

SIMULAÇÃO DE UM REFRIGERADOR EM CICLO DE ADSORÇÃO MOVIDO A GÁS NATURAL POR CIRCUITO DE TERMOSSIFÃO

Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros¹
Lecimara Duque Estrada Coutinho¹
Maria Eugênia Vieira da Silva¹
Sílvia Teles Viana¹
José George Diógenes Holanda¹
eugenia@sol.les.ufc.br
silvinha_viana@yahoo.com.br
lesgn9@sol.les.ufc.br

¹Universidade Federal do Ceará [UFC]
Laboratório de Energia Solar e Gás Natural [LESGN]
Bloco 718, Campus do Pici, CEP: 60455-760, Fortaleza - CE.

Resumo. *Esse trabalho apresenta a determinação da vazão mássica de óleo que circula em sifão térmico em um refrigerador de sorção, a partir das variáveis: temperatura de entrada e saída do óleo; geometria do circuito, e das equações de balanço de energia e massa para a obtenção do volume de gás natural consumido e do coeficiente de desempenho. O refrigerador possui duas unidades: refrigeração e aquecimento. A primeira contém um condensador e um evaporador que se encontra na câmara fria. A segunda possui um queimador linear, um adsorvedor (contém o material adsorvente - zeólita 13X), dois trocadores de calor e um sistema de alimentação de gás, e estes interligam-se por uma tubulação formando o circuito de sifão térmico. O funcionamento do refrigerador é iniciado com a fase de aquecimento, o queimador é acionado para aquecer o óleo térmico através do trocador. Esse óleo transporta calor até o adsorvedor por diferença de densidade. No adsorvedor ocorre a dessorção, retirada do adsorbato (água) dos poros do adsorvente. Depois, o vapor se liquefaz no condensador, trocando calor com um fluxo de água concorrente, e depois escoar por gravidade para o evaporador, então o queimador é desligado e inicia a fase de resfriamento. As válvulas do circuito de aquecimento de óleo são fechadas e as do circuito de resfriamento são abertas. O óleo é resfriado no trocador (fonte fria), por meio de um fluxo de água concorrente e retorna para o adsorvedor (fonte quente). No circuito de refrigeração a pressão se reduz e ao atingir o ponto de saturação da água, no evaporador parte da água evapora e o restante se resfria formando água gelada ou gelo dependendo da aplicação requerida. O coeficiente de desempenho encontrado foi 0,22, para a vazão mássica de óleo encontrada de $6,12 \times 10^{-3}$ kg/s e um consumo de gás natural de 0,222 kg.*

Palavras-chave: *adsorção, refrigeração, gás natural.*

1. INTRODUÇÃO

A crise energética é um problema atual e impulsiona diversas pesquisas. Fontes de energias alternativas são cada vez mais utilizadas em diversos países. Fatores econômicos e ambientais devem ser levados em consideração na utilização dessas fontes de energia.

A refrigeração é muito importante em aplicações industriais, comerciais e domésticas. Os custos com climatização ambiental são bastante elevados em indústrias e estabelecimentos

comerciais. Nos refrigeradores tradicionais, uma das formas mais caras de energia, a energia elétrica, é transformada numa das formas mais baratas de energia, a energia térmica.

O ciclo de refrigeração por adsorção não necessita de bomba de líquido, pode utilizar fonte de energia alternativa e não utiliza fluidos de trabalho tóxicos ao meio ambiente.

Um refrigerador térmico movido a gás natural vem sendo desenvolvido no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural da UFC [LESGN-UFC] para conservação de alimentos, ou também, condicionamento de ar. A fonte térmica utilizada no acionamento do refrigerador é a queima do Gás Natural. O equipamento foi testado utilizando a zeólita 13X como adsorvente e a água como adsorbato.

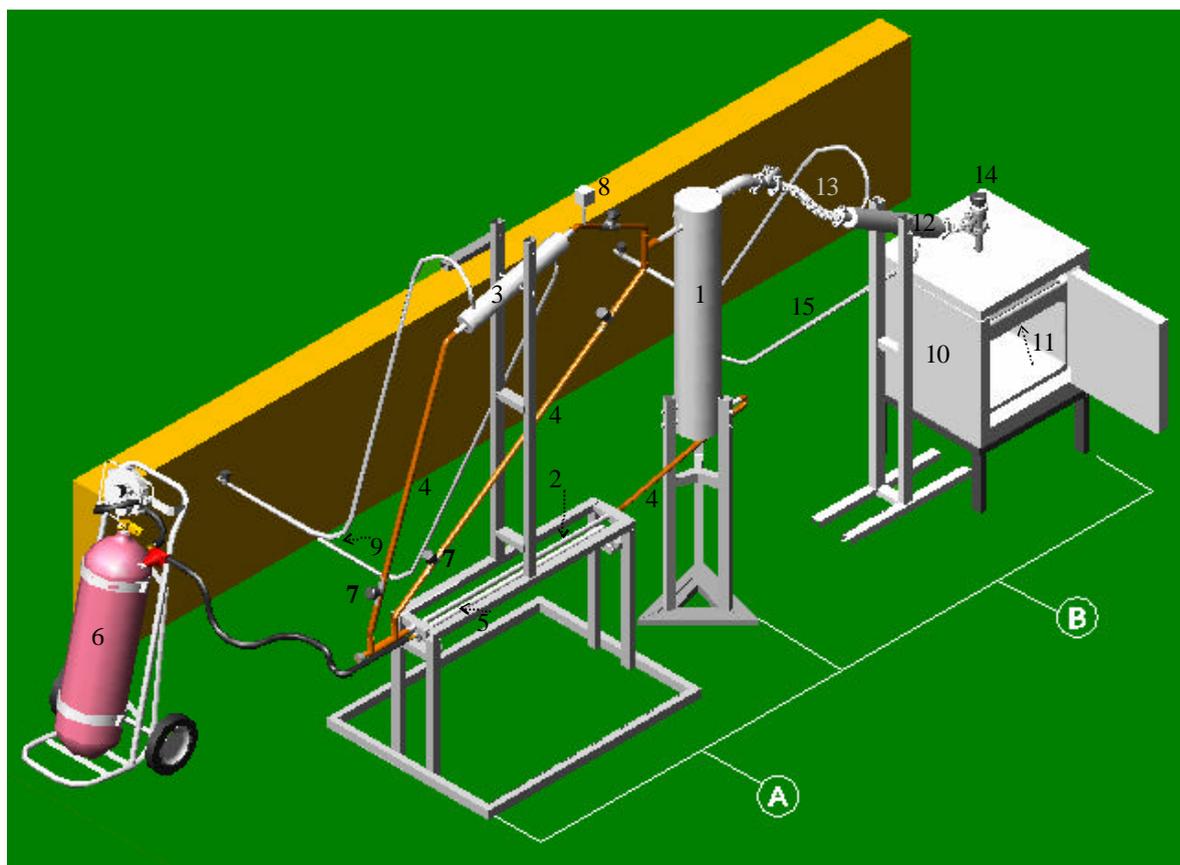
1.1. Funcionamento e Componentes do Refrigerador por ciclo de Adsorção

O refrigerador por ciclo de adsorção com aquecimento indireto possui dois circuitos: o de refrigeração e o de aquecimento (sifão térmico). O circuito de refrigeração é composto por um adsorvedor (parte interna leito poroso, material adsorvente), um condensador e um evaporador contido no interior do compartimento a ser refrigerado. O circuito de aquecimento possui um queimador linear (fonte quente), um adsorvedor (parte externa por onde escoo o fluido térmico, óleo), um trocador de calor (para arrefecimento do óleo na fase de resfriamento do ciclo de adsorção), e um sistema de alimentação de gás natural.

O refrigerador, testado no LESGN, com aquecimento direto (chama do gás em contato com o adsorvedor) alcançou temperaturas entre -4 a 7°C nas paredes do evaporador. Um sistema com aquecimento indireto está em fase de fabricação. Esse sistema possui duas unidades como já descrito anteriormente.

O funcionamento do refrigerador ocorre em duas fases: a de aquecimento e a de resfriamento. Durante a fase de aquecimento, o queimador é acionado e aquece o óleo térmico. Esse óleo transporta calor até o adsorvedor devido a diferença de densidade em escoamento natural. No adsorvedor ocorre a dessorção, retirada do adsorbato (água na forma de vapor) dos poros do adsorvente. Esse vapor flui até o condensador, onde se liquefaz devido a troca de calor com uma contra corrente de água a temperatura ambiente. Ao se liquefazer este escoo por gravidade para o evaporador. Após dessorção o queimador é desligado e inicia a fase de resfriamento. No circuito de refrigeração a válvula que separa o condensador do adsorvedor é fechada, e no circuito de aquecimento as válvulas que desviam o fluxo de óleo para o trocador de resfriamento de óleo são abertas. Durante o resfriamento o óleo resfria o adsorvedor e é resfriado através de um fluxo de água a temperatura ambiente no trocador de calor. Com o resfriamento do adsorvedor até a temperatura de adsorção do par utilizado força em paralelo a redução da pressão (pressão igual ou inferior a pressão de saturação do adsorbato). Quando o circuito atinge a temperatura e pressão de adsorção, a válvula que se encontra entre o adsorvedor e o condensador é aberta forçando a redução de pressão de todo o circuito de refrigeração de forma que o estado da água no evaporador atinja a saturação, onde parte da água evapora e parte da água se resfria formando água gelada ou gelo dependendo da aplicação requerida.

A Figura (1) apresenta o desenho esquemático do refrigerador térmico com aquecimento indireto a ser fabricado no LESGN.



Legenda 1: A) Unidade de Aquecimento e Resfriamento (1. Adsorvedor; 2. Trocador de calor (fonte quente); 3. Trocador de calor (fonte fria); 4. Circuito do óleo; 5. Queimador linear; 6. Tanque de alimentação de GN; 7. Válvulas; 8. Tanque de expansão; 9. Circuito da água)
B) Unidade de Refrigeração (1. Adsorvedor; 10. Câmara fria; 11. Evaporador; 12. Condensador; 13. Tubulação flexível; 14. Válvula para vácuo; 15. Circuito de água do condensador.)

Figura 1. Esquema do refrigerador térmico por ciclo de adsorção movido a gás natural com acionamento indireto em desenvolvimento no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural da Universidade Federal do Ceará.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho tem o objetivo a simulação numérica de um refrigerador por ciclo de adsorção térmica movido a gás natural com aquecimento indireto por circuito de sifão térmico. Os objetos específicos a serem apresentados são: desenvolvimento de procedimento numérico para a determinação da vazão volumétrica de óleo a circular no circuito de sifão térmico; da massa de gás natural necessária para acionar o refrigerador; das energias envolvidas nos processos e do coeficiente de desempenho [COP] do refrigerador.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi baseada nas equações de balanço de energia e de massa, para a determinação das seguintes características do funcionamento do equipamento a ser fabricado: vazão mássica de óleo no circuito de sifão térmico; massa de gás natural a ser consumida para determinada produção de gelo; coeficiente de desempenho do refrigerador; e as quantidades de calor envolvidas no processo, perdas para o meio externo (ambiente) e fornecida pela queima de gás natural.

Utilizando-se destas equações foi elaborado um procedimento numérico em linguagem Fortran, para simular o refrigerador térmico por ciclo de adsorção movido a gás natural com aquecimento indireto.

Os dados iniciais utilizados no procedimento foram as dimensões estipuladas para o circuito de sifão térmico e equipamento de refrigeração, as temperaturas a serem atingidas no interior do adsorvedor e as propriedades dos materiais utilizados.

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção foram utilizadas subrotinas elaboradas através de regressão de dados obtidos na literatura (Incropera, 1999) de características do ar e vapor da água tais como número de Prandtl, densidade, viscosidade, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico .

A resistência total de transferência de calor é calculada utilizando a resistência à condução do isolamento (lã de vidro) e da tubulação (cobre) e a resistência à convecção natural no escoamento externo as tubulações. Onde o coeficiente global de transferência de calor do sistema é expresso em função do inverso da resistência total a transferência de calor. Após a determinação do coeficiente global de transferência de calor, calcula-se o calor das perdas por transferência de calor, expresso pela Eq. (1)

$$Q_{pd} = U \cdot \pi \cdot D_{ext} \cdot C_{Eq,r} \cdot (T_f - T_i) \quad (1)$$

onde D_{ext} é o diâmetro externo da tubulação [m], $C_{Eq,r}$ é o comprimento equivalente reto total do circuito de sifão térmico [m], T é a temperatura do óleo [K] e os subscritos f e i significam final e inicial respectivamente.

A energia a ser vencida pelo óleo Q_{pot} é calculada pela Eq. (2):

$$Q_{pot} = m_{oleo} \cdot g \cdot h_{pot} \quad (2)$$

na qual m é a massa [kg], g é a aceleração gravitacional [m/s^2], h é a variação de deslocamento [m] e o subscrito pot indica a energia potencial a ser vencida pelo sifão térmico.

A energia relacionada às perdas por fricção $Q_{pd,fr}$ nas tubulações do sistema é dada pela Eq. (3):

$$Q_{pd,fr} = m_{oleo} \cdot g \cdot h_{fr} \quad (3)$$

na qual o subscrito fr indica fricção.

O calor necessário para o aquecimento das partes metálicas Q_{cu} é dado pela Eq. (4):

$$Q_{cu} = m_{cu} \cdot c_{p,cu} \cdot (T_f - T_i) \quad (4)$$

na qual c_p é o calor específico a pressão constante [J/kg.K] e o subscrito cu significa o cobre.

O calor necessário para o aquecimento do óleo Q_{oleo} é expresso pela Eq. (5):

$$Q_{oleo} = m_{oleo} \cdot c_{p,oleo} \cdot (T_f - T_i) \quad (5)$$

Foi elaborada uma sub-rotina, através de uma variação do procedimento para cálculo da eficiência do refrigerador por ciclo de adsorção movido a gás natural com aquecimento direto (Medeiros, 2003), calcula-se o calor de aquecimento das partes metálicas do adsorvedor, o calor de adsorção, o calor do condensador, massa de adsorvente e o calor de refrigeração útil do refrigerador com aquecimento indireto a partir da determinação da quantidade de gelo a ser produzida.

O calor a ser fornecido pelo queimador de gás natural $Q_{q,gn}$ é expresso pela Eq.(6) abaixo:

$$Q_{q,gn} = Q_{pd} + Q_{pd,fr} + Q_{cu} + Q_{oleo} + Q_{ads} \quad (6)$$

onde q indica o queimador de gás natural, gn indica gás natural, e ads indica o processo de adsorção.

O calor a ser fornecido pelo gás natural Q_{gn} é dado pela razão do calor fornecido pelo queimador e seu rendimento η , expresso na Eq. (7):

$$Q_{gn} = \frac{Q_{q,gn}}{\eta} \quad (7)$$

A Equação (8) mostra a expressão para o cálculo de massa de gás natural:

$$m_{gn} = \frac{Q_{gn}}{\rho_{gn} \cdot PCI_{gn}} \quad (8)$$

na qual PCI é o poder calorífico inferior [J/kg].

De acordo com a Norma NBR 13723-1 de 1999, considerando o queimador como de tipo rápido a potência média do queimador ($Pot_{q,gn}$) é de 3,0 kW, pode-se calcular o valor da vazão mássica de óleo no sifão térmico, através da Eq.(9),

$$m_{oleo} = \frac{Pot_{q,gn}}{c_{p,oleo} \cdot (T_f - T_i)} \quad (9)$$

na qual m_{oleo} é a vazão mássica do óleo [kg/s].

O cálculo do coeficiente de desempenho COP do refrigerador por ciclo de adsorção movido a gás natural com aquecimento indireto é dado pela Eq. (10):

$$COP = \frac{Q_{ref,util}}{Q_{q,gn}} \quad (10)$$

na qual $Q_{ref,util}$ é o calor útil de refrigeração.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos com a simulação numérica estão apresentados a seguir. Os dados iniciais de entrada utilizados no programa, elaborado em linguagem *Fortran* estão apresentados na Tab. (1). Os resultados são apresentados na Tab.(2): valores para as energias envolvidas nos processos, e na Tab.(3) os valores para a vazão mássica de óleo do sifão térmico, o tempo de duração da fase de aquecimento, o consumo de gás natural, o coeficiente de desempenho do refrigerador considerando apenas o calor de refrigeração útil [COP] e este somado ao calor dissipado pelos trocadores de calor como energia útil [COP'].

Tabela 1. Dados iniciais

	Valores
Temperatura inicial de dessorção [K]	353,00
Temperatura final de dessorção [K]	523,00
Temperatura inicial do óleo [K]	302,00
Temperatura final do óleo	523,00
Aceleração da gravidade [m/s^2]	9,81
Calor específico da água [J/kg.K]	4002,00
Calor específico do cobre [J/kg.K]	3975,00
Calor específico do gelo [J/kg.K]	2060,00
Calor específico do óleo [J/kg.K]	1953,19
Condutividade térmica da lã de vidro [W/m.K]	0,069
Condutividade térmica do cobre [W/m.K]	393,00
Densidade do cobre [kg/m^3]	8933,00
Densidade do gás natural [kg/m^3]	0,74
Densidade do óleo [kg/m^3]	942,90
Massa de gelo [kg]	5,00
Poder calorífico inferior do gás natural [J/m ³]	34.664.000,00
Rendimento do queimador de gás natural	0,63

Tabela 2. Energias envolvidas nos processos.

	Valores
Calor cedido pelo queimador [J]	10.300.000,00
Calor das perdas por troca de calor com o ambiente [J]	4.085,63
Calor das perdas por fricção [J]	1983,19
Calor de aquecimento das partes metálicas [J]	215.951,50
Calor de aquecimento do óleo [J]	3.840.015,00
Calor de adsorção [J]	2.489.536,16
Calor de refrigeração útil [J]	2.291.170,31
Calor das perdas devido a energia potencial a ser vencida [J]	129,46

Tabela 3. Resultados da simulação

	Valores
Vazão mássica do óleo [kg/s]	$6,12 \times 10^{-3}$
Massa de gás natural [kg]	0,222
Tempo do ciclo [s]	3464,35
COP	0,22
COP'	0,31

Os resultados apresentados foram calculados para uma produção média de 5kg de gelo por ciclo completo realizado. Onde a duração da fase de aquecimento do ciclo calculada fora de aproximadamente 1 hora.

5. CONCLUSÃO

Os resultados mostram que para uma produção de 5 kg de gelo por ciclo. Considerando que a fase de resfriamento tenha o mesmo tempo da fase de aquecimento, seria possível rodar o ciclo de adsorção por até 12 vezes por dia obtendo assim uma produção diária de aproximadamente 60 kg de gelo.

O coeficiente de desempenho do refrigerador obtido fora de 0,22. Considerando o calor dissipado no condensador como energia útil do sistema, o novo cálculo para o coeficiente de desempenho foi de 0,31. Isso para um consumo de aproximadamente de 220 g por ciclo.

Os resultados deste trabalho estão sendo utilizados para a fabricação de um protótipo do refrigerador que está sendo instalado no LESGN – UFC.

Este equipamento pode ser acoplado a dessalinizadores, fogões e outros que funcionem através de sifão térmico, onde compartilhariam o mesmo circuito de aquecimento e resfriamento de óleo.

O desenvolvimento de equipamentos utilizando fontes alternativas de energia é de suma importância. O desenvolvimento de equipamentos movido a gás natural contribuirá para a diversificação da matriz energética brasileira. O refrigerador térmico movido a gás natural pode ser instalado para conservação de produtos e alimentos em localidades que não tenham acesso a energia elétrica.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao CNPq – Brasil, por bolsa do programa PROSET-CTPetro e de produtividade em pesquisa, à Petrobrás, financiadora do projeto do Refrigerador em Ciclo Térmico Movido a Gás Natural e à Universidade de Ciências Aplicadas de Aachen, pela colaboração com o projeto.

7. REFERÊNCIAS

Incropera, F. P; Dewitt, D P., “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, 1992.

NBR 13723-1, “Aparelho doméstico de cocção a gás Parte 1: Desempenho e segurança”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1999.

Medeiros, M. R. Q., “Validação Experimental de um Refrigerador Térmico movido a Gás Natural”, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2003.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL SIMULATION OF A SORPTION REFRIGERATOR WITH INDIRECT HEATING BY A NATURAL GAS

Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros¹
Lecimara Duque Estrada Coutinho¹
Maria Eugênia Vieira da Silva¹
Sílvia Teles Viana¹
José George Diógenes Holanda¹
eugenia@sol.les.ufc.br
lesgn9@sol.les.ufc.br

silvinha_viana@yahoo.com.br

¹Federal University of Ceará. Campus of Pici. Bl. 718. Solar Energy and Natural Gas Laboratory. ZIP CODE 60455-760 – Fortaleza – Ceará - Brazil

Abstract. *This work presents a procedure to calculate the mass flow rate in a closed thermal siphon circuit. It also presents the coefficient of performance of a sorption refrigerator with indirect heating. The basic systems components are a heating unit (a linear burner, an adsorber (filled with porous material - zeolith 13X), two heat exchangers and a gas feeding tank) and a cooling unit (an adsorber, a condenser and an evaporator inside the cool chamber). The refrigerator operates in an intermittent cycle, with a heating phase: the burner heats the thermal oil directly, it carries heat to the adsorber by natural draining. In the adsorber, the desorption occurs, and the water is released from the adsorber as vapor, then, it is condensed in a heat exchanger by a water counterflow, then liquid water flows by gravity to the evaporator; and a cooling phase: the burner is set off, the oil is cooled in an exchanger, by another water counterflow and returns for the adsorber. In the cooling circuit the pressure drops down, when reaches water saturation pressure, part of the water in the evaporator evaporates and the other is cooled, making frozen water or ice depending on the application. The procedure uses the physical parameters of the thermal siphon circuit and the thermal properties of the working fluid (thermal oil) to numerically estimate the mass flow rate through these new components, which were designed for this application. Other system parameters, such as performance coefficient, were also calculated. The numerical procedure was developed in FORTRAN and allows the use of various parameters in the calculation. The results show that for this new designed refrigerator, the mass flow rate of oil was of $6,12 \times 10^{-3}$ kg/s, the performance was 0,22 and a natural gas consumption of 0,222 kg for a 5,0 kg of ice production.*

Keywords. *adsorption, refrigeration, natural gas.*