



## **CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE UM RESFRIADOR DE ÁGUA POR ADSORÇÃO**

### **Renato Miguel de Moraes Lisboa**

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Laboratório de Energia Solar/Laboratório de Adsorção e Meios Porosos  
[rlisboa@les.ufpb.br](mailto:rlisboa@les.ufpb.br)

### **José Espínola Júnior**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Sergipe  
Unidade de Ensino Descentralizada de Lagarto  
Coordenação de Indústria  
Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Laboratório de Energia Solar/Laboratório de Adsorção e Meios Porosos  
[espinola@les.ufpb.br](mailto:espinola@les.ufpb.br)

### **José Maurício Gurgel**

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Tecnologia Mecânica  
Laboratório de Energia Solar/Laboratório de Adsorção e Meios Porosos  
[Gurgel@les.ufpb.br](mailto:Gurgel@les.ufpb.br)

**Resumo.** *O presente trabalho mostra a caracterização térmica de um sistema de resfriamento de água por adsorção com regeneração através da queima de gás natural. O objetivo é usar a água gelada para suprir sistema de ar condicionado. O sistema utiliza o princípio da adsorção, através do par frigorígeno sílica gel/água, para a produção de água gelada. Todos os processos termodinâmicos são modelados matematicamente com o intuito de permitir uma simulação numérica computacional do funcionamento do sistema. Para isto, são resolvidas as equações da difusão de calor no interior do leito poroso acoplada ao termo de geração de calor (sorção) relativo ao transporte de massa. Métodos iterativos serão usados para a solução em diferenças finitas.*

**Palavras-chave:** Adsorção, Leito poroso, Resfriador de líquidos, condicionamento de ar.

### **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas ocorridas no planeta, nos últimos anos, ocasionaram a diminuição nos índices pluviométricos em grande parte das regiões, nas quais se encontra dividido o nosso

país. Tais mudanças provocaram a queda no nível de água nas bacias hidrográficas e geraram um colapso no nosso sistema energético. Essas alterações têm causas ambientais e entre elas destacam-se os desmatamentos, a destruição das nascentes dos rios e das matas ciliares, a impermeabilização do solo, a retirada de cobertura vegetal e orgânica, as quais provocam o assoreamento dos rios. Contribui ainda para o esgotamento dos recursos hídricos o crescente uso da água na agricultura intensiva, na indústria e mesmo em termoelétricas, além da emissão crescente de poluentes que afetam a camada de ozônio e provocam o efeito estufa. Como o Brasil é um país extremamente dependente da energia hidroelétrica (92% - Aneel), surgiu a necessidade da diminuição no consumo de energia elétrica (acionamento). Diante disso, viu-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas que abreviassem o consumo de energia elétrica, o que afetou principalmente os sistemas de condicionamento de ar e refrigeração (grandes consumidores de energia).

Os sistemas de condicionamento de ar são responsáveis por grande parte do consumo de energia nas áreas residenciais e industriais. Além deste fato, as restrições ambientais crescem no intuito de não permitir a utilização dos CFC's (Protocolo de Montreal), comum em sistemas de compressão de vapor. Uma alternativa a isto são os sistemas adsortivos.

Os sistemas adsortivos apresentam a vantagem de serem ecologicamente corretos em conjunto com o fato de permitirem a utilização de diversos suprimentos energéticos. Dentre eles, podemos citar o uso do gás natural, cujo consumo vem sendo enormemente incentivado pelo governo federal. Desta forma, um sistema adsortivo de condicionamento de ar que se adapta bem a essas exigências são os que utilizam resfriadores de líquidos.

Os resfriadores de líquidos à adsorção representam uma possibilidade nova em condicionamento de ar (Becker (1997), Chua et al. (2001a, 2001b), Saha et al. (2001)). A principal aplicação dos resfriadores de líquidos é na produção de água gelada, cuja a demanda para condicionamento de ar ou processos resfriamento é aparentemente elevado em uma enormidade de setores. Dentre estes, pode-se citar: Escritórios; hospitais, hotéis, indústria alimentícia, indústria química, etc.

## 2. DESCRIÇÃO DE UM CICLO ADSORTIVO DE RESFRIAMENTO

Um sistema deste tipo tem seu funcionamento baseado na operação de três trocadores interligados, os quais são: Reator, condensador e evaporador.

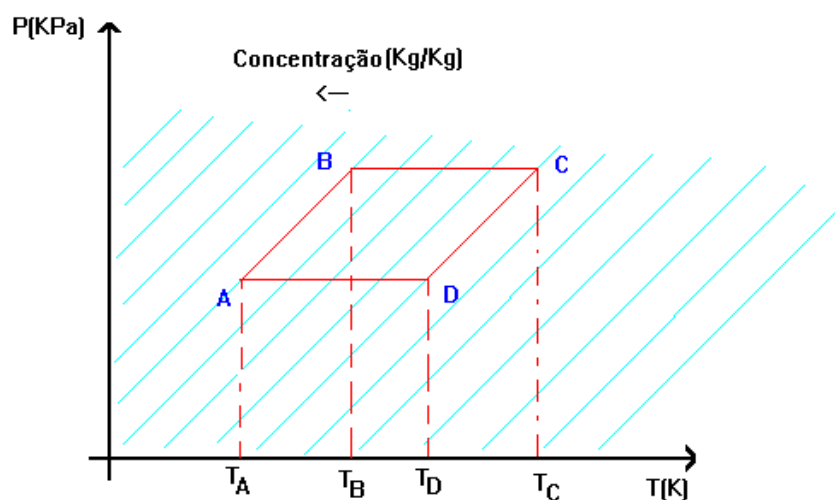


Figura 1. Diagrama de isóteras para um par frigorígeno qualquer mostrando um ciclo de refrigeração a adsorção sólida.

Considerando a figura 1, a partir da energia térmica fornecida por queimadores supridos por gás natural, a temperatura do leito adsorativo se eleva (AB) no reator até que a pressão do reator atinja a pressão de vapor saturante correspondente à temperatura do condensador, então a dessorção (do reator) e a condensação têm início (BC), liberando calor para o ambiente com isso o incremento de energia fornecida servirá para que o adsorvato seja dessorvido, estando assim livre para fluir ao condensador. Este processo ocorre até que o adsorvente atinja sua temperatura máxima (que depende da fonte térmica), o que corresponde ao valor de concentração mínima atingida pelo adsorvato no leito poroso. A temperatura do leito adsorvente diminui (CD), a pressão no reator decresce até que se iguale a pressão do vapor saturante correspondente à temperatura do evaporador. Nesse instante, inicia-se a evaporação do adsorvato (DA), ocorrendo então a produção do efeito frigorífico no evaporador e a adsorção do fluido vaporizado com a liberação de calor para o ambiente, cessando esta quando o leito poroso atinge sua temperatura mínima, que corresponde ao ponto de concentração máxima de adsorvato no adsorvente.

### **3. DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO**

Um sistema deste tipo opera em ciclos alternados de adsorção e dessorção, operando cada reator de forma intermitente, ou seja, quando um reator está sendo resfriado o outro está sendo aquecido, de maneira que o sistema está sempre produzindo o efeito frigorífico.

O ciclo frigorífico no equipamento mostrado na figura 2, o qual é formado por dois reatores em paralelo, tem início com o aquecimento da água que se encontra no reservatório (1), com a utilização de queimadores supridos por gás natural. Desta forma, a água aquecida é então bombeada ao primeiro reator (2), que irá se aquecer iniciando assim o processo de dessorção, onde o adsorvente (Silica-Gel) começa a liberar o adsorvato (Vapor de Água) que inicialmente encontrava-se retido em sua estrutura microporosa. O adsorvato dessorvido, passa então ao condensador (3), de onde sairá na forma líquida, a qual será armazenada no reservatório de líquido (4). Quando o leito poroso atingir sua temperatura máxima, ele terá atingido o menor índice de concentração de adsorvato, então fecha-se a válvula que dá passagem ao fluido do reator para o condensador e concomitantemente interrompe-se o fluxo de água quente para o reator, a fim de que este possa ser resfriado através de água proveniente do condensador, o qual utilizará um sistema de resfriamento contra-fluxo adequado a uma torre de resfriamento. Terminada a etapa de condensação, o líquido armazenado no reservatório (4) é então transferido ao evaporador (5), até que findada a etapa a válvula de passagem é fechada, neste instante o segundo reator passa a ser aquecido iniciando-se o mesmo processo já descrito anteriormente. Posteriormente, abre-se a válvula que liga o primeiro reator ao evaporador e inicia-se o processo de adsorção do vapor d'água, o que provoca o efeito frigorífico no interior do evaporador. Ao final do processo de adsorção no primeiro reator, este começa a ser novamente aquecido e o segundo reator é então resfriado, repetindo todos os passos citados para o primeiro reator.

### **4. MODELAGEM MATEMÁTICA**

Na elaboração deste modelo são consideradas algumas hipóteses, que introduzem certas simplificações que tornam possível a simulação, as quais são respaldadas em dados experimentais obtidos por Guillemot et al. op. Cit., não indo de encontro aos conceitos termodinâmicos empregados. Diante disto, tem-se:

- Os processos de adsorção e dessorção são considerados quase - estáticos.
- A pressão é uniforme em qualquer ponto do leito adsorativo para cada instante de tempo, variando entre a pressão inicial e a pressão de condensação do adsorvato, o que corresponde a

desprezar as resistências internas a difusão de massa no leito poroso. O modelo de adsorção adotado no presente trabalho despreza a resistência à transferência de massa no interior do adsorvente, considerando o equilíbrio instantâneo entre as fases adsorvidas e gasosas, baseado em Dubinin e Erashko (1975), no modelo de difusão cristalina de Sakoda e Suzuki (1984) e nas experiências relatadas em Kariogas e Meunier (1986). Além do mais, a queda de pressão no mesmo deve ser ignorada (Guilleminot et al, op. cit.).

- A distribuição de temperatura no adsorvente é considerada uniforme a cada instante de tempo.
- O leito adsortivo, em presença de vapor do adsorvato, é tratado como um sólido contínuo e homogêneo.
- A distribuição de temperatura no interior do leito é uniforme, devido à pequena espessura do leito (Leite op. Cit.).

O modelo matemático empregado é capaz, com as condições iniciais conhecidas, de simular o comportamento do sistema através do cálculo das pressões, temperaturas e concentração em função do tempo, para cada componente do sistema.

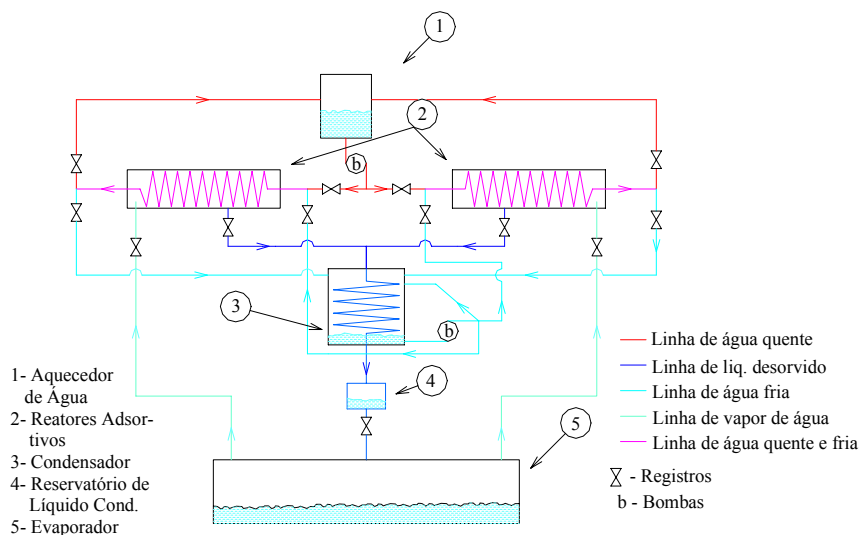


Figura 2. Esquema representativo de um sistema de refrigeração composto por resfriadores de líquidos adsortivos.

#### 4.1. Reator

Por se tratar de um equipamento composto por um grande número de dutos, com o adsorvente compactado entre eles, iremos considerar como simplificação para modelagem, um esquema composto por uma placa de área igual a soma de todas as áreas dos dutos em contato com leito poroso, o qual possui massa igual a do reator, conforme figura abaixo. Para o caso em questão, as equações de conservação de energia e massa ao referido trocador de calor dão-se em duas etapas:

- Análise do processo no leito adsortivo;
- Análise do processo no duto.

##### 4.1.1. Análise na placa (Correspondente à simplificação feita nos dutos):

A transferência de calor convectivo de insuflamento do ar (quente ou frio) para o leito poroso é controlado pelo coeficiente térmico de contato na interface metal/adsorvente. Desta forma, o balanço de energia realizado na placa é então:

$$M_{P1}C_{pP1} \left. \frac{\partial T_{P1}}{\partial t} \right|_{Placa} = H_{cP1}A_{cP1}(T_L - T_{P1}) + H_gA_{gP1}(T_G - T_{P1}) \quad (1)$$

Onde:

- $M_{P1}$  – Massa do conjunto de dutos que formam a placa simplificada (kg);
- $C_{pP1}$  – Calor Específico da placa a pressão constante (J/kgK);
- $H_{cP1}$  – Coeficiente térmico de contato da interface metal/adsorvente (W/m<sup>2</sup>K);
- $A_{cP1}$  – Área de contato da placa (m<sup>2</sup>);
- $H_g$  – Coeficiente de convecção do gás aquecido (W/kgK);
- $A_{gP1}$  – Área de contato do gás aquecido com o duto (m<sup>2</sup>).

#### 4.1.2. Análise no Leito Poroso (Adsorvente)

O calor entregue pela placa provoca o aquecimento do leito. Como o mesmo se encontra em presença do adsorvato, adsorvido, é considerado um termo fonte ( $Q_S$ ). Como condição limite, estabelece-se o leito isolado na outra extremidade, o que corresponde a simetria para o caso do reator tubular.

Fazendo o balanço de energia temos:

$$M_L C_{pL} \left. \frac{\partial T_L}{\partial t} \right|_{Leito} = Q_S + H_{cP1}A_{cP1}(T_{P1} - T_L) \quad (2)$$

Onde:

$$Q_S = M_S H_S \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (3)$$

Onde:

- $M_L$  – Massa do leito (kg);
- $Q_S$  – Calor de sorção (J/mol);
- $M_S$  – Massa do sorvente (kg);
- $H_S$  – Entalpia de Sorção;
- $\frac{\partial \chi}{\partial t}$  - Variação da concentração do adsorvato no adsorvente com o tempo.

Onde, utilizando-se a equação de Clausius-Clapeyron, a qual é dada por:

$$\left( \frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_X = - \frac{H_S}{RT^2} \quad (4)$$

e a equação de Dubinin-Astakhov, a qual é dada por:

$$\chi = \omega_0 \rho(T) \exp \left\{ -D \left[ T \ln \left( \frac{P_S}{P} \right) \right]^N \right\} \quad (5)$$

Onde:

- $\chi$  - Concentração de Adsorvato no Adsorvente (kg/kg);
- $\omega_0$ ,  $D$  e  $N$  - São constantes da equação de Dubinin-Astakhov, dependentes do par frigorígeno;
- $\rho$  - Massa específica do adsorvente (kg/m<sup>3</sup>);
- $T$  - Temperatura do leito poroso (K);
- $P_S$  - Pressão de Saturação do adsorvato à temperatura do leito adsorvente (kPa);
- $P$  - Pressão absoluta (kPa).

tem-se:

$$H_S = L + RT \ln \left( \frac{P_S}{P} \right) + \left( \frac{\alpha RT}{ND} \right) \left[ T \ln \left( \frac{P_S}{P} \right) \right]^{1-N} \quad (6)$$

Onde:

- $R$  - Constante Universal dos Gases (J/molK);
- $L$  - Calor Latente de Evaporação (J/kgK);
- $\alpha$  - Coeficiente de dilatação volumétrica;

e por conseguinte, tem-se:

$$\left( \frac{\partial \chi}{\partial t} \right) = \chi N D T^N \left[ \ln \left( \frac{P_S}{P} \right) \right]^{N-1} \left[ \left( \frac{\partial \ln P}{\partial t} \right) - \frac{H_S}{RT^2} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] \quad (7)$$

Devido ao tipo de formulação utilizada, a pressão e a temperatura, durante os processos com concentração constante, são calculadas através de um procedimento iterativo, usando-se para este fim a equação de Dubinin-Astakhov (equação 5), com a finalidade de obter um critério de convergência.

## 4.2. Condensador

Com a realização do balanço de energia no condensador, obtém-se:

$$M_{\text{Cond}} C_{P_{\text{Cond}}} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{\text{Cond}} = \frac{\partial m}{\partial t} L_{Lv} + H_{\text{Cond}} A_{C_{\text{Água}}} (T_{\text{Água}} - T_{\text{Cond}}) \quad (8)$$

Onde:

- $m$  - representa a massa de água condensada no sistema.

### 4.3. Evaporador

Para o evaporador são realizados dois balanços de energia, um para o adsorvato (água do sistema) e outro para a água, a qual é finalidade deste trabalho resfriar. Neste balanceamento será desprezada a massa metálica do evaporador.

#### 4.3.1. Adsorvato

$$M_{Ad}C_{PAd} \left. \frac{\partial T_{Ad}}{\partial t} \right|_{\text{Adsorvato}} = \frac{\partial m}{\partial t} L_{Lv} + U_{AdAg} A_{AdAg} (T_{Ag} - T_{Ad}) + U_{AdAmb} A_{AdAmb} (T_{Amb} - T_{Ad}) \quad (9)$$

#### 4.3.2. Água

O balanço de energia para a água a ser resfriada é:

$$M_{Ag}C_{PAg} \left. \frac{\partial T_{Ag}}{\partial t} \right|_{\text{Água}} = U_{AdAg} A_{AdAg} (T_{Ad} - T_{Ag}) + U_{AgAmb} A_{AgAmb} (T_{Amb} - T_{Ag}) \quad (10)$$

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O desempenho do sistema pode ser analisado através da verificação da figura 3, a qual denota o comportamento do leito adsorvente em presença do adsorvato. Diante disto, algumas peculiaridades são observadas, destacando-se as etapas de condensação e evaporação, as quais envolvem consideráveis fluxos de calor latente.

O processo de condensação ocorre com um significativo aquecimento do respectivo trocador de calor, devido à crescente massa de adsorvato condensada na superfície interna do mesmo. Entretanto, o resfriamento deste trocador é realizado através de água proveniente de um processo contra-fluxo (torre de resfriamento), o qual mantém o fluido de resfriamento a 26 °C. Conseqüentemente, o condensador é sobrefriado, o que ocasiona um incremento na massa do condensado, pois a temperatura do trocador de calor se mantém abaixo da ambiente (28 °C).

Na etapa de evaporação a água resfriada alcança a temperatura de 12 °C, o que é um reflexo da massa total condensada, pois uma melhor eficiência do processo de adsorção requer um leito poroso com um menor grau de concentração de adsorvato.

Na figura 4, pode-se observar a evolução da temperatura do leito adsorvativo em função do tempo, o que denota o comportamento da temperatura no interior do reator, relacionando esta aos diversos processos ocorridos no sistema.

Na figura 5, com a observação da capacidade frigorífica do sistema, deduz-se que a variação das temperaturas máximas e mínimas do leito provocam uma sensível alteração no poder de resfriamento do sistema, ou seja, as temperaturas do leito adsorvativo influenciam de forma preponderante o funcionamento geral do sistema, corroborando para o aumento ou diminuição da capacidade frigorífica do mesmo.

A quantidade de energia fornecida ao sistema na etapa de aquecimento do leito poroso, aliada a capacidade frigorífica do sistema, denotam uma relação de fundamental importância no desempenho do sistema, a qual denomina-se COP. A variação do COP em função da temperatura do evaporador fornece subsídios para que seja viável uma análise de desempenho em função da temperatura do fluido refrigerante. A análise aqui reportada (figura 6) foi realizada considerando a

variação do evaporador em função das temperaturas de início de condensação, o que demonstra a intercambialidade das etapas do ciclo adsorativo descrito na figura 3.

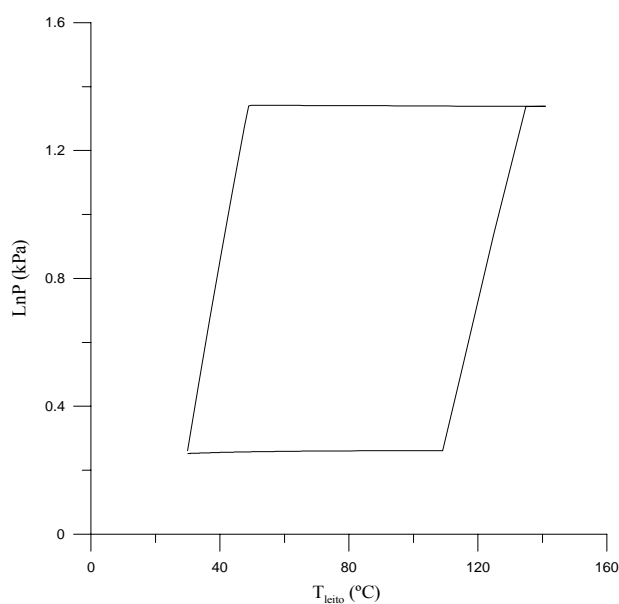


Figura 3. Ciclo adsorativo do resfriador de líquidos (Chiller).

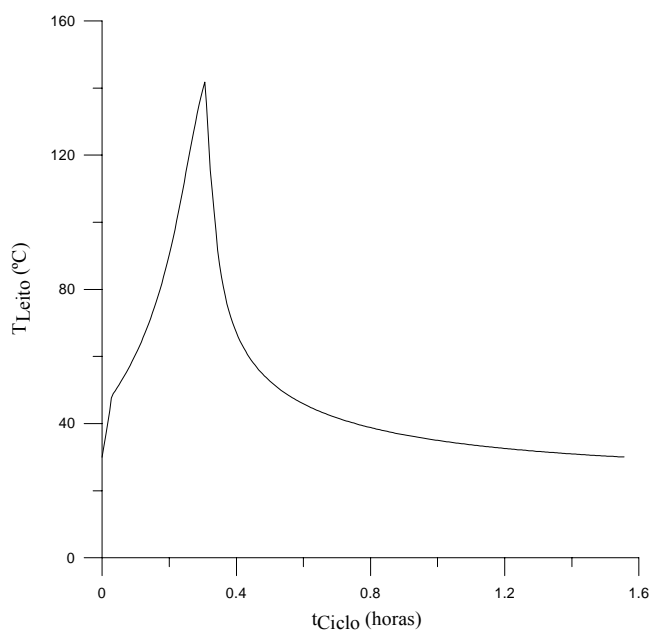


Figura 4. Variação da temperatura do leito em função do tempo do ciclo adsorativo.

## 6. CONCLUSÕES

O sistema de resfriamento adsorativo de líquidos, aqui discutido, se comportou de maneira satisfatória nas análises realizadas neste trabalho. Desta forma, vê-se claramente que a viabilidade comercial de sistemas é incontestável. Para tanto, a otimização dos trocadores de calor, que compõem o referido, torna-se imprescindível para a obtenção de um melhor desempenho geral de sistemas que operem segundo este princípio. Um protótipo encontra-se em fase de construção, o que contribuirá enormemente para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional, introduzindo assim confiabilidade ao sistema, com o objetivo de produção comercial.



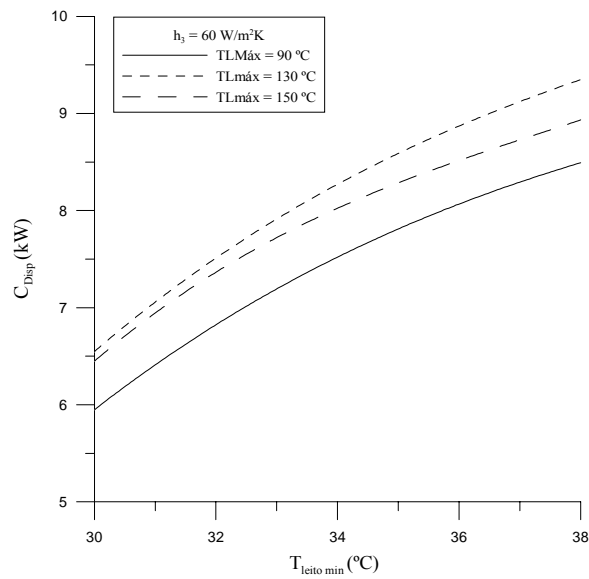


Figura 5. Variação da capacidade frigorífica do sistema em função das temperaturas máximas e mínimas do leito adsorptivo.

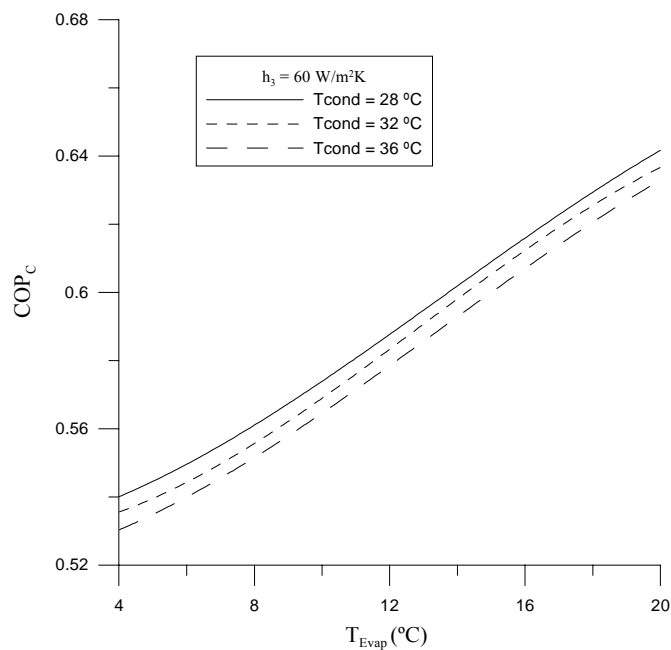


Figura 6. Variação do coeficiente de desempenho em função da temperatura do evaporador.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem auxílios CNPq Processos n° 522.559/95-6 e n° 471039/01-2.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Becker, M. "Three stage adsorption chiller driven by heat of 50°C". Fuel and Energy Abstracts, vol. 38, n° 6, pp. 436, 1997.
- Chua, H. T., Ng, K. C., Malek, A., Kashiwagi, T., Akisawa, A., and Saha, B. B. "Multi-bed regenerative adsorption chiller - improving the utilization of waste heat and reducing the chilled

- water outlet temperature fluctuation”. International Journal of Refrigeration, vol. 24, n° 2, pp. 124-136, 2001.
- Chua, H. T., Ng, K. C., Malek, A., Kashiwagi, T., Akisawa, A. and Saha, B. B. “Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers”. International Journal of Refrigeration, vol. 22, n° 3, pp. 194-204, 1999.
- Dubinin, M. M. and Erashko, I. T. “Kinetics of physical adsorption by carbonaceous adsorbents of biporous structure”. Carbon, vol. 13, pp. 193-200, 1975.
- Guilleminot, J.J., Meunier, F., Meschler, B. “Étude des Cycles Intermitents à adsorption Solide pour la Refrigeration Solaire”. Revue Physique Appliquée 15, p. 441, 1980.
- Kariogas, M. and Meunier, F. “Etude de la relaxation d’un réacteur à zéolite pendant la désorption éclair provoquée par un échelon de pression”. Chemical Engineering Journal, vol. 32, pp.171-192, 1986.
- Leite, A. P. F. “Sistema de refrigeração à adsorção sólida utilizando o par carvão ativado/metanol com regeneração por energia solar“. Campina Grande: Trabalho apresentado perante banca examinadora no concurso para professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II, 1996.
- Saha, B. B., Akisawa, A., Kashiwagi, T. “Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype”. Renewable Energy, vol. 23, pp. 93-101, 2001.
- Sakoda, A. and Suzuki, M. “Fundamental study on solar powered cooling system”. Journal of Chemical Engineering, vol. 17, pp. 52-57, 1984.777

## 9. DIREITOS AUTORAIS

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

## THERMAL CHARACTERIZATION OF A ADSORPTION CHILLER

### **Renato Miguel de Moraes Lisboa**

Universidade Federal da Paraíba/CT/CPGEM

Laboratório de Energia Solar/Laboratório de Adsorção e Meios Porosos

[rlisboa@les.ufpb.br](mailto:rlisboa@les.ufpb.br)

### **José Espínola Júnior**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Sergipe/UNED/COIND

Universidade Federal da Paraíba/CT/CPGEM

Laboratório de Energia Solar/Laboratório de Adsorção e Meios Porosos

[espinola@les.ufpb.br](mailto:espinola@les.ufpb.br)

***Abstract.** The present work shows the thermal characterization of a adsorption chiller with regeneration through it burns of natural gas. The objective is to use the cold water to supply system of conditioned air. The system uses the beginning of the adsorption, through the pair refrigerating silica gel/water, for the production of cold water. All the thermodynamic processes are modeled mathematically with the intention of allowing a numeric simulation of the operation of the system. For this, they are resolved the equations of the diffusion of heat inside the porous bed coupled to the term of generation of heat (sorption) relative to the mass transport. Iteratives methods will be used for the solution in finite differences.*