

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM TUBO DE CALOR E DE UM TERMOSSIFÃO EM UM TÚNEL AERODINÂMICO

Larissa Krambeck (UTFPR/Ponta Grossa)

Vinícius Marrone de Aguiar (UTFPR/Ponta Grossa)

Michel do Espírito Santo (UTFPR/Ponta Grossa)

Paulo Henrique Dias dos Santos (UTFPR/Curitiba)

Thiago Antonini Alves (UTFPR/Ponta Grossa) E-mail: thiagoaalves@utfpr.edu.br

Resumo: Tubos de calor e termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor com ciclo bifásico, capazes de transferir grandes quantidades de energia térmica com uma pequena diferença de temperatura. Neste trabalho foi realizada uma comparação experimental do desempenho térmico de um tubo de calor e de um termossifão em um túnel aerodinâmico. Estes dispositivos, que podem ser utilizados no controle térmico de equipamentos eletroeletrônicos, foram fabricados de cobre com um comprimento total de 200 mm, um diâmetro externo de 9,45 mm e um diâmetro interno de 7,75 mm. A estrutura capilar do tubo de calor consistiu de uma malha de bronze fosforoso de *mesh* #100. O tubo de calor e o termossifão utilizaram água deionizada como fluido de trabalho com uma razão de preenchimento de 60% do volume do evaporador. O condensador foi resfriado por convecção forçada de ar em um túnel aerodinâmico. O evaporador foi aquecido por um resistor elétrico em fita de liga níquel-cromo. Os dispositivos passivos de controle térmico foram testados na posição vertical, com o condensador acima do evaporador, sob cargas térmicas compreendidas entre 1W e 5W. O tubo de calor e o termossifão testados funcionaram satisfatoriamente, porém o tubo de calor apresenta o melhor desempenho térmico.

Palavras-chave: Desempenho térmico, tubos de calor, termossifões, experimental.

EXPERIMENTAL COMPARISON OF THERMAL PERFORMANCE OF A HEAT PIPE AND A THERMOSYPHON IN AN AERODYNAMIC TUNNEL

Abstract: Heat pipes and thermosyphons are heat transfer passive devices with biphasic cycle, able of transferring large amounts of thermal energy with a small temperature difference. In this paper was performed an experimental comparison of the thermal performance of a heat pipe and of a thermosyphon in a wind tunnel. These devices can be used in electronics cooling and were made of copper with a total length of 200 mm, an outer diameter of 9.45 mm and an inner diameter of 7.75 mm. The capillary structure of the heat pipe consists of a #100 phosphor bronze mesh. The heat pipe and the thermosyphon used deionized water as working fluid with a filling ratio of 60% of the evaporator volume. The condenser was cooled by air forced convection in an wind tunnel and an electrical resistor of nickel-chromium alloy strip heated the evaporator. The passive devices of thermal control were tested in a vertical position with the condenser above the evaporator under thermal loads included between 1W and 5W. The tested heat pipe and thermosyphon have operated satisfactorily, however the heat pipe presents the best thermal performance.

Keywords: Thermal performance, heat pipes, thermosyphons, experimental.

1. INTRODUÇÃO

Tubos de calor e termossifões são dispositivos de transferência de calor que operam sob um ciclo bifásico, capazes de transferir grandes quantidades de energia térmica com uma pequena diferença de temperatura. Eles se tornaram populares devido à eficiência e à conveniência. Suas aplicações na melhoria da transferência de calor em muitas áreas industriais são inúmeras, tais como: eletroeletrônica, aeroespacial, telecomunicações, entre outras (CHEN *et al.*, 2016).

A principal característica de um tubo de calor e de um termossifão é a utilização do calor latente de vaporização do fluido de trabalho para realizar o transporte de energia na forma de calor. O tubo de calor é composto essencialmente por três componentes: um invólucro, um fluido de trabalho e uma estrutura capilar. O invólucro geralmente é um tubo oco, feito de metal, vidro ou cerâmica. O fluido de trabalho pode variar de metais líquidos (mercúrio, sódio, potássio, lítio), quando operar a altas temperaturas, passando por água, para temperaturas intermediárias, e até hélio ou nitrogênio para operar em baixas temperaturas. A estrutura capilar pode ser fabricada a partir de pós metálicos sinterizados, telas metálicas, cerâmica, fibra de vidro, ranhuras ou uma combinação destas. O termossifão apresenta o funcionamento e construção similar ao tubo de calor, porém não possui estrutura capilar, pois utiliza a ação da gravidade para a circulação do fluido internamente. Desta forma, o termossifão apresenta facilidade de construção e custo reduzido quando comparado com tubo de calor, porém, apresenta restrição quanto a posição na operação (REAY *et al.*, 2014).

O princípio de funcionamento destes dispositivos passivos de transferência de calor pode ser compreendido pelo diagrama esquemático da Figura 1. Os tubos de calor e termossifões podem ser divididos em três seções, são elas: seção do evaporador, seção adiabática e seção do condensador (FAGHRI, 2014). O evaporador é aquecido através de uma fonte quente e o fluido de trabalho é vaporizado. Esse vapor, por diferença de pressão, se desloca ao condensador. No condensador, o vapor gerado no evaporador perde energia na forma de calor e é condensado. O fluido de trabalho, no estado líquido, escoam para o evaporador pelo princípio da capilaridade, no tubo de calor, e pela ação da gravidade, no termossifão, fechando o ciclo. A seção adiabática fica entre o evaporador e o condensador, nesta região não existe troca de calor entre o dispositivo passivo e o ambiente e em alguns casos esta seção é inexistente (MANTELLI, 2013). Maiores informações sobre os tubos de calor e os termossifões podem ser encontradas em Chi (1976), Peterson (1994), Reay *et al.* (2014) e Mantelli (2015).

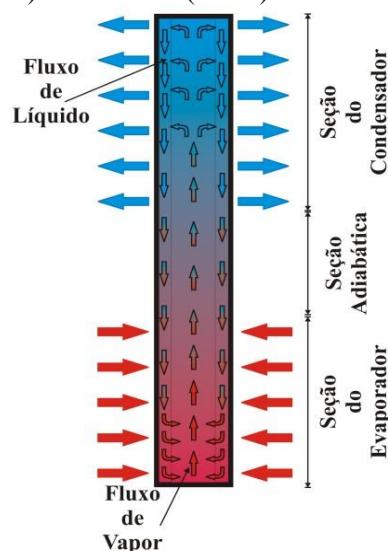


Figura 1 – Diagrama esquemático do princípio de funcionamento de um tubo de calor e de um termossifão.

No presente trabalho foi realizada uma comparação experimental do desempenho térmico de um tubo de calor e de um termossifão em túnel aerodinâmico. Devido às suas características geométricas, esses dispositivos passivos de transferência de calor podem ser utilizados no controle térmico de equipamentos eletroeletrônicos. O tubo de calor, que continha uma camada de tela metálica de bronze fosforoso de *mesh* #100 como estrutura capilar e o

termossifão foram testados na posição vertical, com o condensador acima do evaporador, sob cargas térmicas compreendidas entre 1W e 5W.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a execução da construção (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho) do tubo de calor e do termossifão, para a montagem do aparato experimental e para o procedimento experimental foi baseada levando em consideração as informações fornecidas em Krambeck *et al.* (2015), Nishida *et al.* (2015), Russo *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2017).

2.1 Características do Tubo de Calor e do Termossifão

O tubo de calor e o termossifão foram produzidos a partir tubos de cobre ASTM B75 Liga 122 com um diâmetro externo de 9,45 mm, um diâmetro interno de 7,75 mm e um comprimento total de 200 mm. Ambos os dispositivos passivos apresentam um evaporador de 80 mm de comprimento, uma região adiabática de 20 mm de comprimento e um condensador de 100 mm de comprimento. O fluido de trabalho utilizado nos dispositivos passivos de transferência de calor foi água deionizada com uma razão de preenchimento de 60% do volume do evaporador. A Tabela 1 mostra as principais características do tubo de calor e do termossifão analisados neste trabalho. Maiores informações podem ser obtidas em Krambeck (2016) e Aguiar (2016).

Tabela 1 – Características dos dispositivos passivos de transferência de calor.

Característica	Tubo de Calor	Termossifão
Diâmetro Interno [mm]	7,75	7,75
Diâmetro Externo [mm]	9,45	9,45
Comprimento do Evaporador [mm]	80,0	80,0
Comprimento da Seção Adiabática [mm]	20,0	20,0
Comprimento do Condensador [mm]	100	100
Fluido de Trabalho	Água deionizada	Água deionizada
Razão de Preenchimento [%]	60	60
Quantidade de Fluido de Trabalho [mL]	2,09	2,26
Tipo de Estrutura Capilar	Tela metálica	-
Material da Estrutura Capilar	Bronze fosforoso	-
Tamanho da Malha [#]	100	-

Como mencionado anteriormente, a estrutura capilar do tubo de calor foi uma camada de uma tela metálica de bronze fosforoso de *mesh* #100 (Figura 2a). Na Figura 2(b) é mostrada uma imagem microscópica, obtida por um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da malha metálica *mesh* #100 (KRAMBECK, 2016). Pode ser notado que o diâmetro dos fios de

bronze fosforoso é de 0,10 mm (100,07 μm) e que a abertura da malha é de 0,15 mm (150,10 μm).

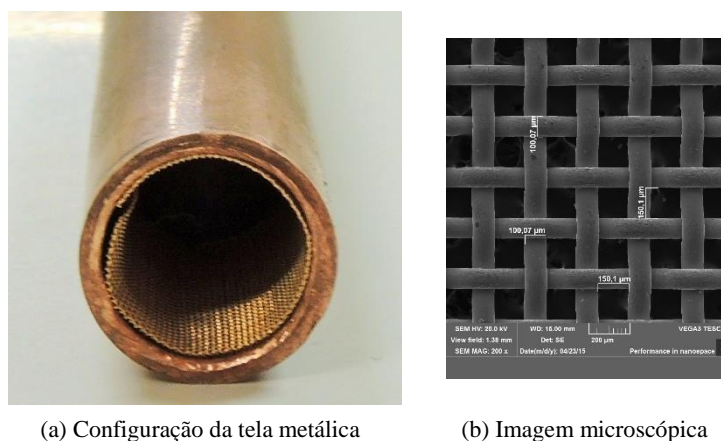


Figura 2 – Estrutura capilar do tubo de calor com tela metálica com *mesh* #100.

2.2 Limpeza do Tubo de Calor e do Termossifão

A limpeza do tubo de calor e do termossifão é muito importante pois garante a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e melhora a qualidade do vácuo (NISHIDA, 2016). Todos os componentes do tubo de calor e do termossifão foram completamente limpos, antes que do carregamento com fluido de trabalho. Para tal, os invólucros, as tampas de fechamento (usinadas a partir de uma barra maciça de cobre ASTM B75 Liga 122 com diâmetro de 9,45 mm) e os capilares (tubo de cobre ASTM B75 Liga 122 com diâmetro interno de 1 mm e com comprimento de 40 mm) foram previamente limpos utilizando primeiramente acetona, para retirar as maiores sujidades. Após esse procedimento inicial, uma limpeza com uma solução de ácido sulfúrico com concentração de 10% em volume (H_2SO_4 de 0,1M). Feito isso, os componentes foram levados a um banho ultrassônico *Kondentech*TM, permanecendo mergulhados em acetona, para que sejam completamente limpos, por 30 (trinta) minutos (Figura 3).



Figura 3 – limpeza dos componentes no banho ultrassônico.

2.3 Montagem do Tubo de Calor e do Termossifão

Após a realização da limpeza dos componentes, o tubo de calor e o termossifão podem ser propriamente construídos. Primeiramente, a tela metálica de bronze fosforoso de *mesh* #100 foi cuidadosamente inserida no interior do invólucro do tubo de calor e, em seguida, as tampas de fechamento e o capilar foram soldados nas extremidades do tubo de calor de acordo com as posições mostradas na Figura 4. O termossifão foi montado da mesma maneira, porém sem a inserção de uma tela metálica como estrutura capilar. O processo de soldagem foi efetuado com o auxílio de um ferro de soldar *Hikari™ Power 300* e as peças foram brasadas utilizando uma liga de estanho como material de adição.



Figura 4 - Montagem do tubo de calor e do termossifão.

2.4 Teste de Estanqueidade

Para verificar se não houve falha no processo de soldagem, foi realizado um teste de estanqueidade utilizando uma bomba de deslocamento positivo manual, um recipiente com água e uma conexão para ligar a bomba ao tubo capilar. Para tal, o tubo de calor foi inserido dentro do recipiente contendo água e, com a bomba de deslocamento positivo foi bombeado ar para dentro do tubo. Se houvesse alguma falha, surgiriam bolhas na água, demonstrando que existiam falhas na solda. Caso ocorresse o surgimento de bolhas, o tubo de calor deveria ser desmontado, limpo, soldado e testado para a correção da falha no processo de soldagem. O mesmo procedimento foi realizado para o termossifão.

2.5 Processo de Evacuação

Antes do preenchimento do tubo de calor e do termossifão com água deionizada, foi necessário fazer vácuo no interior dos tubos através da utilização de uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV* (Figura 5). Com o auxílio de uma mangueira polimérica conectada ao capilar do dispositivo passivo de transferência de calor, o vácuo foi realizado. Essa mangueira é interligada à bomba de vácuo através de uma válvula de controle de fluxo e uma mangueira flexível de borracha. Após isso, a bomba de vácuo foi ligada. Recomenda-se que este processo tenha a duração de, pelo menos, 5 (cinco) horas. Durante o processo de vácuo, a pressão interna atingida é de 90 mbar (9 kPa) e a temperatura de saturação da água relacionada com essa pressão é aproximadamente 43,74 °C.

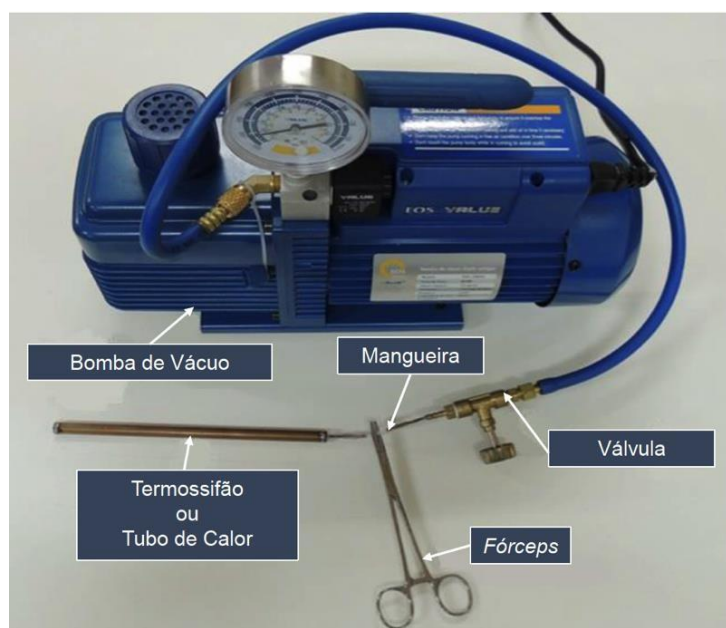


Figura 5 - Bomba de vácuo e dispositivo passivo de controle térmico.

2.6 Preenchimento do Tubo de Calor e do Termossifão com o Fluido de Trabalho

A quantidade de fluido de trabalho inserida no interior do tubo de calor é muito importante para o sistema de bombeamento capilar (KRAMBECK, 2016). Se não existir quantidade suficiente de fluido, o sistema de bombeamento para de funcionar e o tubo de calor entra em colapso e, conseqüentemente, a transferência de calor é interrompida. Para realizar o preenchimento do tubo de calor e do termossifão com o fluido de trabalho, foi desenvolvida uma pequena estação de preenchimento composta por um suporte universal, uma bureta graduada (escala de 0,1 ml) com capacidade de 25 ml *Global Glass™* e um *fórceps* (Figura 6). Primeiramente, o tubo de calor evacuado foi acoplado à uma mangueira polimérica que faz conexão com a bureta. Feito isso, a mangueira foi pinçada com o *fórceps* para evitar que ar entrasse no tubo de calor. A bureta estava completamente preenchida com o fluido de trabalho. O próximo passo foi abrir a válvula da bureta cuidadosamente para que não fosse formada nenhuma bolha de ar na tubulação entre a bureta e o tubo de calor. O *fórceps* foi cuidadosamente aberto para drenar o fluido de trabalho até que o tubo de calor fosse carregado com 2,09 mL (60% do volume do evaporador). Destaca-se que no momento do preenchimento, muito cuidado é necessário para que não se perca o vácuo existente dentro do tubo de calor. Se isso acontecer, todo o processo de vácuo deve ser realizado novamente. Após o carregamento, o capilar foi clipado com um alicate de pressão (Figura 7) e a extremidade soldada para completa vedação. Em seguida, o mesmo procedimento foi repetido para o preenchimento do termossifão, porém a quantidade de fluido de trabalho correspondente a 60% do volume do evaporador foi de 2,26 mL.

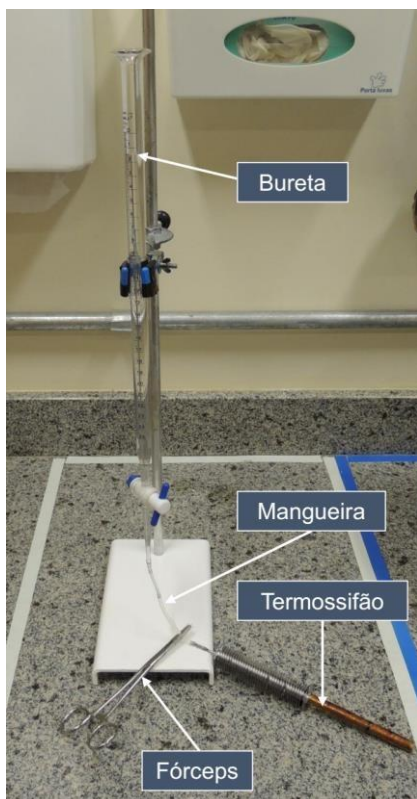


Figura 6 - Estação de Preenchimento.



Figura 7 - Clipagem do capilar.

2.7 Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para os testes experimentais, mostrado na Figura 8, foi composto por uma fonte de alimentação *Politerm™* 16E, um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais, um computador *Dell™* e um túnel aerodinâmico.

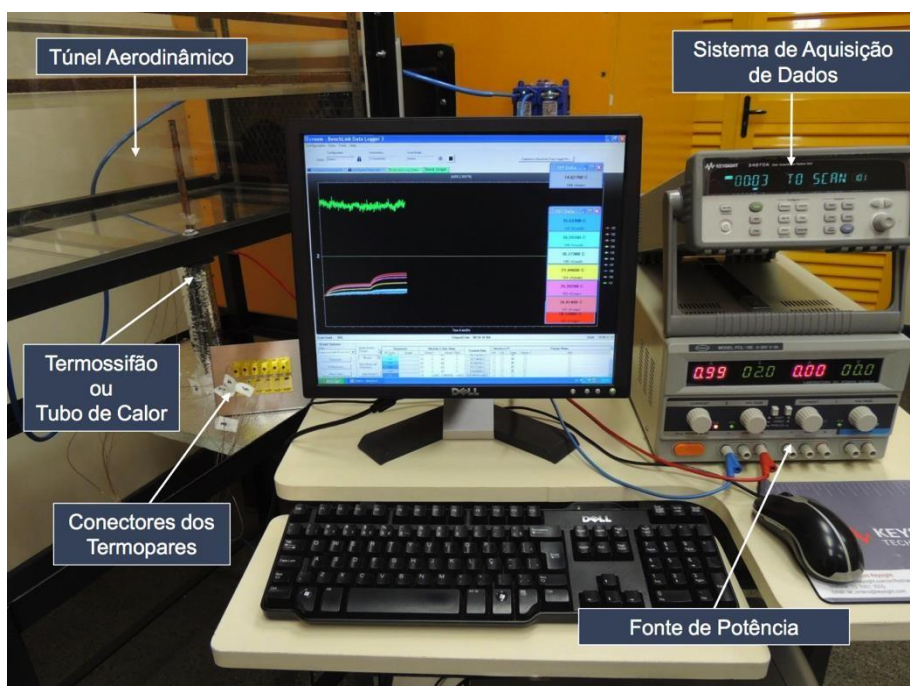


Figura 8 - Aparato Experimental.

O túnel aerodinâmico utilizado nos testes experimentais é do tipo sucção com retorno aberto concebido para a execução de pesquisas científico-tecnológicas em controle térmico de componentes eletroeletrônicos montados em placas de circuito impresso. A Figura 9 mostra um diagrama esquemático do túnel aerodinâmico. Ele é constituído por um *plenum*, uma caixa de estabilização, uma seção de testes, uma contração, um conjunto medidor de vazão (placa de orifício), uma conexão flexível e um ventilador centrífugo. Todos estes elementos têm por finalidade propiciar um escoamento na seção de testes rigorosamente paralelo ao eixo do túnel, sem componentes transversais de velocidade, isento de rotação ou de vórtices. Maiores informações podem ser encontradas em Antonini Alves *et al.* (2013).

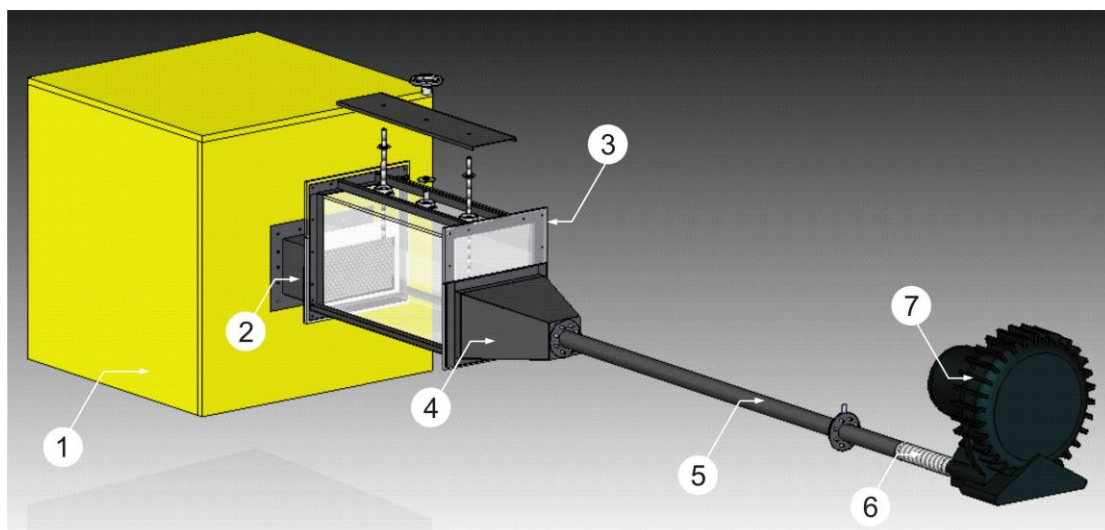


Figura 9 - Diagrama esquemático do túnel aerodinâmico utilizado: (1) *plenum*, (2) caixa de estabilização, (3) seção de testes, (4) contração, (5) conjunto medidor de vazão, (6) conexão e (7) ventilador centrífugo.

Para avaliação do comportamento térmico do tubo de calor e do termossifão, foram utilizados termopares *Omega Engineering*TM do Tipo K. Esses sensores de temperatura foram fixados na superfície externa dos dispositivos passivos de transferência de calor utilizando uma fita adesiva termosensível *Kapton*TM. Como mostrado na Figura 10, três termopares foram fixados no evaporador, um termopar na seção adiabática e quatro termopares no condensador do tubo de calor e do termossifão.

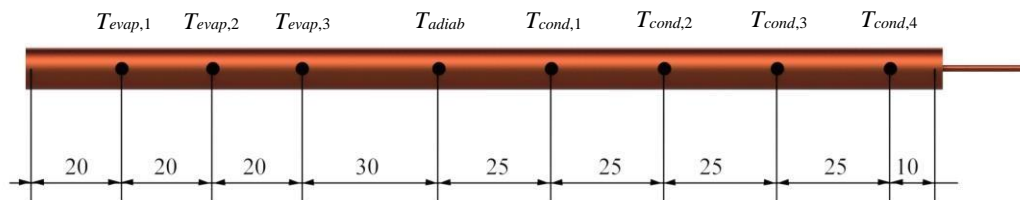


Figura 10 - Posicionamento dos termopares no tubo de calor e no termossifão [mm].

O sistema de aquecimento do evaporador foi realizado pela dissipação de potência proveniente da passagem de uma corrente elétrica em uma fita resistiva *Omega Engineering*TM de liga níquel-cromo de 0,1 mm de espessura e 3,5 mm de largura. Para garantir que todo o calor gerado por efeito *Joule* fosse transmitido ao evaporador foram instalados nesta região um isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno. Uma fita de fibra de vidro foi utilizada na seção adiabática como um isolante térmico. O condensador do tubo de calor e do termossifão foi resfriado por convecção forçada de ar na seção de testes do túnel aerodinâmico.

2.8 Procedimento Experimental

Para garantir um melhor resultado e a repetitividade dos testes experimentais, a temperatura do ambiente foi mantida em $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um sistema de condicionamento de ambiente de 72.000 BTU's *Rheem*TM. Uma verificação minuciosa dos equipamentos do aparato experimental e do dispositivo passivo de transferência de calor testado (fixação de termopares, isolamento térmico, conexão do resistor, entre outros) foi feita antes de cada teste experimental. O dispositivo passivo testado foi cuidadosamente fixado na seção de testes do túnel aerodinâmico e sua posição foi fixada na vertical com o condensador acima do evaporador. O ventilador centrífugo *Aeromack*TM CRE-03 do túnel aerodinâmico, acionado por um motor elétrico de indução *Voges*TM com uma potência de 2 CV e com 3445 rpm, foi ligado e ajustado a uma velocidade de 5 m/s com um erro combinado de $\pm 0,2$ m/s por um inversor de frequência *WEG*TM CFW-08. O sistema de aquisição de dados foi, então, ativado e as temperaturas medidas pelos termopares eram verificadas em relação à temperatura ambiente, e, se estas estivessem estáveis e aproximadamente a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, finalmente, a fonte de alimentação era ligada e ajustada na dissipação de potência desejada. A potência inicial dissipada pela resistência elétrica foi de 1W e, após aproximadamente 30 minutos, era verificada se a condição de regime *quasi* permanente era alcançada nos testes experimentais. Em caso positivo, a dissipação de potência era reajustada com um acréscimo de 1W e nos casos em que regime *quasi* permanente não foi alcançado nesse período de tempo, a potência foi mantida até que se atingisse esta condição. O incremento de potência foi feito até 5W. Os dados foram coletados a cada 10 segundos, gravados no computador *Dell*TM através do *software Agilent*TM *Benchlink Data Logger 3* e, posteriormente, tratados e analisados.

As incertezas experimentais estão associadas às incertezas dos sensores de temperatura (termopares do Tipo K), ao sistema de aquisição de dados e à fonte de alimentação e foram apresentadas juntamente com os resultados obtidos. Para a determinação da incerteza da medição da potência elétrica foi utilizado o método de propagação de erros descrito por Holman (2011). Este mesmo procedimento foi aplicado para a determinação das incertezas das resistências térmicas dos dispositivos passivos de transferência de calor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais apresentam o comportamento térmico de um tubo de calor com tela metálica e um termossifão, operando na posição vertical, com o condensador acima do evaporador. Os testes experimentais foram repetidos três vezes e os erros foram comparados levando em consideração que a diferença entre as médias dos valores fossem menores que $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os testes foram realizados para carga térmicas crescentes de 1W, variando de 1W até 5W. A temperatura ambiente foi mantida em $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. As incertezas experimentais de temperatura foram estimadas em aproximadamente $\pm 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de carga térmica foram $\pm 1\%$. Cada dissipação de potência foi aplicada por aproximadamente 30 (trinta) minutos, onde todos os termopares demonstraram um valor em regime *quasi* permanente.

A Figura 11 apresenta a distribuição de temperaturas em função do tempo para o tubo de calor e a Figura 12 apresenta esta distribuição para o termossifão. Para o termossifão a temperatura máxima alcançada foi de aproximadamente 68°C enquanto que para o tubo de calor, a temperatura máxima atingida foi de $48\text{ }^{\circ}\text{C}$.

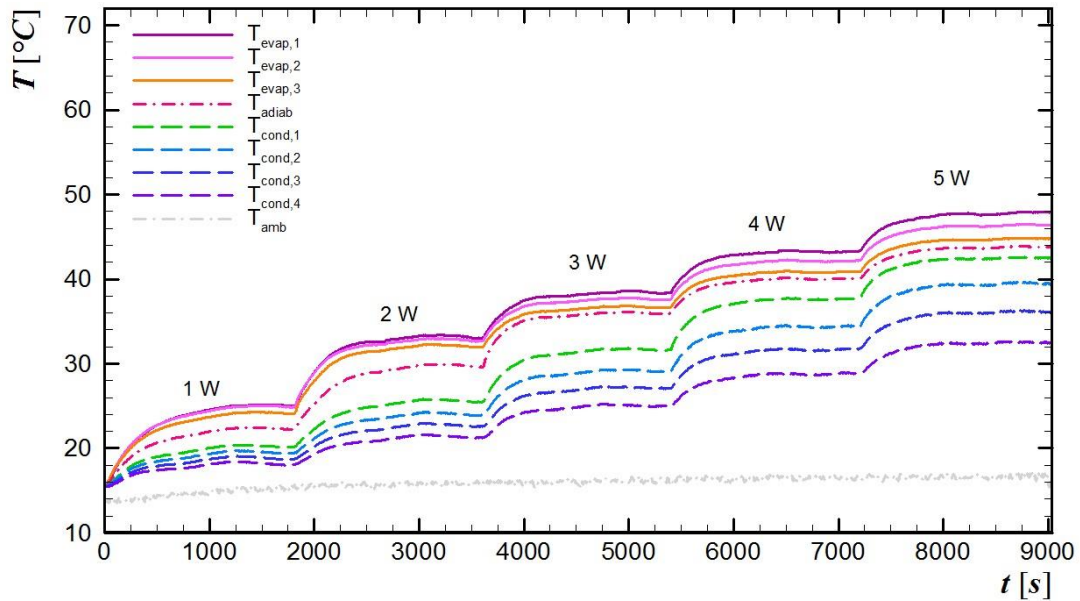


Figura 11 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para o tubo de calor.

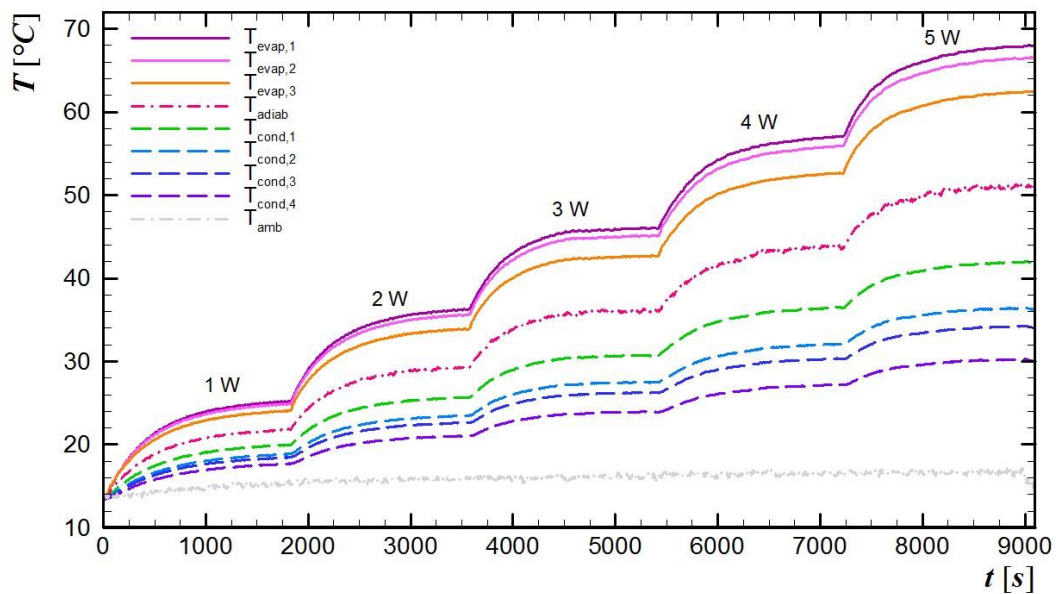


Figura 12 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para o termossifão.

A Figura 13 ilustra o comportamento da resistência térmica em função da dissipação de potência considerando os diferentes dispositivos passivos de controle térmico. A resistência térmica do tubo de calor e do termossifão diminui com o aumento da energia dissipada na forma de calor na região do evaporador. A Tabela 2 mostra os valores da resistência térmica do tubo de calor e do termossifão em regime *quasi* permanente e sua respectiva incerteza experimental em função da potência dissipada parametrizada para a inclinação de operação.

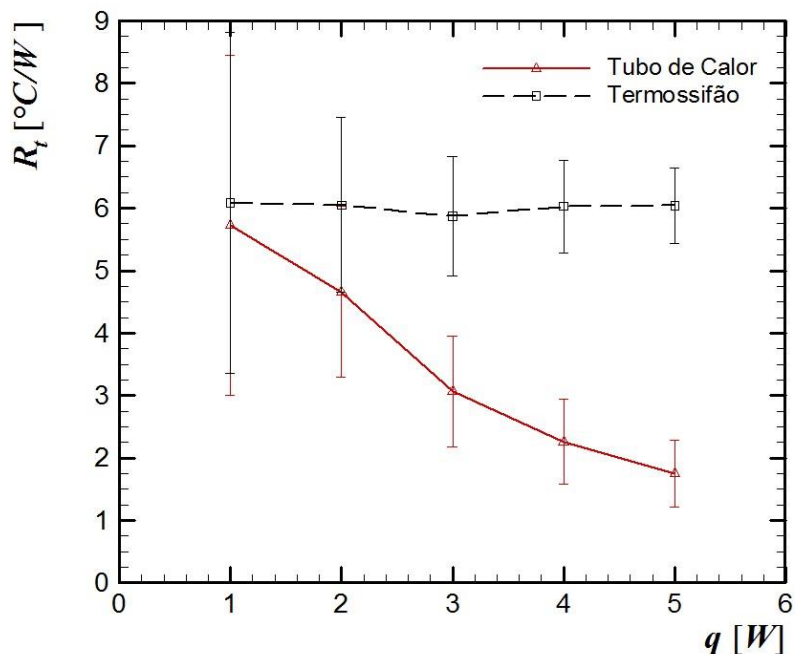


Figura 13 - Resistência térmica em função da potência dissipada para os diferentes dispositivos passivos de transferência de calor.

Tabela 2 – Resistência térmica em função da potência dissipada.

Potência Dissipada	Resistência Térmica	
	Tubo de Calor	Termossifão
1 W	5,724 ± 2,719	6,085 ± 2,729
2 W	4,662 ± 1,371	6,049 ± 1,399
3 W	3,059 ± 0,888	5,874 ± 0,953
4 W	2,259 ± 0,680	6,030 ± 0,742
5 W	1,749 ± 0,535	6,043 ± 0,603

Na Figura 14, o comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada pode ser avaliado para o tubo de calor e para o termossifão. A Tabela 3 apresenta os valores da temperatura de operação do tubo de calor e do termossifão e sua respectiva incerteza experimental em função da potência dissipada parametrizada. Pode ser notado, que conforme a potência dissipada aumenta, a temperatura de operação também aumenta.

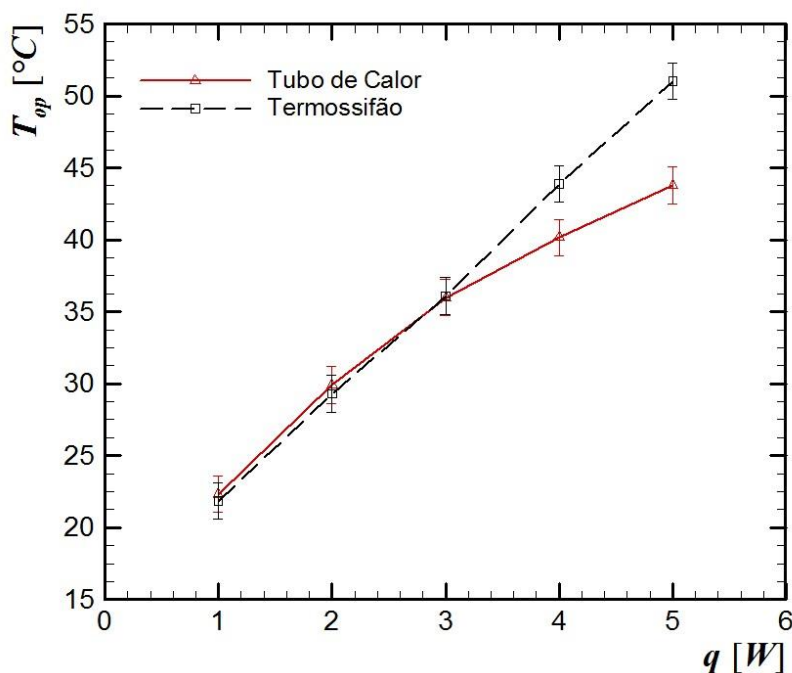


Figura 14 - Comportamento térmico dos diferentes dispositivos passivos de transferência de calor.

Tabela 3 – Temperatura de Operação em função da potência dissipada.

Potência Dissipada	Temperatura de Operação	
	Tubo de Calor	Termossifão
1 W	22,34 ± 1,27	21,86 ± 1,27
2 W	29,91 ± 1,27	29,31 ± 1,27
3 W	35,99 ± 1,27	36,09 ± 1,27
4 W	40,15 ± 1,27	43,88 ± 1,27
5 W	43,79 ± 1,27	51,01 ± 1,27

Ambos os dispositivos passivos de transferência de calor testados, tubo de calor com tela metálica como estrutura capilar e termossifão, funcionaram satisfatoriamente. Dos resultados experimentais, pode ser notado que o tubo de calor apresentou o melhor desempenho térmico, pois possui uma menor resistência térmica.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi executada uma comparação experimental do comportamento térmico de um tubo de calor com tela metálica *mesh* #100 como estrutura capilar e de um termossifão em um túnel aerodinâmico. Devido às suas características geométricas, esses dispositivos passivos de transferência de calor podem ser utilizados no controle térmico de equipamentos eletroeletrônicos. O tubo de calor e o termossifão continham água deionizada como fluido de

trabalho e foram carregados com uma razão de preenchimento de 60 % do volume do evaporador. Eles foram testados na posição vertical sob cargas térmicas compreendidas entre 1W e 5W. Os resultados experimentais mostraram que o termossifão e o tubo de calor funcionaram satisfatoriamente, porém o tubo de calor apresentou um melhor desempenho térmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor e ao terceiro autor. Agradecimentos também são externados ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR (PROPPG), 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 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)/*Câmpus* Ponta Grossa.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, V.M. *Influência da Razão de Preenchimento e da Inclinação no Desempenho Térmico de Termossifões*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

ANTONINI ALVES, T., RAMIREZ-BEHAINNE, J.J. & MACHADO FILHO, M.C. *Concepção e Testes Preliminares de um Túnel Aerodinâmico do Tipo Sucção com Retorno Aberto para Ensino e Pesquisa em Engenharia*. Revista Técnico-Científica CREA-PR, Vol. 1, p.1-17, 2013.

CHEN, X., YE, H., FAN, X., REN, T. & ZHANG, G. *A Review of small heat pipes for electronics*. Applied Thermal Engineering, Vol. 96, p.01-17, 2016.

CHI, S.W. *Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook*. Washington: Hemisphere Publishing Co., 1976.

FAGHRI, A. *Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges*. Frontiers in Heat Pipes, Vol. 5, p.1-48, 2014.

HOLMAN, J.P. *Experimental Methods for Engineers*. New York: McGraw-Hill, 2011.

KRAMBECK, L., NISHIDA, F.B., SANTOS, P.H.D. & ANTONINI ALVES, T. *Configurations of Phosphor Bronze Meshes in Heat Pipes: An Experimental Analysis of Thermal Performance*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, Vol. 2, p.11-14, 2015.

KRAMBECK, L. *Avaliação Experimental do Desempenho Térmico de Telas Metálicas como Estrutura Capilar em Tubos de Calor*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

MANTELLI, M.B.H. *Thermosyphon Technology for Industrial Applications*, Chapter 11. In: **VASILIEV, L.L. & KAKAÇ, S.** (Eds.), *Heat Pipes and Solid Sorption Transformations: Fundamentals and Practical Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2013.

MANTELLI, M.B.H. *Tubos de Calor e Termossifões*. Notas de Aula, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2015.

NISHIDA, F.B. *Desenvolvimento de Tubos de Calor com Microranhuradas Fabricadas por Eletroerosão A Fio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

NISHIDA, F.B., MARQUARDT, L.S., BORGES, V.Y.S., SANTOS, P.H.D. & ANTONINI ALVES, T. *Development of a Copper Heat Pipe with Axial Grooves Manufactured using Wire Electrical Discharge Machining (Wire-EDM)*. *Advanced Materials Research (Online)*, Vol. 1120, p.1325-1329, 2015.

PETERSON, G.P. *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications*. New York: Wiley-Interscience, 1994.

REAY, D.A., KEW, P.A. & MCGLEN, R.J. *Heat Pipe: Theory, Design and Applications*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014.

RUSSO, G.M., KRAMBECK L., NISHIDA, F.B., SANTOS, P.H.D. & ANTONINI ALVES, T. *Desempenho Térmico de Diferentes Fluidos de Trabalho em Termossifões*. Anais do 12º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM XII, 2015.

SANTOS, P.H.D., VICENTE, K.A.T., REIS, L.S., MARQUARDT, L.S. & ANTONINI ALVES, T. *Modeling and Experimental Tests of a Copper Thermosyphon*. *Acta Scientiarum. Technology*, Vol. 39, n.1, p.59-68, 2017.