

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA PRESSÃO DE SATURAÇÃO DO FLUIDO DE TRABALHO EM TERMOSSIFÕES

Roberty Kulesza de Oliveira, kuleszaroberty@gmail.com
Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@aluns.utfpr.edu.br
Luis Vítório Gulinelí Fachini, luisgulinelí@gmail.com
Guilherme Antonio Bartmeyer, gabartmeyer@hotmail.com
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, 84017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Resumo. Um termossifão é dispositivo passivo de troca de calor que utiliza o calor latente de vaporização de um fluido de trabalho. Neste trabalho, uma análise térmica de um termossifão foi realizada, comparando-se dados experimentais de pressão de saturação do fluido de trabalho com a pressão determinada analiticamente. O termossifão foi fabricado a partir de um tubo de cobre possuindo comprimento total de 500 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 210 mm, enquanto a seção adiabática e o condensador têm comprimentos de 20 mm e 270 mm, respectivamente. O condensador foi resfriado por convecção forçada 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 10 a 60 W em duas posições distintas: a 22,5° e 45° da horizontal (evaporador abaixo do condensador). A análise térmica foi baseada na distribuição de temperaturas ao longo do dispositivo, sua temperatura de operação e sua resistência térmica. Pode ser verificado que a inclinação de 45° apresentou melhor desempenho térmico e também menor pressão interna, uma vez que nessas condições as temperaturas do dispositivo são menores do que na inclinação de 22,5°.

Palavras chave: Termossifão. Análise Térmica. Pressão de saturação.

Abstract. A thermosiphon is a passive heat exchange device that uses the latent heat of vaporization of a working fluid. In this work, a thermal analysis of a thermosiphon was performed, comparing experimental data of saturation pressure of the working fluid with the pressure determined analytically. The thermosiphon was manufactured from a copper tube having a total length of 500 mm. The working fluid used was distilled water with a filling ratio of 50% of the evaporator volume. The evaporator has a length of 210 mm, while the adiabatic section and the condenser are 20 mm and 270 mm long, respectively. The condenser was cooled by forced air convection, the adiabatic section was insulated with fiberglass and the evaporator was heated by an electric resistor. Experimental tests were carried out for a heat load of 10 to 60 W in two different positions: at 22.5° and 45° from the horizontal (evaporator below condenser). The thermal analysis was based on the temperature distribution throughout the device, its operating temperature and thermal resistance. It was verified that the inclination of 45° performed better and presented lower internal pressure, since in this conditions, the temperatures of the device are lower than when operating in an inclination of 22.5°.

Keywords: Thermosiphon. Thermal analysis. Saturation pressure.

1. INTRODUÇÃO

Diversas são as pesquisas sobre o funcionamento e aplicações de termossifões, sendo aplicados em diversas áreas como resfriamento de eletrônicos, trocadores de calor, coletores solares, aquecedores e aproveitamento de calor residual (Huminic *et al.*, 2011).

Tanto um termossifão quanto um tubo de calor consistem em tubos metálicos evacuados preenchidos com uma certa quantidade de fluido de trabalho, podendo trocar elevadas taxas de calor a grandes distâncias com baixo gradiente de temperatura, uma vez que operam a partir do calor latente de vaporização do fluido de trabalho. A principal diferença entre um termossifão e um tubo de calor é o fato de que o tubo de calor possui uma estrutura porosa nas paredes do tubo, seja uma malha metálica, material sinterizado ou então ranhuras, que são então responsáveis pelo movimento do fluido. Enquanto no termossifão, esse transporte de fluido ocorre via gradientes de pressão e a ação da gravidade (Reay *et al.*, 2014).

Um termossifão possui três regiões distintas de operação, como pode ser observado na Fig. 1. A região inferior do tubo é denominada de evaporador, região na qual o calor é absorvido de uma fonte quente. Ao absorver calor, o fluido de trabalho inicia um processo de evaporação, processo esse que ocorre a baixas temperaturas pelo fato de o interior do tubo ser evacuado. O vapor de fluido é então transportado pelo centro do tubo devido a gradientes de pressão, atingindo a região superior denominada condensador. No condensador o calor absorvido no evaporador e transportado pelo vapor é dissipado para o ambiente externo, ocasionando a condensação desse vapor. Ao condensar, devido a ação da gravidade, o fluido de trabalho na forma líquida escoou pelas paredes do tubo retornando para a região do evaporador, completando o ciclo termodinâmico. Finalmente, a região adiabática é uma região transitória entre evaporador e condensador, e nessa região não há troca de calor com o ambiente externo (Mantelli, 2013; Reay *et al.*, 2014).

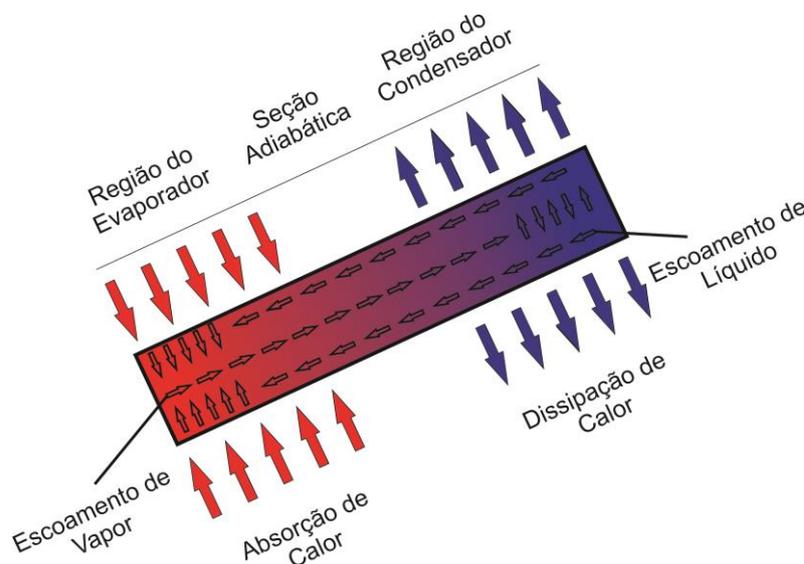


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão

O objetivo desse trabalho consiste em realizar a construção de um termossifão e também a análise de sua operação a partir de testes experimentais. Além disso, busca-se verificar o comportamento da pressão no interior do dispositivo a partir de medidas experimentais realizadas por um vacuômetro analógico.

2. METODOLOGIA

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

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 210 mm de comprimento, uma região adiabática de 20 mm de comprimento e um condensador de 270 mm de comprimento. A Tabela 1 apresenta 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]	210
Região Adiabática [mm]	20
Condensador [mm]	270
Fluido de Trabalho	Água
Razão de Preenchimento [%]	50
Volume de Fluido de Trabalho [mL]	4,45

2.2. Construção do Termossifão

O termossifão é composto por um tubo de cobre (invólucro), uma tampa de cobre contendo um furo no seu centro, um tubo capilar de cobre e um vacuômetro analógico *DuraChoice™ TS50*. 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 fornecidas por Antonini Alves *et al.* (2018).

Tratando-se da limpeza, primeiramente todos os componentes do termossifão foram limpos com água e sabão. Posteriormente, as partes de menor dimensão (tampa de cobre e tubo capilar) foram submetidos a um banho ultrassônico submersas em acetona, ao passo que o interior do invólucro e a extremidade do vacuômetro também foi limpo utilizando-se acetona. Feito isso, a tampa de cobre, o tubo capilar e as extremidades do invólucro foram submersas em uma solução 0,1M de ácido sulfúrico por aproximadamente um minuto.

Após a limpeza foi realizada a montagem, que consiste em realizar a junção entre os componentes a partir da brasagem em estanho. Para tal, foram utilizados estanho, pasta para solda e um ferro de solda para realizar o processo de brasagem. O tubo capilar foi posicionado no furo presente no centro da tampa de cobre, que posteriormente foi posicionada em uma das extremidades do invólucro. O vacuômetro analógico foi posicionado na extremidade oposta.

Visando verificar se a montagem foi realizada sem falhas foi executado o teste de estanqueidade. Esse consistiu em conectar, a partir de uma mangueira flexível de silicone, o tubo capilar do termossifão a uma bomba de deslocamento positivo. Feito isso, o termossifão foi submerso em um recipiente contendo água e ar foi bombeado em seu interior. Caso houvessem falhas, bolhas seriam detectadas na junção entre os componentes, sendo então necessário repetir todos os passos aqui apresentados.

Após o teste de estanqueidade, foi realizado o processo de evacuação. A partir de uma mangueira flexível de silicone, o termossifão foi conectado a uma bomba de vácuo *EOS Value™* modelo *i260SV*, utilizando graxa de vácuo *Dow Corning™*. O processo de evacuação foi realizado por aproximadamente oito horas. Com o seu término, foi utilizado de um *fórceps* para vedar a mangueira de silicone, que foi então retirada da bomba de vácuo e conectada em uma bureta para realizar o processo de preenchimento.

A partir da bureta, foi colocada a quantidade de fluido desejada no interior do termossifão. Para isso, a bureta foi preenchida totalmente com fluido, além da mangueira de silicone conectada ao termossifão e vedada com o *fórceps*, evitando que ar entre no termossifão. Para o preenchimento, a bureta foi aberta e posteriormente abriu-se também o *fórceps*, até que se atingisse a quantidade de fluido desejada. Feito isso, o *fórceps* foi novamente fechado e, a partir de um alicate de pressão, o tubo capilar foi conformado para evitar a passagem de ar. A mangueira flexível foi retirada do tubo capilar e sua extremidade foi vedada a partir de brasagem com estanho.

2.3. Aparato Experimental

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

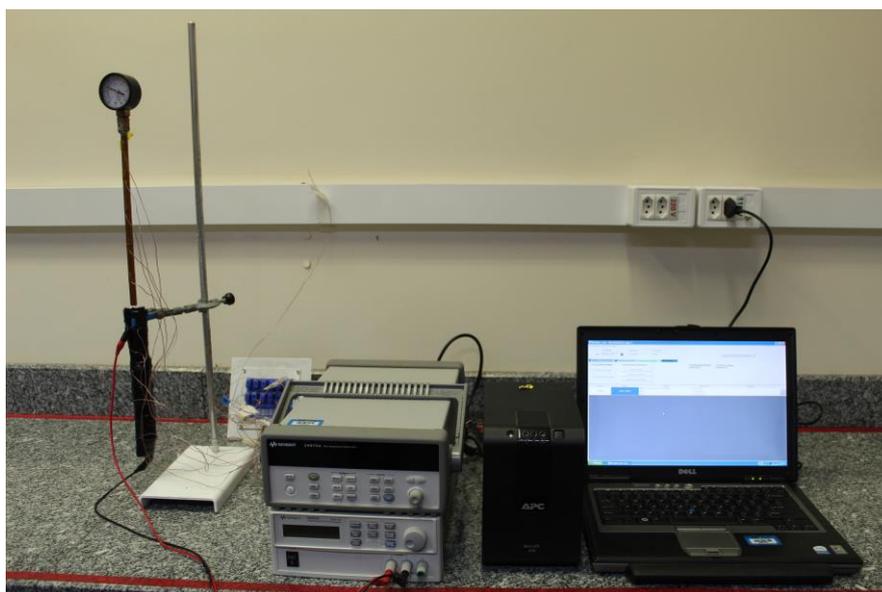


Figura 2. Aparato experimental

O comprimento total das regiões do evaporador e seção adiabática foram cobertas com uma fita *Kapton*TM de alta condutividade térmica. Uma fita resistiva foi enrolada sobre a totalidade do evaporador e conectada à fonte de potência. Um total de 11 termopares do tipo T *Omega Engineering*TM foram responsáveis pela aquisição de dados de temperatura durante os testes experimentais, quatro igualmente espaçados no evaporador ($T_{evap,1}$, $T_{evap,2}$, $T_{evap,3}$, $T_{evap,4}$), um na seção adiabática (T_{adiab}), cinco no condensador ($T_{cond,1}$, $T_{cond,2}$, $T_{cond,3}$, $T_{cond,4}$, $T_{cond,5}$), e um para temperatura ambiente (T_{amb}).

2.4. Procedimento Experimental

O evaporador foi aquecido pelo efeito *Joule* resultante da dissipação de potência da fonte de potência na fita resistiva. Cargas térmicas de 10 a 60W com passo de 10W foram utilizadas durante os testes. O condensador foi resfriado via convecção forçada a ar, mantido a $21,0 \pm 0,5$ °C a partir de um sistema de ar condicionado *Rhemm*TM. Cada carga térmica foi mantida por aproximadamente 30 minutos, ao passo que os dados de temperatura em cada região foram coletados a cada 5 segundos e os dados de pressão foram obtidos por leituras no vacuômetro analógico para cada carga térmica. Os testes foram realizados em duas inclinações distintas com a horizontal (evaporador abaixo do condensador): 22,5° e 45°.

Para a análise térmica, foram considerados a distribuição de temperaturas dos dispositivos, sua temperatura de operação (T_{adiab}), temperatura em função do comprimento do dispositivo e queda de temperatura entre evaporador e condensador a partir da resistência térmica (R_{th} - Eq. (1)).

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

3. RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam a distribuição de temperaturas no termossifão para as inclinações de 22,5° e 45°, respectivamente, em função do tempo. Pode ser observado que ambas as inclinações apresentaram comportamento semelhante em relação à distribuição de temperaturas. Inicialmente as temperaturas estão em equilíbrio, aumentando conforme aplicam-se as cargas térmicas e estabilizando novamente ao atingir regime permanente. As temperaturas da região do evaporador foram maiores que a temperatura da seção adiabática, que por sua vez também foi maior que as temperaturas na região do condensador.

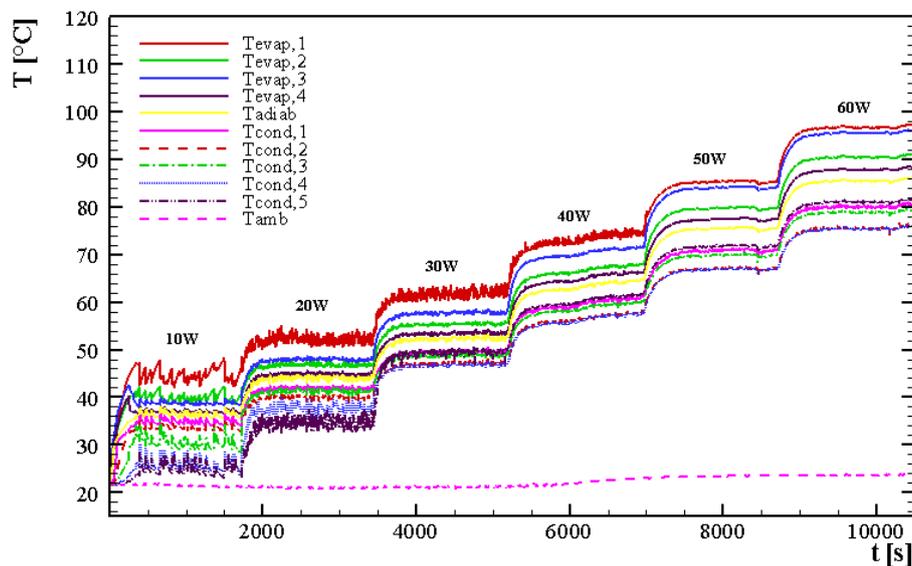


Figura 3. Distribuição de temperaturas para a inclinação de 22,5°.

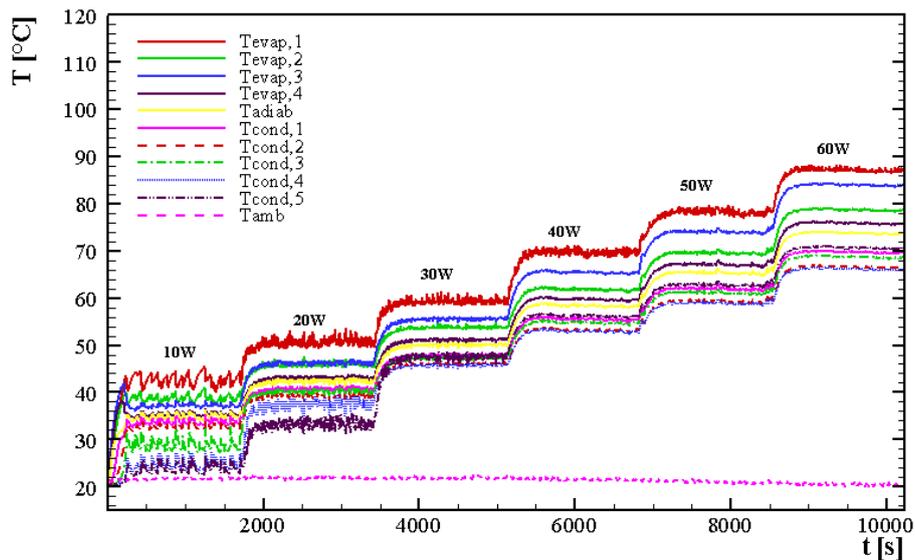


Figura 4. Distribuição de temperaturas para a inclinação de 45°.

A Figura 5 apresenta valores de temperatura de operação para cada inclinação em função da carga térmica aplicada. Pode ser notado que as temperaturas de operação do termossifão operando a 45° foram menores do que operando a 22,5°, indicando uma troca térmica mais eficiente ao longo do dispositivo e, conseqüentemente, uma menor resistência térmica.

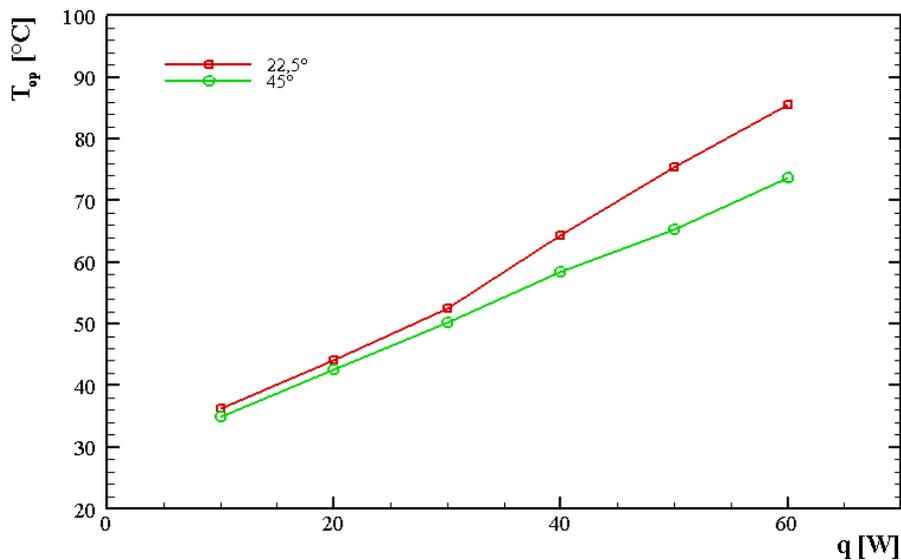


Figura 5. Temperatura de operação em função da carga térmica aplicada.

A Figura 6 apresenta os valores de resistência térmica para as duas inclinações de teste em função da carga térmica aplicada. Os dados de resistência térmica apresentados nessa figura corroboram com os dados apresentados na Figura 5. Para todos os valores de cargas térmica aplicados a inclinação de 45° apresentou menores valores de resistência térmica do que a inclinação de 22,5°, indicando que, nessa inclinação, a transferência de calor pelo dispositivo ocorre de forma mais eficiente.

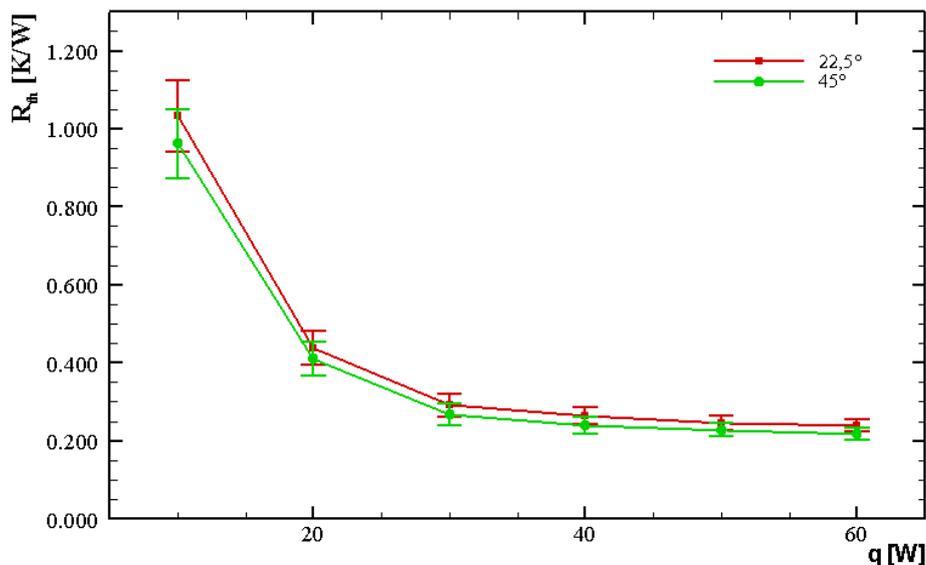


Figura 6. Resistência térmica em função da carga térmica aplicada

Considerando a pressão interna do dispositivo passivo de transferência de calor, a Fig. 7 apresenta os dados de pressão interna do termossifão para cada inclinação em função da carga térmica dissipada. A incerteza dos valores de pressão corresponde a 3% do valor indicado pelo vacuômetro analógico. Pela Figura 7 pode ser notado que o aumento na inclinação do termossifão resultou na redução dos valores de pressão interna do dispositivo, ao passo que o aumento da carga térmica acarretou no aumento da pressão. Isso ocorre pelo fato que, de acordo com Xu *et al.* (2018), quanto menor a inclinação do termossifão, maior é a formação de bolhas na parede do evaporador, aumentando assim a temperatura da parede do evaporador e também a flutuação da temperatura. Dessa forma, com inclinações menores o dispositivo tende a apresentar maiores valores de temperatura e menor desempenho térmico, elevando sua resistência térmica, corroborando com o que pode ser observado nas Figs. 3 a 6. Com uma maior temperatura do dispositivo decorrente da formação de bolhas na parede do evaporador e também em maiores valores de carga térmica aplicados, consequentemente, pode ser verificado uma maior pressão interna nesse, justificando o comportamento dos dados apresentado na Fig. 7.

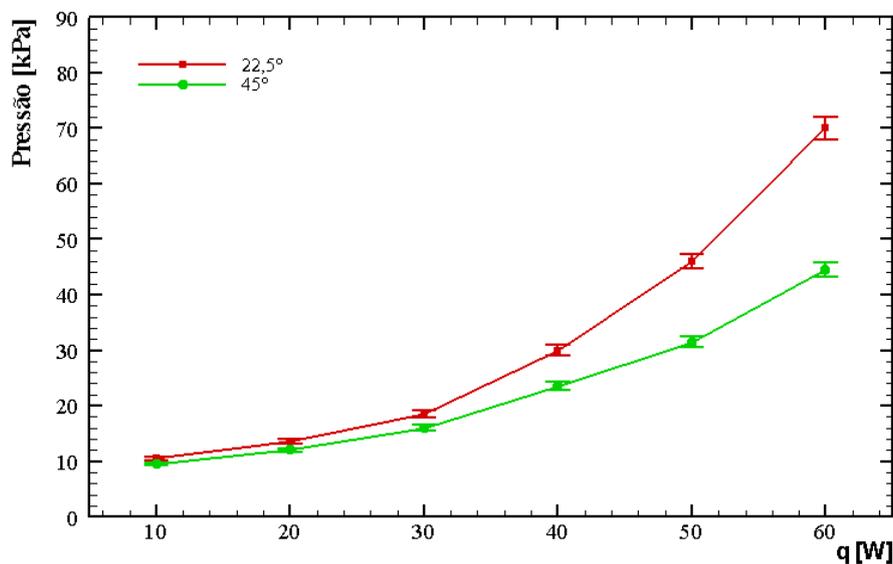


Figura 7. Pressão interna em função da carga térmica aplicada.

4. CONCLUSÃO

Esse trabalho descreveu a construção de um termossifão feito em um tubo de cobre e preenchido com água, contendo um vacuômetro analógico em sua extremidade para aferição da pressão interna do dispositivo. O termossifão foi testado em duas inclinações diferentes, 22,5° e 45°, a partir da dissipação de calor sobre o evaporador resultante da dissipação de potência sobre uma fita resistiva, e resfriamento do condensador via convecção natural a ar. O desempenho do termossifão em cada inclinação foi verificado a partir de uma análise térmica, levando-se em consideração a distribuição de

temperaturas no dispositivo em função do tempo, temperatura de operação, resistência térmica e pressão interna em função da carga térmica aplicada na região do evaporador. A partir da análise térmica foi verificado que a inclinação de 45° apresentou melhor desempenho térmico em função da inclinação de 22,5°, uma vez que apresentou menores valores de temperatura em todas as regiões, menor temperatura de operação e também menor resistência térmica para todas as cargas térmicas aplicadas. Além disso, foi verificado que quanto menor a inclinação do dispositivo, menor a sua pressão interna, que aumenta em função do aumento da carga térmica aplicada. Os dois fatos estão relacionados com a temperatura interna do dispositivo. Com a operação em menores inclinações, formam-se menos bolhas na parede do evaporador, resultando em menores temperaturas na parede dessa seção, além de menores flutuações de temperatura. Assim, quanto menor a temperatura interna, menor também a pressão. O contrário ocorre com o aumento da carga térmica aplicada, que resulta em maiores temperaturas e também maior pressão interna do dispositivo.

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

- 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.
- Huminic, G. *et al.*, 2011. “Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, p. 656-661.
- Mantelli, M.B.H., 2013. 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.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R.J., 2014. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Elsevier: Waltham/MA, USA.
- Xu, Z. *et al.*, 2018. “The influences of the inclination angle and evaporator wettability on the heat performance of a thermosyphon by simulation and experiment”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, p. 675-684.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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