

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dubinin, M.M. & Astakhov, V.A., 1971, "Molecular-Sieve Zeolithes-II". Washington: American Chemical Society.
- Khelifa, N. ,1984, "Das Adsorptionspaar Silicagel-Wasserdampf". Anwendung als Solares Klimatisierungssystem, Dissertation Ludwig-Maximilians Universität, Munich.
- Vodianitskaia, P.J. e Klüppel, R.P., 1984, "Geladeira Solar de Adsorção", Anais do III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- Cacciola, G., Restuccia, G. and Mercadante, 1995, "Composites of activated carbon for refrigeration adsorption machines", Carbon, Vol. 33 (9), pp. 1205-1210.
- Guilleminot, J.J., 1998, "From pellets to composite adsorbent bed: evolution of adsorbent technologies", FOA6, Elsevier, pp 1071-1076.
- Guilleminot, J.J. , Meunier, F. and Pakleza, J. , 1987, "Heat and Mass transfer in a non-isothermal fixed bed solid adsorbent reactor: a uniform pressure/non-uniform temperature case", Int. J. of Heat Mass Transfer, V 30, N 8, pp 1595-1606.
- Gurgel J. M. e Klüppel, R. P., 1992, "Simulação Numérica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção", anais do IV ENCIT , Rio de Janeiro.
- Klüppel, R. P. and Gurgel, J.M., 1987, "Solar adsorption cooling using silicagel/water", Advances in solar energy technology, Proceedings of ISES, volume 3, Hamburg, R.F.A.
- Guilleminot J.J. and Gurgel, J.M. , 1990, "Heat transfer intensification in adsorbent beds of adsorption thermal devices", International solar energy conference american society of mechanical engineers (ASME), Miami (Florida).
- Hsieh, C.K., 1981. "Thermal Analysis of CPC Collectors"; S. Energy, V 27, N 1.
- Carvalho, J.M. , Silva, J. E. Jr e Gurgel, J.M., 1998, " Simulação De Um Sistema De Refrigeração De Leite Usando Adsorção E Regenerado Por Energia Solar." V Congresso De Engenharia Mecânica Norte Nordeste , Fortaleza –CE.
- Tchernev, D. I., 1979, "Proceedings of the XIVth Intersociety Energy Conversion Engineering Conferences".
- Guilleminot, J.J. Meunier F. et Mischler B., 1979, "Étude des cycles intermittents à adsorption solide pour la refrigeration solaire"; Ver. Phys. Appl. 15.
- Boubakri A., Grenier Ph. And Pons M., 1985, "Utilisation du couple C.A.-méthanol pour la production de glace par énergie solaire. Proceedings of the J.I.T.H. Conference, C.N.R.S. Editor, Rabat.
- Passos, E.F., Escobedo, J.F. and Meunier, F., 1986, "Étude des couples charbon actif-methanol et leur application a la refrigeration solaire", Thèse de Doctorat – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça.
- Pons, M. and Grenier, Ph., 1986, "Experiemntal data on a solar-powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair", Journal of Solar Energy Engineering, V 109, pp 303-310.
- Winston, R.,1986, "Principles of solar concentrators of a novel design, Solar Energy, V 16, pp 89-95.
- Silva, J.A., 1986, "Desenvolvimento e análise térmica de um coletor solar de baixo custo"; Dissertação de Mestrado, CPGEM, UFMG.

6 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CNPq (Proc. N° 350163/91-0).

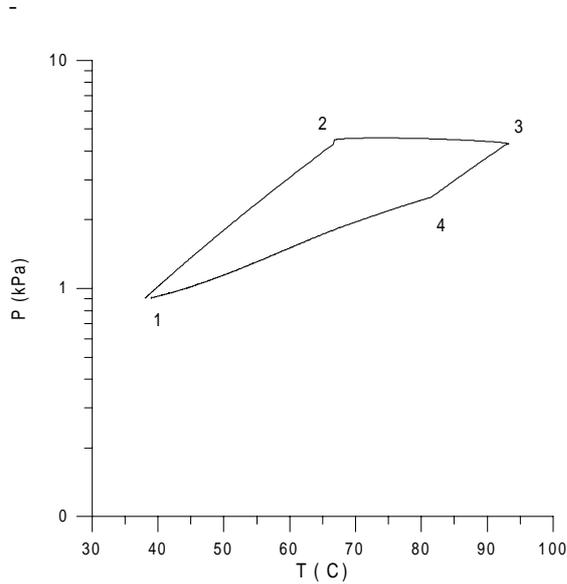


Figura 3. Ciclo adsorptivo obtido com uso de coletor / reator plano

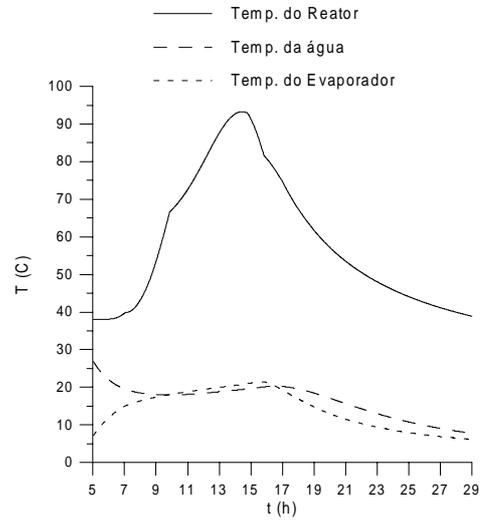


Figura 4. Histogramas de temperaturas do refrigerador com uso de coletor/reator plano

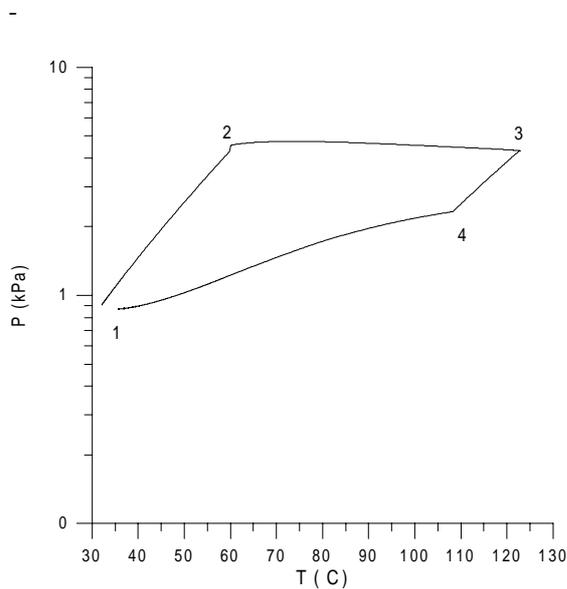


Figura 5. Ciclo adsorptivo obtido com uso de coletor / reator plano

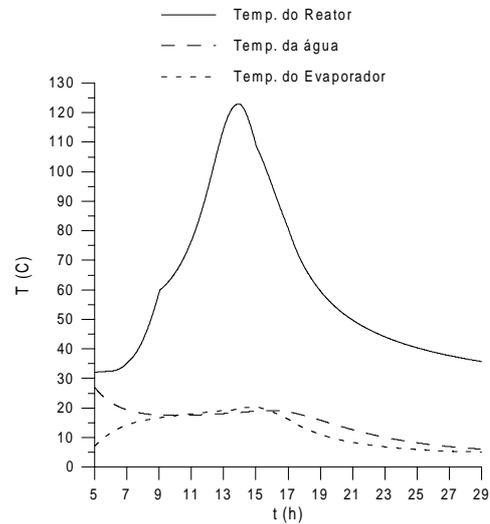


Figura 6. Histogramas de temperaturas do refrigerador com uso de coletor/reator CPC

4. SIMULAÇÃO

O refrigerador é simulado através dos modelos apresentados. É usado um esquema numérico totalmente implícito para a solução das equações. Inicialmente é realizada uma simulação de um refrigerador com reator usando coletor plano. Em seguida, para as mesmas condições de funcionamento é simulado o mesmo refrigerador com a única diferença que é a utilização de um CPC. São consideradas condições solarimétricas e ambientais relativas ao dia 30/04/1985 (João Pessoa), que correspondem a energia incidente em um área da captação de 1 m^2 de 23,8 MJ, temperatura ambiente variando entre 21 e 28 °C, massa de água do evaporador de 25 kg com temperatura inicial (5 horas da manhã) de 6 °C, massa de água para ser resfriada no reservatório de 15 kg com temperatura inicial (5 horas da manhã) de 27 °C. Para o coletor plano (1 m^2), 24 tubos posicionados paralelamente, (4 cm de diâmetro externo com tubo interno concêntrico com 1 cm de diâmetro, permitindo a compactação de 20 kg de sílica gel) somam um comprimento total de 23 m com área total superficial externa de 2.9 m^2 que corresponde a área de transferência de calor entre os tubos e o adsorvente. No CPC, as simulações levaram a otimização de um reator formado por um tubo de 2 m de comprimento com diâmetro externo de 20 cm e interno de 16 cm e com uma área de absorção de energia de 1.25 m^2 e de 2.26 m^2 para resfriamento por convecção. A quantidade de sílica gel foi otimizada em 17 kg. A área de captação na abertura do CPC é igualmente de 1 m^2 porém considerou-se uma eficiência de captação de radiação no absorvedor (CE) de 70 % (decorrente das múltiplas reflexões e imperfeições construtivas das superfícies refletoras). Os resultados obtidos estão mostrados nas figuras 3,4,5 e 6 onde são mostrados os ciclos adsorptivos e histogramas referentes as temperaturas do reator, evaporador e da água a ser resfriada. Os ciclos são formados por 4 processos: (1-2) aquecimento do reator, (2-3) dessorção com condensação do sorbato, (3-4) resfriamento do reator até atingir a pressão do evaporador e (4-1) adsorção com obtenção do frio. Observa-se que no sistema com coletor plano atinge-se uma temperatura menor que no sistema com CPC. Também pode ser notado que o CPC permite uma temperatura de final de processo de adsorção menor que a conseguida com o coletor plano. São fatos que eram esperados com a utilização do CPC que permitiu um melhor COPs solar que é definido como a razão entre a energia solar disponível e o frio obtido no evaporador. Para o uso de sílica gel /água, temperaturas acima de 120 °C não inúteis pois para estas condições a sílica gel já se encontra praticamente anidra. O fato de se conseguir um maior resfriamento é fundamental para se obter uma maior quantidade de massa cíclica (evaporada) com a sílica gel conseguindo atingir uma maior concentração de sorbato. Com o coletor plano obteve-se um COPs de 0.13 com uma massa cíclica de adsorbato de 1.25 kg. Com o CPC, o COPs foi 0.19 e obteve-se uma massa cíclica de 1.95 kg. Estes resultados são obtidos para configurações otimizadas.

5. CONCLUSÃO

Com as simulações realizadas, o uso de um coletor CPC para regenerar um reator adsorptivo mostrou-se viável do ponto de vista técnico e apresentando melhores resultados do COPs quando comparados com os resultados obtidos com reator com coletor solar plano. Isto é entendido como consequência do CPC ter permitido uma maior temperatura do adsorvente e também pela maior facilidade de se resfriar durante o período noturno em relação a um coletor plano. A utilização do absorvedor de vidro também auxiliou na obtenção de temperaturas elevadas com a radiação atingindo diretamente o leito adsorvente. A construção de um protótipo usando CPC se faz necessário para se validar o modelo e melhor avaliar as implicações tecnológicas do seu uso. Também um estudo teórico e experimental da convecção no absorvedor do CPC é relevante para uma conclusão final.

construtivas do absorvedor. O uso do tubo em vidro é inovador e vantajoso pois permite que o fluxo solar incida diretamente sobre o leito poroso, considerando uma transmissividade próxima de 1 para a parede de vidro do tubo. Desta forma os processos de aquecimento não ocorrem através da parede do tubo que apresenta uma grande resistência térmica entre ele e o leito granular. Isto permite se atingir temperaturas mais elevadas com menor inércia térmica. Durante os processo em que envolve o resfriamento do reator, isto não pode ser mais considerado visto que a emissão radiativa do leito ocorre no infravermelho (com τ próximo de 0, tornando o vidro opaco a radiação) e a transferência de calor vai ocorrer através de três resistências em série: contato térmico entre leito e parede do tubo, condução através da parede e finalmente convecção para o ambiente. Como o absorvedor aqui idealizado é composto por tubos concêntricos, a convecção ocorre também através do interior do reator, aumentando a superfície de troca convectiva.

O balanço de energia para a parede externa do tubo de vidro (desprezando-se reflexões de radiação sobre a sua superfície) é então:

$$M_t C_{p_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} = I_s CE (1 - \tau) \pi D L + h_c \pi D_i L (T_g - T_t) + h_e \pi D L (T_a - T_t) \quad (4)$$

No leito adsorativo, compreendido entre os dois tubos concêntricos, um balanço de energia permite calcular para cada tempo sua temperatura:

$$M_g C_{p_g} \frac{\partial T_g}{\partial t} = I_s CE \tau + h_c \pi D_i L (T_{te} - T_g) + h_c \pi d_e L (T_{ti} - T_g) + \frac{\partial C}{\partial t} M_g h_s \quad (5)$$

O balanço de energia para a parede externa do menor tubo do absorvedor é:

$$M_{ti} C_{p_{ti}} \frac{\partial T_{ti}}{\partial t} = h_c \pi d_e L (T_g - T_{ti}) + h_{e2} \pi d_i L (T_a - T_{ti}) \quad (6)$$

Onde: I_s é a radiação solar incidente na abertura do CPC, CE é o coeficiente de eficiência do CPC, τ é a transmissividade do vidro, h_e é o coeficiente de convecção sobre o duto, h_{e2} é o coeficiente de convecção no interior do duto do absorvedor, h_c é o coeficiente de contato térmico tubo/leito, T_{te} é a temperatura do tubo externo, T_{ti} é a temperatura do tubo interno do absorvedor, M_{te} é a massa do tubo externo, M_{ti} é a massa do tubo interno, $C_{p_{te}}$ e $C_{p_{ti}}$ são os calores específicos do tubo externo e do interno, D_e e D_i são os diâmetros externo e interno do maior tubo do absorvedor, d_e e d_i são os diâmetros externo e interno do menor tubo do absorvedor, T_g é a temperatura do adsorvente, T_a é a temperatura ambiente. M_g é a massa do adsorvente (kg), C_{p_g} = Calor específico do adsorvente com adsorbato.

O termo (dC/dt) é obtido diferenciando-se a equação 2 parcialmente em relação a T_g e $\ln P$ e usando-se equação 3 chega-se a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = nDC T_g^n \left(\ln \frac{P_s(T)}{P} \right)^{n-1} \left[\frac{\partial (\ln P)}{\partial t} - \frac{h_s}{RT^2} \frac{\partial T_g}{\partial t} \right] \quad (7)$$

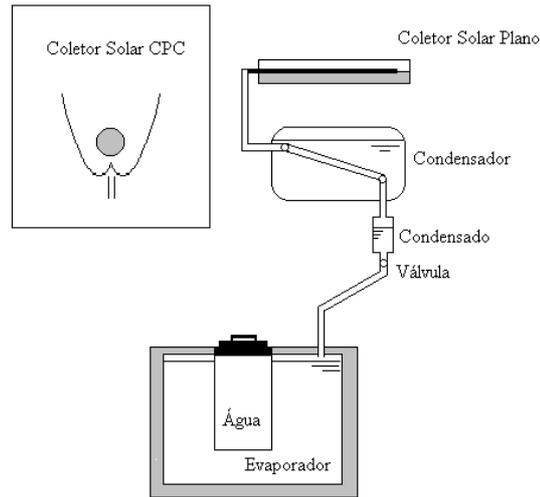


Figura 2. Esquema do resfriador de água adsorvente. São mostradas as duas possibilidades de coletores que formam os reatores estudados.

A relação de Clapeyron dá a entalpia de mudança de fase:

$$h_s = -R T^2 \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T_g} \right) \quad (3)$$

Onde: C = concentração de sorbato (kg/kg), $\rho(T)$ = massa específica do sorbato (kg/m³), $R = 461,6$ (J/kg K), h_s é o calor de sorção (J/kg), P_s = pressão de saturação do sorbato que é função da temperatura do leito sorvente (Pa), P = pressão no adsorvente (Pa), T_g = temperatura do adsorvente (K), n , K e W_0 são constantes dependentes do par sorvente/sorbato. Para o par sílica gel/água, essas constantes foram determinadas por (Khelifa, 1984) e são: $W_0 = 4,07 \times 10^{-4}$ m³(H₂O)/kg de sílica-gel, $n = 1$ e $k = 4,912 \times 10^{-6}$ kg(H₂O)/J

O desequilíbrio térmico responsável pelo início do processo de dessorção corresponde, a partir do instante $t = 0$, ao fornecimento de uma potência solar incidente I_s (em W/m²), na parede externa dos tubos paralelos cujo comprimento total (L) seja suficiente para preencher a área de um metro quadrado de coletor. Um coletor funcionando num sistema de refrigeração por sorção está ligado a um condensador e a um evaporador. Quando a pressão do leito atinge a pressão de condensação do sorbato (P_{cond}), inicia-se a condensação do vapor d'água proveniente do processo de dessorção no reator. Após a finalização da condensação, o reator se resfria com a conseqüente queda de pressão, quando esta atinge a pressão do evaporador e continuando a se resfriar, provoca o processo de adsorção com a evaporação de água obtendo-se o efeito frigorífico. Desta forma define-se o COPs como sendo a razão entre o frio obtido no evaporador e a energia solar global incidente na abertura do concentrador.

O condensador é considerado multi-tubular, resfriado a água estacionária. O evaporador é esquematizado como um reservatório contendo água que é o fluido refrigerante (adsorvato) e em contato com este, um outro reservatório onde se coloca a água a ser resfriada.

Para a modelização matemática do refrigerador de água com o uso do CPC, o procedimento é semelhante ao citado acima. O absorvedor do CPC recebe o mesmo fluxo de energia solar (I_s) incidente na sua abertura (1 m²) com a consideração de um coeficiente de eficiência CE onde são levados em conta a refletividade das paredes refletoras e imperfeições

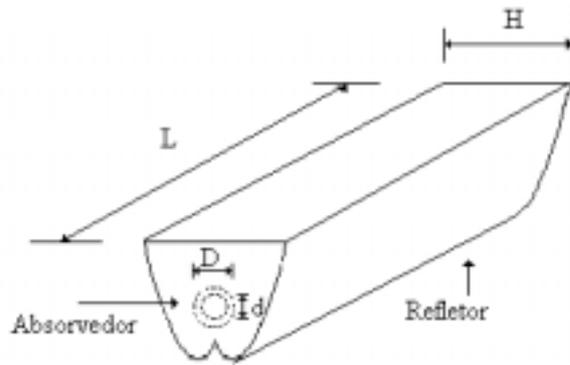


Figura 1. Esquema do CPC

Neste CPC o absorvedor de radiação consiste de dois cilindros concêntricos de dimensões D e d onde entre eles está o leito adsorvente granular consistindo assim no reator adsorvente. A abertura do CPC com $L = 2$ m e $H = 0.5$ m, corresponde a uma área de 1 m^2 . As superfícies refletoras são unidas por placas com as mesmas propriedades óticas e têm o objetivo também de refletir radiação para o absorvedor.

Desta forma, considerando as superfícies com excelente refletividade e perfeitamente parabólicas, define-se a razão de concentração RC como sendo função da área de abertura e da área do absorvedor, podendo ser calculada por:

$$RC = \frac{H}{\pi D} \quad (1)$$

3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático e as respectivas hipóteses simplificadoras utilizadas para simular uma geladeira esquematizada na figura 2 (com o uso de um coletor plano) encontra-se detalhado nos trabalhos de (Gurgel e Klüppel, 1992) e (Carvalho et al., 1998). Nesse modelo a radiação solar incidente no coletor solar plano (I_s), é distribuída em tubos paralelos que compõem o reator no interior do coletor. A parede do tubo é considerada a uma temperatura uniforme, ou seja, o fluxo radiativo incidente na parte superior, é rapidamente difundido por toda a parede do tubo. O aquecimento do leito adsorvente se faz entre as paredes internas dos tubos através de uma resistência térmica de contato.

No interior do leito adsorvente, são desprezados gradientes de temperatura devido a pequena espessura da camada porosa do leito granular. Em função da temperatura e da pressão, os adsorventes têm a capacidade de reter uma quantidade de sorbato variável entre zero e W_0 que é a quantidade máxima possível. Uma relação entre a concentração do sorbato retido no adsorvente, a temperatura do leito sólido e a pressão em que se encontra o sorbato gasoso foi proposta por (Dubinin-Astakhov, 1971) na forma abaixo:

$$C = W_0 \rho(T) \exp \left\{ -K \left[R T_g \ln \frac{P_s}{P} \right]^n \right\} \quad (2)$$

misturadas ao leito e de compactação bimodal. Mais recentemente, nesta mesma direção, também foram desenvolvidos por (Cacciola e Restuccia, 1995) e (Guillemintot, 1998), novos adsorventes (compósitos de carvão ativado e de zeolita-PTFE), com o propósito de melhorar a eficiência dos processos de sorção. Nestes trabalhos, aumentos consideráveis sobre o valor da condutividade térmica foram constatados mas com a desvantagem de apresentarem uma maior resistência a difusão de massa em seu interior, fato que incentiva a uma continuidade de pesquisas tentando minimizar este problema. Vários outros estudos teóricos e experimentais continuam sendo feitos com o objetivo de aperfeiçoar sistemas de refrigeração por adsorção que além de ser atraente pelo uso da energia solar, destaca-se também pela não utilização de CFCs, como fluido de trabalho se enquadrando nas novas regulamentações relativas aos novos fluidos frigorígenos (protocolo de Montreal e de Kyoto). Neste presente trabalho, a motivação do estudo da viabilidade do uso do CPC é pela possibilidade de se conseguir temperaturas mais elevadas durante o período de insolação e menores temperaturas durante o período noturno. Uma das maiores limitações dos sistemas adsorptivos é a dificuldade de transferir calor para o ambiente, durante o processo de resfriamento do reator que deve ocorrer logo após a sua regeneração. Os coletores planos necessitam do uso de vitrais e isolantes térmicos para atingirem suas temperaturas de trabalho e que naturalmente dificulta este resfriamento. O uso do CPC pode a princípio contornar estes dois problemas. Para uma avaliação técnica da incorporação de um CPC, é realizada uma simulação numérica relativa a modelização matemática de todo o sistema frigorífico. Para esta modelização são usadas hipóteses e simplificações que já foram bem testadas e confrontadas com resultados experimentais obtidos em diversos trabalhos (Guillemintot et al, 1987) e (Gurgel e Klüppel, 1992), o que torna as simulações confiáveis.

A descrição detalhada dos sistemas adsorptivos para fins de refrigeração são bem apresentados nas citações acima. Resumidamente é formado basicamente por três trocadores de calor interligados (Reator adsorptivo, Condensador, Evaporador). O funcionamento destas máquinas é baseado na reação química entre dois compostos, que se apresentam um na forma sólida (adsorvente) e outro na forma líquida ou vapor (adsorbato). O frio é obtido durante o processo de adsorção no reator que provoca a evaporação do sorbato do evaporador.

2. COLETOR SOLAR CONCENTRADOR

Concentradores solares apresentam como principal vantagem a possibilidade de se obter altas temperaturas de operação. O concentrador parabólico composto (CPC) foi inicialmente idealizado por (Winston, 1974), que demonstrou que entre os concentradores, este possui a maior eficiência de absorção de radiação difusa cuja fração coletada é inversamente proporcional à razão de concentração. Para o caso de baixas concentrações ($RC < 3$), estudos de (Hsieh, 1981) demonstram que não há a necessidade de se fazer nenhum ajuste de posicionamento para rastreamento solar durante todo o ano. Sua forma característica apresenta superfícies refletoras em forma de parábolas truncadas capazes de concentrar a radiação solar em um absorvedor de forma tubular que recebe a radiação incidente através de sua abertura. Detalhes construtivos podem ser encontrados em (Silva, 1993). O CPC aqui idealizado (figura 1) teve suas dimensões obtidas através de um estudo de otimização realizado através de um modelo matemático desenvolvido para o sistema frigorífico.

REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO SOLAR USANDO CPC

**J.C. Santos¹, J.E. Silva Jr.^{1,2}, F.P. Carvalho, R.P. Klüppel³,
M.A.W. Cavalcanti, J.M. Gurgel**

UFPB/DTM/CPGEM/Laboratório de Energia Solar, e-mail: gurgel@les.ufpb.br

C.P. 5115, CEP 58051-970, João Pessoa - PB - Brasil

1- UFPB/CT/CPGEM

2- Escola Técnica Federal de Sergipe/UNED

3- UFPE/DEM

Resumo

O trabalho apresenta um estudo da viabilidade técnica do uso de um coletor solar concentrador parabólico composto (CPC) com um absorvedor tubular de vidro. O objetivo deste CPC é o de regenerar um leito adsorvente, contido no interior do tubo, que compõe um reator adsorvente de um sistema de refrigeração por adsorção. É apresentado a modelização matemática e simulação numérica referente a tal sistema, que permitiu uma otimização do seu dimensionamento. Os resultados da simulação são comparados com os obtidos com um refrigerador operando sob as mesmas condições, porém usando um reator tubular inserido em um coletor solar plano. O uso do CPC mostrou-se viável como coletor solar tendo-se conseguido um COP superior quando confrontado com o sistema usando coletor plano.

Palavras – chave: Adsorção, Leito Granular, Sílica–gel, Sistema de Refrigeração, CPC.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos da aplicação da adsorção sólida com fins de obtenção de frio têm sido realizados desde o fim da década de 1970 com os trabalhos de (Tchernev, 1979) e (Guilleminot et al, 1980), que construíram protótipos usando o par zeolita/água. O par sílica gel/água foi em seguida testado por (Vodianitskaia e Klüppel, 1984) e (Klüppel e Gurgel, 1987), com testes em dois protótipos. Tais sistemas apresentaram dificuldades para a obtenção de gelo conseqüente da limitação física da temperatura mínima em que a água (fluido de trabalho) pode ser atingida que corresponde a temperatura do ponto triplo. Para contornar este problema, outros pares frigorígenos foram estudados sendo o carvão ativado/metanol usado com resultados promissores (Boubakri et al. , 1985), (Passos, 1986) e (Pons e Grenier, 1987) dentre outros. Embora tenham feito gelo, havia a necessidade de avanços tecnológicos visando melhorar suas performances. Um dos problemas avaliados, é a baixa condutividade térmica dos leitos granulares. Diante disto, algumas tentativas de se intensificar a transferência de calor nos leitos porosos foram estudadas por (Guilleminot e Gurgel, 1990), que conseguiram um aumento do valor da condutividade térmica do leito e diminuição da resistência de contato leito granular/parede através de inserções metálicas