



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

REFRIGERADOR OPERANDO EM CICLO DE ADSORÇÃO COM AQUECIMENTO SOLAR

Maria Eugenia Vieira da Silva, eugenia@ufc.br¹
Maria Elieneide Araújo, elieneide@gmail.com¹
Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros, marcelo@sol.les.ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Laboratório de Energia Solar e Gas Naturasl – LESGN, Campos do Pici, s/n, bloco 718, CEP 60.455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Resumo: A refrigeração é indispensável para o desenvolvimento de diversas atividades e a indisponibilidade de eletricidade necessária ao seu funcionamento dificulta a vida de muitas comunidades não servidas pela rede elétrica e que poderiam ser beneficiadas se dispusessem de equipamentos de refrigeração que não empregassem a eletricidade em seu funcionamento. O presente trabalho apresenta os testes iniciais do desenvolvimento de um novo refrigerador solar por adsorção com aquecimento indireto. Os componentes do refrigerador são: adsorvedor, condensador, evaporador e coletor solar. A escolha do par adsorbato / adsorvente, água como fluido refrigerante e a sílica gel como material adsorvente para o refrigerador, levou em consideração a aplicação em condicionamento de ar e o emprego de um fluido de trabalho atóxico, que não colaborasse para a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global. A coexistência das etapas de aquecimento e resfriamento no adsorvedor gerou a necessidade de se definir uma geometria para o adsorvedor capaz de permitir uma melhor dissipação de calor do material adsorvente após a fase de aquecimento, e a obtenção de um leito com material adsorvente em quantidade suficiente para adsorção do fluido evaporado durante a fase de resfriamento. Assim, um sistema de aquecimento indireto e de resfriamento foi concebido. Os resultados de medições de campo mostraram que o sistema está apropriado para operação com sílica gel tipo A / água, visto que temperaturas próximas a 120°C foram medidas na entrada do adsorvedor, por um intervalo superior a 3 horas.

Palavras-chave: refrigerador, adsorção, aquecimento solar

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de equipamentos eficientes com preço acessíveis e que fundamentalmente não interfiram no equilíbrio ambiental tem sido largamente incentivado nestes últimos anos e uma das áreas de aplicação da engenharia com significativa importância devido ao elevado consumo de eletricidade envolvido, é a refrigeração (condicionamento de ar). Uma alternativa aos sistemas de refrigeração existentes comercialmente (compressão de vapor) que utilizam a energia elétrica seria a utilização de ciclos térmicos que possam operar de forma eficiente com fontes renováveis de energia. Esta alternativa poderá promover o desenvolvimento de comunidades isoladas com o emprego da refrigeração em várias atividades de subsistência tais como a piscicultura, fruticultura, pecuária leiteira e conservação de vacinas. Em unidades assistenciais de saúde o ar condicionado poderá ser utilizado para o controle das condições ambiente e possibilitar à realização de pequenas cirurgias ou ainda garantir condições ambientais adequadas para processos diversos em pequenas indústrias, proporcionando maior produtividade.

O presente trabalho tem como objetivo a validação experimental de um novo refrigerador térmico de adsorção com aquecimento indireto por energia solar. A concepção e a fabricação dos componentes do refrigerador, a implantação do sistema de aquisição de dados e as realizações experimentais foram feitas no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural da Universidade Federal do Ceará (UFC).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A melhoria do desempenho do ciclo térmico de sorção está associada tanto à otimização do processo de captação de calor de forma econômica, quanto às características dos materiais. Os primeiros estudos foram publicados no final da década de setenta. Na revisão bibliográfica procurou-se identificar as mais significantes experiências com os diversos materiais testados.

Tchernev (1978) construiu um protótipo usando o par zeolita 5A e água e constatou que para a pressão de $6,89 \times 10^2$ Pa (0,1 psia), a temperatura correspondente de $0,66 \text{ }^\circ\text{C}$ e a potência simulada de 1 kW/m^2 , a eficiência obtida era de 44%, sendo três vezes maior do que o obtido com o par brometo de lítio e água em um sistema com idênticas condições. O sistema recebia uma taxa de energia térmica de $2,11 \times 10^7 \text{ J/dia}$ (20.000 BTU/h) e produzia potência frigorífica de $9,49 \times 10^6 \text{ J/dia}$ (9000 BTU/h).

Pino *et al.* (1996) realizaram estudos sobre materiais compósitos tendo como material base a zeolita 4A, considerado um dos materiais mais atrativos à água. Devido à baixa condutividade térmica do adsorvedor, foram usados aditivos como o SiC, Si_3N_4 , grafita, aglutinantes como o PTFE e Al(OH)_3 para contornar este problema. As análises mostraram que a adição de PTFE mantinha ou diminuía o coeficiente global de transferência de calor e que os aditivos reduziam de 90% a 80% a quantidade de material adsorvente no material compósito. A melhoria da condutividade térmica era válida para uma outra geometria do adsorvente.

Hauer e Lavemann (1998) estudaram o desempenho térmico e a estabilidade hidrotérmica do adsorvente zeolita 13X para aplicação em sistemas de refrigeração e constataram que a estabilidade do sistema ia de 50 ciclos/ano para armazenamento de energia termoquímica e 200 ciclos/ano para ciclo aberto de bomba de calor. A zeolita 13X apresentou estabilidade constante de mais de 400 ciclos/ano em todas as amostras testadas.

Restuccia *et al.* (1999) realizaram estudos de novos materiais adsorventes denominados de “*selective water sorbents*”, SWS. Estes materiais foram capazes de operar em ciclos de refrigeração e bombas de calor, com fontes térmicas de baixa ou média temperatura. O material SWS consiste de uma matriz porosa e uma substância higroscópica que impregna o interior dos poros da matriz. Os tipos de adsorventes SWS foram: Cloreto de cálcio SWS em mesoporos, sílica gel, brometo de lítio em alumina SWS-2A, sílica SWS-2L em mesoporos e cloreto de cálcio SWS-1S em microporos.

Lijun *et al.* (1999) realizaram estudos sobre a transferência de calor para o adsorvedor em uma bomba de calor. Foram utilizados um condutor elétrico de polianilina para aumento da condutividade térmica do leito adsorvedor e um condutor térmico composto de polianilina e adsorvente (zeolita) pelo processo de oxidação química e polimerização da polianilina na superfície das partículas adsorventes. Os resultados mostraram que a condutividade elétrica da polianilina aumentou aproximadamente quatro vezes a condutividade térmica do leito adsorvedor, porém a capacidade de adsorção decresceu de maneira indesejada.

Vasiliev *et al.* (2001) utilizaram adsorvedores que continham filtros de carvão ativado saturado com diferentes sais (CaCl_2 , BaCl_2 , NiCl_2) para adsorção com amônia. Os resultados para três tipos de leito foram: Leito adsorvedor (fibra de carvão ativado) com capacidade de 0,35 kg de gás adsorvido por kg de adsorvente com duração do ciclo de 12 minutos; Leito adsorvedor com CaCl_2 , possuindo capacidade de 0,6 kg de gás adsorvido por kg de adsorvente, com duração do ciclo em torno de 25 a 30 minutos e coeficiente de desempenho de 0,43; e Leito adsorvedor com BaCl_2 e NiCl_2 , obtendo um coeficiente de desempenho de 0,44.

3. FUNDAMENÇÃO TEÓRICA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Sociedade Internacional de Adsorção (IAS, “*Interntional Adsorption Society*”), define a adsorção como sendo o mecanismo de separação preferencial de fases gasosas ou líquidas dentro da superfície de um substrato sólido. A adsorção física é causada principalmente por forças de Van der Waals e por intermédio de forças eletrostáticas entre as moléculas e os átomos que compõem a superfície do adsorvente.

Os adsorventes são materiais em cuja superfície existem estruturas formadas de diversas cavidades com abertura na ordem de 10^{-10}m , e com características polares, possibilitando a atração e aprisionamento de outras substâncias que possuam dimensões inferiores à abertura das cavidades.

3.1. Equações

As equações de balanço de massa e de energia nos componentes foram utilizadas para determinar o coeficiente de desempenho do refrigerador. Estas equações auxiliaram a especificar quais as variáveis de processo deveriam ser medidas; são elas: temperatura, pressão e vazão de água.

Na fase de aquecimento, a radiação solar incide sobre o coletor de placa plana e o óleo é aquecido por condução, fazendo-o circular em um circuito de termossifão por convecção natural, o calor do fluido térmico é transferido indiretamente para o leito adsorvente contido no adsorvedor. Parte da energia transferida pelo óleo é utilizada no processo de dessorção outra parte é perdida para o meio e armazenada nos componentes do sistema e materiais.

A energia absorvida pelos coletores planos, que é transferida indiretamente para o adsorvedor, pode ser determinada pela Equação (1),

$$\dot{Q}_{sol} = F \cdot A_{col} \cdot (W - D) [S - U_L \cdot (T_{solar} - T_{\infty})] \quad (1)$$

na qual F é a eficiência dos coletores, A_{col} é a área de coletor, W é o espaçamento dos tubos no coletor, D é o diâmetro dos tubos aletados no coletor, S é a taxa de radiação solar absorvida por unidade de área, U_L é o coeficiente de perdas no coletor (laterais, superiores e inferiores), T_{solar} é a temperatura da radiação solar incidente, e T_{∞} é a temperatura ambiente.

O efeito da refrigeração é quantificado pelo resfriamento produzido no evaporador. Neste sistema, uma massa de água é resfriada em cada ciclo e é quantificada por Q_{eva} ,

$$Q_{eva} = m_{eva} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

na qual m_{eva} é a massa de água armazenada no evaporador, c_p é o calor específico da água e ΔT é a diferença de temperatura na água entre o início e o final do resfriamento. O coeficiente de desempenho do refrigerador é dado por,

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_{sol}} \quad (3)$$

3.2. Ciclo de Refrigeração por Adsorção

O ciclo de refrigeração por adsorção é caracterizado por duas fases: fase de aquecimento com os processos de aquecimento / dessorção / condensação, e fase de resfriamento com processos de resfriamento / dessorção / evaporação.

O início do ciclo ocorre quando o adsorvente encontra-se à baixa temperatura e baixa pressão. A quantidade de massa adsorvida depende dos valores iniciais destas propriedades. O adsorvente é aquecido isostericamente, isto é com massa constante, e a pressão do sistema aumenta até atingir o valor de início de dessorção. A partir daí o aquecimento se dá a pressão constante; quando o adsorbato atinge uma dada temperatura máxima a dessorção cessa e o valor da massa desorvida depende dos valores de temperatura e da pressão de dessorção.

Ao final desta fase o adsorvedor é resfriado e a diminuição da temperatura do adsorvente induz a uma diminuição de pressão no circuito do refrigerador.

Na fase seguinte do ciclo, o resfriamento se dá a pressão constante e os processos de adsorção e evaporação realizam-se enquanto o adsorvente é resfriado. Como a remoção do calor no evaporador ocorre somente durante esse período e não ao longo de todo o ciclo, o regime de funcionamento do ciclo é intermitente.

3.3. Componentes do Refrigerador

Os principais componentes do ciclo de sorção são: um Adsorvedor, um Evaporador e um Condensador. O Adsorvedor é o componente principal do sistema de refrigeração, onde ocorrem os processos de adsorção / dessorção, ou seja, aprisionamento ou liberação do fluido refrigerante nas cavidades do material adsorvente (sílica gel). O adsorvedor possui um encamisamento que possibilita seu resfriamento com água, cuja alimentação é proveniente de uma fonte externa, esta operação é aplicada na fase de resfriamento do leito adsorvente. Na fase de regeneração do leito, o mesmo encamisamento é preenchido por ar, servindo de isolamento térmico para o Adsorvedor. O Condensador é o trocador de calor onde o fluido refrigerante na fase vapor proveniente do adsorvedor, é condensado. A construção do condensador permite os fluidos operarem em contra corrente. A troca de calor para a água de condensação pode ser utilizada em outras aplicações como a co-geração de energia, ou no aquecimento de um processo qualquer. O Evaporador é o componente responsável pela energia útil do sistema, ou seja, promove o efeito frigorífico que será utilizado na refrigeração ou no ar condicionado.

Para o aquecimento do Adsorvedor, foi utilizado um coletor solar de alto desempenho.

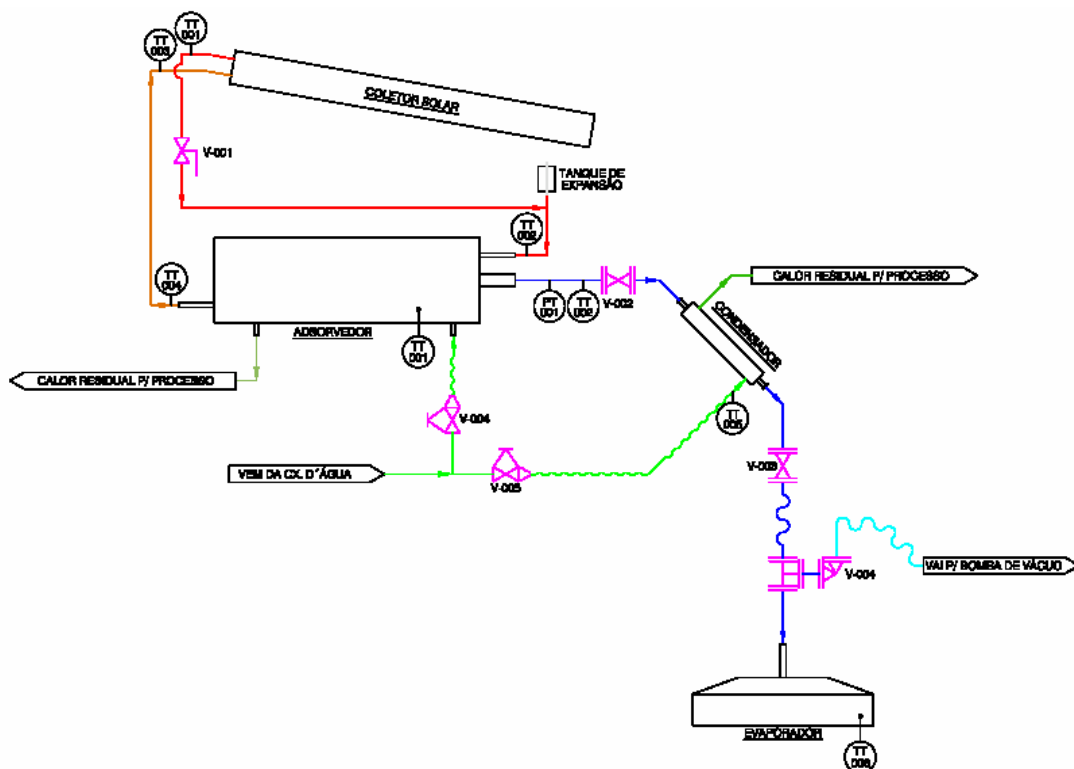


Figura 1. Diagrama esquemático do refrigerador.

3.4. Materiais de Construção do Refrigerador

O adsorvedor é formado por três cilindros concêntricos de aço inox e um outro de tela metálica do mesmo material, montado na parte mais interna do adsorvedor, e é responsável pela contenção da sílica gel e cuja malha permite apenas o escoamento do fluido refrigerante. O condensador consiste de um tubo de aço inox encamisado por onde circula a água de condensação. O evaporador tem a forma de tronco de pirâmide com base quadrada objetivando-se com isso, obter uma maior área superficial de água e desta forma provocar o efeito “flash”. O material empregado na fabricação do evaporador foi o aço inox.

Nas interligações dos componentes, adsorvedor, condensador e evaporador foram utilizados tubos flexíveis de aço inox e abraçadeiras por facilitarem a montagem do sistema. Na interligação do coletor solar com o adsorvedor foi utilizado tubos e acessórios de cobre.

3.5. Características do Par Adsorativo

O adsorvente empregado no experimento foi a sílica gel tipo A granular, com densidade aparente de 0,73 g/ml, e capacidade nominal de adsorção de 35% em peso a 90% de umidade relativa. O adsorbato (água) passou pelo processo de destilação antes de ser alimentado no sistema.

3.6. Instrumentos de Medição

Para as medições experimentais foram utilizados: - termopares do tipo K (níquel - cromo) com faixa de operação - 270 °C entre 1372 °C com saída analógica entre - 6,458 mV e 54,886 mV, fabricante Omega; - sensor de pressão com faixa de precisão entre 10^{-4} mBar e 10^3 mBar, saída analógica de 0 a 10V, precisão de 1 (uma) casa decimal fabricante Leybold modelo TTR91S; - coletor de dados fabricante Omega; Bomba de vácuo, fabricante Leybold, modelo D16B com pressão nominal final de 1×10^{-4} mBar e vazão de 10,0 l/h.

Foram monitoradas as seguintes variáveis: Temperatura – foram instalados sensores (termopar) no interior do adsorvedor, na superfície metálica do evaporador, nas tubulações de entrada e de saída do adsorvedor e na saída do condensador; Pressão – um sensor de pressão está instalado na tubulação de interligação do adsorvedor com o evaporador.

Todos os sensores estão conectados diretamente ao coletor de dados.

4. RESULTADOS

Os resultados experimentais estão representados na Figura (2) pelas curvas de temperatura do óleo na entra e na saída do coletor, a temperatura no interior do adsorvedor e a radiação solar global local.

Estes dados foram utilizados para determinação da vazão de circulação pelo termosifão e verificação da energia transferida para o adsorvedor, considerando a diferença média de temperatura entre a entrada e a saída do coletor de 43,1 °C, a radiação solar média de 916,5 W/m² para o intervalo de tempo correspondente a 3 h de funcionamento do circuito de aquecimento. Neste cálculo obteve-se: vazão mássica de circulação do óleo de 2,34x10⁻² kg/s e energia de 19,9x10³ kJ, disponível para promover a dessorção da sílica tipo A.

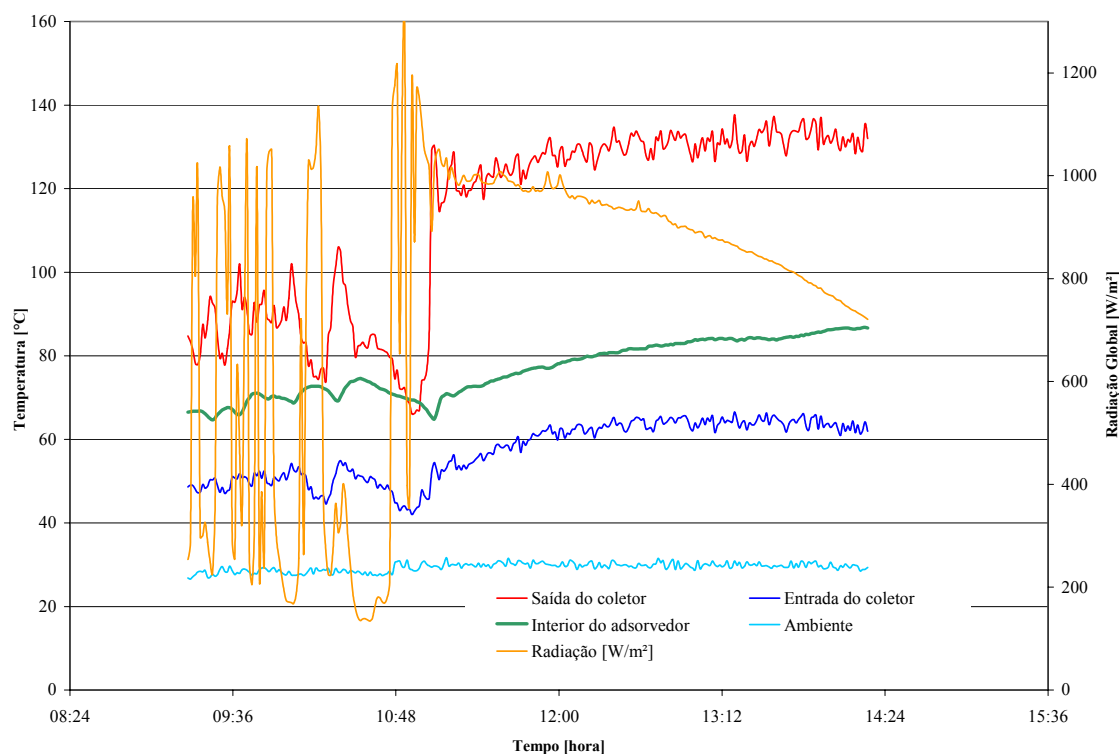


Figura 2. Temperaturas, na fase de aquecimento, na entrada e saída do adsorvedor e radiação incidente.

5. CONCLUSÃO

A continuidade dos trabalhos está voltada para o aprimoramento do refrigerador. Serão feitas alterações na configuração geométrica do circuito de aquecimento objetivando reduzir as perdas de calor para o ambiente. As medições experimentais comprovaram o funcionamento do circuito de termosifão, e o valor de energia obtido foi suficiente para promover a dessorção do adsorbato (água) das cavidades do adsorvente (sílica gel tipo A), na fase de aquecimento.

A tecnologia da adsorção para a refrigeração é muito promissora e a continuidade das pesquisas possibilitará o desenvolvimento do refrigerador, visando uma utilização futura deste equipamento principalmente em localidades sem eletrificação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento de projeto de pesquisa e de bolsas.

7. REFERÊNCIAS

- Chua, Hui T, Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water System, Singapore, 2002;
- Hauer, A.; Lavemann E., “Solid Adsorbents in open Sorption System for Thermal and Energetic Applications – Performance and Stability”, Proceedings of 6th Fundamentals of Adsorption, Presqui’ il de Giens, págs. 1089-1094, France, 1998;
- Medeiros, M. R. Q., Validação Experimental de Um Refrigerador de Térmico movido a Gás Natural, Fortaleza, 2003;
- Pino, L.; et al., “Composite Materials Based on Zeolite 4A for Adsorption Pumps”, Kluwer Academic Publishers, Adsorption vol. 3, págs. 33-40, 1993;
- Restuccia, G.; et al, “Performance of Sorption Systems using New Selective Water Sorbents”, ISHPC ’99, págs. 219-223,1999;
- Tchernev, D. I., “Solar Energy Application of Natural Zeolites”, Zeolite’76, págs. 479-488, Arizona, 1978;

Vasiliev, L. L.; et al., “Solar-Gas Solid Sorption Refrigerator”, Kluwer Academic Publishers, Adsorption 7, págs. 149 – 161, Netherlands, 2001.

8. DIREITOS AUTORAIS

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



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

ADSORPTION CYCLE REFRIGERATOR HEATED BY SOLAR ENERGY

Maria Eugenia Vieira da Silva, eugenia@ufc.br¹

Maria Elieneide Araújo, elieneide@gmail.com¹

Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros, marcelo@sol.les.ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Laboratório de Energia Solar e Gas Naturais – LESGN, Campos do Pici, s/n, bloco 718, CEP 60.455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil.

***Abstract:** Solar refrigeration is needed in the development of various activities and the lack of electricity makes it difficult to live in remote communities not connected to the grid. These communities would benefit if refrigeration equipment did not use electricity in its operation. This article presents the initial tests in the development of a new solar thermal refrigerator in sorption cycle with indirect heating. The components are; one adsorber, one condenser, one evaporator, and a solar collector. The selection of the pair Silica gel and water as the pair adsorbent-adsorbate took into consideration the application in air-conditioning and the fact that it is not toxic and not aggressive to the environment. The need of the heating and cooling phases in the adsorber created a necessity design a geometry that allowed the heat dissipation after heating phase to promote the cooling process. Thus, an indirect heating and cooling system was designed. The results show that the system can be used with silica gel and water as temperatures near 120°C were measured in a 3-hour period.*

***Keywords:** refrigerator, sorption, solar heating*