

RESULTADOS DO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UMA MÁQUINA ADSORTIVA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE GELO

Grilo M. B. – margrilo@hotmail.com

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica
58109-970 Campina Grande – PB

Andrade R. R. D. – rodrigo_ronelli@yahoo.com.br

Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar
58059-900 João Pessoa - PB

Belo F. A. – belo@les.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar
58059-900 João Pessoa - PB

Moura J. L. F. P. – jorge.dj@bol.com.br

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica
58109-970 Campina Grande - PB

Leite A. P. F. – pralon@yahoo.com.br

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica
58109-970 Campina Grande - PB

Resumo. Neste trabalho são apresentados resultados de testes do protótipo de um sistema de refrigeração por adsorção, operando em ciclo fechado e intermitente, com regeneração por energia solar. A máquina destina-se à fabricação de gelo e o par adsorvente-adsorbato utilizado é o carvão ativado-metanol. A metodologia adotada foi colocar água líquida à temperatura ambiente em uma bandeja no interior da câmara fria do equipamento e monitorar experimentalmente a variação de sua temperatura em função do tempo e dos parâmetros meteorológicos, medidos a cada hora, durante um ciclo diário. A quantidade de gelo produzido foi de 6 kg/m²dia, sob condições de céu predominantemente limpo, em um dia típico de outubro, na cidade de João Pessoa, PB. Os resultados obtidos são apresentados em tabelas e gráficos que representam o comportamento dinâmico da máquina e comprovam sua funcionalidade.

Palavras chaves. Refrigeração solar, adsorção, produção de gelo, termodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de refrigeração solar por adsorção podem ser uma alternativa ao uso de refrigeradores a compressão de vapor, particularmente em áreas remotas não eletrificadas, como em vastas áreas do Nordeste brasileiro. Entretanto, o custo relativamente alto do componente adsorvedor/coletor solar e o caráter intermitente da energia solar são ainda fatores limitantes para que sistemas

adsorтивos possam competir economicamente com sistemas convencionais. Estudos experimentais recentes têm comparado o desempenho de diferentes dispositivos empregados como adsorvedor em refrigeradores solares, visando o aumento do coeficiente de performance (COP) e, consequentemente, uma diminuição dos custos de fabricação (Boubakri *et al.* 2000).

Neste trabalho são apresentados alguns resultados obtidos nos testes do protótipo de um sistema de refrigeração por adsorção. O refrigerador destina-se à fabricação de gelo e opera em um ciclo fechado e intermitente. O adsorvedor é constituído de uma série de tubos posicionados paralelamente, em que o adsorvente ocupa o espaço anular entre a parede do tubo e uma tela metálica concêntrica, por onde se difunde o adsorbato gasoso. O componente adsorvedor/coletor solar tem coberturas de material isolante transparente, tanto na parte superior, como na parte inferior, possibilitando, assim, a incidência de radiação solar em ambas as faces da superfície adsorvedora, com auxílio de refletores, como pode ser visto na Fig. (1). A regeneração do leito adsorvente é obtida mediante a incidência de radiação solar sobre o adsorvedor. Foram levantados dados que permitiram avaliar o funcionamento dinâmico do sistema.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

O sistema de refrigeração por adsorção baseia-se em um ciclo de efeito simples, ou intermitente, no qual não há recuperação de calor. O ciclo consiste de dois estágios: um caracterizado pela adsorção, em que ocorre a evaporação do fluido de trabalho/adsorbato, e outro, através do qual se dá a regeneração do adsorvente mediante a incidência da energia solar, quando o adsorbato é transferido ao condensador. O refrigerador solar é constituído basicamente de um adsorvedor/coletor solar conectado a um condensador e a um evaporador, como mostrado na Fig. (1).

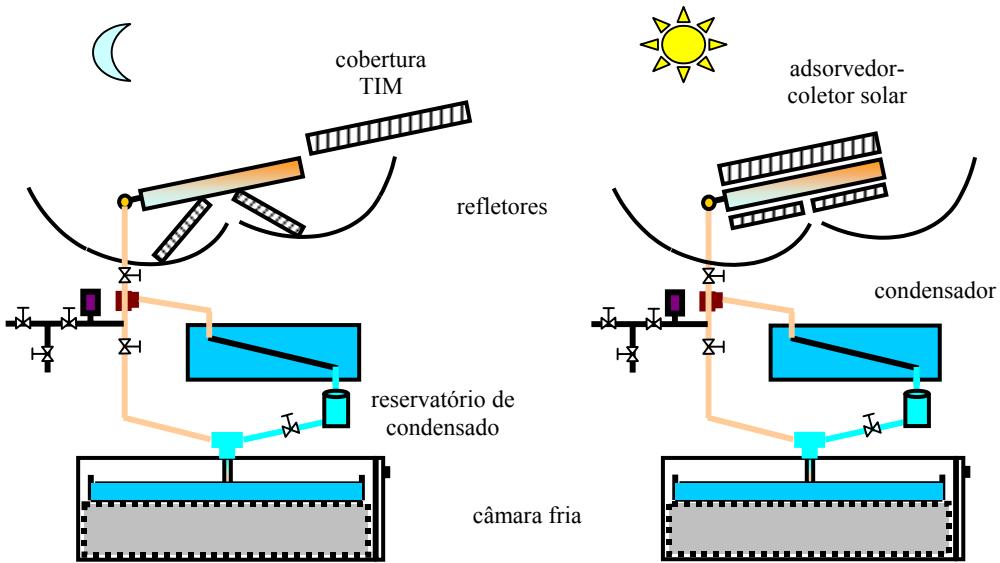


Figura 1. Esquema descritivo do refrigerador solar à adsorção:
(a) etapa de produção frigorífica - noturna; (b) etapa de regeneração - diurna.

A direção do fluxo gasoso é alternada, conforme o estágio do ciclo; seja do evaporador para o adsorvedor durante a adsorção, seja deste para o condensador durante o processo de regeneração. O ciclo de refrigeração ideal pode ser representado por duas isóbaras e duas isósteras intercaladas, como está indicado na Fig. (2). As curvas *a* representam as isósteras, i.e., funções à concentração de fase adsorvida constante.

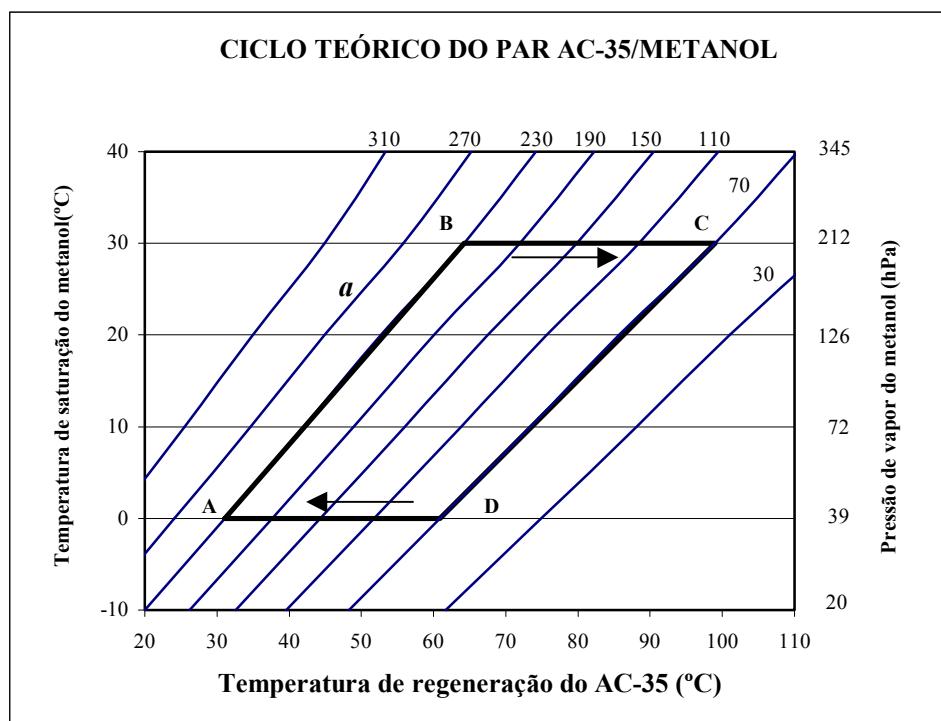


Figura 2. Rede de isósteras e representação do ciclo ideal de adsorção.

O processo de regeneração é representado pelos pontos ABC e o processo de adsorção pelos pontos CDA. No final da adsorção (A) o adsorvedor está à pressão de saturação da fase gasosa no evaporador. Com o aquecimento do adsorvedor pela ação do sol ocorre uma elevação de sua temperatura e de sua pressão, segundo um processo isostérico ($a = \text{cte}$) até que sua pressão se iguale a do condensador (B), quando então se inicia a transferência do adsorbato para o condensador. O processo de condensação ocorre até que o adsorvedor alcance a temperatura máxima (C). Inicia-se então o esfriamento do adsorvedor, em função das condições ambientais, segundo outro processo isostérico, até que sua pressão alcance um valor mínimo, i.e., se iguale à pressão do evaporador, quando então o processo de adsorção tem lugar, ocorrendo até o adsorvedor alcançar a temperatura mínima (A), completando, assim, o ciclo.

3. DESCRIÇÃO DO PROTOTIPO

O protótipo de refrigerador solar foi construído com base nos resultados das simulações numéricas realizadas para a localidade de João Pessoa ($7^{\circ}8'S$, $34^{\circ}50'W$), considerando os seis meses de maior insolação, quais sejam, de outubro a março (Leite e Daguenet, 2000).

O sistema testado apresenta algumas inovações, em relação aos protótipos e unidades comerciais já construídas: os componentes principais são multitungulares, o condensador utiliza água, o adsorvedor-coletor possui cobertura de material isolante transparente – TIM (*Transparent Insulation Material*), refletores, e um sistema de regulagem, que pode ser ajustado de acordo com a inclinação solar. O uso de coberturas TIM em coletores solares visa reduzir as perdas de calor, com uma atenuação mínima da radiação solar incidente (Leite et al. 2003a). Estruturas de TIM com diâmetros hidráulicos das células de uns poucos milímetros reduzem consideravelmente as perdas de calor por convecção e por radiação de placas absorvedoras com superfície negra não seletiva (Platzer, 1992).

O protótipo foi construído de modo que a radiação solar possa incidir sobre ambas as faces dos tubos que formam o componente adsorvedor/coletor solar. Para obter esse efeito, o plano de captação solar foi alongado e uma cobertura TIM articulada e refletores foram instalados abaixo dos tubos do adsorvedor, conforme é indicado na Fig. (3). A superfície absorvedora de radiação solar é constituída por um conjunto de 8 tubos, posicionados lado a lado, pintados em preto fosco,

perfazendo uma área efetiva de captação solar direta de 1 m² (1,65 x 0,61). Detalhes de fabricação e instalação dos componentes principais do protótipo são apresentados em Leite *et al.* (2003b).



Figura 3. Foto do protótipo em teste.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas medições de temperaturas em diferentes pontos do protótipo, como também levantados os seguintes parâmetros ambientais: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar total diária. Por não se dispor de equipamentos especiais, como de um radiômetro ou câmera fotográfica com sensores de infravermelho, as condições predominantes do céu noturno foram avaliadas através de observações visuais, realizadas a cada hora, durante todo o período de adsorção. O grau de cobertura de nuvens do céu noturno foi avaliado em relação ao zênite local, tendo sido classificado na noite dos testes como predominantemente limpo. Testes preliminares revelaram que este parâmetro – grau de cobertura de nuvens – é um fator limitante para a obtenção do efeito frigorífico necessário para a produção de gelo. Quanto mais limpo o céu noturno estiver, maior a dissipação de calor do adsorvedor e, consequentemente, maior o efeito frigorífico obtido.

No adsorvedor/coletor solar foram realizadas medições de temperaturas em vários pontos dos tubos, nas superfícies superiores e inferiores das coberturas TIM e nos refletores. As temperaturas foram medidas com sensores termorresistivos de platina (Pt-100), previamente aferidos com base em 4 temperaturas de referência (0°C, 26,3°C, 50,6°C e 100°C), medidas com um termômetro de bulbo de mercúrio de precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. As curvas de aferição de cada um dos sensores, num total de 34 (20 nos tubos, 12 nos vidros e 2 nos refletores), foram levantadas considerando o comprimento total dos respectivos cabos de transmissão do sinal. O erro de leitura para as curvas obtidas está na faixa de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a $\pm 0,4^\circ\text{C}$.

Os sensores foram posicionados em pontos correspondentes ao plano de projeção do adsorvedor (tangente aos tubos), visando uma avaliação da distribuição de temperatura nas direções longitudinal e transversal dos tubos, como pode ser visto na Fig. (4).

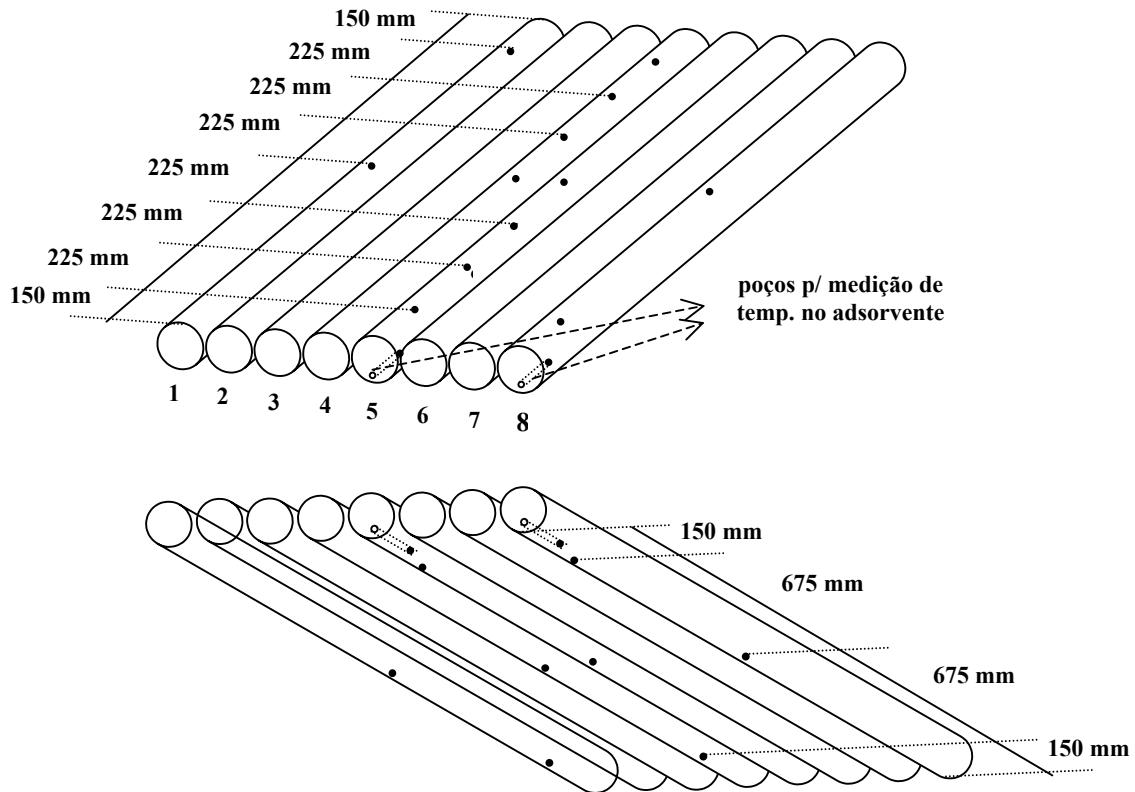


Figura 4. Representação esquemática da posição dos sensores no adsorvedor, vista superior e inferior.

No condensador, estão posicionadas dois Pt-100, um no interior dos tubos, com a finalidade de informar a variação da temperatura do metanol que está condensando, e outro na água do condensador, para avaliar o comportamento de sua temperatura.

Na câmara frigorífica, que efetivamente é o refrigerador, onde se localiza o evaporador e a bandeja de água a congelar, foram instalados três Pt-100. Um foi posicionado na parede externa de um dos tubos do evaporador, que permite monitorar a variação da temperatura do metanol em seu interior, outro na parede da câmara, para medir a variação da temperatura do ar, e um terceiro sensor foi colocado no interior da bandeja para medir a variação da temperatura da água a congelar. Uma representação esquemática do posicionamento desses sensores está indicada na Fig. (5).

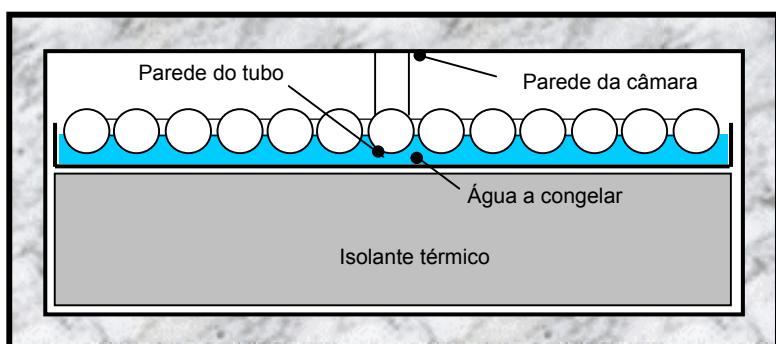


Figura 5. Representação esquemática do posicionamento dos sensores no interior da câmara fria.

Os testes foram realizados nos dias 5 e 6 de outubro de 2003, tendo início às 05:00 h da manhã do primeiro dia, com o nascer do sol (correspondente ao ponto A da Fig. (2)). O processo de dessorção propriamente dito (condensação) teve início às 09:25 h indo até às 14:00 h, resultando em uma massa de condensado de 3 kg de metanol. Logo após o final da dessorção, as coberturas TIM inferiores foram abertas, para facilitar a dissipação de calor do adsorvedor. Às 19:00 h teve início o processo de adsorção (correspondente ao ponto C da Fig. (2)), com a abertura da válvula de conexão do adsorvedor com o evaporador e a remoção da cobertura TIM superior.

Foram realizadas medições, a cada hora, com um sistema de aquisição de dados construído especificamente para coletar e armazenar as propriedades relevantes para este estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados são dos testes experimentais realizados nos dias 5 e 6 de outubro de 2003, no Laboratório de Energia Solar da UFPB.

As propriedades velocidade do vento (V_{vento}), umidade relativa do ar (U.R.), pressão no interior do sistema (P), temperatura ambiente ($T_{ambiente}$), temperatura do ar no interior da câmara fria ($T_{ar\ câmara}$), temperatura do metanol no interior do evaporador ($T_{metanol}$) e a temperatura da água a congelar ($T_{água}$), constam da Tab. (1). A quantidade de energia solar incidente diária medida no plano de captação do adsorvedor/coletor foi de 23,7 MJ/m².

Tabela 1. Variação das propriedades do sistema durante o seu funcionamento.

Hora	V_{vento} (m/s)	U.R. (%)	P (hPa)	$T_{ambiente}$ (°C)	$T_{água}$ (°C)	T_{evap} (°C)	$T_{ar\ câmara}$ (°C)
05:00	1,8	85	44	25,1	25,0	1,6	22,2
06:00	1,9	78	37	25,5	22,6	-1,1	22,1
07:00	1,9	83	44	26,4	22,4	1,6	22,7
08:00	1,9	67	78	28,2	22,6	11,2	23,7
09:00	2,4	66	166	30,5	24,9	25,0	25,9
10:00	2,0	60	192	30,5	23,3	27,8	25,9
11:00	2,0	58	203	30,7	23,6	28,9	26,6
12:00	2,2	51	214	31,5	25,1	30,0	28,1
13:00	2,1	53	221	30,9	25,2	30,6	28,5
14:00	2,4	61	216	30,6	25,4	30,1	28,3
15:00	2,4	65	212	28,8	25,6	29,8	27,9
16:00	1,8	68	204	26,8	25,5	29,0	27,2
17:00	1,4	73	191	26,6	25,7	27,7	26,7
18:00	1,5	77	184	26,3	26,3	27,0	26,6
19:00	1,2	78	168	26,2	26,6	25,2	25,9
20:00	1,2	82	27	26,0	4,5	-6,0	25,3
21:00	1,1	82	29	26,0	2,0	-4,9	23,0
22:00	1,2	82	28	26,1	1,3	-5,5	23,5
23:00	1,1	83	28	25,8	0,3	-5,5	20,2
00:00	1,1	86	27	26,0	-0,8	-6,0	19,5
01:00	1,1	87	26	26,1	-3,2	-6,6	18,8
02:00	1,1	86	26	25,6	-3,2	-6,6	18,3
03:00	1,1	86	26	25,6	-3,4	-6,6	18,0
04:00	1,1	86	26	24,8	-3,3	-6,6	17,8

Os dados de variação da temperatura da água a congelar no interior da câmara frigorífica são apresentados na Fig. (6), juntamente com os dados de variação de temperatura ambiente, da

temperatura do metanol no evaporador e da temperatura do ar no interior da câmara frigorífica. Com isso, é possível observar a influência dessas propriedades no processo de formação de gelo.

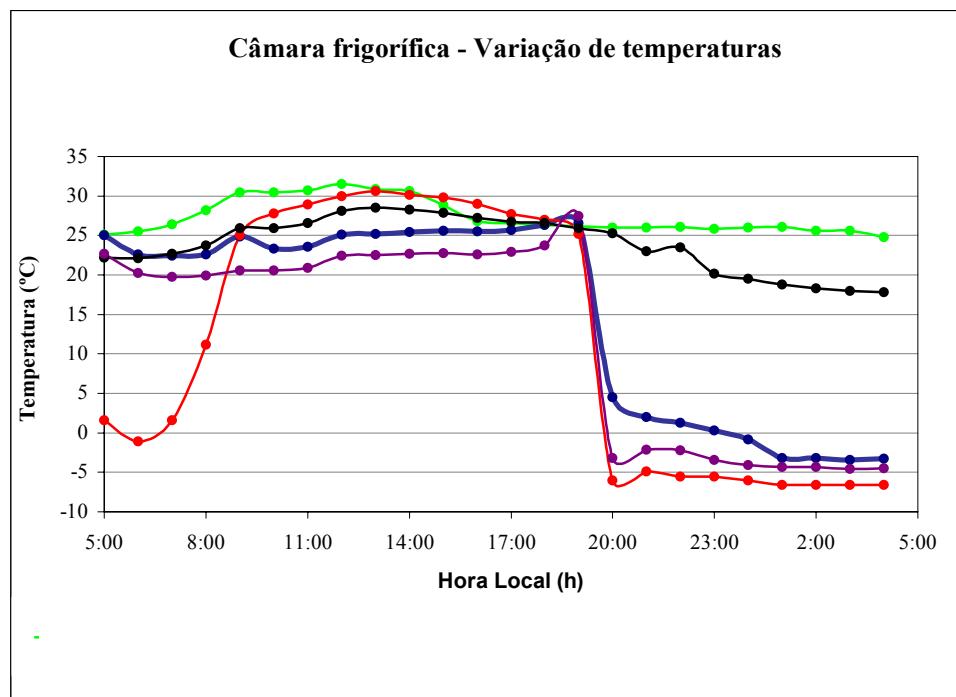


Figura 6. Gráfico da variação da temperatura ambiente e das temperaturas no interior da câmara frigorífica.

Do gráfico anterior, constata-se que a partir das 23:30 h a temperatura da água a congelar fica abaixo de 0°C, quando se inicia o processo de formação de gelo, atingindo sua menor temperatura às 03:20 h do dia 06.10.2003. Neste momento ocorre o ponto de inflexão, isto é, a partir deste momento a temperatura no gelo passa a aumentar; a câmara foi aberta às 04:00 h para verificar se havia gelo em seu interior. Sendo constatada a formação de gelo, como pode ser observado nas Figs. (7) e (8), retirou-se a parte da água em fase líquida, para determinar a quantidade de gelo produzido. Mais informações e detalhes dessa etapa estão apresentados em Leite *et al.* 2004.



Figura 7. Foto do interior da câmara fria, mostrando parte do gelo que adere à superfície do evaporador.



Figura 8. Fragmentos de gelo no interior da câmara frigorífica, sem a caixa de isolante térmico e sem a bandeja.

A quantidade de água líquida na bandeja no início do processo era de 7 kg. Ao abrir a câmara, foi observado que 1 kg da massa inicial já estava em fase líquida, provavelmente resultante do processo de fusão, que teve início após o momento de inflexão correspondente a menor temperatura na água a congelar. Por isso, a quantidade de gelo produzido foi de apenas 6 kg.

6. CONCLUSÃO

Foram analisados dados experimentais de um refrigerador solar baseado na adsorção de metanol em carvão ativado, destinado à fabricação de gelo, empregando um sistema de captação e conversão solar de alta eficiência. Os resultados obtidos correspondem a um dia típico do mês de outubro em João Pessoa-PB, com um grau de cobertura de nuvens diurna muito baixo, possibilitando uma boa incidência de energia solar e condições de céu noturno adequadas para a obtenção do efeito frigorífico necessário à formação de gelo. A ausência de nuvens durante o período noturno colaborou para uma boa dissipação de calor dos tubos, através de trocas radiativas com o céu, propiciando a obtenção de baixas temperaturas no adsorvedor e, assim, intensificando o processo de adsorção. A etapa de regeneração teve a duração de 4,5 horas, enquanto que a de refrigeração, caracterizada pelo processo de adsorção, teve a duração de 8,5 horas, obtendo-se ao final do ciclo 6 kg de gelo/m²dia, a uma temperatura de -3,3°C.

As medidas das temperaturas no interior da câmara fria (do ar, do metanol e da água a ser congelada) permitiram avaliar suas variações durante o ciclo de refrigeração, concluindo-se que a massa de água efetivamente congelada pode ser maior, com a redução do volume de ar acima do evaporador e melhorando o isolamento térmico entre o interior e exterior da câmara fria, por exemplo, com o uso de superfícies refletoras para minimizar o aporte solar nas paredes da câmara.

7. AGRADECIMENTO

Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, através de auxílio financeiro e bolsas (Proc. 522637/96-5).

8. REFERÊNCIAS

- Boubakri, A., Guilleminot, J. J. and Meunier, F., 2000, "Adsorptive solar powered ice maker: Experiments and model", *Solar Energy*, Vol. 69, No.3, pp. 249-263.
- Leite, A.P.F. and Daguenet, M., 2000, "Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration", *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 1625-1647.
- Leite, A.P.F., Belo, F.A., Grilo, M.B. e Andrade, R.R.D., 2003a, "Avaliação experimental de um adsorvedor multitubular coberto com material isolante transparente", Actas do VI Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBEM6), Coimbra, Portugal, 15-18 out. 2003, Vol. I, pp. 253-258.
- Leite, A.P.F., Chaya, M.R., Horn, M. and Grilo, M.B., 2003b, "Description and operation of two prototypes of adsorptive solar refrigerators", Proc. Int. Conference on Energy and the Environment (ICEE), 11-13 dez. 2004, Shanghai, China.
- Leite, A.P.F., Belo, F.A., Grilo, M.B., Andrade, R.R.D. and Meunier, F., 2004, "Experimental evaluation of a multi-tubular adsorber operating with activated carbon-methanol", 8th International Conference on Fundamentals of Adsorption (FOA8), 23-28 maio 2004, Sedona, Arizona, EUA (aceito para apresentação).
- Platzer, W.J., 1992, "Total heat transport data for plastic honeycomb-type structures", *Solar Energy*, Vol. 49, No. 5, pp. 351-358.

EXPERIMENTAL DATA OF A PROTOTYPE OF AN ADSORPTIVE SOLAR-POWERED ICE MAKER

Abstract. In this paper are presented experimental results of a developing prototype of an adsorption refrigeration system applied to ice production, using the activated carbon-methanol pair, operating in a closed and intermittent cycle, with regeneration by solar energy. The adopted methodology was to introduce water at ambient temperature inside the cold chamber of the system, and to monitor its time variation and also the temperatures of other components, such as the stagnated air inside the chamber and the evaporator, in function of meteorological data, measured at each hour during a whole day. The machine produced 6 kg of ice/m²day, under clear sky conditions during a typical October day, in João Pessoa-PB, Brazil. The obtained results are presented in tables and graphics that represent the dynamic behavior of the system.

Keywords. Adsorption, Solar refrigeration, Ice production.