

# INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE CARREGAMENTO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES

## INFLUENCE OF FILLING RATIO ON THERMAL PERFORMANCE OF THERMOSSYPHONS

**Vinícius Marrone de Aguiar, Larissa Krambeck, Paulo Henrique Dias dos Santos,  
Thiago Antonini Alves**

Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
– UTFPR/Câmpus Ponta Grossa, Brasil

### RESUMO

*Neste trabalho foi executada uma investigação experimental da influência da razão de carregamento no desempenho térmico de termossifões de cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro externo de 9,45 mm, diâmetro interno de 7,75 mm e comprimento total de 200 mm. As razões de carregamento analisadas foram de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em relação ao volume do evaporador. O fluido de trabalho foi água deionizada. Os testes experimentais foram executados na posição vertical considerando cargas térmicas entre 5W e 45W. Os resultados experimentais do desempenho térmico dos termossifões indicaram que, dentro da faixa de operação analisada, eles operaram satisfatoriamente. O termossifão com razão de carregamento de 40% apresentou o melhor desempenho térmico.*

### ABSTRACT

*In this research it was performed an experimental investigation of the filling ratio influence on thermal performance of ASTM B-75 Alloy 122 copper thermosyphons with outside diameter of 9.45 mm, inner diameter of 7.75 mm, and total length of 200 mm. The analyzed filling ratios were 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% of the evaporator volume. The working fluid was deionized water. The experimental tests were performed in vertical position under thermal loads between 5W and 45W. The experimental results of the thermosyphons thermal performance indicated that, within the considered operation range, they operated satisfactorily. The thermosyphon with a filling ratio of 40% showed the best thermal performance.*

## 1. INTRODUÇÃO

Termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor altamente eficientes que transportam grandes quantidades de energia na forma de calor com uma pequena diferença de temperatura pela utilização do calor latente de vaporização. Tais dispositivos são constituídos por tubo metálico evacuado preenchido com um fluido de trabalho e utilizam a força da

gravidade para a circulação do fluido internamente. Estes dispositivos são aplicados para melhorar a transferência de calor em muitas áreas industriais, tais como: eletroeletrônica, aeroespacial, telecomunicações, alimentícias, entre outras (Faghri 2014).

O termossifão possui três regiões com funções distintas no seu funcionamento, são elas: evaporador, seção adiabática e

condensador. O evaporador, a região inferior do tubo, é aquecida através de uma fonte quente e o fluido de trabalho sofre um processo de evaporação. Esse vapor, por diferença de pressão, se desloca para região mais fria (condensador). Nesta região, o vapor gerado no evaporador perde energia e é condensado. O fluido de trabalho no estado líquido retorna ao evaporador, por ação da gravidade, fechando o ciclo. A seção adiabática fica entre o evaporador e o condensador, nesta região não existe troca de calor entre o termostifão e o ambiente e em alguns casos a região adiabática é inexistente (Mantelli, 2013). Um diagrama esquemático do princípio de funcionamento dos termostifões é apresentado na Fig. 1. Maiores informações sobre termostifões podem ser encontradas em Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2013).

Conforme Aguiar (2016), a quantidade de fluido de trabalho dentro do termostifão é muito importante e deve ser estudada cuidadosamente. Pequenas quantidades de fluido de trabalho podem acarretar na secagem (*dryout*) das paredes do termostifão enquanto que líquido em excesso pode resultar em grandes quantidades de vapor que serão carregadas ao condensador quando as bolhas se formam devido à ebulição. Em ambos os casos, os termostifões poderão entrar em colapso e a transferência de calor será interrompida.

Neste contexto, no presente trabalho foi executada uma investigação experimental da influência da razão de carregamento no

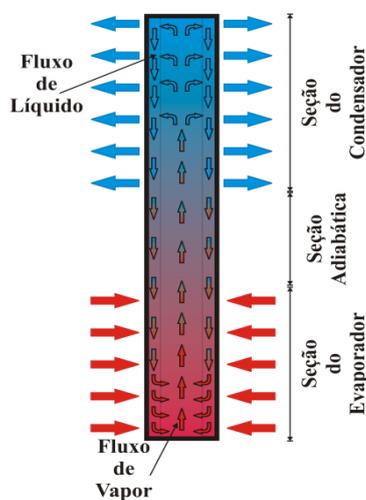


Fig. 1 – Diagrama esquemático do princípio de funcionamento dos termostifões.

desempenho térmico de termostifões. As razões de carregamento analisadas foram de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em relação ao volume do evaporador. O fluido de trabalho utilizado foi água deionizada. Os testes experimentais foram executados na posição vertical considerando cargas térmicas entre 5W e 45W.

## 2. METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

A metodologia utilizada para execução da fabricação dos termostifões (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e carregamento com fluido de trabalho) foi baseada levando em consideração as instruções fornecidas em Santos *et al.* (2014), Krambeck *et al.* (2015), Nishida *et al.* (2015), Nishida (2016) e Santos *et al.* (2017).

### 2.1. Descrição dos Termostifões

Os termostifões foram fabricados a partir de um tubo de cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro externo de 9,45 mm, diâmetro interno de 7,75 mm e comprimento total de 200 mm. Os termostifões 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 foi água deionizada e a razão de carregamento foi de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do volume do evaporador. O volume de fluido utilizado foi de 0,88 ml, 1,51 ml, 2,26 ml, 3,02 ml e 3,77 ml para as respectivas razões de carregamento.

### 2.2. Processo de Limpeza dos Componentes dos Termostifões

A limpeza dos termostifões é necessária para garantir a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e melhorar a qualidade do vácuo (Krambeck 2016). Dessa forma, todos os componentes dos termostifões necessitam estar completamente limpos, antes do carregamento com fluido de trabalho. Para tal, os invólucros, as tampas de fechamento (usinadas a partir de uma barra maciça de cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro de 9,45 mm) e os capilares

(tubo de cobre ASTM B-75 Liga 122 com diâmetro interno de 1 mm e com comprimento de 40 mm) foram previamente limpos utilizando 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 0,1M).

Feito isso, os componentes foram levados a um banho ultrassônico *Kondentech™*, permanecendo mergulhados em acetona, para que sejam completamente limpos, durante 30 minutos (Fig. 2).



Fig. 2 – Limpeza dos componentes de um termossifão em banho ultra-sônico.

### 2.3. Montagem dos Termossifões

Após a realização da limpeza de seus componentes, os termossifões podem ser propriamente montados. As tampas de fechamento e os capilares foram soldados nas extremidades dos invólucros (tubos de cobre ASTM B-75 Liga 122) dos termossifões. O processo de soldagem foi efetuado com o auxílio de um ferro de soldar e as diferentes peças foram brasadas utilizando uma liga de estanho como material de adição.

### 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 termossifões 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 termossifão com defeito deveria ser desmontado, limpo, soldado e testado para a correção da falha no processo de soldagem.

### 2.5. Processo de Evacuação

Primeiramente, os termossifões 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 termos-sifões foram acoplados a uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV* (Fig. 3). Para garantir uma conexão sem vazamentos, silicone foi aplicado nas juntas 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 *fôrceps*, a mangueira polimérica foi vedada e então, a bomba de vácuo foi desligada.

### 2.6. Carregamento dos Termossifões com Fluido de Trabalho

Para execução do carregamento dos termossifões com a quantidade de fluido de



Fig. 3 – Processo de evacuação do termossifão.

de trabalho desejada, foi desenvolvida uma pequena estação de carregamento composta por um suporte universal, uma bureta graduada (escala de 0,1 ml) com capacidade de 25 ml e um *fórceps* (Fig. 4). Cada 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 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 termossifão. O *fórceps* foi cuidadosamente aberto para drenar o fluido de trabalho até que o termossifão fosse carregado com 0,88 ml, 1,51 ml, 2,26 ml, 3,02 ml e 3,77 ml correspondente a razões de carregamento, de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, respectivamente. Destaca-se que no momento do carregamento, muito cuidado é necessário para que não se perca o vácuo existente dentro dos termossifões. Se isso acontecer, todo o processo de vácuo deve ser realizado novamente. Após o procedimento de carregamento com fluido de trabalho, o *fórceps* foi fechado e, então, o capilar foi conformado com um alicate de

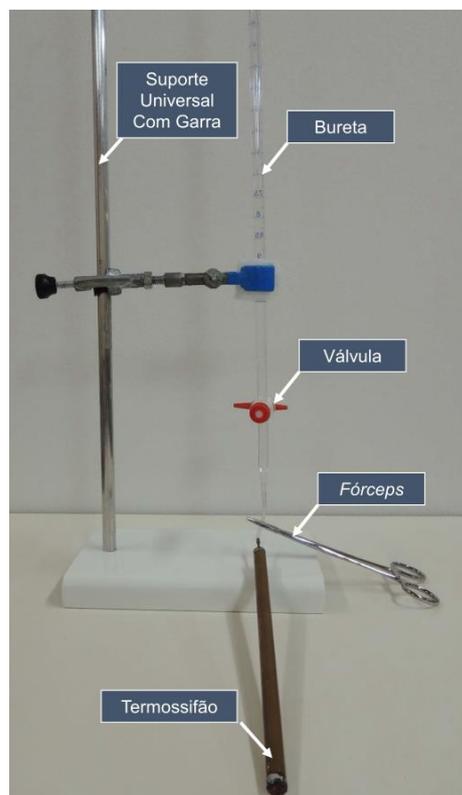


Fig. 4 – Estação de carregamento do termossifão.

pressão, bloqueando o único caminho pelo qual o ar poderia entrar. Além disso, a extremidade do capilar soldada para completar o processo de vedação nos termossifões.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

#### 3.1. Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para os testes, mostrado na Fig. 5, foi composto por uma unidade de fonte de alimentação *Agilent*<sup>TM</sup> U8002A, por um sistema de aquisição de dados *Agilent*<sup>TM</sup> 34970A com 20 canais, por um ventilador *Ultrar*<sup>TM</sup>, por um microcomputador *Dell*<sup>TM</sup>, por um suporte universal com garra e um nobreak *NHS*<sup>TM</sup>.

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*<sup>TM</sup>) de 0,1 mm de espessura e 3,5 mm de largura. A superfície externa do termossifão foi protegida com fita adesiva termosensível *Kapton*<sup>TM</sup> para que o resistor e os termopares não tivessem contato direto com o tubo de cobre.

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 termossifão. O sistema de resfriamento por convecção forçada de ar foi constituído pelo ventilador na região do condensador (Fig. 6). Para a avaliação do comportamento térmico dos termossifões foram utilizados termopares *Omega*<sup>TM</sup> do tipo K fixados na superfície externa dos termossifões utilizando uma fita termosensível *Kapton*<sup>TM</sup>.

#### 3.2. Procedimento Experimental

Para garantir um melhor resultado e a repetitividade dos testes experimentais, a temperatura ambiental foi mantida em  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por um sistema de condicionamento de ambiente *York*<sup>TM</sup>. Uma verificação minuciosa dos equipamentos do aparato experimental e do termossifão testado (fixa-

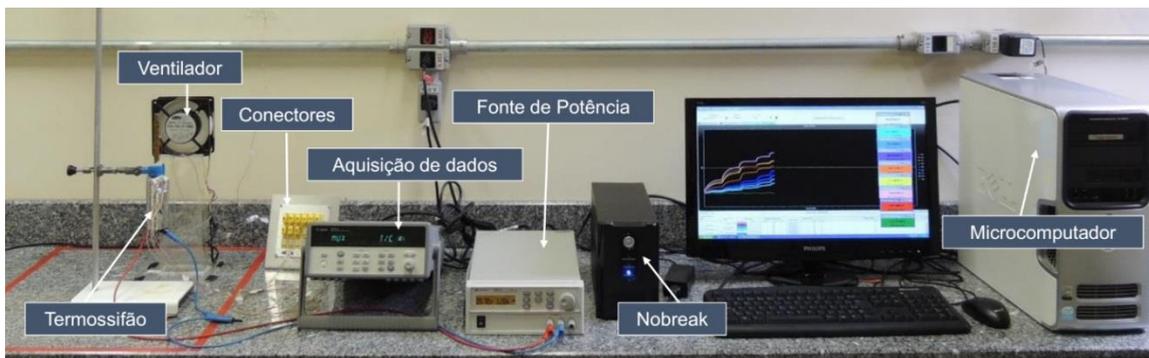


Fig. 5 – Aparato experimental.

(fixação de termopares, isolamento térmico, conexão do resistor, entre outros) foi feita antes de cada teste. O termossifão 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. 6. O ventilador foi ligado, corretamente posicionado na região do condensador do termossifão e ajustado a uma velocidade de 5 m/s controlada por um potenciômetro e um anemômetro, com um erro combinado de  $\pm 0,2$  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 °C, finalmente, a fonte de alimentação era ligada e ajustada na dissipação de potência desejada.

Os testes foram realizados para cargas térmicas crescentes de 5 W, variando até a temperatura máxima no evaporador atingir 150°C, por questões de segurança. Cada carga térmica foi mantida por 15 minutos – condição de fun-

cionamento de regime *quasi* permanente foi atingida. Os dados foram registrados a cada 5 segundos pelo sistema de aquisição de dados e gravados no microcomputador pelo *software Agilent™ Benchlink Da-ta Logger 3* e, posteriormente, tratados para avaliação do desempenho térmico dos termossifões.

As incertezas experimentais estão associadas às incertezas dos sensores de temperatura, do sistema de aquisição de dados e da fonte de alimentação e foram apresentadas juntamente com os resultados obtidos. Para a determinação das incertezas da medição da potência elétrica e dos valores das resistências térmicas foi utilizado o Método de Propagação de Erros (Holman, 2012).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais apresentam o comportamento térmico dos termossifões com diferentes razões de carregamento 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 °C. Os testes foram realizados para cargas térmicas crescentes de 5W, variando de 5W até 45W. Por questões de segurança, os testes experimentais foram imediatamente interrompidos quando a temperatura de 150 °C fosse atingida. As incertezas experimentais de temperatura foram estimadas em aproximadamente  $\pm 2,2$  °C e de carga térmica foram  $\pm 1\%$ . A Fig. 7 apresenta a distribuição de temperatura em função do tempo considerando o termossifão com razão de carregamento de 40%.

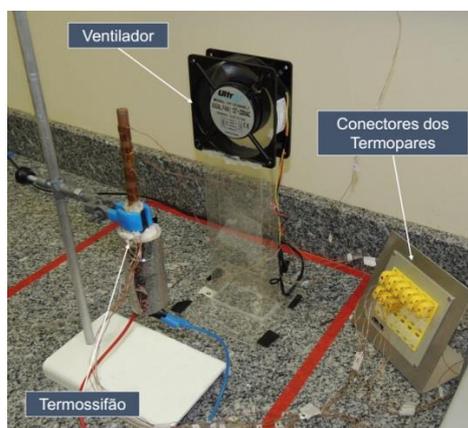


Fig. 6 – Testes experimentais em execução.

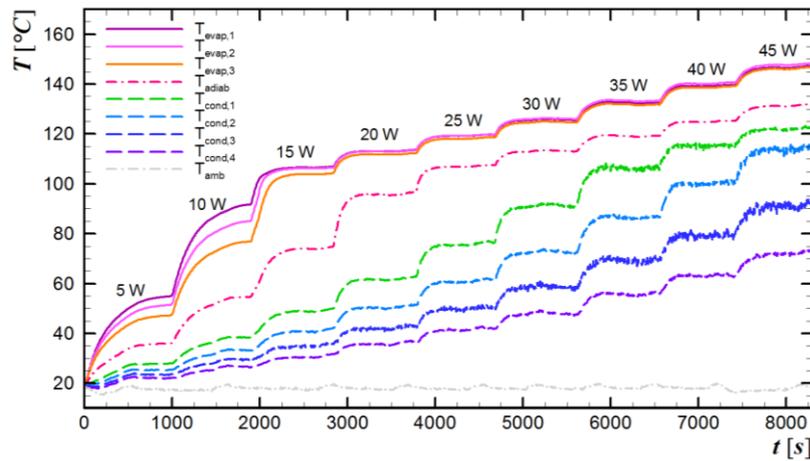


Fig. 7 – Distribuição da temperatura em função do tempo: 40% de razão de carregamento.

A Fig. 8 e o Quadro 1 apresentam o comportamento da temperatura de operação dos diferentes termossifões testados em função da potência dissipada no evaporador. Esta temperatura de operação corresponde à temperatura da seção adiabática durante a execução dos testes experimentais. Como esperado, a temperatura de operação aumenta com o aumento da dissipação de potência. Além disso, o termossifão com razão de carrega-

mento de 40% é o dispositivo passivo de transferência de calor que opera em menor temperatura de operação e é o único que consegue dissipar 45W sem exceder a temperatura de segurança (150°C).

A Fig. 9 e o Quadro 2 apresentam o comportamento da resistência térmica em função da dissipação de potência considerando os termossifões com diferentes razões de carregamento. Como esperado, a resistência térmica dos termossifões diminui com o aumento da dissipação de calor no evaporador. O termossifão com razão de carregamento de 40% possui resistência térmica próxima aos termossifões com razões de carregamento de 60%, 80% e 100%.

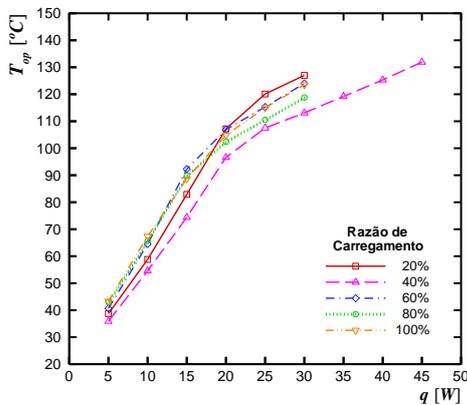


Fig. 8 – Comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada.

Quadro 1 - Temperatura de operação versus potência dissipada.

q [W]	Razão de Carregamento				
	20%	40%	60%	80%	100%
5	38,7	35,9	40,7	42,9	43,3
10	58,8	54,6	64,5	65,7	67,4
15	82,9	74,4	92,3	89,8	88,7
20	107,2	96,6	106,9	102,4	104,9
25	120,1	107,5	115,3	110,5	115,0
30	-	113,1	124,0	118,8	123,5
35	-	119,2	-	-	-
40	-	125,3	-	-	-
45	-	131,9	-	-	-

### 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental da influência da razão de carregamento no desempenho térmico de termossifões que podem ser aplicados no controle

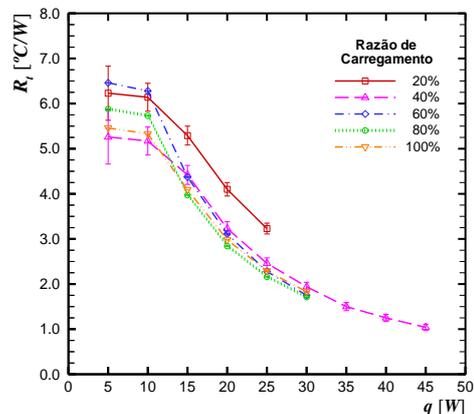


Fig. 9 – Comportamento da resistência térmica em função da potência dissipada.

**Quadro 2** – Resistência térmica dos termossifões.

<i>q</i> [W]	Razão de Carregamento				
	20%	40%	60%	80%	100%
5	6,23±0,60	5,26±0,60	6,46±0,60	5,88±0,60	5,46±0,60
10	6,14±0,31	5,17±0,31	6,28±0,31	5,73±0,31	5,33±0,31
15	5,29±0,21	4,42±0,21	4,37±0,21	3,97±0,21	4,09±0,21
20	4,10±0,15	3,23±0,15	3,11±0,15	2,84±0,15	2,98±0,15
25	3,23±0,12	2,46±0,12	2,28±0,12	2,16±0,12	2,29±0,12
30	-	1,94±0,10	1,75±0,10	1,71±0,10	1,83±0,10
35	-	1,50±0,09	-	-	-
40	-	1,25±0,08	-	-	-
45	-	1,04±0,07	-	-	-

térmico de eletroeletrônicos. Estes termossifões foram testados verticalmente sob cargas térmicas entre 5W e 45W. Os resultados experimentais do desempenho térmico dos termossifões indicaram que, dentro da faixa de operação analisada, todos os termos-sifões operaram satisfatoriamente. O termossifão com razão de carregamento de 40% apresentou o melhor desempenho térmico.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, V.M. 2016. Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões. 118 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Chi, S.W. 1976. Heat pipe theory and practice: a sourcebook, 1st Edition, Hemisphere Publishing Corporation, Washington. ISBN 00-701-0718-1.
- Faghri, A. 2014. Heat pipes: review, opportunities and challenges, *Frontiers in Heat Pipes*, 5, p. 01-48.
- Holman, J.P. 2012. Experimental methods for engineers, 8th Edition, McGraw-Hill, New York. ISBN 00-735-2930-3.
- Krambeck, L. 2016. Investigação experimental do desempenho térmico de telas metálicas em tubos de calor. 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Krambeck, L., Nishida, F.B., Santos, P.H.D., 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 (IJAERS)*, 2 (10), p. 11-14.
- Mantelli, M.B.H. 2013. Thermosyphon technology for industrial applications, Chapter 11, In: Vasiliev, L.L., Kakaç, S. (Eds.), *Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications*, CRC Press, Boca Raton, ISBN 14-665-6414-8.
- Peterson, G.P. 1994. An introduction to heat pipes: modeling, testing, and application. 1st Edition, John Wiley & Sons, New York. ISBN 04-713-0512-X.
- Reay, D., Kew, P., McGlen, R. 2013. Heat pipes: theory, design and applications. 6th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford. ISBN 00-809-8266-2.
- Nishida, F.B. 2016. Desenvolvimento de tubos de calor com microranhuras fabricadas por eletroerosão a fio, 158 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Nishida, F.B., Marquardt, L. S., Borges, V. Y.S., Santos, P. H.D., Antonini Alves, T. 2015. Development of a copper heat pipe with axial grooves manufactured using wire electrical discharge machining (wire-EDM), *Advanced Materials Research (Online)*, 1120, p. 1325-1329.
- Santos, P.H.D., Krambeck, L., Santos, D.L.F., Antonini Alves, T. 2014. Analysis of a stainless steel heat pipe based on operation limits, *International Review of Mechanical Engineering*, 8, p. 599-608.
- Santos, P.H.D., Vicente, K.A.T., Reis, L.S., Marquardt, L.S., Antonini Alves, T. 2017. Modeling and experimental tests of a copper thermosyphon, *Acta Scientiarum. Technology*, 39 (1), p. 59-68.