

## DETERMINAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE UM CIRCUITO DE SIFÃO TÉRMICO DE AQUECIMENTO SOLAR

Isaias Silva da Costa, [isaiasmundya@gmail.com](mailto:isaiasmundya@gmail.com)<sup>1</sup>  
Maria Elieneide Araújo, [eli@sol.les.ufc.br](mailto:eli@sol.les.ufc.br)<sup>2</sup>  
Maria Eugênia Vieira da Silva, [eugenia@sol.les.ufc.br](mailto:eugenia@sol.les.ufc.br)<sup>2</sup>  
Osvaldo Assunção Mendonça, [osvaldotavares9@gmail.com](mailto:osvaldotavares9@gmail.com)<sup>1</sup>  
Francisco Nascelio Pinheiro, [nascelio@hotmail.com](mailto:nascelio@hotmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFC (Universidade Federal do Ceará)- Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>2</sup>UFC (Universidade Federal do Ceará)- LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural)

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo a determinação numérica e experimental da vazão mássica de circulação e da eficiência de aquecimento de um circuito de sifão térmico solar para aquecimento em processos térmicos solares como cozimento, dessalinização e refrigeração. Na determinação numérica da vazão mássica de circulação no circuito, foram feitas duas considerações. Na primeira, o escoamento era laminar devido aos valores dos fluxos de calor por radiação solar responsáveis pela movimentação do fluido no circuito. Na segunda, a pressão decorrente da diferença de densidade nos lados quente e frio do circuito era equilibrada pela perda de pressão por fricção no escoamento do fluido de trabalho no circuito. O circuito térmico padrão tem tubulação de cobre, isolada com calhas de 2 cm de espessura, que fazem a ligação entre os coletores térmicos planos e o equipamento de dissipação de energia útil (painéis, tanque de água quente e adsorvedor). O fluido de trabalho utilizado foi um óleo térmico sintético com capacidade de aquecimento de até 400°C. As medições experimentais incluíam os valores das temperaturas em várias posições do circuito, da radiação solar global em plano inclinado do coletor e da vazão mássica de circulação. Para não interferir com a perda de carga no circuito e, conseqüentemente com a própria vazão mássica a ser medida, foi selecionado um sensor externo, que opera com ondas sonoras. Os resultados mostram que para fluxos de radiação de 900 W/m<sup>2</sup>, a vazão mássica alcança valores em torno de 16 g/s.

**Palavras-chave:** refrigerador solar, sifão térmico, vazão mássica

### 1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia para suprir a crescente demanda mundial, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, que não atuem de forma destrutiva no meio ambiente, tem levado a pesquisas na área de energias renováveis, seja solar, eólica, de biomassa, entre outras, tanto para aplicações residenciais como industriais.

O uso de energia solar térmica representa uma contribuição significativa na solução do problema de falta de energia limpa devido à sua ampla possibilidade de utilização em diferentes processos (geração de energia elétrica, aquecimento de água, cozimento, refrigeração, secagem, etc.) e à facilidade de co-utilização (com outras fontes em um mesmo processo), como no caso de plantas de geração elétrica termo-solar com calhas parabólicas, nas quais o aquecimento solar é responsável por 6 a 8 horas de operação da planta, enquanto outros energéticos, como os produtos de biomassa, são responsáveis pelo fornecimento de energia nas demais horas do dia. Essa junção de fontes “diferentes” de energias renováveis torna economicamente viável a operação dessas plantas.

Os sistemas de refrigeração por adsorção vêm sendo estudados e aprimorados, sendo o grande desafio melhorar o coeficiente de desempenho do ciclo de adsorção. Entre as vantagens dos sistemas térmicos de refrigeração, que utilizam a energia solar como fonte de energia tem-se: construções mais simplificadas, sem partes móveis, instalações simples, baixo custo de manutenção e não uso de eletricidade, além de fornecerem energia residual para outras possíveis aplicações.

O circuito de termossifão solar é encontrado em sistema de refrigeração por adsorção, de fogão solar com armazenamento temporário de calor, em sistemas de dessalinização com recuperação de calor, entre outros (Schwarzer, 1997; Araújo, 2009). O sistema completo é composto por uma fonte de absorção de energia solar, ou fonte quente, que nos casos estudados está representada por um ou mais coletores planos, e uma fonte fria, onde o calor absorvido pelos coletores é transferido para um processo, seja de refrigeração, cozimento ou dessalinização. As fontes quentes e frias estão ligadas pelo circuito de termossifão, que é essencialmente formado por tubulações e acessórios de cobre, válvulas de controle e de retenção e isolamento térmico com proteção mecânica para utilização em ambientes externos. Na tubulação do circuito escolhe-se um fluido de trabalho, um óleo térmico, que tem por função levar o calor absorvido nos coletores aos equipamentos, componentes da fonte fria. O principal objetivo do presente trabalho é determinar a eficiência térmica do circuito de aquecimento por termossifão solar através da determinação da vazão mássica no circuito.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de energia solar em sistemas de refrigeração é uma alternativa interessante, pois traz vários benefícios, principalmente econômicos e ambientais. O acionamento de equipamentos de refrigeração pode ser feito basicamente de três formas: através do calor, do trabalho mecânico ou da eletricidade. A forma de energia apropriada para cada ciclo depende do nível de temperatura disponível e da temperatura desejável dos sistemas refrigerados e/ou condicionados. A energia solar fotovoltaica e energia solar térmica podem ser usadas em sistemas de refrigeração, de acordo com a Fig.1.

O equipamento de refrigeração por adsorção é formado por quatro componentes básicos: gerador, condensador, evaporador e adsorvedor. O ciclo por adsorção opera em regime intermitente e é caracterizado por duas fases: uma de resfriamento (adsorção) e uma de aquecimento (dessorção).

No resfriamento o adsorbato (fluido refrigerante) contido no evaporador, é evaporado parcialmente por causa da remoção de calor da vizinhança. Após ser evaporado o adsorbato flui do evaporador para o adsorvedor e é adsorvido, ou seja, fixado nas cavidades porosas do material adsorvente, devido às forças intermoleculares entre o adsorbato e o adsorvente (sólido poroso). Com a evaporação, o líquido que cedeu calor (resfriado) no evaporador pode ser usado em refrigeração e/ou condicionamento de ar.

No aquecimento um sistema térmico cede calor ao adsorvedor e promove a regeneração do leito adsorativo. O adsorbato é despreendido das cavidades porosas do adsorvente fluindo do adsorvedor para o condensador, passando para a fase líquida por transferência de calor latente ao meio condensante. Na fase líquida, o fluido retorna para o evaporador e ao final dessa fase o ciclo se reinicia. A Fig. (1) mostra o ciclo básico de refrigeração por adsorção.

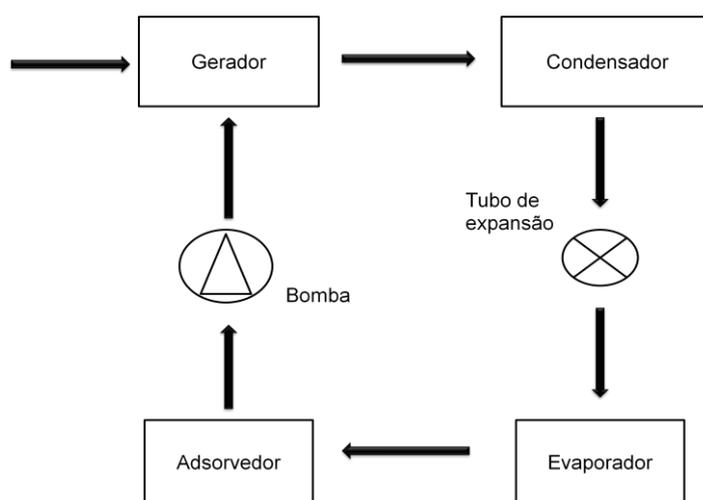


Figura 1. Ciclo básico de refrigeração por adsorção. Fonte: Próprio autor (2012).

Um dos primeiros trabalhos relatados com termossifão foi desenvolvido e patenteado por A. M. Perkins e J. Perkins, em 1831. O equipamento patenteado, intitulado tubo Perkins, era composto de um tubo hermético carregado com um fluido de trabalho, no qual acoplava termicamente uma fornalha a um tanque de água, proporcionando o aquecimento indireto da água no tanque através da circulação de água sem mudança de fase no interior do tubo, (Paiva, K.V., 2007). Segundo Dunn e Reay (1994), este aquecedor de tubos herméticos foi produzido por mais de 100 anos em escala comercial. Em 1929, F.W.Ray patenteou um dispositivo semelhante ao tubo Perkins, carregado com uma pequena quantidade de água e operando em um ciclo de mudança de fase, posicionado verticalmente e com o

evaporador abaixo do condensador. Tal dispositivo, hoje conhecido por termossifão, estabeleceu as bases para que mais tarde fosse desenvolvido o dispositivo conhecido como tubo de calor.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi dividido em determinação numérica e experimental do sistema de sifão térmico de aquecimento solar. Para a modelagem numérica foi utilizado o programa de computador FORTRAN 77, com a finalidade de determinar a vazão mássica, ou seja, a relação de volume de óleo por tempo dentro do tubo do refrigerador. No estudo experimental foi utilizado o aparelho medidor de fluxo chamado DYNAMETERS, do tipo DMTFH (*Transit Time Ultrasonic Flow Meter Handheld*).

A determinação numérica é feita considerando-se que em um circuito fechado, onde a posição inicial do circuito é a própria posição final, a força de empuxo é equilibrada pelas perdas por fricção através do circuito fechado, isto é,

$$(\Delta P)_{\text{empuxo}} = (\Delta P)_{\text{fricção}} \quad (1)$$

na qual  $(\Delta P)_{\text{Empuxo}}$  é a diferença de pressão gravitacional devido aos lados quente e frio do circuito e  $(\Delta P)_{\text{Fricção}}$  é a diferença de pressão causada pelas forças de fricção, contrárias ao escoamento.

Por se tratar de um circuito onde a movimentação do fluido é natural, sem a utilização de bombas ou outras máquinas de fluxo, o escoamento é considerado laminar. Com as expressões para o coeficiente de fricção e do número de Reynolds as perdas por fricção,  $(\Delta P)_{\text{Fricção}}$  podem ser expressas por,

$$(\Delta P)_F = \frac{128 \cdot \dot{m} \cdot \mu \cdot \Delta X_F}{\pi \cdot \rho \cdot D^4} \quad (2)$$

na qual  $\dot{m}$  é a vazão mássica de circulação,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido térmico,  $\Delta X_F$  o comprimento equivalente de percurso do fluido no trocador de calor,  $\rho$  a densidade do fluido e  $D$  é o diâmetro do tubo.

A diferença de pressão devido à ação da gravidade, isto é, às diferentes temperaturas e densidades no circuito, pode ser estimada por,

$$(\Delta P)_G = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \Delta X_g \quad (3)$$

na qual  $\rho_2$  é a densidade do óleo na entrada do coletor,  $\rho_1$  é a densidade do óleo na saída do coletor,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\Delta X_g$  é a diferença de altura entre a entrada e saída do coletor.

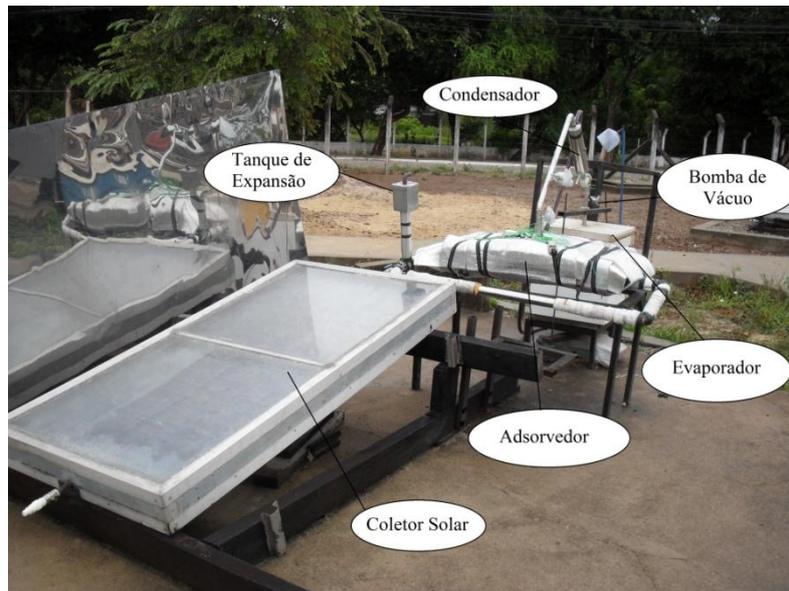
Igualando a Eq. (2) com a Eq. (3) encontra-se a expressão para a vazão mássica de circulação no circuito de termossifão, ou seja,

$$\dot{m}_0 = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \Delta X_E \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot \Delta X_F} \quad (4)$$

na qual  $\rho$  é a densidade do fluido,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\Delta X_E$  é o comprimento do desnível entre a entrada e a saída do coletor,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica média do fluido e  $\Delta X_F$  o comprimento de percurso do fluido no trocador de calor.

O refrigerador solar é composto por três partes básicas: evaporador, condensador e adsorvedor. O sistema completo está ilustrado na Fig. (2), sendo o evaporador os coletores planos, o adsorvedor a estrutura de aço inoxidável isolada e o condensador a estrutura em forma de caixa próxima ao adsorvedor.

A Fig. (3) mostra uma fotografia do sistema de fogão solar e a Fig. (4) do dessalinizador solar, ambos que operam com circuito de termossifão para a transferência de calor dos calores às painéis e à torre de dessalinização, respectivamente.



**Figura 2. Refrigerador completo.**  
Fonte: Próprio autor (2012).

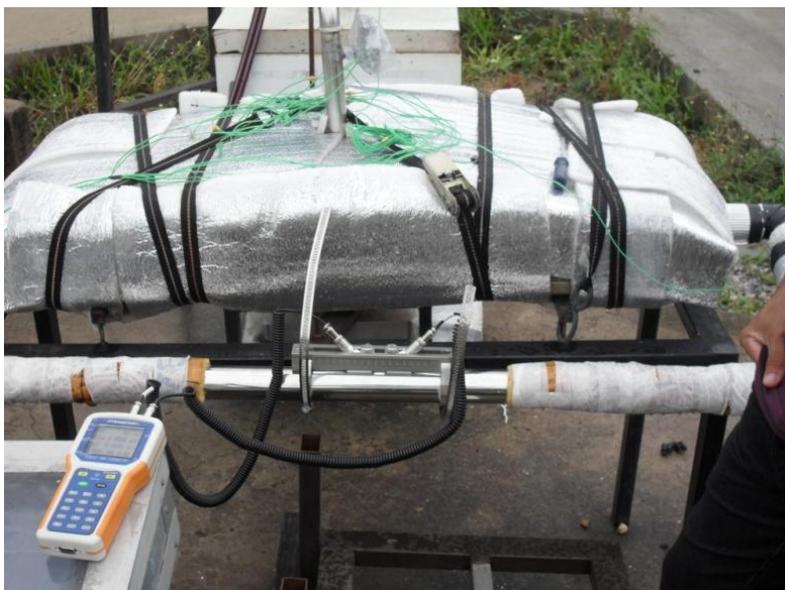


**Figura 3: Fotografia do fogão solar.**  
Fonte: Próprio autor (2012).



**Figura 4: Fotografia do dessalinizador solar.**  
Fonte: Próprio autor (2012).

A Fig. (5) mostra o medidor de fluxo instalado no refrigerador da Fig. (3), com os transdutores ligados em um tubo de maior diâmetro de aço inoxidável acrescentado ao circuito de termostato, atendendo as exigências de instalação apresentadas pelo fabricante.



**Figura 5: Tubo com o equipamento instalado.**  
Fonte: Próprio autor (2012).

O medidor de fluxo utilizado tem como princípio de funcionamento a equação 5:

$$V=K.D.\Delta t \quad (5)$$

na qual  $V$  é a velocidade de fluxo do fluido,  $K$  é uma constante,  $D$  é a distância entre os transdutores e  $\Delta t$  é o tempo de voo, ou seja, o tempo que o ultrassom passa pelos dois transdutores.

O óleo utilizado no experimento do refrigerador é sintético (*Dowtherm A*), com alta capacidade calorífica, baixa viscosidade, sendo indicado para circuitos de termostato. Ele possui uma faixa recomendável de temperatura que vai de 15°C a 400°C. As temperaturas medidas nos três sistemas apresentado nas Figs. (3), (4) e (5), alcançam valores máximos de 210°C, em função da intensidade de insolação sobre os coletores.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados para o cálculo da vazão mássica de circulação nos circuitos de termostato das Figs. (3), utilizando um programa de simulação escrito em FORTRAN para Eq. (4). No procedimento numérico, são necessárias as medições experimentais de temperatura na entrada e saída dos coletores e equipamentos (painéis, adsorvedor e torre de dessalinização) e da radiação solar global no plano inclinado dos coletores.

Nas Tabelas (1) e (2) são apresentadas os resultados numéricos obtidos pelo programa de simulação e das medições experimentais. A Tab. (1) mostra valores de vazão mássica para uma radiação global de 900 W/m<sup>2</sup>, com temperatura de entrada do coletor de 110°C e temperatura de saída do coletor de 120°C.

**Tabela 1. Valores de vazão mássica para  $G_b= 900 \text{ W/m}^2$**

Sistema	L equivalente (m)	Vazão mássica (Kg/s)
Adsorvedor	13,34	1,6781.10E-2
Fogão Solar	15,31	1,4622.10E-2
Dessalinizador	40,74	0,5495.10E-2

Foram testados três valores, onde se vê que o aumento do comprimento equivalente, ou seja, as perdas por fricção proporcionam diminuição da vazão mássica.

A Tab. (2) mostra os mesmos valores de comprimento equivalente para uma radiação global de 700 W/m<sup>2</sup>, temperatura de entrada do coletor de 100°C e temperatura de saída do coletor de 108°C.

**Tabela 2. Valores de vazão mássica para  $G_b=700 \text{ W/m}^2$** 

Sistema	L equivalente (m)	Vazão mássica (Kg/s)
Adsorvedor	13,34	1,2107.10E-2
Fogão Solar	15,31	1,0549.10E-2
Dessalinizador	40,74	3,9645.10E-3

na qual pode ser observado um comportamento semelhante aos dados da Tab.(1). Para um mesmo circuito, a vazão mássica está diretamente relacionada com a radiação global.

O valor da perda de carga no circuito do refrigerador é 13,340 m. A vazão mássica experimental para esse sistema foi de 16 g/s, o que condiz com o resultado numérico, que é de 16,781 g/s, em uma radiação global de 900 W/m<sup>2</sup>, que foi a insolação média nos experimentos.

## 5. CONCLUSÕES

O sistema de termossifão estudado tem muitas aplicações em energia solar, em especial na área de energia solar térmica.

Os resultados numéricos mostraram uma vazão mássica de 16,781 g/s no termossifão com insolação de 900 W/m<sup>2</sup> e a previsão experimental foi de 16 g/s, concluindo que a aproximação numérica é próxima dos valores experimentais, podendo ser usada com segurança.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, M.E., 2009. "Validação experimental de um refrigerador de água operando em ciclo de adsorção com aquecimento solar indireto". Dissertação de Mestrado, UFC, Brasil.
- Cunha, T.R.B., 2005. "Fogão Solar Com ou sem armazenamento temporário de calor". Prêmio Petrobrás de Tecnologia.
- Dunn, P.D., Reay, D.A., "Heat pipes". Pergamon, 4<sup>a</sup> ed, 1994.
- Dyer J.R., 1975. "The Development of Laminar Natural Convection Flow in Vertical Uniform Heat Flux Duct, Int. J. Heat Mass Transfer", Vol. 18, pp. 1455-1465.
- Incropera, F.P. e D.P. Dewitt., 2003. "Fundamentos da Transferência de Calor e Massa". 5<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos.
- Medeiros, M.R.Q., 2003. "Validação Experimental de um Refrigerador Térmico Movido a Gás Natural. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFC, Fortaleza.
- Paiva, K.V., 2007. "Comportamento térmico em gravidade e microgravidade de mini tubos de calor do tipo fio-placa". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- UFSC, Florianópolis.
- Pridasawas, W., Lundqvist, P., 2003. "Techinal options for a solar-drivencooling sytem". Proceeding of the International Solar Energy Congress. Gothenurg, 2003.
- Schwarzer, K. Vieira, M.E., R.N.P.Teixeira, 1997. "Eficiência Térmica de um Sistema de Fogão Solar com Armazenamento de Calor", COBEM.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

# NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF A CIRCUIT OF HEAT SIPHON OF SOLAR HEATING

Isaias Silva da Costa, [isaiasmundya@gmail.com](mailto:isaiasmundya@gmail.com)<sup>1</sup>

Maria Elieneide Araújo, [eli@sol.les.ufc.br](mailto:eli@sol.les.ufc.br)<sup>2</sup>

Maria Eugênia Vieira da Silva, [eugenia@sol.les.ufc.br](mailto:eugenia@sol.les.ufc.br)<sup>2</sup>

Oswaldo Assunção Mendonça, [osvaldotavares9@gmail.com](mailto:osvaldotavares9@gmail.com)<sup>1</sup>

Francisco Nascelio Pinheiro, [nascelio@hotmail.com](mailto:nascelio@hotmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFC (Universidade Federal do Ceará)- Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>2</sup>UFC (Universidade Federal do Ceará)- LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural)

***Abstract:** This work has as objective the numeric and experimental determination of the mass flow rate of circulation and of the efficiency heat of a thermosiphon solar circuit for heating of a refrigeration system by absorption. Two considerations have been done at the numeric determination of the mass flow rate of circulation on the circuit. At the first, the outflow was laminar because of the flows of heat by solar radiation responsible for the movement of the fluid on the circuit. At the second, the pressure resultant of the difference between the densities of the hot and the cold sides of the circuit was equilibrated by the loss of pressure by friction on the outflow of work's fluid at the circuit. At the experimental determination, the circuit has copper tubing isolated with gutters with the thickness of 2 cm. The fluid used was a synthetic thermal oil with heating capacity up to 400°C. The absorber was made by stainless steel and instaled over the flat solar collector. The experimental measurements included the values of the temperature in various positions of the circuit, of the global solar radiation on inclined plane of the collector and of the mass flow rate of circulation. An external sensor that operates with sound waves was selected for not to interfere with the pressure loss in the circuit, and consequently with the mass flow that will be measured. The results show that for radiation fluxes of 800 W/m<sup>2</sup>, the mass flow reaches values around 16 g/s.*

***Keywords:** Solar refrigerator, thermosiphon, flow mass*