

## METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE TERMOSSIFÕES APLICADOS EM COLETORES SOLARES

**Monique Goto Holetz**  
**Thiago Antonini Alves**  
**Paulo Henrique Dias dos Santos**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Ponta Grossa, Av. Monteiro Lobato, Km 4, 84016-210  
E-mail para correspondência: psantos@utfpr.edu.br

### Introdução

Os tubos de calor são dispositivos altamente eficientes para o controle térmico por transferirem grandes quantidades de calor. Eles são amplamente utilizados em diferentes aplicações na engenharia, desde aplicações aeroespaciais até o controle térmico de microeletrônicos (Groll e Rösler, 1992). Os termossifões, também chamados de tubos de calor assistidos pela ação da gravidade, são os tipos mais simples de tubo de calor e que possuem várias aplicações em recuperação de calor industrial. Esses dispositivos são também uma alternativa viável para coletores solares, devido à sua relativa simplicidade de construção e ao bombeamento do fluido do trabalho realizado pela ação da gravidade devido à inclinação da superfície do coletor (Abreu e Colle, 2004). Vários pesquisadores, OLIVETI e ARCURI (1996); ISMAIL e ABOGDERAH (1992, 1998) e HUSSEIN *et. al.* (1999a, b), vêm estudando esse tipo de coletores solares de forma experimental e teórica.

Uma nova configuração para um coletor solar compacto assistido por termossifões para o aquecimento de água de uso doméstico é aqui proposta para ser desenvolvida. Este coletor solar compacto será composto por cinco termossifões feitos de cobre. Uma metodologia para dimensionamento destes termossifões é apresentada neste trabalho e esta, por sua vez, é baseada nos limites operacionais dos mesmos.

### Descrição do Problema

O coletor solar compacto assistido por termossifões é mostrado na Fig. 1. Esse coletor é composto por cinco termossifões feitos de cobre tendo como fluido de trabalho a água. A caixa do coletor é de aço inoxidável, onde a parte inferior possui um vidro por onde os raios solares entram no coletor solar. Nesta parte inferior estão alocados os evaporadores dos termossifões. Na parte superior, onde estão alocados os condensadores dos termossifões, um fluxo de água passa externamente aos tubos dos termossifões.

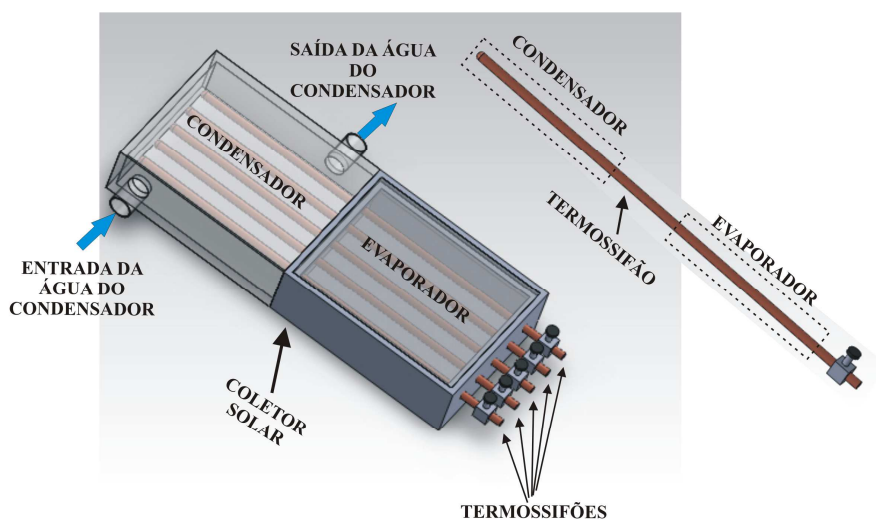


Figura 1 – Diagrama esquemático do coletor solar compacto assistido por termossifões.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

Os termosifões são compostos por três partes: seção do evaporador, seção adiabática e seção do condensador, como observado na Fig. 2. Eles funcionam da seguinte maneira: o calor absorvido na parte inferior do coletor solar é transferido para o termosifão, vaporizando o fluido contido internamente nesta região. O vapor gerado se desloca devido à diferença de pressão, para regiões mais frias do tubo, o condensador, onde o calor transportado é rejeitado para o fluxo de água que passa externamente aos tubos dos termosifões. No processo de rejeição de calor, o vapor se condensa, e o condensado é transportado de volta ao evaporador, fechando o ciclo. A região adiabática, que pode apresentar dimensão variável (sendo inexistente em alguns casos), está localizada entre o evaporador e o condensador, sendo isolada do meio externo. O retorno do fluido de trabalho do condensador para o evaporador se dá pela ação da gravidade. Por essa razão o condensador deve estar localizado acima do evaporador.

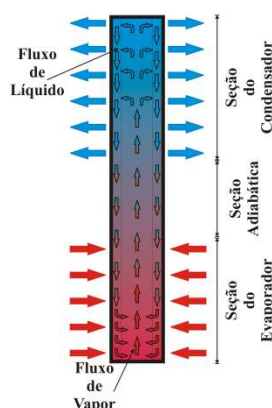


Figura 2 – Diagrama esquemático do coletor solar compacto assistido por termosifões.

### Modelo Matemático

O modelo matemático para o dimensionamento dos termosifões, aqui apresentados, é baseado nos limites operacionais dos mesmos, que são: limite viscoso, limite sônico, limite de ebulição e limite de arrasto. As correlações aqui apresentadas podem ser encontradas na literatura (Silva, 2001).

Antes de calcular os limites de operação é necessário que se determine alguns parâmetros e as resistências térmicas de acordo com a Fig. 3. As expressões para o cálculo das resistências térmicas são apresentadas na sequência.

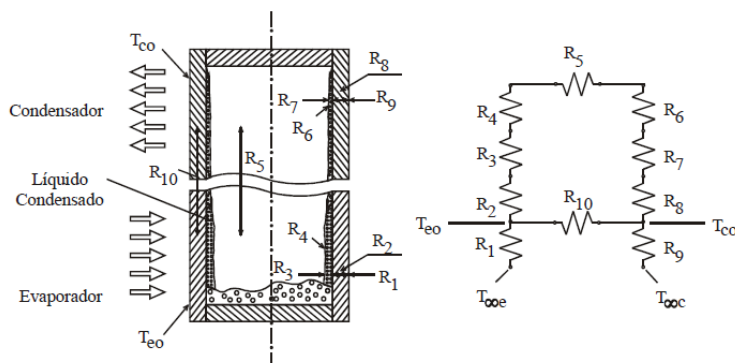


Figura 3 – Circuito elétrico equivalente de um termosifão (Silva, 2001)

$$R_1 = \frac{1}{h_{eo} A_e} \quad (1)$$

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**

Artigo CREEM2012

$$R_9 = \frac{1}{h_{co} A_c} \quad (2)$$

As resistências das paredes são:

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2\pi l_e k_w} \quad (3)$$

$$R_8 = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2\pi l_c k_w} \quad (4)$$

Desprezando as resistências internas, a resistência térmica total é dada por:

$$R = R_1 + R_2 + R_8 + R_9 \quad (5)$$

É assumida como primeira aproximação para potência transferida:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (6)$$

$$q'' = \frac{4q}{\pi d_i^2} \quad (7)$$

Como a espessura do filme de líquido no condensador é muito pequena, pode-se assumir que  $R_7 = 0$ . Logo, a temperatura de vapor pode ser calculada da seguinte maneira:

$$T_v = T_{ext,e} + (R_7 + R_8 + R_9)q \quad (8)$$

De posse da temperatura de saturação, determina-se a pressão de saturação. A diferença de temperatura global efetiva pode ser calculada por:

$$\Delta T = (T_{ext,c} - T_{ext,e}) \quad (9)$$

A carga térmica do termosifão é então calculada pela Eq. 6. É necessário comparar agora a carga térmica a ser transportada (calculada na Eq. 6), com os limites de operação que são apresentados a seguir.

O *limite viscoso* ocorre quando as forças viscosas dominam o fluxo de vapor. Quando isto ocorre, a pressão de vapor no condensador pode se reduzir a zero. Nestas condições, o transporte de calor pode ser limitado. Este limite pode ser calculado por:

$$q''_{\text{máx,viscoso}} = r_v^2 h_{lv} \frac{\rho_v p_v}{16\mu_v l_e} \quad (10)$$

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

O *limite sônico* ocorre quando a velocidade do vapor pode atingir níveis sônicos durante o início de operação ou em regime permanente. Uma onda de choque afeta a operação do termossifão. Este limite pode ser determinado da seguinte maneira:

$$q''_{\text{máx,sônico}} = 0,474h_{lv}(\rho_v p_v)^{1/2} \quad (11)$$

O *limite de ebulição* ocorre quando o fluxo de calor radial aplicado no evaporador se tornar excessivamente alto. Neste caso a ebulição do fluido de trabalho no evaporador pode ser severamente afetada e a circulação de fluido cessa devido à formação de bolhas. Este limite pode ser calculado pelo seguinte grupo de equações:

$$K_L = h_{lv}[\rho_v^2(\rho_l - \rho_v)g\sigma]^{1/4} \quad (12)$$

$$q''_{\text{máx,rad}} = 0,12K_L \quad (13)$$

$$A_e = \pi d_e l_e \quad (14)$$

$$q''_{\text{máx,ebulição}} = q''_{\text{máx,rad}} A_e \quad (15)$$

O *limite de arrasto* ocorre quando a velocidade do vapor é suficientemente alta. As forças de cisalhamento que ocorrem na interface líquido-vapor podem extrair líquido do filme de líquido formado na parede do condensador e arrastá-lo para o fluxo de vapor. Este fenômeno reduz o aporte de condensado para o evaporador e limita a capacidade de transporte de calor do termossifão. Este limite é calculado pela seguinte equação:

$$q''_{\text{máx,arrasto}} = 0,64 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \left( \frac{d_i}{4l_c} \right) h_{lv} \sigma g \rho_v (\rho_l - \rho_v) \quad (16)$$

## Resultados

Foi utilizada a água como fluido de trabalho. As propriedades térmicas e hidrodinâmicas foram determinadas em função da temperatura do vapor que foi calculada pela Eq. 7 ( $T_v = 56,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Foram assumidos os seguintes dados:  $T_{\text{ext,e}} = 90^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{ext,c}} = 27^\circ\text{C}$ , tubo de cobre, espessura de 1 mm, coeficiente de transferência de calor externo no evaporador de  $31 \text{ W/m}^2\text{-K}$ , coeficiente de transferência de calor externo no condensador de  $37 \text{ W/m}^2\text{-K}$ . Alguns parâmetros de dimensionamento foram variados a fim de se avaliar a influência dos mesmos nos limites de operação do termossifão. Os comprimentos do evaporador e do condensador foram variados entre 15 e 45 cm. O diâmetro externo do termossifão também foi modificado entre  $\frac{1}{2}$  pol (12,7 mm) e 2 pol (50,8 mm).

A Fig. 4 apresenta os limites de ebulição (Fig. 4a) e sônico (Fig. 4b) em função da variação do comprimento do evaporador. Note que para um comprimento abaixo de 17,5 cm o limite de ebulição será atingido e o termossifão irá falhar. Percebe-se também que o limite sônico não é atingido. O limite de arrasto (na ordem de  $10^{10} \text{ W/m}^2$ ) e o limite viscoso (na ordem de  $10^9 \text{ W/m}^2$ ) ficaram muito acima dos valores calculados para a carga térmica do termossifão.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

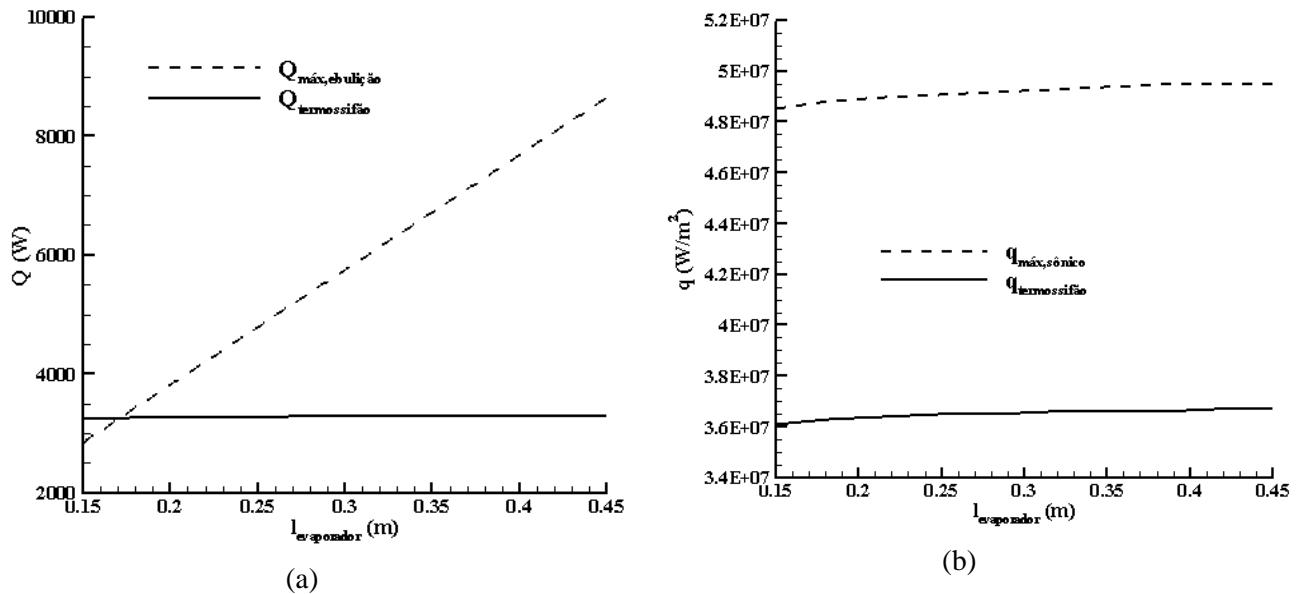


Figura 4 Limite de ebulição (a) e sônico (b) em função do comprimento do evaporador.

A Fig. 5 apresenta os limites de ebulição (Fig. 5a) e sônico (Fig. 5b) em função da variação do comprimento do condensador. Percebe-se que os limites sônico e de ebulição não são atingidos. O limite de arrasto (na ordem de  $10^{10}$   $\text{W/m}^2$ ) e o limite viscoso (na ordem de  $10^9$   $\text{W/m}^2$ ) ficaram muito acima dos valores calculados para a carga térmica do termossifão.

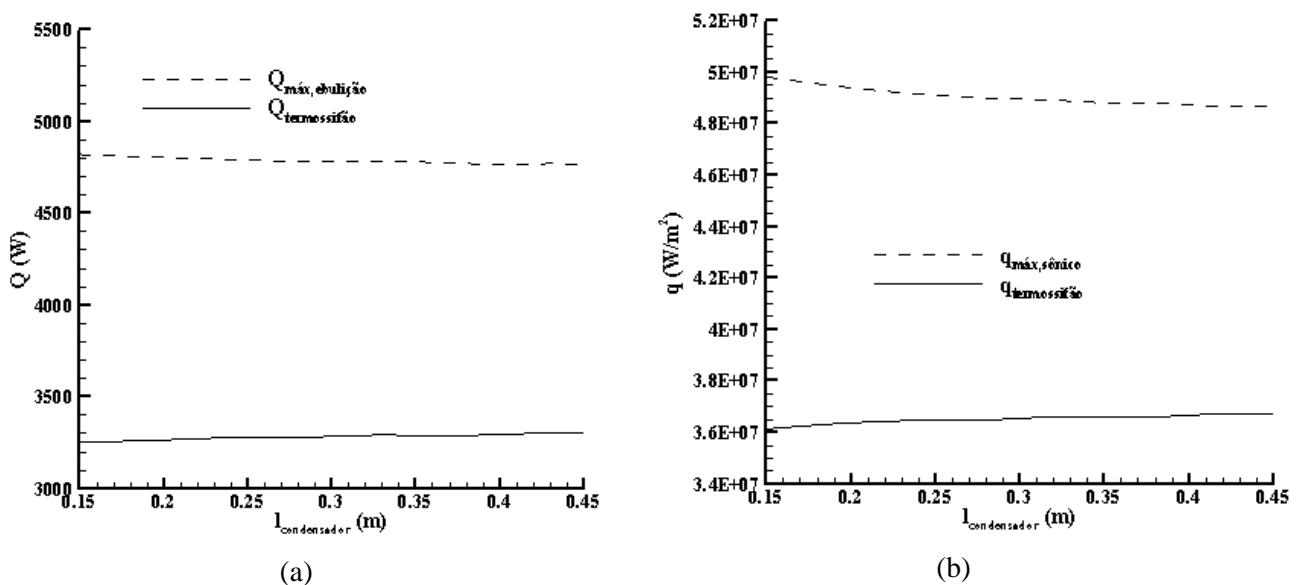


Figura 5 Limite de ebulição (a) e sônico (b) em função do comprimento do condensador.

A Fig. 6 apresenta os limites de ebulição (Fig. 6a) e sônico (Fig. 6b) em função da variação do diâmetro externo do termossifão. Percebe-se que os limites sônico e de ebulição não são atingidos. O limite de arrasto (na ordem de  $10^{10}$ ) e o limite viscoso (na ordem de  $10^9$ ) ficaram muito acima dos valores calculados para a carga térmica do termossifão.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

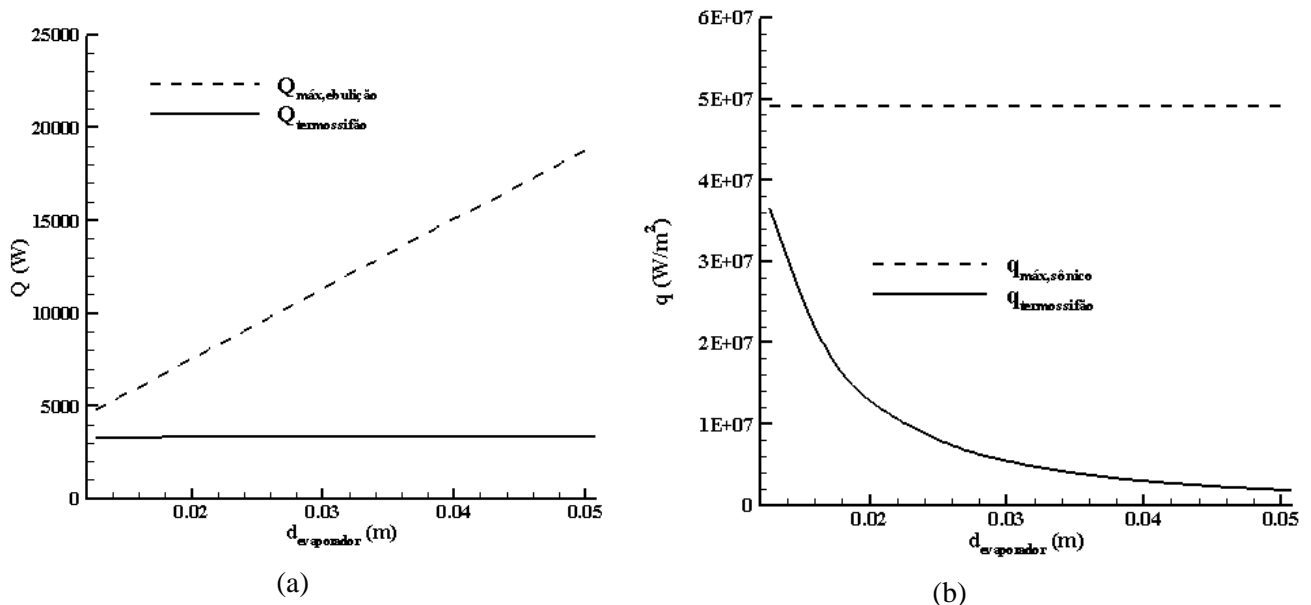


Figura 6 Limite de ebulição (a) e sônico (b) em função do diâmetro externo do termossifão.

### Conclusões

Este artigo apresenta uma metodologia para o dimensionamento de termossifões que podem ser aplicados em coletores solares assistidos por termossifões. A metodologia é aplicada para dimensionar apenas um termossifão, mas ela pode ser estendida para um conjunto de termossifões. Esta modelagem matemática foi baseada nos limites de operação dos termossifões e num circuito equivalente de resistências térmicas.

Foram analisados alguns parâmetros geométricos do termossifão tais como: comprimento do evaporador, comprimento do condensador e o diâmetro externo do termossifão. Percebeu-se que para um comprimento do evaporador menor do que 17,5 cm este termossifão em particular iria falhar, pois o limite de ebulição seria atingido. Percebeu-se ainda que o limite sônico, o limite de arrasto e o limite viscoso não são críticos no dimensionamento deste tipo de termossifão.

### Referências Bibliográficas

- Abreu, S. L., Colle, S., 2004. An experimental study of two-phase closed thermosyphons for compact solar domestic hot-water systems, *Solar Energy* 76, 141-145.
- Groll, M., Rosler, S., 1992. Operation principles and performance of heat pipes and closed two-phase thermosyphons. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics* 17, 91-151.
- Hussein, H.M.S., Mohamad, M.A., El-Asfour, A.S., 1999a. Transient investigation of a thermosyphon flat-plate solar collector. *Applied Thermal Engineering* 19, 789-800.
- Hussein, H.M.S., Mohamad, M.A., El-Asfour, A.S., 1999b. Optimization of a wickless heat pipe flat plate collector. *Energy Conversion and Management* 40, 1949-1961.
- Ismail, K.A.R., Abogderah, M.M., 1992. Residential solar collector with heat pipes. In: *Proceedings 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, China.*
- Ismail, K.A.R., Abogderah, M.M., 1998. Performance of a heat pipe solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering* 120, 51-59.
- Oliveti, G., Arcuri, N., 1996. Solar radiation utilisability method in heat pipe panels. *Solar Energy* 57, 345-360.
- Silva, A. K., 2001. Análise de um forno de cocção de pães assistido por termossifões de duas fases. *Dissertação de Mestrado, UFSC.*