



## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

Herbert Melo Vieira<sup>1</sup>, Joselma Araújo de Amorim<sup>2</sup>, Márcio Gomes da Silva<sup>3</sup>, José Mauricio A. M. Gurgel<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba - UFPB. e-mail: herbert\_melo@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba - UFPB. e-mail: joselmaaraujo@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB. e-mail: mgcefet@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal da Paraíba - UFPB. e-mail: jm.gurgel@uol.com.br

**Resumo:** Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos através da simulação numérica de um sistema de refrigeração por adsorção e uma análise exergética do sistema que é composto por um chiller adsorativo, sendo aquecido/resfriado por água quente/fria, um reservatório térmico um condensador e um evaporador. Foi desenvolvida uma metodologia computacional para avaliar a influência dos principais parâmetros de operação do sistema sobre a capacidade de resfriamento e o coeficiente de performance (COP). Os modelos matemáticos foram solucionados utilizando o programa Engineering Equation Solver (EES) para análise exergética e o Fortran PowerStation 4.0 para as equações que mapeiam o fenômeno adsorativo/dessorativo, que ocorre no interior do chiller. O modelo foi validado através da comparação com os dados experimentais de um sistema de refrigeração por adsorção que utiliza um chiller adsorativo. Um condensador e um evaporador estão acoplados ao chiller, onde o adsorbato (água) que está adsorvido no adsorvente (sílica-gel) é condensada e transferida para o evaporador. Quando o leito poroso atingir a temperatura máxima, faz-se passar água fria sobre o mesmo, promovendo o rápido resfriamento e conseqüentemente a adsorção do adsorbato que se encontra no evaporador, produzindo desta forma o efeito frigorífico. Os resultados obtidos mostram que a temperatura do fluido térmico que fornece energia para o leito poroso é fundamental para o bom desempenho do sistema. Para a análise exergética foi calculada a exergia total dos fluidos de trabalho, obtendo o coeficiente de performance pela primeira lei e segunda lei da termodinâmica.

**Palavras – chave:** adsorção, chiller, exergia, refrigeração

### 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos através da simulação matemática de um sistema de adsorção que utiliza um chiller adsorativo e uma análise exergética do mesmo. A energia é uma propriedade de um sistema, onde a mesma não pode ser destruída, tendo a cada transformação uma parte perdida, assim, pode-se descrever que a energia é a soma da parcela de tudo aquilo que pode ser aproveitado exergia, mais a parcela que não pode ser utilizada chamada de anergia, desta forma a exergia é aparte da energia que pode ser transformada em calor ou trabalho. Os chiller adsorativos que apresentam um bom desempenho são mais caros, pesados e ocupam mais espaço quando comparados aos de absorção (HENNING, 2005), estes chillers trabalham sob condições específicas de operação, com uma temperatura para regeneração do leito adsorativo de aproximadamente 80°C, estes sistemas apresentam um COP de aproximadamente 0,60. A validação do código computacional desenvolvido foi obtida através da comparação com resultados experimentais. Em 2005 um chiller adsorativo foi testado experimentalmente, onde foi verificado que as condições de temperaturas, taxas de fluxos e tempo de ciclo são dependentes, para um bom desempenho do sistema, (Chang, 2007).

### 2. MATERIAL E MÉTODOS

Descrevendo resumidamente, o processo de refrigeração por adsorção utilizando um chiller adsorativo de simples efeito, tem-se que: O sistema é composto por um boiler (reservatório térmico), que tem como finalidade armazenar água quente usada para regeneração do leito adsorativo, sendo, esta água aquecida através de resistências elétricas que encontram-se dentro do boiler, mantendo desta forma, o fluido térmico (água) na temperatura constante desejada. O chiller adsorativo é composto por

tubos aletados, que contribui para uma maior área de troca de calor entre o fluido térmico e o adsorvente, um condensador e um evaporador estão acoplados ao chiller, onde, o adsorbato (água) que estar adsorvido no adsorvente (sílica-gel) é condensado e transferido para o evaporador, quando o leito poroso atingir a temperatura máxima, faz-se passar água fria sobre o mesmo, promovendo o rápido resfriamento e conseqüentemente a adsorção do adsorbato que se encontra no evaporador, produzindo o efeito frigorífico desejado, na Figura 1 é mostrado um esquema simplificado do funcionamento do sistema. Resultados experimentais utilizando tubos de calor em chiller adsortivos tem mostrado que são muito eficientes em sistemas de refrigeração por adsorção (Wang, 2008). A análise do ciclo, foi considerado estando em regime permanente e as equações de balanço (Eq. 1) de massa e de energia (Eq. 2) serão aplicadas para cada componente do sistema conforme apresentado na Figura 1.

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \sum_e \dot{m} - \sum_s \dot{m} \quad (1) \quad \frac{d\dot{E}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} h_e - \sum_s \dot{m} h_s \quad (2)$$

Para a análise energética do sistema, chiller adsortivo, reservatórios térmicos, condensador e evaporador, foram aplicadas as equações de balanço de massa e energia, sendo considerada as hipóteses simplificadoras para o desenvolvimento da modelagem do sistema. As trocas de calor com a vizinhança são desprezíveis; as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis; O processo total ocorre em regime permanente; Os coeficientes globais de transferência de calor são considerados constantes ao longo do processo.

O estudo da exergia tem seu fundamento da quantidade útil da energia utilizada nos processos térmicos (Moran M. J., e Shapiro H. N., 2006, Kotas T. J., 1995), sendo esta exergia dividida comumente em quatro partes, física, química, cinética e potencial. Para análise exergética do sistema foi considerada a exergia física ( $ex_f$ ), onde a mesma representa o máximo trabalho possível quando um sistema sai do seu estado original e alcança o equilíbrio com o ambiente, geralmente uma atmosfera padrão (estado morto  $T_0, p_0$ ). (Moran M. J., e Shapiro H. N., 2006, Kotas T. J., 1995). Para a análise dos componentes do sistema foram determinadas as exergias dos fluxos nos diferentes estados do ciclo (Eq. 3).

$$ex_f = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (3)$$

Pode-se definir o COP exergético do sistema através da Equação 4:

$$COP_{ex} = \frac{\Delta ex_{evaporador}}{\Delta ex_{gerador}} \quad (4)$$

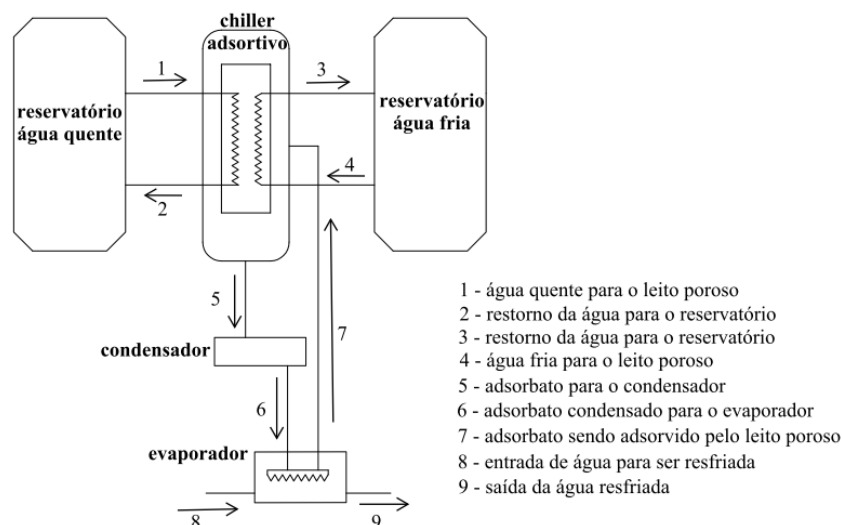


Figura 1 - Esquema do sistema de resfriamento de água utilizando um chiller adsortivo



### 3. MODELO MATEMÁTICO

A simulação matemática apresentada neste trabalho foi construída, partindo-se da equação de Dubinin-Astakhov, que propõe uma relação entre concentração do adsorbato adsorvido no adsorvente, temperatura do leito poroso e a pressão do sorbato, onde tendo as condições iniciais conhecidas como temperatura máxima e mínima do fluido térmico, massa de adsorvente, e pressão inicial do leito poroso, é possível obter as pressões, temperatura e concentrações em função do tempo no leito poroso o método de diferenças finitas foi utilizado para discretizações das equações utilizadas, também foram feitas algumas considerações sendo apresentadas: Os processos de adsorção e dessorção são considerados quase estáticos; A pressão é uniforme em qualquer ponto do leito adsorvivo para cada instante de tempo, variando entre a pressão inicial e a pressão de condensação do adsorbato, o que corresponde a desprezar as resistências internas a difusão de massa no leito poroso; A distribuição de temperatura no adsorvente é considerada uniforme a cada instante de tempo; O leito adsorvivo, em presença de vapor do adsorbato, é tratado como um sólido contínuo e homogêneo. Uma simulação relativa à modelação matemática de todo o sistema frigorífico, foram testadas e confrontadas com resultados experimentais, obtidos em diversos trabalhos (Guilleninot *et al*, 1987) e (Gurgel e Klüppel, 1992), demonstrando excelente aproximação. A concentração do adsorbato no leito poroso é obtida através da equação 5 de Dubini - Astakovic.

$$X = W_0 \cdot \rho_{(T)} \cdot \exp \left[ -k \cdot \left( R \cdot T_{leito} \cdot \ln \left( \frac{P_s}{P_{leito}} \right) \right)^n \right] \quad (5)$$

Energia térmica armazenada no Boiler:

$$Q_H = m_{boiler} \cdot c_{p,água} \cdot (T_{final} - T_{inicial}) \quad (6)$$

#### 3.1. CHILLER ADSORTIVO

Por se tratar de um equipamento composto por um grande número de dutos com o adsorvente compactado entre eles, foi considerado como sendo uma placa em contato com o leito poroso correspondente a mesma área da soma dos dutos. Para simplificação do problema as perdas de energia no chiller adsorvivo foram desprezadas.

Para os dutos temos: 
$$M_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_{ft} \cdot A_p \cdot (T_{ft} - T_p) - h_{con} \cdot A_p \cdot (T_p - T_L) \quad (7)$$

Para o leito poroso temos: 
$$M_L \cdot C_p \cdot \frac{\partial T_L}{\partial t} = Q_s + h_{con} \cdot A_p \cdot (T_p - T_L) \quad (8)$$

Sendo: 
$$M_L \cdot C_{pL} = M_{ad} \cdot C_{pad} + M_{adsorv} \cdot C_{adsorv} \quad (9)$$

O calor de sorção e dada pela equação: 
$$Q_s = M_{adsorv} \cdot h_s \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (10)$$

Pela equação de Clausius - Clapeyron, (Ruthven,1984): 
$$h_s = -R \cdot T_L^2 \cdot \left( \frac{\ln \partial P_s}{\partial T_L} \right) \quad (11)$$

Cálculo da exergia:

Durante o processo de resfriamento (Eq.12,13,14) e aquecimento (Eq.15,16,17) do leito poroso.

$$Ex_3 = (h_3 - h_0) - T_0(S_3 - S_0) \quad (12)$$

$$Ex_1 = (h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0) \quad (15)$$

$$Ex_4 = (h_4 - h_0) - T_0(S_4 - S_0) \quad (13)$$

$$Ex_2 = (h_2 - h_0) - T_0(S_2 - S_0) \quad (16)$$

$$Ex_7 = (h_7 - h_0) - T_0(S_7 - S_0) \quad (14)$$

$$Ex_5 = (h_5 - h_0) - T_0(S_5 - S_0) \quad (17)$$

Irreversibilidade:

$$I_{total} = T_0 [(\dot{m}_2 S_2 + \dot{m}_5 S_5 - \dot{m}_1 S_1) + (\dot{m}_4 S_4 - (\dot{m}_3 S_3 - \dot{m}_7 S_7))] \quad (18)$$

### 3.2. CONDENSADOR

A temperatura da água de resfriamento no condensador é considerada constante, na simulação, foi realizada considerando-se várias especificações, onde a variação do coeficiente de transferência convectiva de calor determina a eficiência do resfriamento.

$$M_{cond.} \cdot c_{pcond.} \cdot \frac{\partial T_{cond.}}{\partial t} = \frac{\partial m_{cond.}}{\partial t} \cdot L_{VL} + h_{conv.cond.} \cdot A_{cond.água} \cdot (T_{água} - T_{cond.}) \quad (19)$$

Cálculo da exergia:  $Ex_6 = (h_6 - h_0) - T_0(S_6 - S_0)$  (20)

Irreversibilidade:  $I_{cond.} = T_0 \left[ (\dot{m}_6 S_6 - \dot{m}_5 S_5 - \frac{Q_{cond.}}{T_{cond.}}) \right]$  (21)

Calor dissipado para a água no condensador:  $Q_{cond.} = U_2 - U_1 + \dot{m}_5(h_6 - h_5)$  (22)

### 3.3. EVAPORADOR

No evaporador são realizados dois balanços de energia, um para o adsorbato que está no evaporador e o outro balanço para o fluido que se deseja resfriar, no caso deste trabalho será água, sendo desprezada a massa metálica do evaporador.

Desta forma temos:  $M_{adsorb.} \cdot c_{padsorb.} \cdot \frac{\partial T_{adsorbato}}{\partial t} = \frac{\partial m_{adsorb.}}{\partial t} \cdot L_{LV} + U_{adsorb.água} \cdot A_{adsorb.água} \cdot (T_{água} - T_{adsorb.}) + U_{adsorb.amb} \cdot A_{adsorb.amb} \cdot (T_{amb} - T_{adsorb.})$  (23)

Para o fluido a ser resfriado:  $M_{água.} \cdot c_{págua.} \cdot \frac{\partial T_{água}}{\partial t} = U_{adsorb.água} \cdot A_{adsorb.água} \cdot (T_{adsorb.} - T_{água.}) + U_{água.amb} \cdot A_{água.amb} \cdot (T_{amb} - T_{água.})$  (24)

Cálculo da exergia:

$Ex_7 = (h_7 - h_0) - T_0(S_7 - S_0)$  (25)  $Ex_8 = (h_8 - h_0) - T_0(S_8 - S_0)$  (26)  $Ex_9 = (h_9 - h_0) - T_0(S_9 - S_0)$  (27)

Irreversibilidade:  $I_{evaporador} = T_0[(\dot{m}_9 S_9 - \dot{m}_7 S_7) - (\dot{m}_6 S_6 - \dot{m}_8 S_8)]$  (28)

Energia retirada do fluido a ser resfriado para evaporar o adsorbato:

Massa de água evaporada:

$$X = \frac{m_{adsorbato}}{m_{adsorvente}} \quad (29) \quad M_{evaporada} = (X_{máx.} - X_{min.}) \cdot m_{adsorvente} \quad (30)$$

Energia retirada do fluido a ser resfriado para evaporar o adsorbato:

$$Q_{resf} = M_{evaporada} \cdot L_{VL} \quad (31)$$

Cálculo do coeficiente de desempenho (COP) do sistema de refrigeração pela primeira e segunda lei.

$$COP_{1ª lei} = \frac{Q_{resf}}{Q_H} = \frac{(h_8 - h_9) \cdot \dot{m}_1}{(h_1 - h_2) \cdot \dot{m}_9} \quad (32) \quad COP_{2ª lei} = \frac{(ex_8 - ex_9) \cdot \dot{m}_1}{(ex_1 - ex_2) \cdot \dot{m}_9} \quad (33)$$

### 3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O programa foi validado através da simulação de resultados obtidos experimentalmente por “Y. L. Liu *et al.* (2005)”, sendo testado um sistema de refrigeração por adsorção para resfriar água, neste trabalho foi utilizado o par sílica gel/água, em quantidade de 26,4 kg de sílica gel em cada leito poroso, temperatura do fluido térmico para regeneração do leito variando de 70 a 85 °C, e uma área de troca térmica de 34,05 m<sup>2</sup> os resultados obtidos demonstraram que o sistema apresentou uma capacidade de refrigeração de 2 a 7,3 kW, variando de acordo com a temperatura do fluido térmico, e um COP de 0,2 a 0,42, os dados utilizados para simulação foram: Temperatura do fluido térmico 80°C, massa de sílica gel 26,4 kg, e área igual a do experimento, como pode ser verificado na Figura 2, é possível observar que os resultados simulado e experimental foram bastante similares, mostrando que o programa desenvolvido representa com bastante aproximação um sistema de refrigeração por adsorção.

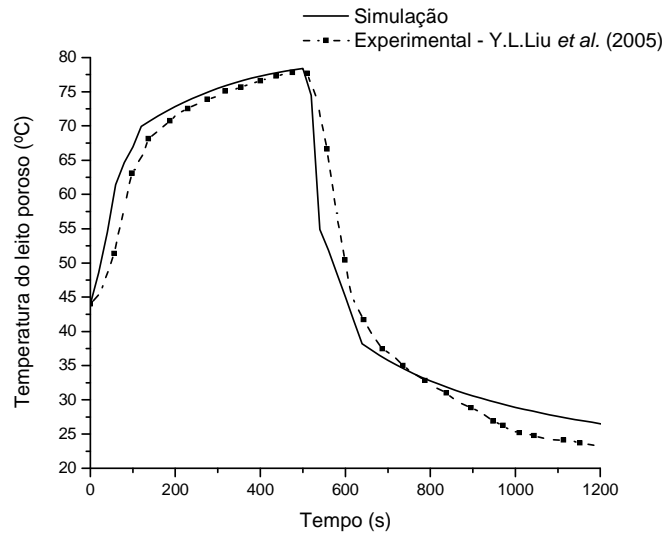


Figura 2 - Comparação entre os resultados simulados e experimentais

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar a influência da temperatura do fluido térmico que fornece calor para o leito poroso, foram simulados varias temperaturas no reator adsorbtivo, e verificou-se que quanto maior a temperatura do fluido térmico menor a concentração de adsorbato no leito poroso quanto o mesmo atinge a temperatura máxima, conforme apresentado na Figura 3 podemos observar que quando o fluido térmico entra no leito a 90 °C a concentração mínima de adsorbato é de aproximadamente 0,04 kg de água/kg de sílica gel, quando o fluido térmico está a 60 °C a concentração mínima atingida é de aproximadamente 0,12 kg de adsorbato/kg de sílica gel, observa-se também que maiores temperaturas contribuem significativamente para redução do tempo de dessorção do leito poroso, assim quanto maiores temperaturas do fluido térmico maior quantidade de adsorbato no evaporador, possibilitando uma maior capacidade de refrigeração. As vazões utilizadas na simulação nos pontos 1, 2, 5, 6, foram de 0,03 kg/s e nos pontos 3 e 7 as vazões foram obtidas conforme equação abaixo:

$$vazão_{3 e 7} = (X_{max} - X_{min}) \cdot M_{silica} / tempo$$

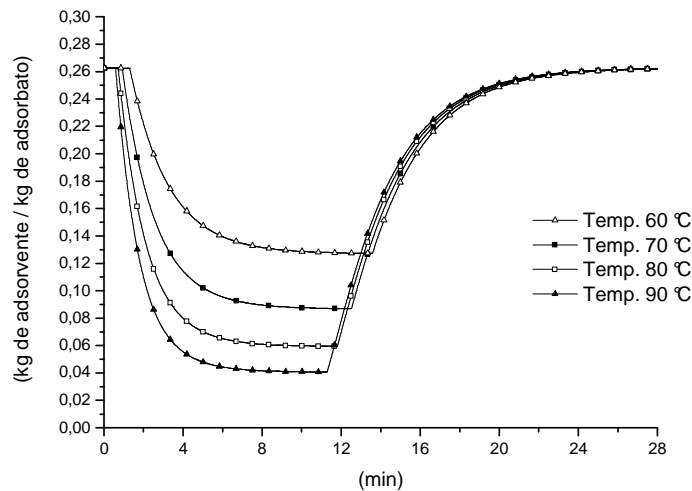


Figura 3 – Concentração de adsorbato no leito poroso

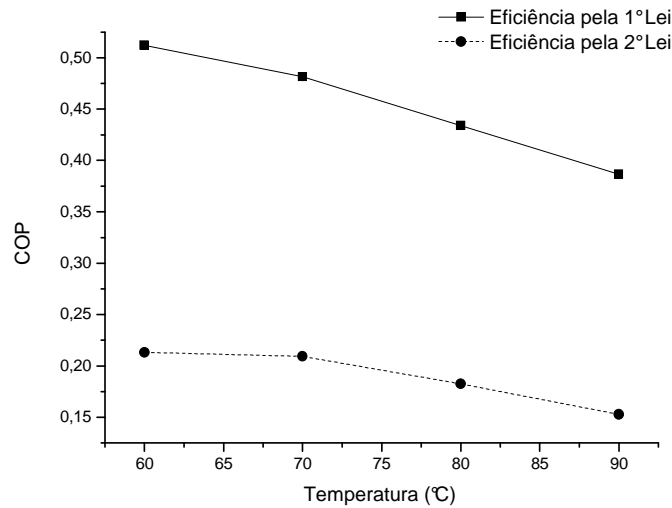


Figura 4 - COP do sistema de refrigeração pela 1º e 2º lei

Na Figura 4 é apresentada a variação do COP pela primeira e segunda lei em função da temperatura de regeneração do leito poroso, deste modo verificou-se que com o aumento da temperatura o COP do sistema tende a diminuir, mostrando que o desempenho do sistema é dependente da temperatura de regeneração do leito. Na Figura 5 são apresentadas as irreversibilidades dos componentes: leito poroso, condensador e evaporador, verifica-se que com o aumento da temperatura de regeneração as irreversibilidades também aumentam para todos os componentes analisados, ficando claro que no condensador a uma maior irreversibilidade, indicando que este componente tem maior desperdício de energia em comparação ao evaporador e leito poroso.

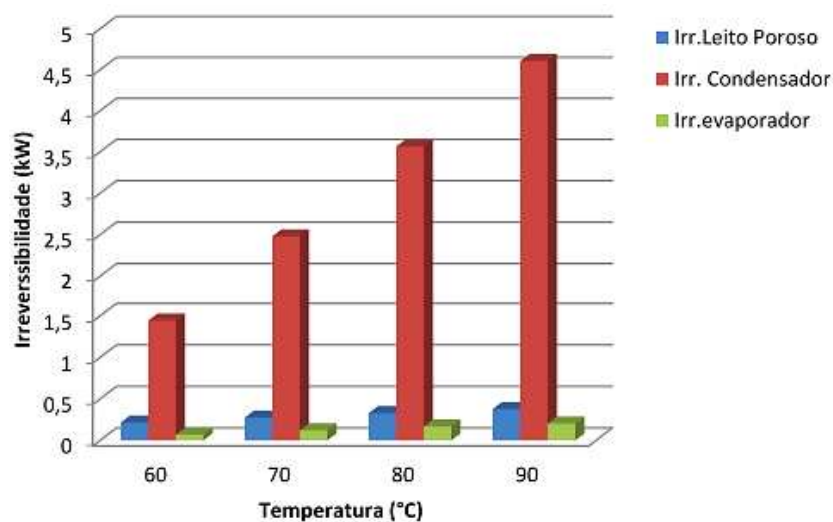


Figura 5 - Irreversibilidade no leito poroso, condensador e evaporador do sistema



## 5. CONCLUSÕES

Através da observação dos dados plotados pela simulação, pode-se concluir que o desempenho do sistema é bastante dependente das condições de funcionamento, como as temperaturas do fluido térmico. Neste trabalho foram apresentados os resultados da simulação de um sistema de refrigeração que utiliza um chiller adsorptivo, os resultados mostraram que, quando fixa-se a vazão e varia a temperatura de entrada do fluido térmico no chiller, a concentração de adsorbato no leito poroso tende a ser menor à medida que aumenta-se esta temperatura, contribuindo desta forma, para uma maior massa de adsorbato no sistema. O COP do sistema de refrigeração diminui à medida que a temperatura do fluido térmico aumenta, onde, o COP obtido pela segunda lei foi sempre menor do que calculado pela primeira lei, verificando deste modo o real coeficiente de performance do sistema. O condensador é o dispositivo que apresenta maior desperdício de energia, pois nele se encontram as maiores irreversibilidade, em comparação aos outros dois dispositivos. De acordo com os resultados da simulação o sistema operando a uma temperatura do fluido térmico a 90 °C, temperatura de condensação de 28 °C, temperatura no evaporador de 10 °C, temperatura da água para resfriamento do leito de 28 °C e utilizando uma massa de adsorvente de 30 kg, no leito poroso foi possível obter uma potência frigorífica acima de 5 kW, deste modo pela análise feita podemos concluir que a real eficiência do sistema ainda é muito baixo quando é feita uma análise pela segunda lei e o principal ponto que contribui para baixa eficiência seria a energia que é perdida no condensador.

## REFERÊNCIAS

- Chang, W.S.; Wang C.C.; Shieh C.C. **Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed.** Applied Thermal Engineering, V.27, p. 2195-2199, 2007.
- Gurgel J. M. e Klüppel, R. P., 1992, **Simulação Numérica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção**, anais do IV ENCIT, Rio de Janeiro.
- Guilleminot, J.J., Meunier, F. and Pakleza, 1987, **J. Heat and Mass transfer in a nonisothermal fixed bed solid adsorbent reactor: a uniform pressure/non-uniform temperature case**, Int. J. of Heat Mass Transfer, V. 30, N. 8, p. 1595-1606.
- HENNING, H-M. **Solar Assisted Air Conditioning of Buildings – An Overview.** Proceedings Heat SET 2005 – Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies. França, 2005.
- Ruthven, D. M., 1984, **Principles of adsorption and adsorption processes**, Wiley Interscience, New York, 1984.
- Wang R.Z. **Efficient adsorption refrigerators integrated with heat pipes.** Applied Thermal Engineering, V.28, p. 317-326, 2008.
- Y.L.Liu, R.Z. Wang, Z.Z. Xia. **Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design.** Int. J. Refrig. 28 (2005) 218 - 230.
- Kotas, T.J., **The exergy method of thermal plant analysis**, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1995

## NOMENCLATURAS

$A_{cond.água}$  - Área entre o condensador e a água ( $m^2$ );

$c_{p.adsorb.}$  - Calor específico do adsorbato (J/kg);

$c_{p.cond.}$  - Calor específico do condensador (J/kg);

$E_x$  - Exergia (kW);

$h$  - Entalpia (kJ/kg);

$h_0$  - Entalpia do fluido no estado morto (kJ/Kg);

$h_{conv.cond}$  - Coeficiente de convecção no condensador ( $W/m^2 \cdot K$ );

$I$  - Irreversibilidades (kW);

$L_{vap.}$  - Calor latente de vaporização da água;

$L_{VL}$  - Calor latente de condensação do adsorbato (J/kg);

$L_{LV}$  - Calor latente de vaporização do adsorbato (kJ/kg);

$M_{sílica}$  - Massa de sílica gel (kg);

$m_{adsorbato}$  - Massa de adsorbato condensada;

$M_{evaporada}$  - massa de água evaporada (kg);

$M_{adsorb.}$  - Massa do adsorbato no evaporador (kg);

$M_{cond.}$  - Massa do condensador (kg);

$M_{boiler}$  - Massa de água armazenado no boiler;

$\dot{m}$  - vazão mássica do fluido térmico (kg/s);

$n$  - Constante da equação de Dubinin - Astakhov que depende do adsorvente utilizado (para a sílica gel  $n = 1$ );

$P_{leito}$  - Pressão no leito poroso (kPa);

$P_s$  - Pressão de saturação do adsorbato (kPa);

$Q_{ref}$  - Energia de resfriamento do sistema para resfriar água (kJ);

$Q_H$  - Energia para aquecimento do sistema no Boiler (kJ);

$R$  - Constante universal para vapor de água (0,462 kJ/kg . K);

$S$  - Entropia do fluido térmico (kJ/kg.K);

$S_0$  - Entropia do fluido no estado morto (kJ/kg.K);

$T_{água}$  - Temperatura da água de resfriamento (K);

$T_{final}$  - Temperatura final da água no boiler;

$T_{inic.água}$  - Temperatura inicial da água a ser resfriada ( $^{\circ}C$ );

$T_{fin.água}$  - Temperatura final da água a ser resfriada;

$T_{adsorb.}$  - Temperatura do adsorbato ( $^{\circ}C$ );

Tempo - correspondente ao ciclo adsorativo/dessorativo;

$T_{leito}$  - Temperatura do leito poroso ( $^{\circ}C$ );

$U$  - Energia interna específica (kJ/kg);

$U_{adsorb.amb}$  - Coeficiente de perdas do adsorbato para o ambiente ( $W/m^2 \cdot K$ );

$W_0$  - Constante da equação de Dubinin - Astakhov;

$X_{max}$  - Concentração máxima de adsorbato no leito poroso;

$X_{min}$  - Concentração mínima de adsorbato no leito poroso;

$\frac{\partial m_{adsorb.}}{\partial t}$  - Variação da massa do adsorbato no evaporador (kg/s);