



ANÁLISE TÉRMICA DE UM TERMOSSIFÃO ALETADO PARA APLICAÇÕES EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br
Guilherme Antônio Bartmeyer, gabartmeyer@hotmail.com
Carlos Henrique Diedrich, chd145@hotmail.com
Luis Vitorio Gulineli Fachini, luisfachini@alunos.utfpr.edu.br
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330 - Jardim Carvalho - CEP 84017-220 - Ponta Grossa - 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, uma análise térmica de um termossifão aletado para aplicações em controle térmico de painéis fotovoltaicos foi experimentalmente pesquisada. O termossifão foi fabricado a partir de um tubo de cobre com o diâmetro externo de 9,45 mm, o diâmetro interno de 7,35 mm e um comprimento total de 500 mm. O fluido de trabalho usado foi água com uma taxa de enchimento de 50% do volume do evaporador. O condensador foi resfriado por convecção natural a ar, 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 5 a 15 W em uma posição a 25° da horizontal (evaporador acima do condensador). Como resultado da pesquisa, o termossifão operou satisfatoriamente para a posição testada. Além disso, o termossifão aletado obteve melhor desempenho térmico que o condensador não aletado, comprovando a eficácia da aplicação da aleta.

Palavras chave: Aletas. Análise térmica. Termossifão. Controle térmico. Experimental.

1. INTRODUÇÃO

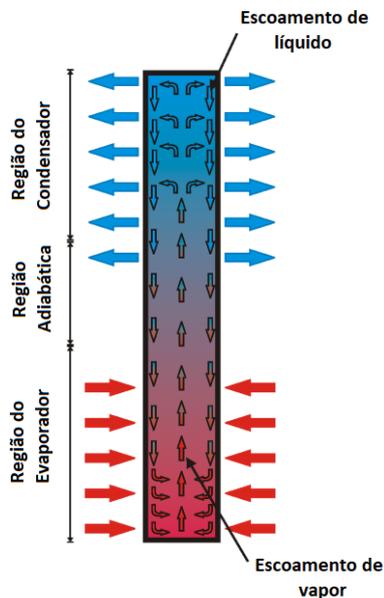
Um termossifão é um tubo de calor assistido por gravidade usado para melhorar a transferência de calor em várias aplicações (Akbasrzadeh; Wadowski, 1996). A característica principal de um termossifão é o uso de calor latente de vaporização para transmitir calor a altas taxas em distâncias consideráveis com pequena diminuição de temperatura. Suas vantagens são flexibilidade, construção simples e fácil controle sem potência de bombeamento externo (Reay; Kew; McGlen, 2014).

Um termossifão possui três regiões com funções distintas em sua operação. Essas regiões são chamadas de evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador, a região inferior do tubo, é aquecido por uma fonte quente e o fluido de trabalho é submetido a um processo de evaporação. O vapor gerado, devido à diferença de pressão, move-se para a região mais fria que se encontra na região superior do tubo (condensador). Nessa região o vapor gerado no evaporador perde energia como calor e é condensado, ocasionando o retorno do fluido de trabalho no estado líquido flui para o evaporador por gravidade, fechando o ciclo. A seção adiabática está localizada entre o evaporador e o condensador. Nessa seção, não há transferência de calor entre o termossifão e o ambiente. Em alguns casos, a seção adiabática está ausente (Mantelli, 2013). Um diagrama esquemático do princípio de funcionamento do termossifão é mostrado na Fig. 1.

Termossifões podem ser amplamente aplicados no ambiente industrial. Um exemplo de aplicação é a recuperação de calor em um sistema de gases de exaustão, pré-aquecendo o ar em trocadores de calor de caldeiras. Além disso, a transferência de calor em trocadores de calor pode ser melhorada pelo uso de aletas, que podem ser acopladas ao evaporador e /ou ao condensador dos termossifão (Aguiar, 2016).

Neste contexto, uma análise térmica de um termossifão aletado sob condições de convecção natural foi experimentalmente pesquisada. O intuito da construção do termossifão e investigação experimental consiste em utilizá-lo para controle térmico de um painel fotovoltaico.

Figura 1. Diagrama esquemático de um termossifão (Aguiar *et al.*, 2018)



2. METODOLOGIA

Essa seção apresenta os procedimentos executados durante os testes experimentais. A metodologia de fabricação do termossifão (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, processo de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho), ensaios experimentais e análise térmica do termossifão aletado foi realizada levando em consideração as instruções contidas na literatura (Krambeck *et al.*, 2015; Russo *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017).

2.1. Características do Termossifão

Um tubo de cobre ASTM B-75, liga 122, com um diâmetro externo de 9,45 mm, um diâmetro interno de 7,35 mm e um comprimento de 500 mm foi usado para fabricar o termossifão. O termossifão tem um evaporador de 310 mm de comprimento, uma região adiabática de 20 mm de comprimento e um condensador de 170 mm de comprimento. 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 Tabela 1 mostra as principais características do termossifão aletado.

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

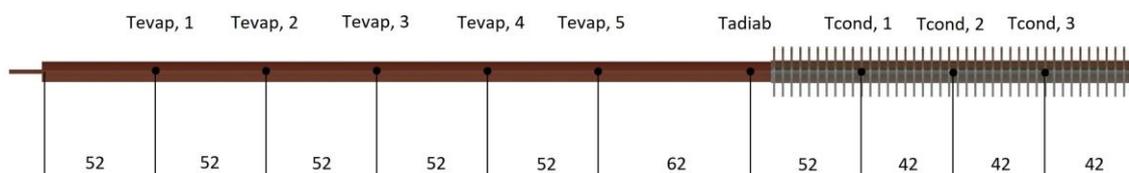
O aparato experimental utilizado para os testes experimentais, mostrado na Fig. 2, é composto por uma fonte de alimentação *Agilent*TM U8002A, um sistema de aquisição de dados *Agilent*TM 34970A com um multiplexador de 20 canais, um *laptop* *Dell*TM e um suporte universal com garra.

Figura 2. Aparato Experimental



Para a avaliação do desempenho térmico do termossifão aletado, foram utilizados termopares do tipo K *Omega Engineering*TM. Eles foram fixados na superfície externa do tubo por uma fita adesiva termossensível *Kapton*TM. Como mostrado na Fig. 3, foram utilizados 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 três termopares no condensador ($T_{cond,1}$, $T_{cond,2}$ e $T_{cond,3}$). O termossifão foi mantido em uma orientação de 25° em relação à horizontal.

Figura 3. Posicionamento dos Termopares [mm]

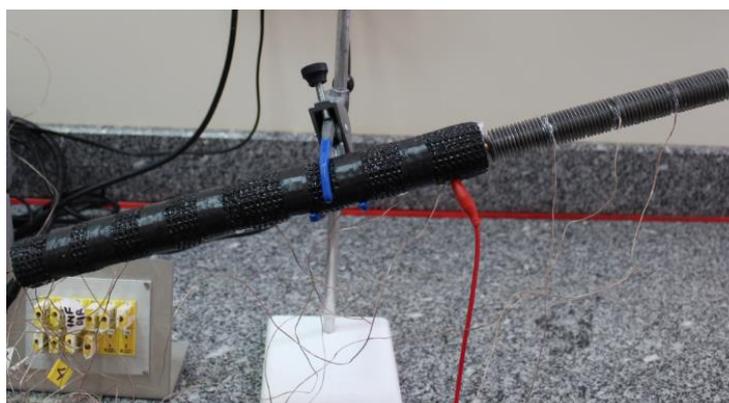


O sistema de aquecimento do evaporador foi conduzido por dissipação de energia em um resistor elétrico *Omega Engineering*TM. Para garantir que o calor gerado pelo efeito *Joule* fosse transmitido ao evaporador, um isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno foram instalados nesta região. O sistema de resfriamento consistiu em convecção natural sobre a região do condensador. Como mencionado acima, para intensificar o resfriamento, aletas de alumínio foram instaladas nessa região, comparando resultados com e sem a adição de aletas. A região adiabática foi mantida isolada do ambiente.

2.3. Procedimento Experimental

Para garantir os melhores resultados e a repetibilidade dos testes experimentais, a temperatura ambiente foi mantida em $17,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ pelo sistema de condicionamento térmico *Rhemm*TM. O termossifão aletado foi testado na orientação de 25° em relação à horizontal, que corresponde à inclinação utilizada para um painel fotovoltaico na região de Ponta Grossa/PR. A Figura 4 mostra o teste de termossifão com aleta. O sistema de aquisição de dados foi ligado e as temperaturas medidas pelos termopares.

Figura 4. Termossifão aletado na posição de teste



A fonte de alimentação foi ligada e ajustada para a potência de dissipação desejada. A carga inicial foi de 5 W e, após aproximadamente 30 minutos, os termopares apresentaram valores estacionários. O incremento de carga de 5 W foi feito até 15 W. Os dados foram adquiridos a cada dez segundos, registrados no *laptop* pelo programa computacional *Agilent™ Benchlink Data Logger 3*.

As incertezas experimentais estão associadas aos termopares do tipo K, ao sistema de aquisição de dados e à unidade de fonte de alimentação. A incerteza experimental da temperatura é estimada em aproximadamente $\pm 1,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma carga térmica foi de $\pm 1\%$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão aletado, ao passo que a Fig. 6 apresenta a distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão não aletado. Pode ser observado que o termossifão aletado apresenta um comportamento mais instável para a primeira potência dissipada em relação ao termossifão não aletado. Isso se deve ao aumento do coeficiente convectivo para o caso aletado, sendo possível perceber que a partir de um instante de tempo o termossifão possui seu comportamento estabilizado e se aproxima do comportamento do termossifão não aletado.

Apesar disso, é possível perceber também que as temperaturas de regime permanentes obtidas para as partes do termossifão aletado foram menores do que as temperaturas do termossifão não aletado para as três potências dissipadas, chegando a temperaturas máximas de aproximadamente $46,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $56,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as potências dissipadas de 5, 10 e 15 W, respectivamente, ao passo que o termossifão não aletado apresentou temperaturas máximas de aproximadamente $51,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $73,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $92,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as potências dissipadas de 5, 10 e 15 W, respectivamente.

Figura 5. Distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão aletado

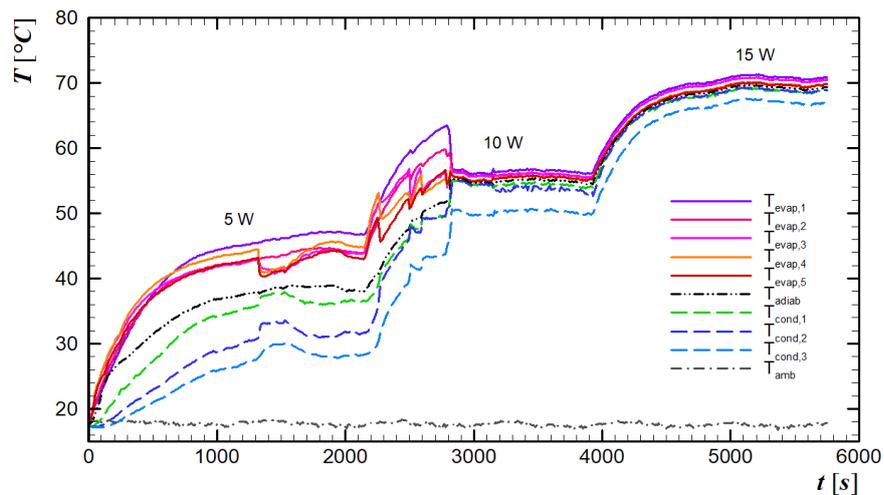
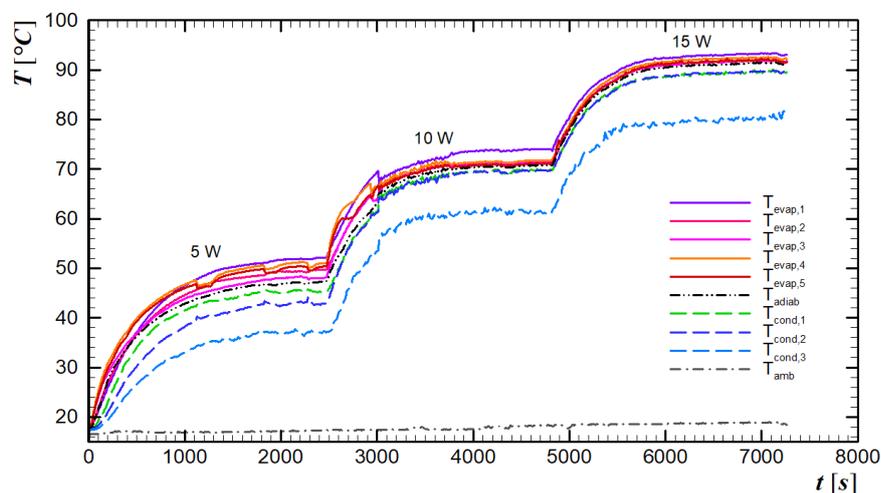


Figura 6. Distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão não aletado



A Figura 7 apresenta a distribuição de temperaturas em função do comprimento do termossifão aletado, ao passo que a Fig. 8 apresenta a distribuição de temperaturas em função do comprimento do termossifão não aletado. Com ambas as figuras fica mais claro o fato de que as temperaturas obtidas para o termossifão aletado são menores que as temperaturas para o termossifão não aletado. Pode ser observado também que as temperaturas ao longo dos termossifões apresentou maior variação para as menores potências dissipadas, o que se deve ao baixo coeficiente convectivo apresentado pela troca de calor com convecção natural.

Figura 7. Distribuição de temperaturas em função do comprimento para o termossifão aletado

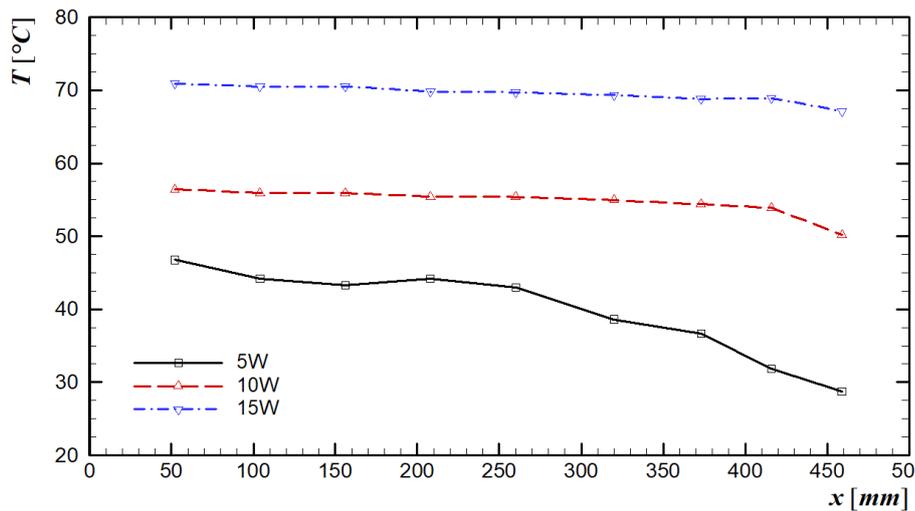
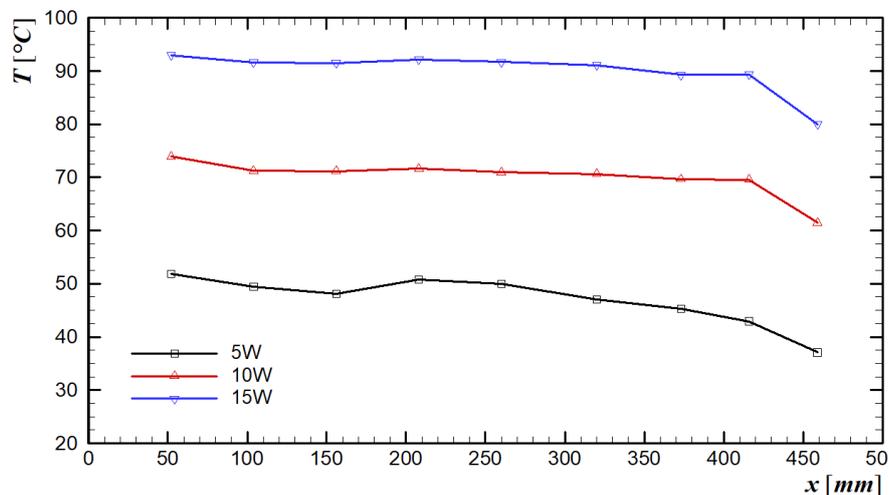


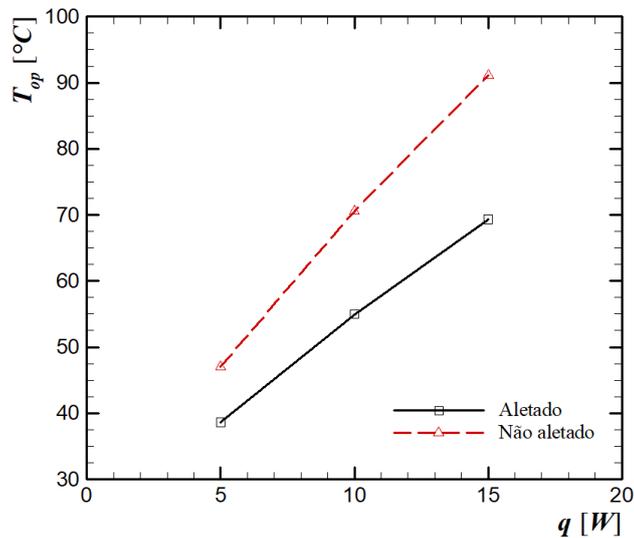
Figura 8. Distribuição de temperaturas em função do comprimento para o termossifão não aletado



A influência do coeficiente convectivo fica clara ao se comparar os resultados obtidos com resfriamento por convecção natural com dados obtidos por (Aguiar *et al.*, 2018) com resfriamento por convecção forçada, em que a distribuição de temperaturas ao longo do termossifão, mesmo para potências dissipadas de até 50 W, se apresenta com grandes variações de temperatura e grande diferença entre as temperaturas do evaporador e temperaturas do condensador.

A Figura 9 apresenta as temperaturas de operação para os termossifões aletado e não aletado em função das potências dissipadas. A temperatura de operação pode ser utilizada como quesito de comparação entre termossifões distintos, e é definida como a temperatura da região adiabática de cada termossifão (Aguiar, 2016).

Figura 9. Temperatura de operação em função da potência dissipada para os termossifões aletado e não aletado



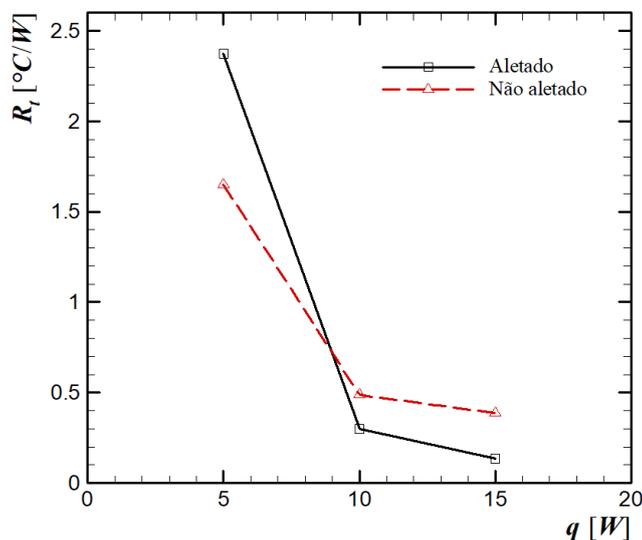
Pela Figura 9 pode ser notado que o termossifão aletado apresenta menores valores de temperatura de operação que o termossifão não aletado para todos os valores de potência dissipados. Com isso, já que o intuito do termossifão analisado é o resfriamento de uma superfície, pode ser verificado que o termossifão aletado possui melhor desempenho, justificando então o uso de aletas em seu condensador.

Outra análise térmica que pode ser realizada entre os termossifões consiste na análise da resistência térmica. A resistência térmica total, R_t , de um termossifão pode ser definida como a dificuldade do dispositivo em transportar calor. Quanto maior a resistência térmica, maior a dificuldade no transporte de calor do sistema (Krambeck *et al.*, 2018). A resistência térmica total pode ser calculada de acordo com a equação 1.

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

A Figura 10 apresenta dados obtidos para a resistência térmica dos termossifões em função da potência dissipada. Pode ser percebido que a tendência é que a R_t diminua com o aumento da potência dissipada no evaporador, além de que os valores de resistência térmica dos dois termossifões se apresentam próximos.

Figura 10. Resistência térmica em função da potência dissipada



4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise térmica de um termossifão aletado para aplicações de controle térmico de paines fotovoltaicos. Testes experimentais foram realizados para uma carga de calor de 5 a 15W orientado a 25° da horizontal. O fluido de trabalho era água. Como resultado da pesquisa, o termossifão operou satisfatoriamente para a posição testada. Além disso, o termossifão aletado obteve melhor desempenho térmico que o condensador não aletado, comprovando a eficácia da aplicação da aleta e justificando seu uso para a operação desejada.

5. 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.

6. REFERÊNCIAS

- A. Akbaszadeh, T. Wadowski, Heat Pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, pp. 81-87, 1996.
- D.A. Reay, P.A. Kew, RJ McGlen, *Heat Pipe: Theory, Design and Applications*, Butterworth-Heinemann, Amsterdam, NED, 2014.
- G.M. Russo, L. Krambeck, F.B. Nishida, P.H.D Santos, T. Antonini Alves, Thermal performance of thermosyphon for different working fluids, *Engenharia Térmica*, Vol. 15, pp 3-8, 2016.
- L. Krambeck, F.B. Nishida, P.H.D. Santos, T. Antonini Alves, Configurations of phosphor bronze meshes in heat pipes: an experimental analysis of thermal performance, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 2, pp 11-14, 2015.
- L. Krambeck, F.B. Nishida, V.M. Aguiar, P.H.D. Santos, T. Antonini Alves, Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling, *Thermal Science*, in press, 2018.
- M.B.H. Mantelli, 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, 2013.
- P.H.D Santos, K.A.T. Vicente, L.S. Reis, L.S. Marquardt, T. Antonini Alves, Modeling and experimental tests of a copper thermosyphon, *Acta Scientiarum. Technology (online)*, Vol. 39, pp 59-68, 2017.
- V.M. Aguiar, Influence of filling ratio and inclination angle on thermal performance of thermosyphons, 2016. Graduation work, Federal University of Technology – Paraná, Ponta Grossa, Brazil (in Portuguese).
- V. M. AGUIAR et al. Thermal analysis of a finned thermosyphon for heat exchanger applications. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 5, n. 1, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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