

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESEMPENHO TÉRMICO DE DIFERENTES DISPOSITIVOS PASSIVOS DE RESFRIAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com¹

Felipe Baptista Nishida, felipenishida@hotmail.com¹

Vinicius Marrone de Aguiar, viniciusmarrone@hotmail.com¹

Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br²

Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br¹

Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR, ¹Câmpus Ponta Grossa, ²Câmpus Curitiba

Resumo: Neste trabalho foi realizada uma comparação experimental do desempenho térmico de quatro diferentes dispositivos passivos de transferência de calor que podem ser utilizados no resfriamento de equipamentos eletroeletrônicos. Os dispositivos considerados foram uma barra sólida, um termossifão, um tubo de calor com tela metálica como estrutura capilar e um tubo de calor com microranhuras. O tubo de calor é um dispositivo altamente eficiente que transporta grandes quantidades de energia a partir de uma pequena diferença de temperatura. O tubo de calor é composto pelo invólucro, fluido de trabalho e a estrutura capilar. O termossifão é um tipo de tubo de calor assistido pela gravidade, ou seja, não possui estrutura capilar para o retorno do fluido de trabalho. A tela metálica é a estrutura mais comumente utilizada, devido a disponibilidade, a facilidade de construção e o bom bombeamento capilar. As microranhuras como estrutura capilar apresentam uma elevada condutividade térmica e permeabilidade. Os dispositivos foram fabricados de cobre com um comprimento total de 200 mm e um diâmetro externo de 9,45 mm. O termossifão e os tubos de calor 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 e evaporador foi aquecido por um resistor elétrico em fita de liga níquel-cromo. Os dispositivos passivos de transferência de calor foram testados na posição vertical, com o condensador acima do evaporador, sob cargas térmicas compreendidas entre 5W e 45W. Todos os dispositivos testados funcionaram satisfatoriamente e, de acordo com o comportamento térmico, os tubos de calor apresentaram os melhores desempenhos.

Palavras-chave: dispositivos passivos, desempenho térmico, análise experimental, tubos de calor, termossifões

1. INTRODUÇÃO

O contínuo aumento na dissipação de potência dos eletroeletrônicos concomitantemente a uma miniaturização em suas dimensões, ocasionam condições severas de temperatura para as soluções de resfriamento nestes componentes. Desta forma, há situações em que as necessidades de resfriamento não podem ser satisfeitas por técnicas convencionais, tais como simples aletas resfriadas por convecção forçada de ar. A demanda por técnicas avançadas, a busca por melhoramentos e inovações tecnológicas em resfriamento de equipamentos eletroeletrônicos tem sido elevada nas últimas duas décadas, através de desenvolvimentos industriais e atividades de pesquisa acadêmica (NISHIDA, 2012).

Tubos de calor e termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor de duas fases, capazes de transferir grandes quantidades de calor com uma pequena diferença de temperatura, que se tornaram muito populares nas últimas décadas devido à sua eficiência e à sua conveniência (REAY *et al.*, 2014). Estes dispositivos são aplicados para melhorar a transferência de calor em muitas áreas industriais, tais como: eletroeletrônica, aeroespacial, telecomunicações, alimentícias, entre outras (CHEN *et al.*, 2007). Os tubos de calor e os termossifões são dispositivos com altíssima condutividade térmica com 10-50 vezes maior do que uma barra de cobre maciça com as mesmas dimensões (OBATA *et al.*, 2015). O calor transmitido por meio deste dispositivo passivo é baseado no princípio da mudança de fase. As principais vantagens dos tubos de calor e dos termossifões consistem em uma elevada condutividade térmica, não há necessidade de bombeamento de energia, não apresenta partes móveis e as quedas de pressão são relativamente baixa (KRAMBECK *et al.*, 2015). Além disso, os tubos de calor e os termossifões são dispositivos de relativamente simples fabricação e, portanto, de custo reduzido quando a sua geometria é favorável. Contudo, à medida que suas dimensões são reduzidas, a complexidade de fabricação aumenta, resultando em um consequente aumento de seu custo (FAGHRI, 2014).

De acordo com Mantelli (2015), os tubos de calor e os termossifões possuem três regiões distintas, o evaporador, a seção adiabática e o condensador e operam conforme o seguinte princípio: na região do evaporador, calor é fornecido ao tubo de calor ou ao termossifão, vaporizando o fluido de trabalho contido dentro dessa região. O vapor gerado se desloca, devido às diferenças de pressão, para as regiões frias do tubo de calor ou do termossifão (condensador) onde o calor transportado é rejeitado para a fonte fria. Neste processo de rejeição de calor, o vapor condensa e o condensado retorna ao evaporador, fechando o ciclo. A região adiabática, que pode ter dimensões variadas (sendo inexistentes em alguns casos) é localizada entre o evaporador e o condensador, sendo isolada do meio externo. O retorno do fluido de trabalho do condensador ao evaporador ocorre pelo efeito do bombeamento capilar, resultante do escoamento do condensado pelo meio poroso, que normalmente reveste a parede interna do tubo de calor, ou exclusivamente pela ação da gravidade, nos termossifões. Um diagrama esquemático do princípio de funcionamento dos tubos de calor e dos termossifões é apresentado na Fig. 1. Maiores detalhes sobre o princípio de funcionamento dos tubos de calor e dos termossifões podem ser encontrados em Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014).

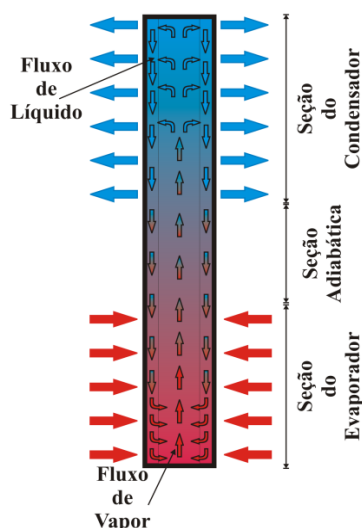


Figura 1. Desenho esquemático do princípio de funcionamento de um tubo de calor.

A estrutura capilar dos tubos de calor pode ser composta de fibra de vidro corrugada, de telas metálicas, de ranhuras ou de pós metálicos sinterizados. A tela metálica é a estrutura capilar mais comumente utilizada, devido a disponibilidade, a facilidade de construção e o bom bombeamento capilar. As ranhuras como estrutura capilar apresentam uma elevada condutividade térmica e boa permeabilidade (NISHIDA, 2016). Como mencionado anteriormente, o termossifão é um tipo de tubo de calor assistido pela gravidade, ou seja, não possui estrutura porosa para o retorno do fluido de trabalho. O meio de retorno do fluido de trabalho para o evaporador tem elevada influência na eficiência do dispositivo (AGUIAR, 2016).

Neste contexto, no presente trabalho foi efetuada uma investigação experimental do desempenho térmico de quatro diferentes dispositivos passivos de transferência de calor que, devido às suas características geométricas, podem ser utilizados em resfriamento de equipamentos eletroeletrônicos. Os dispositivos analisados foram: uma barra sólida, um termossifão, um tubo de calor contendo uma tela metálica de *mesh* #100 como estrutura capilar e um tubo de calor com microranhuras usinadas por eletroerosão a fio.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na construção (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho) dos dispositivos passivos de transferência de calor, na montagem experimental e no procedimento dos testes experimentais foi baseada levando em consideração as instruções fornecidas em Santos *et al.* (2014), Nishida *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2016).

2.1. Características dos Dispositivos Passivos Desenvolvidos

Os tubos de calor e o termossifão foram provenientes de tubos de cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro externo de 9,45 mm, com diâmetro interno de 7,75 mm e com comprimento total de 200 mm (Fig. 2). A barra sólida foi produzida a partir de uma barra maciça de cobre ASTM B75 Liga 122 com as mesmas dimensões dos tubos de calor e do termossifão produzidos. Todos estes dispositivos possuem um evaporador com 80 mm de comprimento, uma região adiabática com 20 mm de comprimento e um condensador com 100 mm de comprimento. Os tubos de calor e o termossifão foram carregados com o água deionizada, como fluido de trabalho com uma razão de preenchimento de 60% do volume do evaporador. A Tabela 1 mostra as principais características dos dispositivos passivos de transferência de calor analisados neste trabalho.



Figura 2. Dispositivo passivo de transferência de calor.

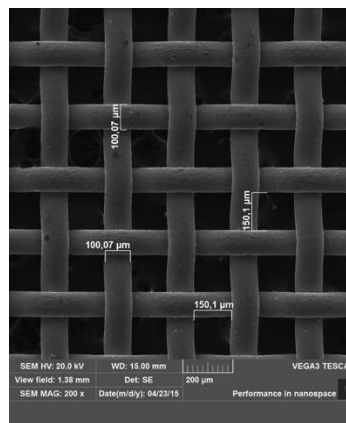
Tabela 1. Principais características dos Dispositivos Passivos.

Características	Barra Sólida	Termossifão (AGUIAR, 2016)	Tubo de Calor com Tela Metálica (KRAMBECK, 2016)	Tubo de Calor com Microranhura (NISHIDA, 2016)
Diâmetro interno [mm]	-	7,45	7,45	6,20
Diâmetro externo [mm]	9,45	9,45	9,45	9,45
Comprimento do evaporador [mm]	80,0	80,0	80,0	80,0
Comprimento da seção adiabática [mm]	20,0	20,0	20,0	20,0
Comprimento do condensador [mm]	100,0	100,0	100,0	100,0
Fluido de trabalho	-	Água deionizada	Água deionizada	Água deionizada
Quantidade do fluido de trabalho [ml]	-	2,27	2,19	1,73
Razão de preenchimento [%]	-	60	60	60
Estrutura Capilar	-	-	Tela metálica de bronze fosforoso com <i>mesh</i> #100	Microranhuras usinadas por eletroerosão a fio

O tubo de calor com tela metálica utilizou como estrutura capilar uma camada de malha de bronze fosforoso com *mesh* #100 – Fig. 3(a). A imagem microscópica da tela metálica utilizada, obtida por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), é apresentada na Fig. 3(b). Maiores informações sobre este tubo de calor podem ser obtidas em Krambeck (2016).



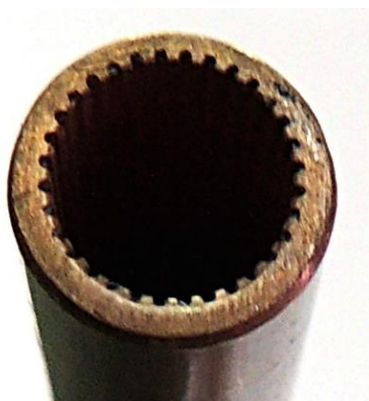
(a) Configuração da tela metálica



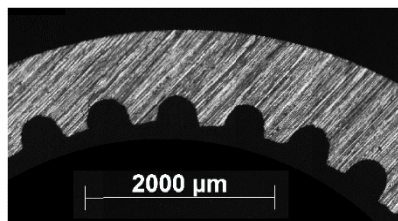
(b) Imagem microscópica (MEV) da tela

Figura 3. Estrutura capilar de tela metálica *mesh* #100.

O tubo de calor ranhurado contendo 32 microranhuras fabricadas pelo processo de eletroerosão a fio (*wire electrical discharge machining* ou *wire-EDM*) é mostrado na Fig. 4(a). Os detalhes destas microranhuras são mostrados por meio de imagens microscópicas na Fig. 4(b). Maiores detalhes sobre este tubo de calor por ser encontrados em Nishida (2016).



(a) Configuração da microranhura



(b) Imagem microscópica da microranhura

Figura 4. Estrutura capilar de microranhuras.

2.2. Limpeza dos Tubos de Calor e do Termossifão

A limpeza dos tubos de calor e do termossifão foi necessária para garantir a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e melhorar a qualidade do vácuo. Desta forma, todos os componentes dos tubos de calor e do termossifão necessitam estar completamente limpos, antes que o fluido de trabalho seja introduzido. Para tal, os invólucros (tubos de cobre com 200 mm de comprimento), 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 tubos 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, seguido de uma limpeza com uma solução de ácido sulfúrico com concentração de 10% em volume (H_2SO_4 de 0,1 M). Feito isso, estes componentes foram levados a um banho ultrassônico *Kondentech™*, permanecendo mergulhados em acetona, para que sejam completamente limpos, durante 15 minutos (Fig. 5).



Figura 5. Limpeza das partes dos dispositivos passivos no banho ultrassônico.

2.3. Montagem dos Tubos de Calor e do Termossifão

Após a realização da limpeza de seus componentes, os tubos de calor e o termossifão podem ser propriamente montados. As tampas de fechamento e o capilar foram soldados nas extremidades dos tubos de calor e do termossifão de acordo com as posições mostradas na Fig. 6. 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 6. Componentes dos tubos de calor.

2.4. Teste de Estanqueidade

Para verificar se não houve falha no processo de soldagem, foram realizados testes 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, os tubos de calor e o termossifão foram inseridos 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 e/ou termossifão com defeito deveria ser desmontado, limpo, soldado e testado para a correção da falha no processo de soldagem.

2.5. Procedimento de Evacuação

Primeiramente, os tubos de calor e o termossifão foram acoplados a uma bomba de vácuo LAB1000™, através do capilar, para o processo de evacuação inicial, com o intuito de remover principalmente o líquido remanescente do processo de limpeza. Feito isso, os dispositivos passivos foram acoplados a uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV* (Fig. 7). Para garantir uma conexão sem vazamentos, gel de vedação (silicone) foi aplicado nas conexões da mangueira polimérica previamente à realização de vácuo nos tubos. A bomba de vácuo permaneceu em funcionamento por aproximadamente 5 horas. Durante o processo de vácuo, a pressão interna atingida é de 90 mbar (9kPa) e a temperatura de saturação da água relacionada com essa pressão é aproximadamente 43,74°C. Com o auxílio de um *fórceps*, a mangueira polimérica foi vedada e então, a bomba de vácuo foi desligada.

2.6. Preenchimento dos Tubos de Calor e do Termossifão com o Fluido de Trabalho

A quantidade de fluido de trabalho inserido nos tubos de calor e no termossifão é muito importante para que o ciclo dentro deles seja completado, pois se não houver fluido suficiente, o evaporador secará, levando ao colapso os tubos de calor e/ou o termossifão. Como resultado, a transferência de calor será interrompida. Para realização do preenchimento dos tubos de calor e do termossifão com o fluido de trabalho desejado, 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* (Fig. 8). Cada tubo de calor e termossifão 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 e/ou no termossifão. 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 e/ou o termossifão. O *fórceps* foi cuidadosamente aberto para drenar o fluido de trabalho até que o tubo de calor e/ou o termossifão fosse carregado com a quantidade desejada de fluido de trabalho. Destaca-se que no momento do preenchimento, muito cuidado é necessário para que não se perca o vácuo existente dentro dos tubos de calor e/ou do termossifão. Se isso acontecer, todo o processo de vácuo deve ser realizado novamente. Os tubos de calor e o termossifão foram preenchidos com o correspondente a 60% do volume dos seus evaporadores, ou ainda, uma razão de preenchimento de 60%.



Figura 7. Bomba de vácuo e o tubo de calor.

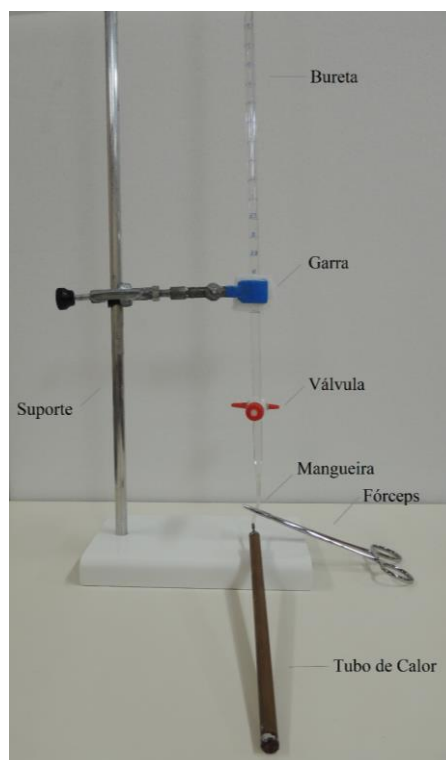


Figura 8. Estação de preenchimento dos tubos de calor.

Após o procedimento de carregamento do fluido de trabalho, o *fórceps* foi fechado e, então, o capilar foi conformado (clipado) com um alicate de pressão (Fig. 9), bloqueando o único caminho pelo qual o ar poderia entrar. Além disso, a extremidade do capilar soldada (Fig. 10) para completar o processo de vedação nos tubos de calor e no termossifão.



Figura 8. Clipagem do capilar do tubo de calor.



Figura 9. Soldagem do capilar do tubo de calor.

2.7. Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para os testes experimentais, mostrado na Fig. 10, foi composto por uma fonte de potência *Agilent™* U8002A, por um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com 20 canais, por um microcomputador *Dell™*, por um suporte universal com garra e por um ventilador *Ultrar™* DF12038HBL2.

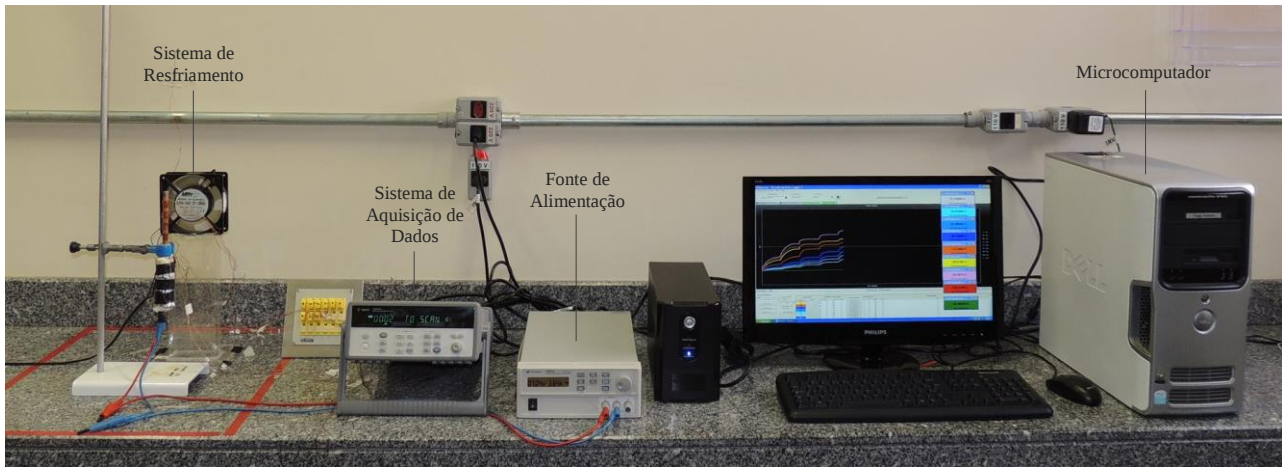


Figura 10. Aparato experimental.

Para avaliação do comportamento térmico dos diferentes dispositivos passivos de transferência de calor, foram utilizados termopares do tipo K (*Omega™*) fixados na superfície externa dos dispositivos por meio de uma fita adesiva termosensível (*Kapton™*). Como mostrado na Figura 11, três termopares foram fixados no evaporador, um termopar na seção adiabática e quatro termopares no condensador dos tubos de calor e do termossifão. No caso da barra sólida, foram fixados dois termopares no evaporador, um termopar na seção adiabática e três termopares na região do condensador.

O sistema de aquecimento do evaporador foi realizado pela dissipação de potência proveniente da passagem de uma corrente elétrica em uma fita resistiva de liga níquel-cromo (*Omega™*) 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 usada na seção adiabática como um isolante térmico entre o suporte e o dispositivo passivo de transferência de calor. Na Figura 12(a) é mostrado o sistema de aquecimento do evaporador enquanto que nas Figs. 12(b) e 12(c) são mostrados, dentre outras coisas, os sistemas de isolamento da região adiabática e do evaporador, respectivamente. O sistema de resfriamento por convecção forçada de ar, mostrado na Fig. 13, foi constituído pelo ventilador *Ultrar™* na região do condensador.

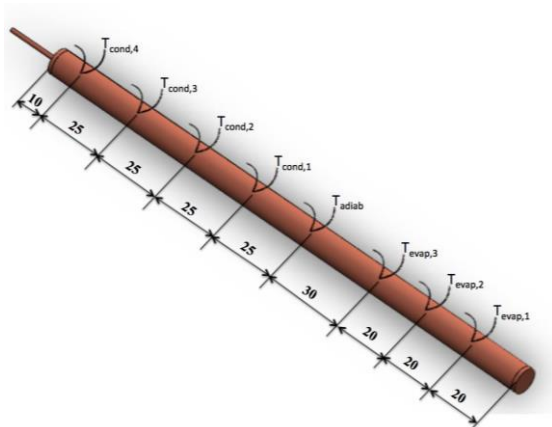


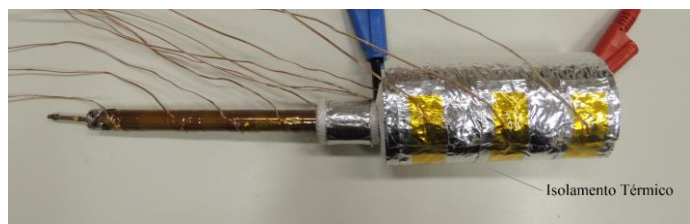
Figura 11. Posicionamento dos termopares no tubo de calor (em [mm]).



(a) sistema de aquecimento do evaporador



(b) sistema de isolamento da seção adiabática



(c) sistema de isolamento do evaporador

Figura 12. Sistemas de aquecimento e isolamento.

2.8. Procedimento Experimental

Para garantir um melhor resultado e a repetitividade dos testes experimentais, a temperatura do ambiente foi mantida em $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um sistema de condicionamento de ambiente YorkTM. 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 foi cuidadosamente fixado ao suporte universal com garra pela região adiabática e sua posição foi fixada na vertical com o condensador acima do evaporador, como ilustrado na Fig. 13. O ventilador foi ligado, corretamente posicionado na região do condensador do dispositivo passivo e ajustado a uma velocidade de 5 m/s controlada por um potenciômetro e um anemômetro, com um erro combinado de $\pm 0,2\text{ m/s}$. 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, finalmente, a fonte de alimentação era ligada e ajustada na dissipação de potência desejada.



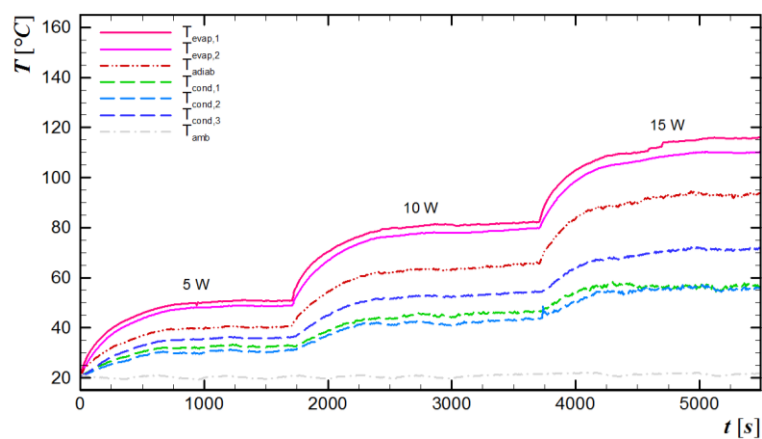
Figura 13. Posição de teste dos dispositivos passivos de transferência de calor.

A potência inicial dissipada pela resistência elétrica foi de 5 W e, após aproximadamente 15 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 5W, 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 que a temperatura máxima nos dispositivos passivos de transferência de calor atingisse a temperatura crítica ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$), onde a fusão dos materiais de colagem começava a acontecer. Os dados foram coletados a cada 5 segundos, gravados no microcomputador DellTM através do software AgilentTM Benchlink Data Logger 3 e, posteriormente, tratados e analisados.

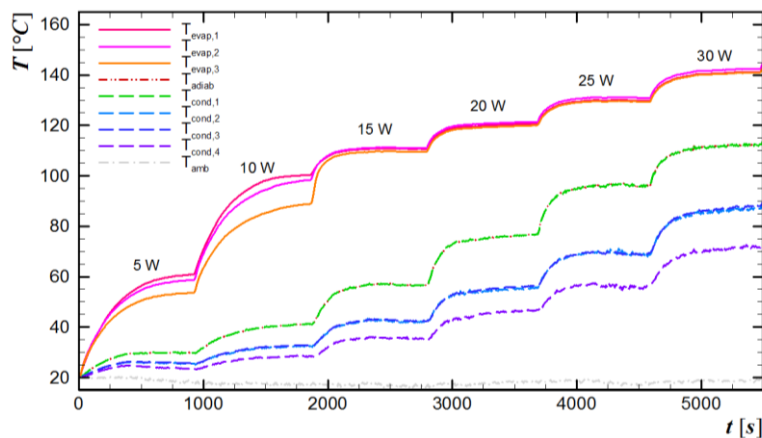
As incertezas experimentais estão associadas às incertezas dos sensores de temperatura (termopares do tipo K), ao sistema de aquisição de dados e à fonte de potência e foram apresentadas juntamente com os resultados obtidos. Para a determinação da incerteza da medição da potência elétrica foi utilizado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

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

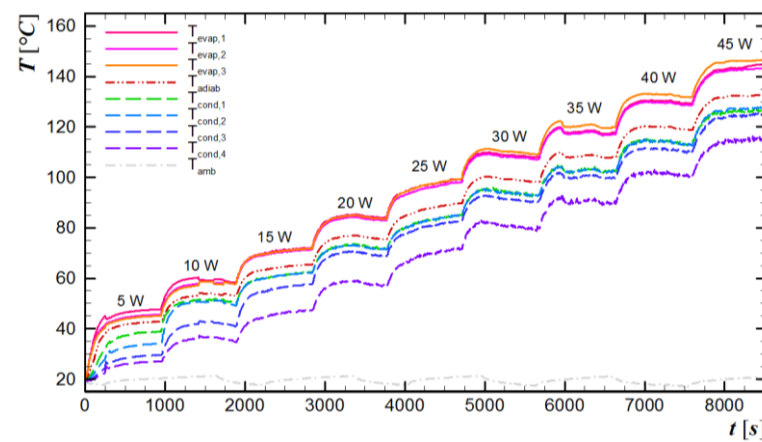
Os resultados experimentais apresentam o comportamento térmico dos diferentes dispositivos passivos de transferência de calor – barra sólida, termossifão, tubo de calor com tela metálica e tubo de calor com microranhura – operando na posição vertical, com o condensador acima do evaporador. Os testes 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 cargas térmicas crescentes de 5W, variando de 5W até 45W. A temperatura ambiente foi mantida em $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por questões de segurança, os testes experimentais foram imediatamente interrompidos quando a temperatura de 150°C fosse atingida no evaporador dos dispositivos. As incertezas experimentais de temperatura foram estimadas em aproximadamente $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de carga térmica foram $\pm 1\%$. Cada dissipação de potência foi aplicada por aproximadamente 15 minutos, onde todos os termopares demonstraram um valor em regime *quase* permanente. A Figura 14 apresenta as distribuições de temperaturas em função do tempo para os diferentes dispositivos passivos de transferência de calor: (a) barra sólida, (b) termossifão, (c) tubo de calor com tela e (d) tubo de calor com microranhuras. Para a barra sólida a potência máxima dissipada foi de 15W. Para o termossifão a potência máxima foi de 30W enquanto que para os tubos de calos a potência máxima dissipada foi de 45W.



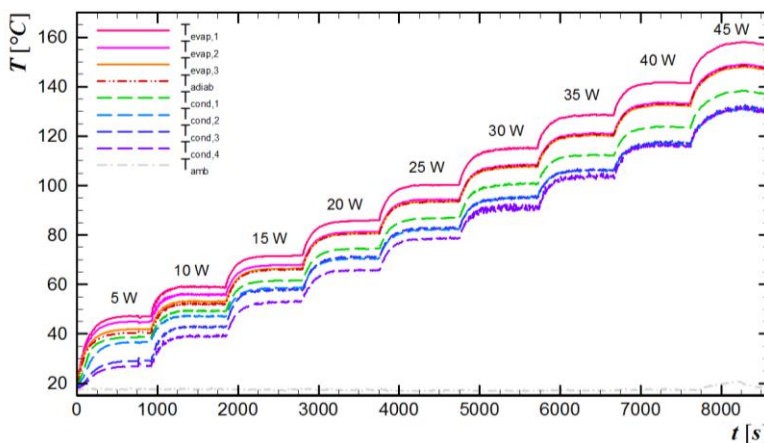
(a) barra sólida



(b) termossifão



(c) tubo de calor com tela metálica



(d) tubo de calor com microranhas

Figura 14. Distribuição de temperaturas em função do tempo para os diferentes dispositivos testados.

A Figura 15 ilustra o comportamento da resistência térmica em função da dissipação de potência considerando os diferentes dispositivos passivos de transferência de calor. Com exceção da barra sólida, que possui uma resistência térmica quase que constante, a resistência térmica dos tubos de calor e do termossifão diminui com o aumento da dissipação de calor no evaporador. Na Figura 16 o comportamento da condutividade térmica efetiva dos diferentes dispositivos passivos de transferência de calor é mostrado em função da potência dissipada. Como esperado, pode ser observado que os dispositivos passivos que utilizam a mudança de fase (tubos de calor e termossifão) possuem uma maior condutividade térmica efetiva e que este importante parâmetro térmico aumenta com o aumento da dissipação de potência.

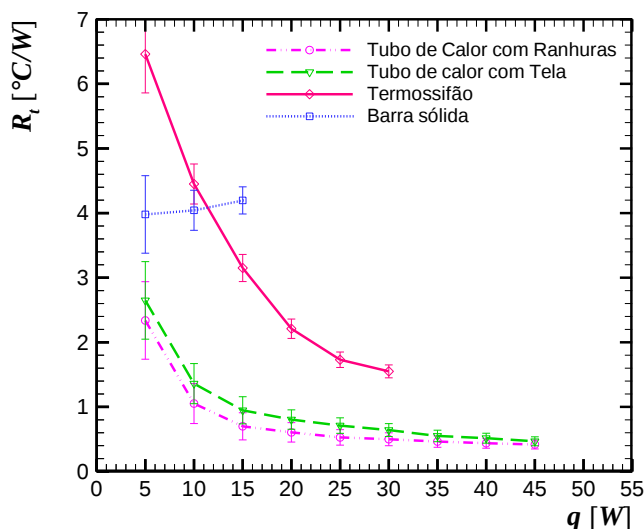


Figura 15. Resistência térmica versus potência aplicada para diferentes dispositivos passivos.

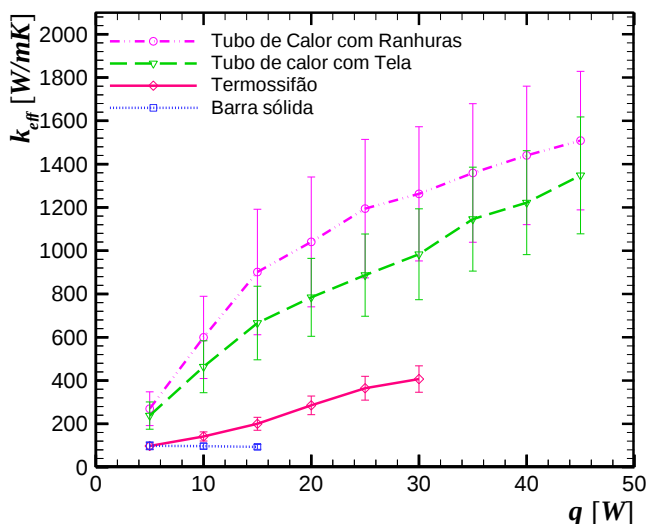


Figura 16. Condutividade térmica efetiva versus potência aplicada para diferentes dispositivos passivos.

Dos dispositivos passivos de transferência de calor avaliados, o tubo de calor com tela metálica e o tubo de calor microranhurado apresentaram os melhores comportamentos. Porém, o tubo de calor com tela metálica como estrutura capilar apresentou o melhor desempenho térmico, devido à mais baixa resistência térmica ou à maior condutividade térmica efetiva. As razões pelas quais os tubos de calor apresentarem o melhor desempenho são a utilização do calor de vaporização do fluido de trabalho na transferência de calor concomitantemente com a estrutura porosa para facilitar o escoamento do fluido de trabalho do condensador para o evaporador.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental do desempenho térmico de diferentes dispositivos passivos de transferência de calor (barra sólida, termossifão, tubo de calor com tela metálica e tubo de calor com microranhuradas) utilizados no resfriamento de equipamentos eletroeletrônicos. Estes dispositivos passivos foram testados verticalmente, com o evaporador abaixo do condensador, sob cargas térmicas compreendidas entre 5 W e 45 W e funcionaram satisfatoriamente. Os dispositivos com melhores desempenhos térmicos foram os tubos de calor com tela metálica e com microranhuradas, que obtiveram um comportamento muito semelhante.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado aos dois primeiros autores. Agradecimentos também são externados ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), 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

- Aguiar, V.M., 2016, "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, PR, Brasil.
- Chen, S.W., Hsieh, J.C., Chou, C.T., Lin, H.H., Shen, S.C. and Tsai, M.J., 2007, "Experimental Investigation and Visualization on Capillary and Boiling Limits of Micro-Grooves made by Different Processes", *Sensors and Actuators*, Vol. 139, pp. 78-87.
- Chi, S.W., 1976, "Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook. Washington", Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., USA. 272 p.

- Faghri, A., 2014, "Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges", *Frontiers in Heat Pipes*, Vol. 5, pp. 1-48.
- Holman, J.P., 2011, "Experimental Methods for Engineers", McGraw-Hill, New York, 800 p.
- Krambeck, L., Nishida, F.B., Santos, P.H.D. and Antonini Alves, T., 2015, "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.
- Krambeck, L., 2016, "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, PR, Brasil.
- Mantelli, M.B.H., 2015, Tubos de Calor e Termossifões, Notas de Aula, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Nishida, F.B., 2012, "Análise numérica do escoamento laminar e da transferência de calor de aquecedores 3D protuberantes montados em uma placa de circuito impresso utilizando diferentes fluidos de resfriamento", Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, Brasil.
- Nishida, F.B., 2016, "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, PR, Brasil.
- Obata, D.H.S., Antonini Alves, T., Bazani, M.A. and Paschoalini, A.T., 2015, "Experimental Analysis of a Vapor Chamber Applied to Thermal Management of Microelectronics", *Advanced Materials Research*, Vol. 1120, pp. 1368-1372.
- Peterson, G.P., 1994, "An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications", (Thermal Management of Microelectronic and Electronic System Series), Wiley-Interscience, New York, USA, 368 p.
- Reay, D.A., Kew, P.A. and McGlen, R.J., 2014, "Heat Pipe: Theory, Design and Applications", Butterworth-Heinemann, Amsterdam, NED, 235 p.
- Santos, P.H.D., Krambeck, L., Santos, D.L.F. and Antonini Alves, T., 2014, "Analysis of a Stainless Steel Heat Pipe Based on Operation Limits", *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 599-608.
- Santos, P.H.D., Reis, L.S., Marquardt, L.S., Vicente, K.A.T. and Antonini Alves, T., 2016, "Modeling and Experimental Tests of a Copper Thermosyphon", *Acta Scientiarum. Technology*, Vol. 38, N. 4.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THERMAL PERFORMANCE OF DIFFERENT PASSIVE DEVICES OF ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING

Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com¹
 Felipe Baptista Nishida, felipenishida@hotmail.com¹
 Vinícius Marrone de Aguiar, viniciusmarrone@hotmail.com¹
 Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br²
 Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br¹

Federal University of Technology – Paraná/UTFPR, ¹Câmpus Ponta Grossa, ²Câmpus Curitiba

Abstract. In this research was performed an experimental comparison of the thermal performance of four different passive devices that can be used in electronics cooling. The devices were considered a rod, a thermosyphon, a heat pipe with a metal screen as capillary structure and a heat pipe with microgrooves. The heat pipe is a highly efficient device which carries large amounts of power from a small temperature difference. The heat pipe consists of the involucre, working fluid, and capillary structure. The thermosyphon is a kind of heat pipe assisted by gravity, in other words it has no porous structure for the return of the working fluid. The metal mesh structure is used commonly due to availability, easy construction and good capillary pumping. The grooves as capillary structure have a high thermal conductivity and permeability. The devices were made of copper with a total length of 200 mm and an outer diameter of 9.45 mm. The thermosyphon and the heat pipes used deionized water as working fluid with a filling ratio of 60% of the evaporator volume. The condenser was cooled by forced air convection and evaporator was heated by an electric resistor tape nickel-chromium alloy and a power source. The devices were tested in a vertical position with the condenser above the evaporator under thermal loads included between 5 W and 45 W. All devices have operated satisfactorily tested in accordance with the behavior of the heat resistance, the best devices were heat pipes.

Keywords: passive devices, thermal performance, experimental analysis, heat pipes, thermosyphons