

AValiação EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TéRMICO DE TERMossIFões UTILIZANDO NANOFLUIDO DE TRABALHO

Gedley Kunan Stremel, gedleyks@gmail.com
Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com
Vinícius Mariani Lenart, vmlenart@gmail.com
Rozane de Fátima Turchiello, turchiel@utfpr.edu.br
Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br

Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Tecnológica Feredal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, CEP 84.016-210, Brasil

Resumo: Termossifões são dispositivos passivos que intensificam a transferência de calor, pois utilizam calor latente de vaporização do fluido de trabalho no transporte de energia na forma de calor a partir de pequenos gradientes de temperatura. Eles operam em um ciclo bifásico e são compostos por tubos metálicos ocos preenchidos com um fluido de trabalho. Neste trabalho foi executada uma avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com a utilização de nanofluido a base de ouro como fluido de trabalho. Para tal, foram confeccionados três termossifões a partir de um tubo de cobre, com diâmetros externo e interno de 9,45 mm e 7,75 mm, respectivamente, onde seus comprimentos foram de 200 mm, caracterizando-se pelo evaporador com 80 mm, região adiabática de 20 mm e condensador de 100 mm. A razão de preenchimento destes termossifões foi de 40% do volume total do evaporador e os fluidos de trabalho testados foram água deionizada e o nanofluido com 10% e 20% de concentração. Os testes foram realizados na posição vertical com cargas térmicas variando entre 5W e 35W ou até que a temperatura de 100°C fosse alcançada nos nanofluidos de trabalho. A partir dos resultados encontrados foi constatado a efetividade do nanofluido como intensificador de calor, bem como a concentração de 20% em água deionizada como a melhor concentração.

Palavras-chave: termossifão, nanofluido, fluido de trabalho, desempenho térmico, experimental.

1. INTRODUÇÃO

Termossifões são dispositivos passivos que intensificam a transferência de calor, pois utilizam calor latente de vaporização do fluido de trabalho no transporte de energia na forma de calor a partir de pequenos gradientes de temperatura. Eles operam em um ciclo bifásico e são compostos por tubos metálicos ocos preenchidos com um fluido de trabalho (Mantelli, 2013). Os termossifões bifásicos fechados são constituídos de três regiões de destaque, o evaporador, onde ocorre absorção do calor cedido ao sistema, o condensador, o qual é a região de transferência de calor para o ambiente externo, e, uma região isolada, chamada de região adiabática, onde não ocorre trocas de calor com o ambiente e sua utilização é necessária ou não, dependendo da aplicação (Aguilar, 2016).

De acordo com Groll & Rösler (1992), durante o seu funcionamento, calor é adicionado no evaporador, geralmente por uma resistência elétrica, onde o aquecimento do fluido de trabalho gera vapor o qual, por diferença de massa específica, se desloca para as regiões de menor temperatura, ou seja, para o condensador. Nessa etapa, há a retirada de calor para o ambiente externo, e também o processo de condensação do vapor, onde o mesmo retorna à região de evaporação por gravidade, fechando o ciclo (Aguilar *et al.*, 2018). A Figura 1 apresenta um exemplo esquemático do princípio de funcionamento de um termossifão.

O invólucro de um termossifão é um tubo oco, podendo ser fabricado de diferentes materiais, tais como metais ou cerâmicos. O fluido de trabalho pode variar de acordo com a faixa de operação do termossifão, sendo composto desde metais líquidos para operações em temperaturas elevadas, até nitrogênio líquido, quando sua utilização ocorre em baixas temperaturas. Além da compatibilidade com o invólucro e de sua temperatura de operação, outros fatores como pressão de vapor, condutividade térmica, estabilidade, toxicidade são importantes na seleção do fluido de trabalho (Faghri, 2014).

Os nanofluidos são caracterizados pela adição de nanopartículas a um fluido-base específico e têm se destacado nos últimos anos entre os fluidos de trabalho que podem ser utilizados em um termossifão e/ou tubos de calor. De acordo com Menezes (2015) e Stremel (2017), isto ocorre devido ao fato de apresentarem uma condutividade térmica muito superior do fluido-base.

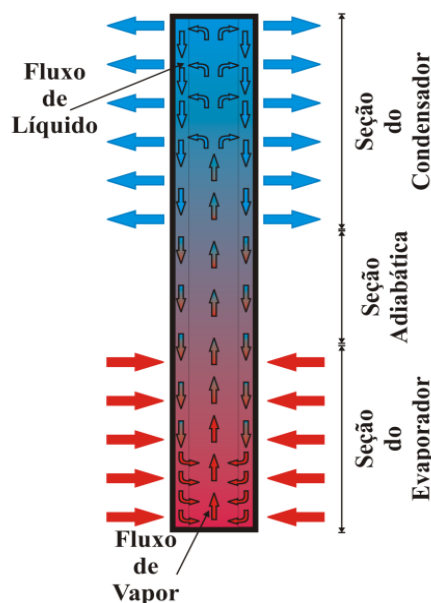


Figura 1. Exemplo da operação de um termossifão, destacando suas seções e fenômenos físicos presentes.

Quando as nanopartículas são adicionadas a um fluido-base melhoram a condutividade térmica do fluido e, desta forma, aumentam o desempenho de um dispositivo muito eficaz como o termossifão, gerando novas faixas de aplicação e operação em equipamentos diversos (Reay *et al.*, 2014).

De acordo com Da Silva (2010) e Stremel *et al.* (2017), a presença de nanopartículas dispersas em um fluido-base não interfere no seu calor latente de vaporização, tampouco em sua tensão superficial, desta forma a utilização de nanofluidos têm a capacidade de melhorar a transferência de calor do sistema, desde que a troca térmica por convecção e condensação desempenhe papel importante. Com isso, a temperatura de operação dos fluidos-base é semelhante à de seu nanofluido.

Neste contexto, no presente trabalho foi executada uma avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com a utilização de nanofluido a base de ouro como fluido de trabalho. Os termossifões foram construídos utilizados três diferentes fluidos de trabalho: água deionizada, nanofluido com concentração de 10% e nanofluido com concentração de 20%. Os termossifões foram testados experimentalmente na posição vertical sob condições de cargas térmicas variando entre 5W e 35W ou até que a temperatura de 100°C fosse alcançada nos nanofluidos de trabalho.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia aborda a obtenção do nanofluido de trabalho e a construção e testes experimentais dos termossifões. A metodologia utilizada na limpeza, na montagem, no teste de estanqueidade, no procedimento de evacuação e no preenchimento com o nanofluido de trabalho dos termossifões foi baseada levando em consideração as instruções fornecidas em Aguiar (2016), Aguiar *et al.* (2017), Santos *et al.* (2017) e Stremel (2017).

2.1. Nanofluido de Trabalho

Para a síntese do nanofluido de ouro foi utilizado 20,0 mL de uma solução de 1 mM de cloreto de ouro ácido trihidratado (ácido cloroáurico – $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) VetecTM na função de agente oxidante e 2,0 mL de uma solução aquosa de 1% de citrato de sódio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – SynthTM) como agente redutor. A produção das nanopartículas de ouro foi feita no Laboratório do Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos (GFFFCx) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

A banda de absorção das nanopartículas de ouro utilizadas neste trabalho apresentaram características semelhantes à literatura, referente a ressonância de plasma na faixa de 500 a 550 nm. A Figura 2 indica a banda de absorção das nanopartículas de ouro utilizadas. O formato das partículas obtidas é preferencialmente esférico, e na ordem de 12 nm, com erro de leitura de ± 2 nm. A partir da técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), realizada em laboratório especializado da Universidade Federal do Paraná (UFPR/Curitiba), foi possível realizar o registro do formato destas nanopartículas de ouro, ilustradas na Fig. 3. Maiores informações podem ser encontradas em Lopes *et al.* (2017).

A produção do nanofluido foi executada a partir da diluição de uma amostra do nanofluido de ouro estabilizado e pronto para o uso, onde se escolheram duas concentrações diferentes, sendo 10% (NF10) e 20% (NF20), do volume total preenchido com o nanofluido, e o restante com água deionizada.

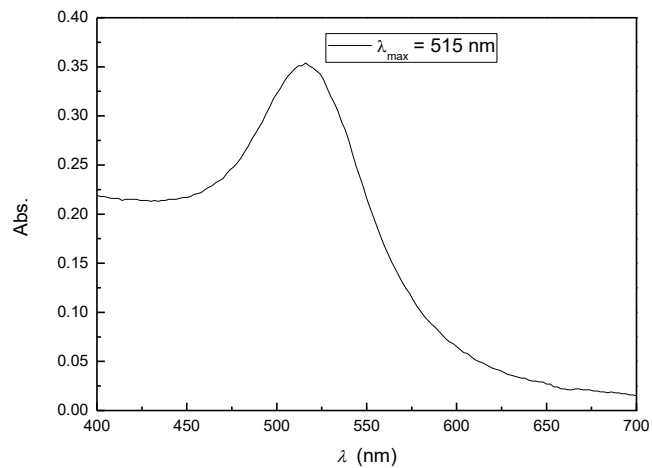


Figura 2. Espectro de absorção das nanopartículas de ouro, mostrando o máximo da absorção referente à ressonância de plasma (515 nm).

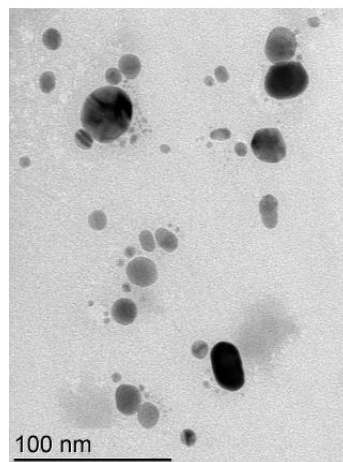


Figura 3. Imagem de TEM das nanopartículas de ouro com tamanho médio da ordem de (12 ± 2) nm.
Fonte: Lopes *et al.* (2017).

2.2. Descrição das Características dos Termossifões

Após a obtenção do nanofluido de trabalho com diferentes concentrações, três termossifões foram construídos a partir de tubos de cobre ASTM B75 com diâmetros externo e interno de 9,45 mm e de 7,75 mm, respectivamente, onde seu comprimento total foi de 200 mm, caracterizando-se pelo evaporador com 80 mm, região adiabática de 20 mm e condensador de 100 mm. De acordo com Aguiar *et al.* (2017), a melhor razão de preenchimento de um termossifão com essas características é de 40%. Desta forma, a razão de preenchimento utilizada foi a de 40% do volume do evaporador e os fluidos de trabalho testados foram água deionizada, nanofluido a base de ouro com 10% de concentração (NF 10) e o nanofluido a base de ouro com 20% de concentração (NF 20). As principais características dos termossifões utilizados nos testes experimentais estão indicadas na Tab. 1.

Tabela 1. Principais características dos termossifões avaliados.

Parâmetro	Termossifão
Diâmetro Externo [mm]	9,45
Diâmetro Interno [mm]	7,75
Comprimento do evaporador [mm]	80
Comprimento da região adiabática [mm]	20
Comprimento do condensador [mm]	100
Fluido de Trabalho	Água Deionizada NF 10 - Nanofluido de ouro com 10% de concentração NF 20 - Nanofluido de ouro com 20% de concentração
Razão de Preenchimento [%]	40
Volume de Fluido de Trabalho [mL]	1,50

2.3. Aparato Experimental

O aparato experimental desenvolvido para os testes experimentais foi composto por uma fonte de alimentação *Agilent™* U8002A, um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador *Agilent™* 34901A com 20 canais, um microcomputador *Dell™*, um *nobreak NHS™*, um ventilador *Ultrar™* e por um suporte universal com garra – Fig. 4.

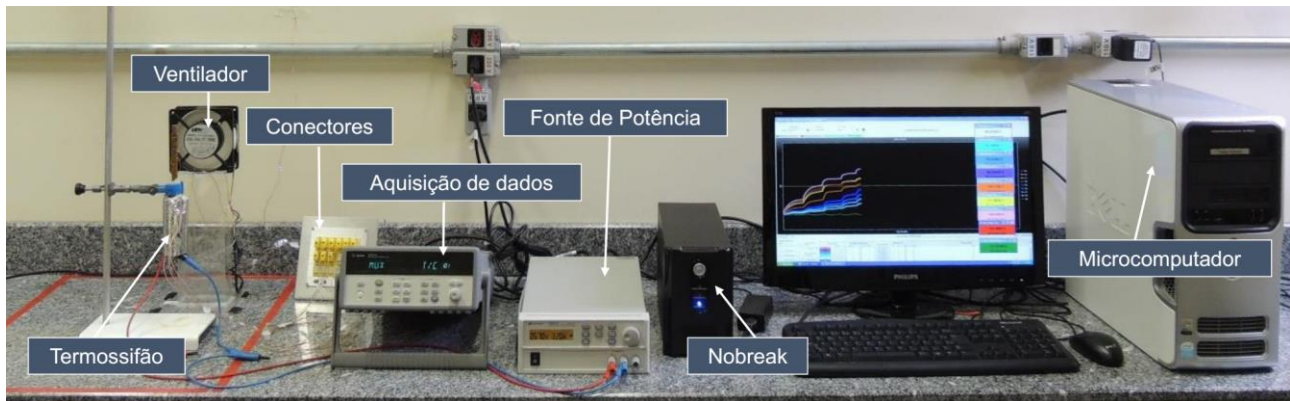


Figura 4. Aparato experimental.

Para avaliação do comportamento térmico dos termossifões, foram utilizados termopares *Omega Engineering™* do tipo K (*Chromega™-Alomaga™*) fixados na superfície externa dos termossifões por meio de uma fita adesiva termosensível *Kapton™*. Três termopares foram fixados no evaporador, um termopar na seção adiabática e quatro termopares no condensador dos termossifões. A Figura 5 apresenta esquematicamente as regiões dos termossifões e o posicionamento dos termopares. Os dados foram coletados a cada 5 (cinco) segundos, gravados no microcomputador *Dell™* através do *software Agilent™ Benchlink Data Logger 3* e, posteriormente, tratados e analisados.

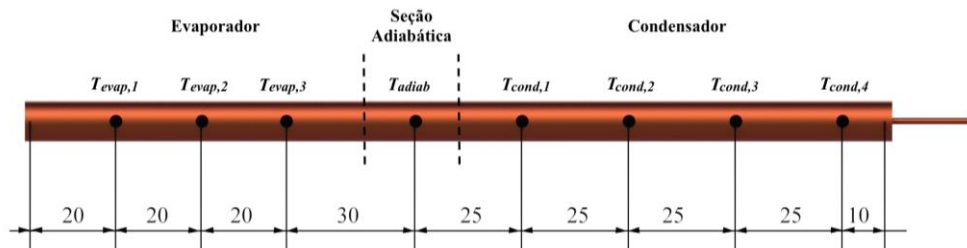


Figura 5. Posicionamento dos termopares nos termossifões [mm].

A adição de energia no sistema foi realizada a partir da dissipação de potência proveniente da passagem de uma corrente elétrica em uma fita resistiva de liga níquel-cromo (*Omega Engineering™*) de 0,1 mm de espessura e 3,5 mm de largura, tal energia promove o aquecimento do evaporador. Com o intuito de isolar termicamente a região do evaporador, para que a energia fornecida ao sistema por efeito *Joule* não seja retirada pelo meio externo, o evaporador foi envolvido com uma camada de poliuretano preenchido com um isolante térmico aeronáutico. Para a realização do isolamento da região adiabática, uma fita de fibra de vidro foi utilizada durante toda a extensão da seção, desta forma, foi evitado a troca de calor entre o invólucro do termossifão e o suporte sobre o qual a estrutura estava montada. Finalmente, o resfriamento do sistema, visando a condensação do fluido de trabalho, foi executado por convecção forçada por meio de um ventilador *Ultrar™* posicionado na região do condensador.

2.4. Procedimento Experimental

Inicialmente, o termossifão foi fixado ao suporte universal pela região adiabática a uma garra fixa, posicionando-o com uma inclinação de operação de 90° e ajustando o ventilador para que o mesmo estivesse na região do condensador. O ventilador foi ligado e ajustado a uma velocidade de 5 m/s controlada por um potenciômetro e um anemômetro digital portátil *Itan™* 720, com um erro combinado de $\pm 0,2$ m/s. Para a realização dos testes experimentais, foi fundamental o estabelecimento de uma faixa de temperatura estável para o meio externo, desta forma, um sistema de ar condicionado *Carrier™* com capacidade de 36.000 BTU's foi utilizado. A temperatura ambiente foi mantida em $20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

A potência inicial dissipada pela resistência elétrica foi de 5 W e, após aproximadamente 15 (quinze) minutos, era verificada se a condição de regime *quasi* permanente estava alcançada nos testes experimentais. Em caso positivo, a dissipação de potência era reajustada com um acréscimo de 5 W. O incremento de dissipação de potência foi feito até que a temperatura máxima do evaporador atingisse uma temperatura crítica de 100°C para os nanofluidos de trabalho e

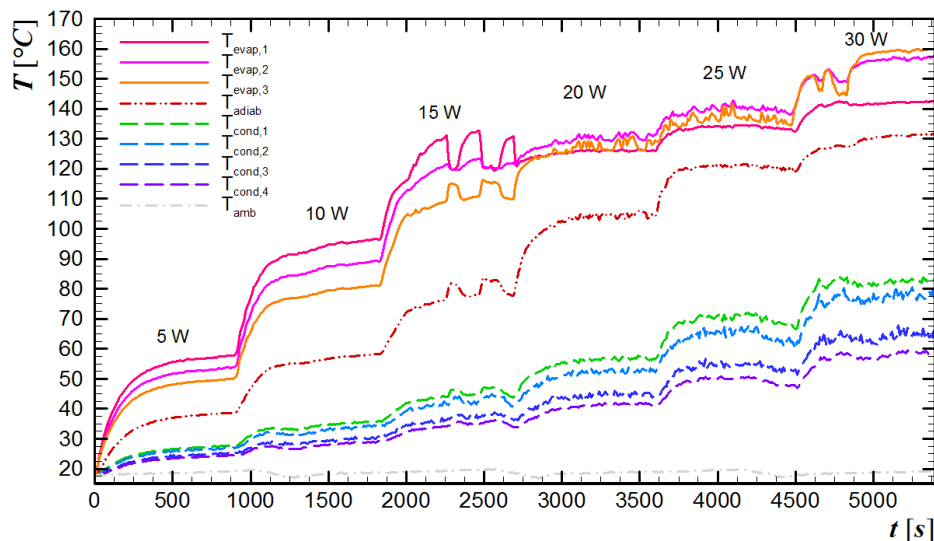
de 160°C para a água destilada. A temperatura máxima de 100°C é limitante, pois, ao atingi-la, o nanofluido utilizado como fluido de trabalho pode apresentar perda de propriedades físicas e químicas, o que pode prejudicar o seu desempenho térmico. Para a água deionizada, a temperatura máxima foi estabelecida para que não houvesse perdas nos materiais utilizados na montagem do termossifão.

2.5. Incertezas Experimentais

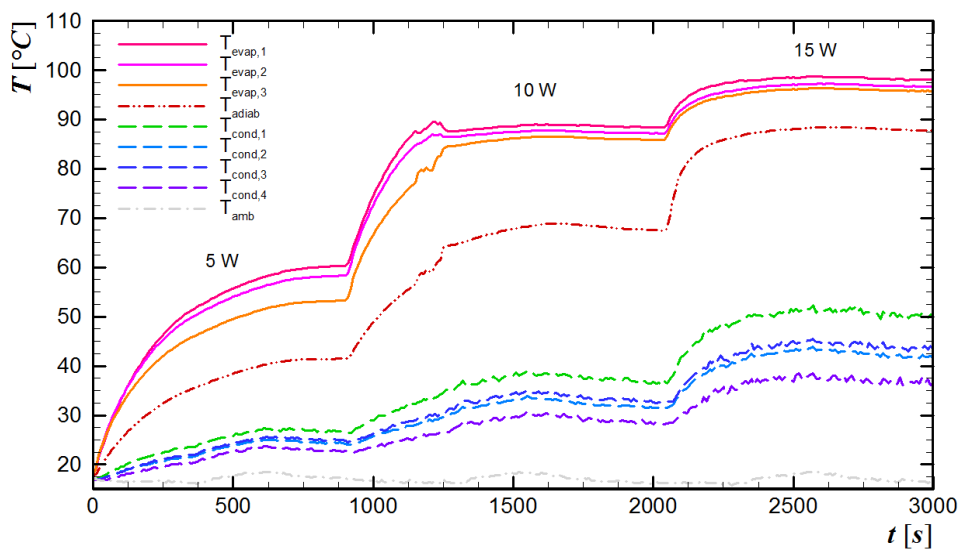
As incertezas experimentais estão associadas às incertezas dos termopares do tipo K, ao sistema de aquisição de dados e à fonte de alimentação e foram apresentadas concomitantemente com os resultados obtidos. Para a determinação das incertezas experimentais da medição da potência elétrica e da resistência térmica foi utilizado o Método de Propagação de Erros descrito por Holman (2011).

3. RESULTADOS & DISCUSSÃO

Os resultados experimentais mostram o comportamento térmico dos termossifões operando com diferentes fluidos de trabalho: água deionizada e nanofluido a base de ouro com 10% e 20% de concentração (NF10 e NF20, respectivamente). Os testes experimentais foram realizados na posição vertical sob condições de cargas térmicas variando de 5W a 35W. Os testes foram realizados três vezes e apresentaram erros inferiores a 0,5 °C nos valores médios. As incertezas experimentais de temperatura foram estimadas em aproximadamente $\pm 1,27$ °C e da carga térmica de ± 1 %. A Figura 6 apresenta o comportamento das temperaturas ao longo dos termossifões em função do tempo para as diferentes cargas térmicas.



(a) água deionizada



(b) NF 10

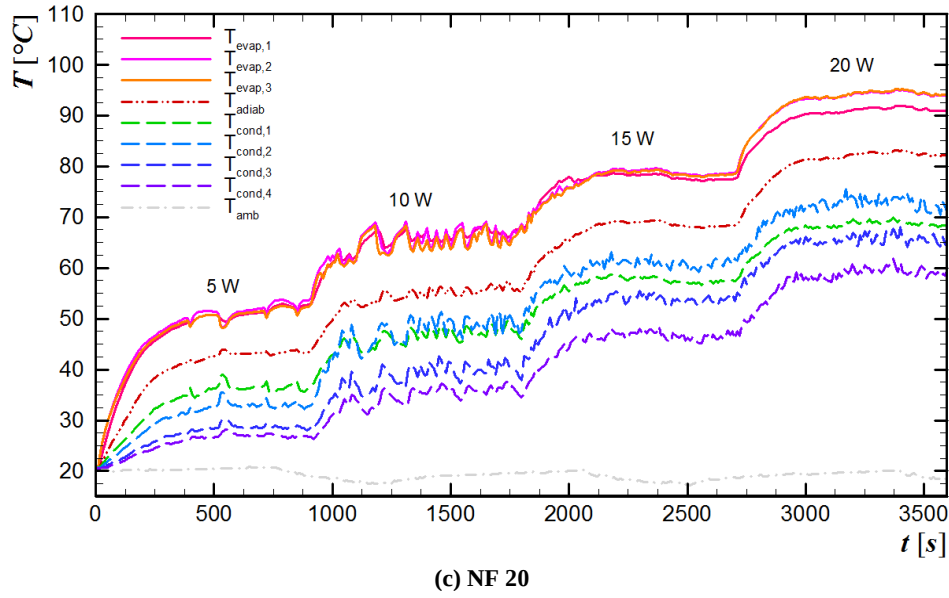


Figura 6. Distribuição de temperaturas em função do tempo para as cargas térmicas atribuídas.

O desempenho térmico de um termossifão pode ser avaliado por meio de sua resistência térmica. Reay *et al.* (2014) definiram a resistência térmica global, R_t , de um termossifão, expressa pela Eq. (1), como a razão entre diferença de temperatura entre a região do evaporador e do condensador, ΔT , e a taxa de transferência de calor, q . Em outras palavras, a R_t refere-se à facilidade que o dispositivo passivo tem de transportar calor. Quanto maior a resistência, maior a dificuldade do sistema em transportar calor e, conseqüentemente, maior será a diferença de temperaturas entre o condensador e o evaporador.

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

sendo que, q é a capacidade do tubo de calor em transferir calor, $T_{w, \text{evap}}$ e $T_{w, \text{cond}}$ são as temperaturas média da parede do evaporador e do condensador, respectivamente.

Na Figura 7 são apresentados os valores encontrados para resistência térmica dos termossifões estudados em função da potência dissipada no evaporador para a posição vertical. Como esperado, pode ser notado que o aumento da potência dissipada resulta em uma diminuição da resistência térmica. Todos termossifões operaram de forma satisfatória. Apesar do termossifão com água suportar uma maior carga térmica, devido a sua temperatura de teste alcançar 160°C, sua resistência térmica é mais que o dobro do que a resistência térmica do Termossifão NF 20. Desta forma, o desempenho térmico do nanofluido com 20% de concentração apresenta o melhor resultado.

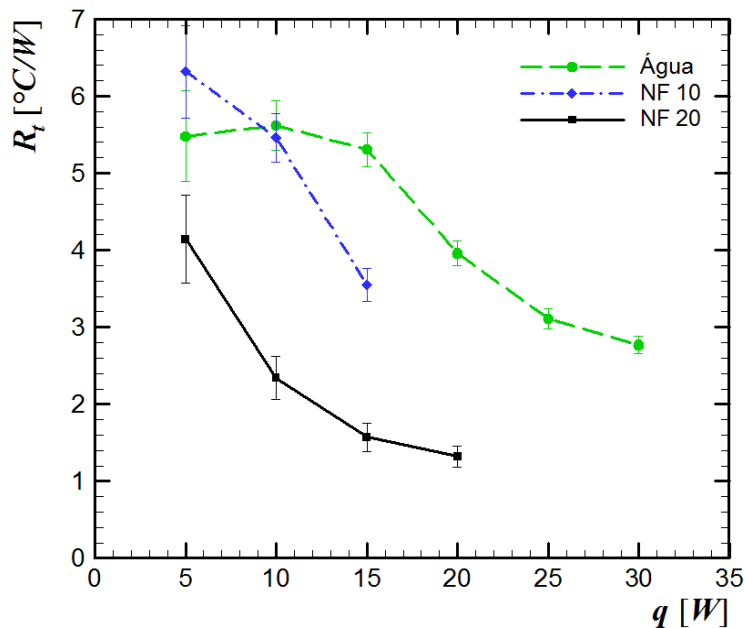


Figura 7. Resistência térmica dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi executada uma avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com a utilização de nanofluido a base de ouro como fluido de trabalho. Três termossifões foram construídos com fluidos de trabalho diferentes: água deionizada, nanofluido com 10% de concentração (NF10) e nanofluido com 20% de concentração (NF20). Os termossifões foram testados experimentalmente na posição vertical sob condições de cargas térmicas variando entre 5W e 35W ou até que a temperatura de 100°C fosse alcançada nos nanofluidos de trabalho. A partir da análise dos resultados experimentais, pode ser constatado que os termossifões operaram de forma satisfatória. Além disso, da análise de potencialidade do nanofluido a base de ouro como intensificador da transferência de calor nos termossifões, a melhor concentração de operação foi a de 20%.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsas de mestrado à acadêmica *Larissa Krambeck*, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste projeto de desenvolvimento tecnológico e de inovação. Agradecimentos também são externados à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR/Câmpus Ponta Grossa. Se houver, esta seção deve ser colocada antes da lista de referências.

6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, V.M., 2016, “Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões”, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa/PR, Brasil.
- Aguiar, V.M., Bartmeyer, G.A., Krambeck, L., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2018, “Thermal Analysis of a Finned Thermosyphon for Heat Exchanger Applications”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 18-21.
- Aguiar, V.M., Krambeck, L., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2017, “Influência da Razão de Carregamento no Desempenho Térmico de Termossifões”, *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Vol. 29, pp. 27-33.
- Da Silva, A.C.M., 2010, “Transferência de calor em nanofluidos - potencialidades e desafios”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Faghri, A., 2014, “Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges”, *Frontiers in Heat Pipes*, Vol. 5, No. 1, pp. 01-48.
- Groll, M., Rösler, S., 1992, “Operation Principles and Performance of Heat Pipes and Closed Two-Phase Thermosyphons”, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 17, pp. 091-151.
- Holman, J.P., 2011, “Experimental Methods for Engineers”, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York, USA, 768 p.
- Lopes, C.S., Lenart, V.M., Turchiello, R.F., Gómez, S.L., 2017, “Dependência da Refração Óptica Não Linear de Origem Térmica em Nanofluidos de Prata com a Frequência de Excitação Óptica”, *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, Vol. 4, No. 1, pp. 72-83.
- Mantelli, M.B.H., 2013, “Thermosyphon Technology for Industrial Applications”, Chapter 11, Vasiliev L.L., Kakaç S. (Eds.), *Heat Pipes and Solid Sorption Transformations: Fundamentals and Practical Applications*, CRC Press, Boca Raton, USA, 54 p.
- Menezes, A., 2015, “Conversão fototérmica em nanofluidos utilizando coletor plano montado em posicionador solar”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Brasil.
- Reay, D. A., Kew, P. A., Mcglen, R. J., 2014, “Theory, Design and Applications”, Elsevier, 6 ed. Waltham, MA, USA, 251p.
- 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 (Impresso)*, Vol. 39, No. 1, pp. 59-68.
- Stremel, G.K., 2017, “Avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com nanofluidos como fluido de trabalho”, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa/PR, Brasil.
- Stremel, G.K., Krambeck, L., Turchiello, R.F., Gomez, S.L., Antonini Alves, T., 2017, “Desempenho Térmico de um Termossifão com Nanofluido como Fluido de Trabalho”, *Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo*, Vol. 44, pp. 82.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF THERMOSYPHONS USING WORKING NANOFLUID

Gedley Kunan Stremel, gedleyks@gmail.com

Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com

Vinicius Mariani Lenart, vmlenart@gmail.com

Rozane de Fátima Turchiello, turchiel@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br

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

Abstract. *Thermosyphons are passive devices that intensify the heat transfer because they use latent heat of vaporization of the working fluid in the transport of energy in the form of heat with small temperature gradients. They operate in a biphasic cycle and are composed of hollow metal tubes filled with a working fluid. In this work, an experimental evaluation of the thermal performance of thermosyphons with gold-based nanofluid as working fluid was performed. For this purpose, three thermosyphons were made from a copper tube, with external and internal diameters of 9.45 mm and 7.75 mm, respectively; the length was 200 mm, characterized by an evaporator with 80 mm, an adiabatic region of 20 mm, and a condenser of 100 mm. The filling ratio of these thermosyphons was 40% of the total volume of the evaporator, and the working fluids tested were deionized water and the nanofluid with 10% and 20% concentration. The tests were carried out in the vertical position with thermal loads varying between 5 and 35W or until the temperature of 100° C was reached in working nanofluids. From the results found, the effectiveness of nanofluid as heat intensifier was verified, as well as the concentration of 20% in water as the best concentration.*

Keywords: *thermosyphon, nanofluid, working fluid, thermal performance.*