossifão (Eq. (1)), em que T_{evap} e T_{cond} representam essas duas temperaturas, respectivamente, q representa a carga térmica e R_{th} a resistência térmica. A temperatura da seção adiabática é considerada como a temperatura de operação do dispositivo.

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

Analisando a Equação (1) pode ser verificado que, para um mesmo gradiente de temperatura entre evaporador e condensador, quanto menor a carga térmica dissipada pelo dispositivo, maior sua resistência térmica. Logo, como é desejado dissipar a maior carga térmica possível, é considerado o dispositivo de melhor desempenho aquele com menores valores de resistência térmica para todas as cargas térmicas dissipadas. O mesmo pode ser aplicado para a temperatura de operação, quanto menor a temperatura de operação do dispositivo, é entendido que maior é a carga térmica dissipada por esse. Para o cômputo das incertezas experimentais foram consideradas incertezas de $1,27^\circ\text{C}$ para os valores de temperatura, $0,125\text{V}$ para tensão e $0,0375\text{A}$ para corrente elétrica.

3. RESULTADOS

As Figuras 4 a 6 apresentam a distribuição de temperaturas em função do tempo para as inclinações de 17, 25 e 35°, respectivamente, considerando o termossifão aletado.

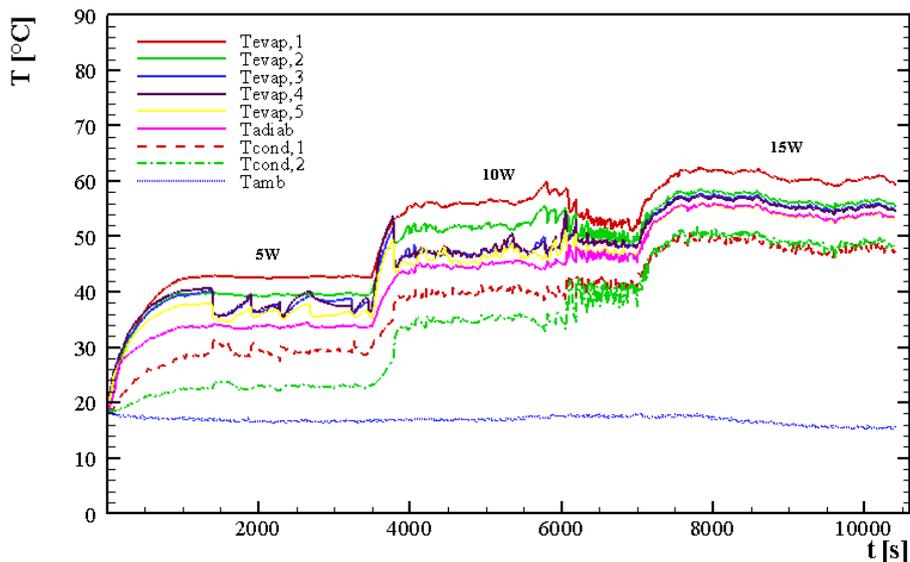


Figura 4. Distribuição de temperaturas em função do tempo para a inclinação de 17°.

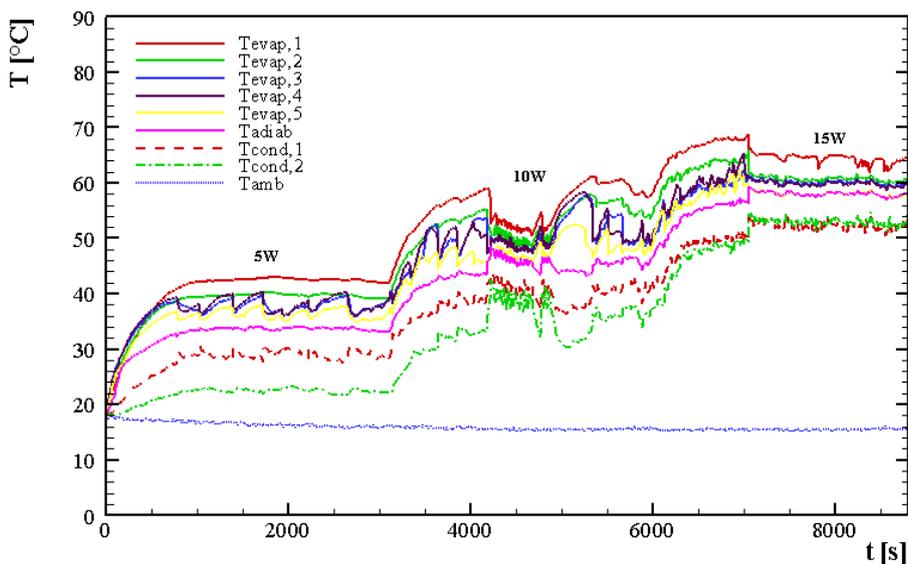


Figura 5. Distribuição de temperaturas em função do tempo para a inclinação de 25°

Analisando as Figuras 4 a 6 pode ser percebido que os testes experimentais apresentaram resultados semelhantes em relação ao comportamento das temperaturas. Ao se aplicar uma carga térmica, as temperaturas que, a princípio estavam em equilíbrio, começam a aumentar até atingir um estado *quasi* permanente. Além disso, as temperaturas no evaporador foram mais altas que as temperaturas na região adiabática, que foi mais alta que as temperaturas no condensador.

Pode ser notado que em todas as inclinações testadas, a região de aplicação da primeira carga térmica (5W) foi a que apresentou uma maior estabilidade nos valores de temperatura em relação às outras cargas aplicadas (10 e 15W). Uma hipótese para esse fato é que na região da primeira carga térmica ocorreu um maior equilíbrio entre fluido evaporando e fluido condensando no interior do dispositivo, mantendo assim uma maior constância nos valores de temperatura.

Outra possível explicação para as instabilidades apresentadas nos valores de temperatura consiste no fato de que o resfriamento do condensador foi realizado via convecção natural, tornando-se muito árdua a tarefa de se manter um coeficiente convectivo constante sobre o dispositivo, uma vez que movimentações no interior do ambiente de teste, ou até aberturas de portas podem alterar as condições às quais o dispositivo é submetido.

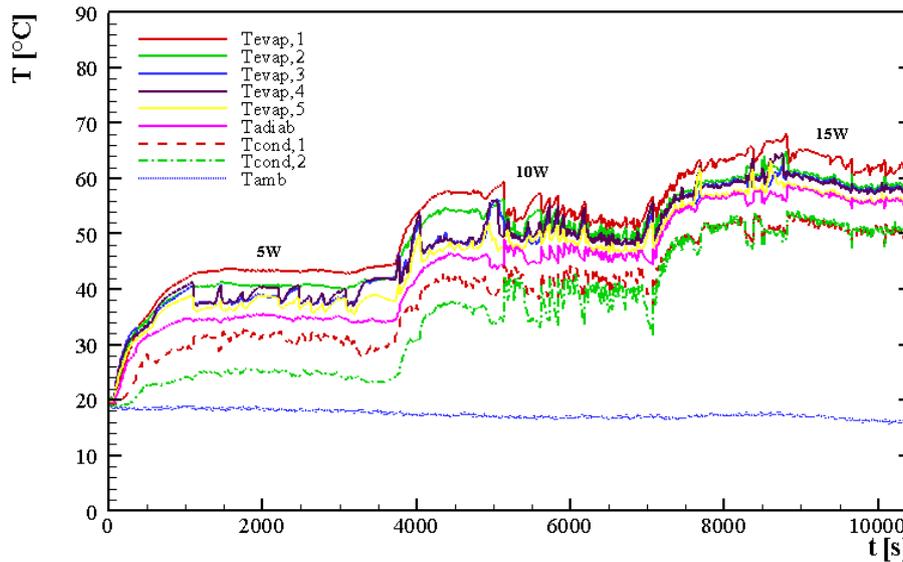


Figura 6. Distribuição de temperaturas em função do tempo para a inclinação de 35°.

A Figura 7 apresenta os valores de temperatura de operação (T_{adiab}) em função da carga térmica dissipada para cada inclinação de teste. Observando essa figura pode ser observado que a diferença entre a temperatura de operação das três condições de teste é muito pequena, tendo como menores valores nas duas primeiras cargas térmicas a inclinação de 25°, seguida de forma muito próxima pela inclinação de 17°. Para a última carga térmica a inclinação de 17° apresentou a menor temperatura de operação.

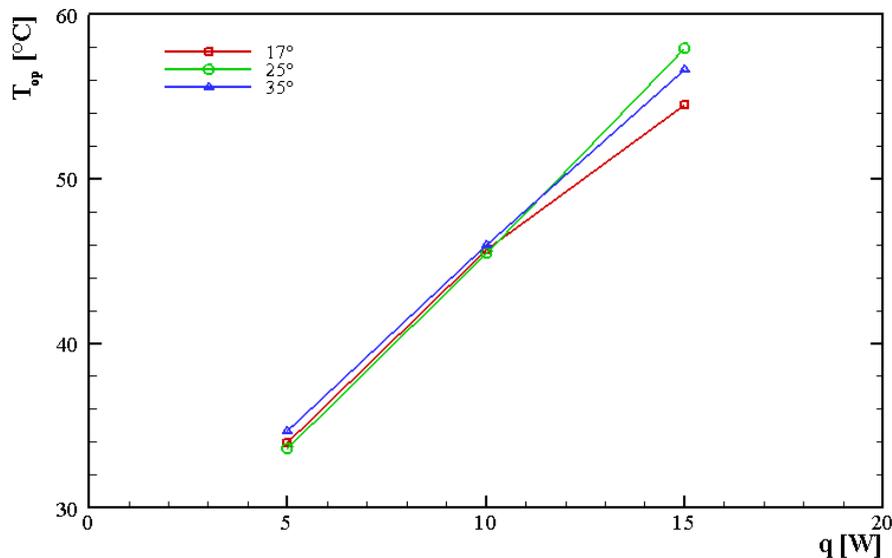


Figura 7. Temperatura de Operação em Função da Carga Térmica Dissipada

A Figura 8 apresenta os resultados de resistência térmica para cada inclinação, levando-se em consideração a incerteza dos resultados. Para a obtenção das temperaturas do evaporador e do condensador (T_{evap} e T_{cond}), foi realizada uma média das temperaturas em regime permanente para cada termopar, sendo T_{evap} a média aritmética entre $T_{evap,1}$, $T_{evap,2}$, $T_{evap,3}$, $T_{evap,4}$ e $T_{evap,5}$ e T_{cond} uma média aritmética entre $T_{cond,1}$ e $T_{cond,2}$.

Levando-se em consideração a incerteza experimentais dos dados, pode ser percebido que os valores de resistência térmica para as três inclinações testadas mantiveram-se muito próximos. Apesar disso, em geral, as inclinações de 17° e 35° apresentaram os menores valores absolutos para as três cargas térmicas aplicadas. Além disso, todos os dispositivos operaram corretamente, uma vez que os valores de resistência reduziram com o aumento da carga térmica aplicada, o que já era esperado.

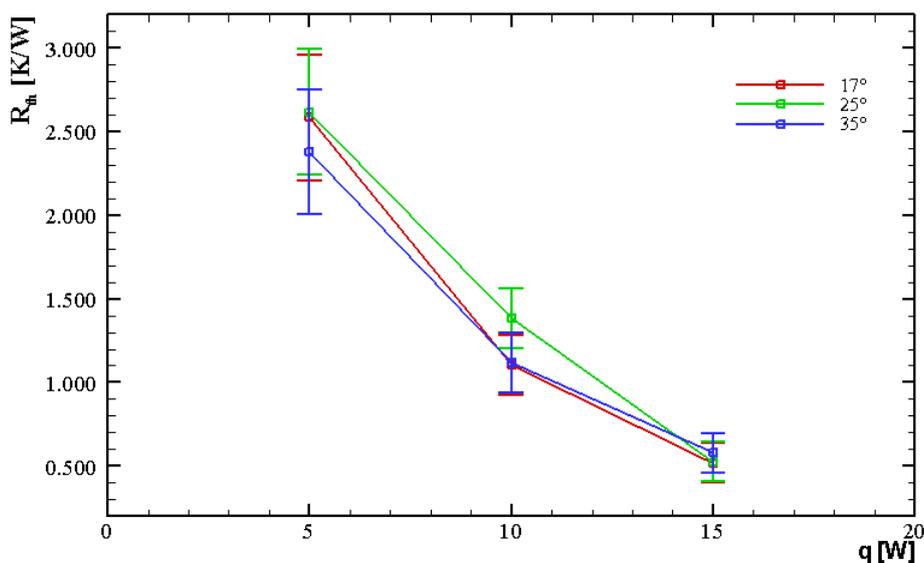


Figura 8. Resistência Térmica em Função da Carga Térmica Dissipada

A recomendação para orientação de painéis fotovoltaicos consiste em colocá-los em uma inclinação em relação à horizontal igual à latitude da região em que o painel está localizado, ou então igual à latitude somada de 10° , de forma que os raios solares atinjam perpendicularmente a superfície do painel (Reis, 2018). Sabendo que a latitude da cidade de Ponta Grossa/PR/Brasil é $25^\circ 05' 42''$ Sul, e levando-se em conta os resultados apresentados na Fig. 8, entende-se que a melhor forma para se aproveitar a energia solar e também a troca térmica nos termossifões é utilizando-se o painel fotovoltaico orientado a 35° com a horizontal, que está mais próxima de atingir a condição ótima desses dois requisitos entre todas as inclinações testadas, uma vez que corresponde à latitude da cidade somada a 10° , conforme orientações da literatura, e também apresenta, em geral, os menores valores de resistência térmica.

4. CONCLUSÕES

Três diferentes inclinações foram testadas para termossifões destinados para o resfriamento de painéis fotovoltaicos. Para os testes experimentais dos termossifões foi simulado o uso desses a partir do aquecimento do evaporador pela dissipação de potência em uma fita resistiva, ao passo que o condensador foi resfriado via convecção natural a ar. Dados de temperatura foram coletados a partir de termopares do tipo T. Utilizando-se de tais dados, uma análise térmica foi realizada, onde foram verificados a temperatura de operação e a resistência térmica dos dispositivos. A partir da análise térmica foi constatado que todos os dispositivos operaram de acordo com o esperado. A partir da resistência térmica dos dispositivos e também recomendações de uso de painéis fotovoltaicos, foi verificado também que, visando a obtenção de um maior aproveitamento da energia solar a partir do ângulo de incidência dos raios solares sobre o painel, e também maior eficiência na dissipação de calor pelos termossifões, recomenda-se o uso da inclinação de 35° , que melhor se aproxima dos parâmetros ótimos para as duas condições expostas entre todas as inclinações testadas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados 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

- Aguiar, V. M. *et al.*, 2018. "Thermal analysis of a finned thermosyphon for heat exchanger applications". *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 5, p. 1-14.
- 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.
- 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, UK.
- Krambeck, L. *et al.*, 2019. "Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling". *Thermal Science*, Vol. 23, p. 1151-1160.

Mantelli, M.B.H. Thermosyphon Technology for Industrial Applications. Chapter 11, In: Vasiliev L.L. and Kakaç S. (Eds.), *Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications*. CRC Press, Boca Raton, USA, 54 p., 2013.

Reay, D. A., Kew, P. A., McGlen, R. J., 2014. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Elsevier: Waltham/MA, USA.

Reis, P., 2018. “Qual a inclinação que um painel solar deve ter? ”. 18 Ago. 2018. < [https://www.portal-energia.com/qual-inclinacao-painel-solar/#:~:text=Assim%2C%20por%20norma%20para%20uma,latitude%20onde%20vão%20ficar%20instalados!](https://www.portal-energia.com/qual-inclinacao-painel-solar/#:~:text=Assim%2C%20por%20norma%20para%20uma,latitude%20onde%20vão%20ficar%20instalados!>) >

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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