

ANÁLISE DE UM CIRCUITO DE TERMOSSIFÃO BIFÁSICO

Andre Roberto Nisgoski

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia Solar e Núcleo de Controle Térmico de Satélites (LABSOLAR/NCTS), C.P. 476 – 88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil.
nisgoski@labsolar.ufsc.br

Marcia B. H. Mantelli

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Matemática, C.P. 476 – 88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil.
marcia@labsolar.ufsc.br

Resumo. *O presente trabalho apresenta o estudo do fenômeno de escoamento bifásico existente no interior de um circuito de termossifão. O objetivo é determinar uma combinação entre os parâmetros construtivos que seja capaz de obter o menor gradiente de temperaturas entre as quatro seções do circuito de termossifão, visando uma homogeneização de temperaturas. Para isto um aparato experimental de vidro e um de aço inoxidável foram construídos e um modelo analítico desenvolvido. Tal modelo é simples e pode servir como ferramenta de projeto. Correlações de Kutateladze e Kaminaga mostraram-se satisfatórias na avaliação da ebulição e da condensação. Valores da resistência térmica equivalente total foram obtidos com ordem de grandeza de 10^{-2} . Oscilações na medida de temperaturas estão presentes no sistema e são devidas à formação e ao contínuo escape de bolhas de vapor na seção do evaporador. O valor da incerteza experimental da resistência térmica manteve-se em torno de 1,2 %.*

Palavras-chave: *circuito de termossifão bifásico, transferência de calor, escoamento bifásico.*

1. Introdução

Problemas energéticos atuais levam a pesquisas por fontes alternativas e otimização de processos que envolvam transferência de calor e escoamento bifásico. O circuito de termossifão bifásico é um equipamento que apresenta uma melhor performance, quando comparado a termossifões retos normais. Isto é explicado pela não existência de escoamento em contracorrente, uma vez que o fluido de trabalho se movimenta em uma direção preferencial. Para uma melhor compreensão do que realmente ocorre no interior destes circuitos, uma visualização do escoamento torna-se necessária. Para isto, no presente trabalho será apresentado primeiramente um aparato experimental, cujo circuito de termossifão bifásico possui a geometria retangular feita de vidro. Em uma seção vertical encontra-se o evaporador também de vidro, montado no mesmo eixo axial do termossifão, por onde escoam água quente que fornece calor necessário para fazer com que o fluido de trabalho entre em ebulição. Uma vez tendo o fluido evaporado, o mesmo entra na linha de vapor até chegar ao condensador, posicionado na outra seção vertical. Ao escoar pela linha de vapor e ao chegar ao condensador o fluido condensa e retorna para a linha de líquido, de onde se movimentará até o evaporador por diferença de massa específica. Assim, tem-se um eficiente dispositivo capaz de transferir calor e até mesmo homogeneizar temperaturas.

Posteriormente, um circuito de termossifão de aço inoxidável também foi construído para a coleta de dados experimentais. Para a compreensão do fenômeno envolvido termopares são colocados ao longo do termossifão para um monitoramento e controle de temperaturas e uma posterior análise.

Conjuntamente, um modelo analítico é desenvolvido para uma comparação de resultados. Tal modelo utiliza-se da analogia térmica com resistências elétricas. Através de uma análise da ordem de grandeza destes valores de resistência, um modelo complexo pode ser simplificado em uma simples associação em série de quatro resistências.

2. Modelamento matemático

Um modelo analítico baseado no método das resistências térmicas equivalentes pode ser criado, de acordo com a Eq. (1), para uma estimativa da taxa de transferência global de calor no sistema.

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{eq}} \quad (1)$$

onde: R_{eq} é igual a resistência equivalente que representa todas as trocas térmicas; ΔT é igual a variação de temperatura entre o evaporador e o condensador e Q é igual a quantidade da transferência de calor injetada no sistema.

Analisando-se o circuito de termostifão bifásico, uma malha elétrica dada pela Fig. (1) pode ser montada na representação de todas as trocas térmicas possíveis no sistema. Nela, R1, R2, R3 e R4 representam a resistência térmica associada a queda da temperatura de saturação entre o evaporador e o condensador, devido a queda de pressão do escoamento de vapor e de líquido; R6, R8, R10 e R12 representam a resistência térmica radial do material do tubo; R13, R14, R15 e R16 representam a resistência térmica axial do material do tubo; R7 e R11 representam as resistências associadas ao vapor e ao líquido, respectivamente; enquanto R17, R18, R19 e R20 representam as resistências térmicas de convecção natural e radiação entre as paredes do circuito de termostifão e o ar dentro da câmara. As resistências térmicas mais difíceis de serem determinadas são R5 e R9, que representam o mecanismo da ebulição e da condensação, respectivamente. A temperatura T6 representa o ponto onde a potência é aplicada, e T10, onde a potência é removida.

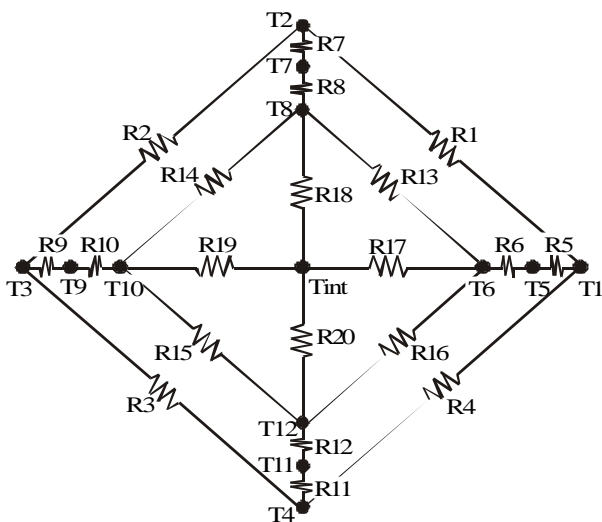


Figura 1. Modelo de resistência térmica equivalente completo.

Os valores da resistência de condução axial e radial podem ser obtidas em Incropera e Witt (1992). As resistências de condução axial não são consideradas, uma vez que possuem elevados valores e encontram-se em caminhos não preferenciais na transferência de calor pelo circuito elétrico, quando o mesmo é simplificado. Para a avaliação do fenômeno de ebulição e de condensação, correlações de Kutateladze (1959) e de Kaminaga et al. (1997) são utilizadas. As demais resistências são desprezadas, baseadas em Brost (1996). Todos estes valores são mostrados na Tab. (1), bem como suas ordens de grandeza.

Tabela 1. Resistências térmicas obtidas [K/W] e ordem de grandeza

| | Valores Calculados | Ordem de Grandeza |
|---------------------|--------------------|-------------------|
| R6, R8, R10 e R12 | 0,0095 | $\sim 10^{-2}$ |
| R13, R14, R15 e R16 | 2077,72 | $\sim 10^3$ |
| R1, R2, R3 e R4 | $\cong 0$ | $\sim 10^{-6}$ |
| R9 (Kaminaga) | 0,0142 | $\sim 10^{-2}$ |
| R5 (Kutateladze) | 0,0236 | $\sim 10^{-2}$ |
| R7 e R11 | $\cong 0$ | $\sim 10^{-6}$ |

Após uma análise da ordem de grandeza dos valores das resistências do circuito de termostifão bifásico, algumas destas podem ser desprezadas e assim, uma nova malha elétrica mais simples pode ser montada, conforme representada pela Fig. (2).

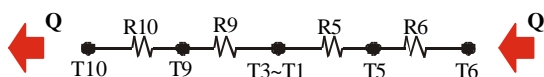


Figura 2. Modelo simplificado.

O modelo simplificado representa todo o processo de transferência de calor dentro do circuito de termostifão bifásico. Este processo é descrito por quatro resistências em série, onde: R6 e R10 significam a condução radial existentes na parede do evaporador e do condensador, respectivamente; R5 é relativa ao fenômeno de ebulição envolvido no escoamento e R9 a condensação.

2.1. Correlações de Kutateladze e Kaminaga

As resistências térmicas mais difíceis de serem avaliadas no modelo são as relativas à ebulição e à condensação. Mantelli et al. (1999) estudaram diferentes correlações da literatura e concluíram que para a aplicação em termosifões, as duas correlações que melhor representam o escoamento bifásico são dadas por Kutateladze (1959) e por Kaminaga et al. (1997). Sabendo-se que o fenômeno da ebulição é fortemente dependente do acabamento superficial (pontos de nucleação na interface sólido e líquido em escoamento), Kutateladze leva em conta um comprimento característico da bolha formada, designado por l_m . A correlação de Kutateladze para a ebulição é dada pela Eq. (2) e a de Kaminaga para a condensação pela Eq. (3).

$$R5 = 1428,57 \frac{l_m}{k_l Pr_l^{0,35} \left(\frac{q l_m}{r_v h_{lv} \mu_l} \right)^{0,7} \left(\frac{p_{sat} l_m}{\sigma} \right)^{0,7} A_E} \quad (2)$$

$$R9 = \frac{0,0283}{\left(\frac{Q}{p D_i h_{lv} m_l} \right)^{0,25} Pr_l^{0,4} k_l p l_i} \quad (3)$$

onde: R5 é a resistência térmica associada a evaporação; R9 é a resistência térmica associada a condensação; Q é igual à potência aplicada; D_i representa o diâmetro interno do tubo do termosifão; h_{lv} é o calor latente de vaporização; μ_l é a viscosidade do líquido; Pr_l é igual ao número de Prandtl do líquido; k_l representa a condutividade térmica do líquido; l_i é o comprimento do condensador do tubo de aço inoxidável; l_m é o comprimento característico da bolha formada; q é igual ao fluxo de calor; ρ_v é a massa específica do vapor; ν_l é a viscosidade cinemática; p_{sat} é a pressão de saturação; σ é a tensão superficial e A_E representa a área interna do evaporador.

3. Aparato experimental

Para a realização dos testes experimentais, dois aparatos contendo o circuito de termosifão bifásico foram construídos. Primeiramente, um com o termosifão de vidro do tipo borosilicato, para visualização e análise, de geometria retangular, com 520 mm de largura por 500 mm de altura. E ainda, um segundo, construído de aço inoxidável, com as mesmas dimensões. Ambos os tubos dos termosifões apresentaram um diâmetro externo de 14 mm e espessura de parede de 1,5 mm.

Como fluido de trabalho, foi usada água destilada por serem suas propriedades bem conhecidas e por não ser esta nociva à saúde, caso o circuito de termosifão venha a se romper.

Em uma seção vertical encontra-se o evaporador e em outra o condensador. Para que o condensador e o evaporador, no caso do termosifão de vidro, fossem mantidos a uma temperatura constante, dois banhos térmicos foram utilizados. No caso do termosifão de aço inoxidável, um banho térmico foi usado no condensador.

Ainda, isolamentos de espuma de poliestireno expandido foram colocados ao redor dos tubos para a redução das trocas térmicas.

Na Figura (3) se observa o aparato experimental de vidro, onde o evaporador está localizado na seção vertical da direita e o condensador na seção vertical da esquerda. A linha de vapor é a seção horizontal superior do circuito de termosifão e a linha de líquido a seção horizontal inferior. Conjuntamente está mostrado o sistema de aquisição, o computador de processamento e a fonte de alimentação de potência.



Figura 3. Aparato experimental de vidro.

O aparato experimental de aço inoxidável pode ser visualizado na Fig. (4). Sua geometria é a mesma do aparato construído de vidro. O condensador é mantido a uma temperatura constante através de um banho térmico. Uma diferença de potencial elétrico é aplicada na resistência localizada no evaporador, de onde calor será gerado fazendo com que o fluido de trabalho ali localizado entre em ebulição.



Figura 4. Aparato experimental de aço inoxidável.

4. Resultados

4.1. Aparato experimental de vidro

Uma característica importante do vidro de borossilicato é a sua transparência e sua capacidade de resistir a altas temperaturas. Logo, a visualização do escoamento em altas temperaturas foi possível, assim como a verificação das regiões mais críticas do termossifão, visando uma otimização na construção do segundo termossifão construído em metal. Os pontos críticos do termossifão foram observados na saída do evaporador e na transição entre fluido/vapor. Estes locais foram posteriormente melhor monitorados com o acréscimo de um número maior de termopares.

No início do fenômeno de ebulição, observa-se a formação de pequenas bolhas oriundas de sítios de nucleação. Nesta fase a formação das bolhas de vapor é lenta, assim como o seu crescimento. Esta bolha, a medida em que cresce ocupa toda a seção transversal do tubo e ascende no evaporador, arrastando um certo volume de líquido sobre ela, até atingir a primeira curva, onde colapsa. Então o líquido arrastado pela bolha retorna ao evaporador pela ação da gravidade, enquanto que o vapor se dirige ao condensador, por diferença de pressão.

Com o aumento de potência inserida no evaporador, tem-se uma mudança no tipo de escoamento dentro do tubo, partindo-se para o escoamento pistonado ou “slug-flow”, visualizado na Fig. (5). Basicamente, o fenômeno é o mesmo, porém ocorre a uma maior velocidade. Infelizmente, o aparato experimental de vidro, da forma em que foi concebido, não permitiu que uma maior potência fosse aplicada ao evaporador, de forma que se pudesse visualizar a ebulição do fluido no evaporador. Na realidade, pelo fato do vidro ser um material bastante liso em seu interior, uma alta taxa de calor seria necessária para que a temperatura de superaquecimento, responsável pela disparada do processo de nucleação fosse alcançada.

O processo de condensação que ocorre no condensador é quase imperceptível a olho nu, não sendo aparentemente afetado pelo nível de calor injetado no evaporador. Portanto, nenhum fenômeno digno de nota foi observado no condensador.

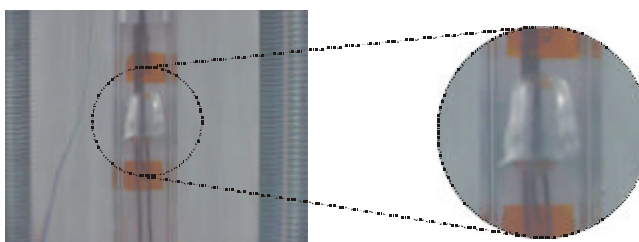


Figura 5. Escoamento pistonado.

Por outro lado, diferenças na altura da coluna de líquido entre o evaporador e o condensador (h_d) foram visualizadas, assim como mostrado na Fig. (6). Experimentalmente, mediu-se um valor desta diferença de altura em

torno de 7,0 mm. Este efeito não está reportado na literatura e a sua explicação, de acordo com o entendimento do presente autor, é apresentada a seguir.

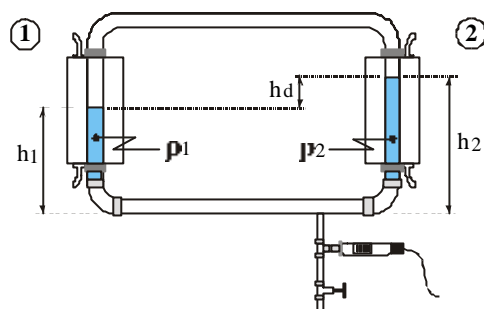


Figura 6. Diferença da altura de líquido.

A diferença que ocorre na altura da coluna d'água entre o evaporador e o condensador, quando o circuito de termostato está em operação, é explicada devido a diferença de massas específicas existentes no fluido de trabalho entre o lado do evaporador (lado 2) e o do condensador (lado 1), uma vez que as temperaturas do evaporador e do condensador encontram-se em diferentes níveis. Estimando-se temperaturas iguais às experimentais, de 80 °C no evaporador (T_2) e 20 °C no condensador (T_1), tem-se de uma tabela termodinâmica segundo Van Wylen e Sonntag (1976), os valores das massas específicas do fluido de trabalho iguais a 971,8 e 998,2 kg/m³, respectivamente.

Fazendo-se um balanço de forças, tem-se a Eq. (4), que relaciona as massas específicas do líquido e do vapor com as alturas da coluna de fluido. Utilizando-se esta equação e a altura do líquido (h_1), medida a partir da extremidade inferior do condensador e igual a 24,5 cm, tem-se com os valores das massas específicas mostrados anteriormente, uma diferença de altura (h_d) aproximadamente igual a 6,65 mm.

$$r_1 h_1 = r_2 h_1 + r_2 h_d \quad (4)$$

Este valor apresenta uma diferença de 5 % em relação à altura observada conforme antes mencionado no aparato experimental, o que confirma a hipótese de que esta variação de altura é proveniente da diferença nas massas específicas do líquido nas duas seções verticais do circuito de termostato bifásico, devido à diferença de temperaturas.

4.2. Aparato experimental de aço inoxidável

Uma vez tendo-se observado o escoamento dentro do circuito de termostato bifásico no aparato de vidro, partiu-se para a construção do aparato experimental de aço inoxidável. À seguir, os resultados serão mostrados e discutidos, primeiramente, para o termostato com uma razão de preenchimento de 60 % e posteriormente para o de 20 %.

Tais razões foram utilizadas, por se tratarem de valores comuns para termostatos normais e por representarem valores extremos da quantidade de fluido de trabalho no evaporador.

4.2.1. Razão de preenchimento de 60 %

Define-se razão de preenchimento (P) como sendo a porcentagem da altura de líquido em relação a altura da seção do evaporador. Variando-se a inclinação do circuito de termostato à partir da horizontal, diferentes razões de preenchimento com inclinação (P^*) podem ser obtidas.

Analisando-se o efeito da inclinação da bancada para o circuito de termostato com a mesma razão de preenchimento e para uma potência aplicada de 600 W, representado pela Fig. (7), nota-se o melhor comportamento térmico para uma inclinação (θ) igual a 25 °. Este comportamento é caracterizado por um menor gradiente de temperaturas entre as quatro seções do termostato e ao mesmo tempo por apresentarem maior nível de temperatura para uma mesma quantidade de calor (Q) inserida no sistema. Pode-se perceber que, para a inclinação de 15 °, tem-se uma maior temperatura no evaporador, na linha de vapor e no condensador. Porém, nota-se um elevado gradiente de temperatura entre estas seções e a linha de líquido, o que não é recomendável, uma vez que o objetivo deste trabalho é procurar uma configuração onde o gradiente de temperaturas seja o menor possível, visando a homogeneização de temperaturas e ao mesmo tempo garantir um nível de temperatura nas quatro seções suficientemente alto. Assim, verifica-se que o líquido de trabalho não deve ultrapassar a altura total do evaporador, ou seja, a inclinação imposta não deve fazer o evaporador trabalhar "afogado", como ocorre no caso da inclinação de 35 °, onde percebe-se uma redução drástica, em torno de 25 °C, na temperatura de todo o termostato quando comparado à inclinação de 25 °. Ainda também, existe uma determinada inclinação na qual a razão de preenchimento (P^*) torna-se insuficiente para homogeneizar as temperaturas, no caso da inclinação de 0 e 15 °. Verifica-se, que para estes testes, as curvas plotadas apresentam uma certa semelhança, o que leva a concluir que ambas não apresentavam uma inclinação suficiente.

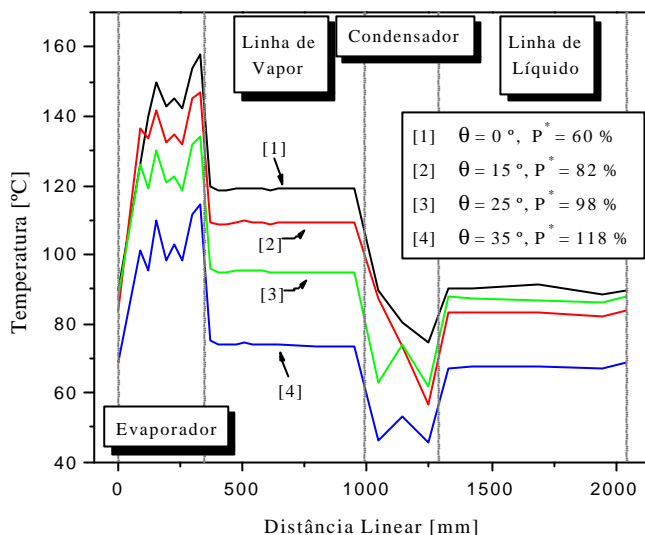


Figura 7. Influência da inclinação do circuito de termosifão na distribuição de temperaturas.

4.2.2. Razão de preenchimento de 20 %

A Figura (8) apresenta a distribuição de temperatura para termosifões com razão de preenchimento de 20 % e várias inclinações, para uma potência aplicada de 600 W. Nota-se claramente que, para uma inclinação de 15°, ocorre um superaquecimento na região final do evaporador, devido à secagem da parede interna do mesmo. Isto é explicado pelo fato de que o coeficiente interno de transferência de calor é menor na região onde o tubo está em contato com o vapor do que na região em que está em contato com o líquido, ou seja, na piscina. Este superaquecimento é altamente indesejado e sinaliza que maiores potências térmicas não devem ser transferidas pelo termosifão.

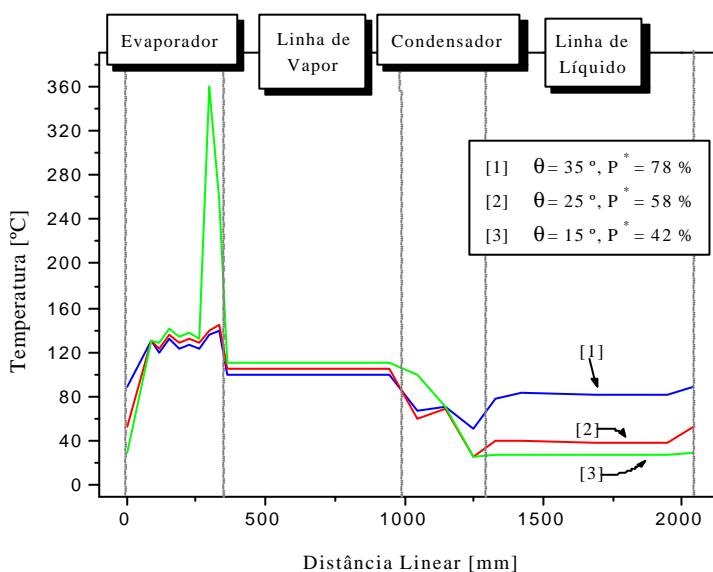


Figura 8. Influência da inclinação do circuito de termosifão na distribuição de temperaturas.

4.2.3. Resultado experimental x Resultado de Kutateladze/Kaminaga

Fazendo-se uma comparação entre o resultado experimental do circuito de termosifão para o caso onde $P = 60\%$ e $\theta = 25^\circ$ e o resultado teórico utilizando-se das correlações de Kutateladze para a ebulição e de Kaminaga para a condensação, tem-se o gráfico representado pela Fig. (9). Observa-se uma boa concordância entre os valores experimentais e os teóricos, em toda a faixa intermediária de potência. Para os valores extremos, 50 e 600 W, uma diferença maior entre os valores pode ser notada. A diferença entre o modelo e os dados experimentais variou de 0,1 % para a potência de 300 W a 40,8 % para a potência de 600 W, sendo 17 % o valor médio obtido. Apesar da diferença ter um valor médio elevado, considerando-se a complexidade dos fenômenos de ebulição e condensação aqui envolvidos, este valor é razoável.

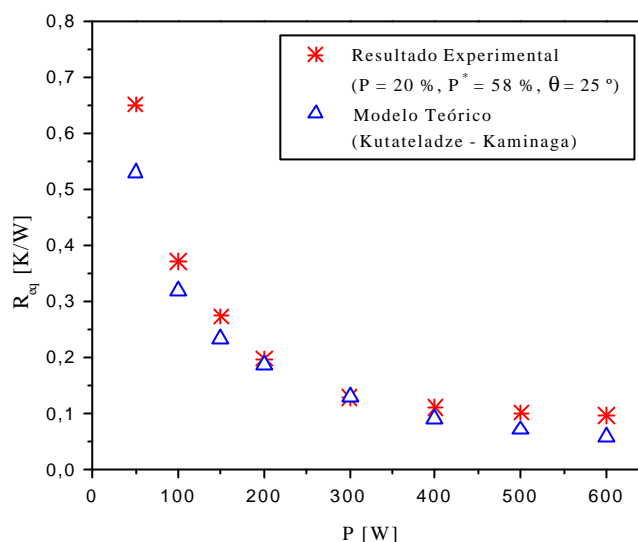


Figura 9. Comparação entre resultado experimental e resultado do modelo teórico utilizando-se as correlações de Kutateladze/Kaminaga.

4.3. Incerteza experimental

Baseado no método descrito por Holman (1994), o valor calculado da incerteza experimental da resistência térmica equivalente, para o caso onde $P = 60\%$ e $\theta = 25^\circ$, variou de 0,6 até 1,2 % nas potências aplicadas no evaporador entre 50 e 600 W.

5. Conclusões

Um modelo de resistência térmica simples foi desenvolvido, podendo o mesmo ser utilizado como instrumento de projeto na construção de circuitos de termossifões bifásicos.

As correlações de Kutateladze para a ebulição e de Kaminaga para a condensação representam de maneira satisfatória o escoamento bifásico envolvido no aparato com uma precisão de até 17 %, quando comparada com os resultados experimentais.

A diferença entre a altura da coluna d'água do evaporador e do condensador, quando o circuito de termossifão está em operação, é explicada devido a diferença de massas específicas existentes no fluido de trabalho entre o lado do evaporador, mais quente e o lado do condensador, mais frio.

A melhor combinação razão de preenchimento/inclinação estudada para a homogeneização de temperaturas nas quatro seções do circuito de termossifão foi de $P = 60\%$ e $\theta = 25^\circ$.

O cálculo da incerteza experimental da resistência térmica manteve-se em valores aceitáveis, não maiores do que 1,2 %, comprovando a qualidade da medida da resistência.

A razão de preenchimento e o ângulo de inclinação são valores que influenciam a performance do circuito de termossifão. Valores da razão de preenchimento com inclinação (P^*) próximos a 100 % são aconselháveis.

A aplicação de altas potências no evaporador de circuitos de termossifão é recomendada, visando-se a redução de oscilações de temperatura e pressão, uma vez que estas estão presentes para baixos níveis de potência aplicada.

Novos diâmetros, geometrias, fluidos de trabalho, assim como a introdução de superfícies intensificadoras do fenômeno de ebulição, por exemplo superfícies porosas, devem ser estudados a fim de se obterem dados experimentais para uma possível comparação com os dados do presente trabalho.

Um aumento demasiado do coeficiente de transferência de calor no lado do evaporador, sem uma elevação também do coeficiente no lado do condensador, levaria o circuito de termossifão a um colapso, em consequência da incapacidade da dissipação de calor pelo mesmo.

6. Referências

- Brost, O., 1996, "Closed Two-Phase Thermosyphons", Institut für Kemenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart, Germany.
- Holman, J. P., 1994, "Experimental Methods for Engineers", 6th edition, McGraw-Hill, Inc., United States of America.
- Incropera, F. P. e Witt, D. P., 1992, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Brasil.
- Kaminaga, F., Hashimoto, H., Feroz, C., Goto, K. and Matsumura, K., 1997, "Heat Transfer Characteristics of Evaporation and Condensation in a Two-Phase Closed Thermosyphon", 10th International Heat Pipe Conference, Stuttgart, pp. 1-6.

- Kutateladze, S. S., 1959, "Heat Transfer in Condensation and Boiling", AEC-tr-3770, pp. 129.
- Mantelli, M. B. H., Colle, S., Carvalho, R. D. M. and Moraes, D. U.C., 1999, "Study of Closed Two-Phase Thermosyphons for Bakery Oven Applications", Proceedings of 33rd National Heat Transfer Conference, Albuquerque, pp. 1-8.
- Van Wylen, G. J. and Sonntag, R. E., 1976, "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", Ed. Edgard Blücher Ltda., Brasil.

A TWO-PHASE LOOP THERMOSYPHON ANALYSIS

Andre Roberto Nisgoski

Mechanical Engineering Department, NCTS - Satellite Thermal Control Group
Federal University of Santa Catarina - UFSC, P.O. Box 476, 88040-900, Florianópolis, SC, BRAZIL
Phone: +55 48 3319937, Fax: +55 48 2341519
E-mail: nisgoski@labsolar.ufsc.br

Marcia B. H. Mantelli

Mathematics Department
Federal University of Santa Catarina - UFSC, P.O. Box 476, 88040-900, Florianópolis, SC, BRAZIL
Phone: +55 48 3319937, Fax: +55 48 2341519
E-mail: marcia@labsolar.ufsc.br

Abstract. *The present study presents the two-phase flow phenomenon inside the tubes of the loop thermosyphon. The principal objective is to determine the constructive parameters that means the lowest temperature gradient between the four sections from loop thermosyphon, aiming the temperature homogenization. For this, an experimental apparatus of glass and other of stainless steel were made and an analytical model were developed. This model is simple and can be used as a design tool. Kutateladze and Kaminaga correlations showed good values in estimation of the boiling and condensation. Magnitude order of the 10^{-2} for the equivalent thermal resistance was obtained. Oscillations in the temperature measure were detected in the loop thermosyphon due to the continuous formation and escape of the vapor bubble in the evaporator section. The experimental uncertainty from the thermal resistance was about 1.2%.*

Keywords: *two-phase loop thermosyphon, heat transfer, two-phase flow.*