

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

GUSTAVO FERNANDES CRISOSTOMO SOARES, FRANCISCO FREDERICO DOS SANTOS MATOS,
MARCOS VENICIO SANTOS AGUIAR, STANLEY PRIMO FERREIRA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará,
Campus de Maracanaú

<gustavovw@hotmail.com>, <francisco.f.matos@gmail.com>
<marcos.venicio.mecanica@gmail.com>, <stanleyprimo@gmail.com>

DOI: 10.21439/conexoes.v10i5.1166

Resumo. A discussão acerca do uso de energias renováveis tem demandado inúmeras pesquisas na área, dentre elas destacam-se o uso de sistemas de refrigeração por absorção de vapor. Estes sistemas, inclusive, são apresentados como uma alternativa para o aproveitamento da energia solar, quando utilizados em equipamentos que usam essa energia para a transferência de calor. O presente trabalho relata o desenvolvimento de uma pesquisa que, através de princípios termodinâmicos, modela matematicamente o desempenho de um sistema de climatização por absorção de vapor. Essa modelagem foi implementada no software Engineering Equation Solver, utilizando balanço de massa, de energia e de concentração para equacionar cada componente do sistema. O algoritmo tem por objetivo a obtenção do coeficiente de desempenho, possibilitando avaliar parâmetros do sistema de refrigeração por absorção quando a energia solar é a fonte principal. Os resultados obtidos na simulação computacional são condizentes com as literaturas analisadas e mostram desempenho satisfatório do sistema proposto.

Palavras-chaves: Energia solar. Refrigeração por absorção. Coletor Solar. Avaliação de desempenho.

Abstract. The discussion about the use of renewable energy has required extensive research in the area; among them stand out the use of vapor absorption refrigeration systems. These systems, including, are presented as an alternative for the utilization of solar energy, when used in equipment that they use that energy to heat transfer. This paper describes the development of a research through thermodynamic principles, mathematically models the performance of a cooling system for vapor absorption. This model was implemented in the Engineering Equation Solver software, using mass balance, energy and concentration to equate each system component. The algorithm aims to obtain the coefficient of performance, making possible the evaluation parameters of the cooling system by absorption when solar energy is the main source. The results of the computer simulation are consistent with the literature analyzed and show satisfactory performance of the proposed system.

Keywords: Solar Energy. Cooling by absorption. Solar collector, Performance evaluation.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande incidência de energia solar durante todo ano, pelo fato de ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical (TIBA et al., 2000). A razão para isso é sua proximidade com a linha do equador.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL, 2008), a irradiação solar do Brasil é uma das mais altas do mundo, principalmente na região nordeste, onde os níveis de energia variam entre 5700 e 6100 Wh/m² dia. Embora ocorra essa grande incidência de energia solar no território brasileiro, não é notada uma massificação de tecnologias que aproveitem tal energia. Um dos principais motivos para esse pro-

blema é o fator econômico, pois sistemas que utilizam energia solar para geração de energia elétrica ou para transferência de calor ainda apresentam um custo elevado.

A solução para esse problema de custo seria a produção desses equipamentos em larga escala. Segundo Feitosa (2010), experiências de países como a Alemanha, Dinamarca e Espanha, mostraram que apesar da existência de barreiras financeiras, a adoção de fontes renováveis de energia é plenamente viável com a criação de programas bem estruturados de incentivos governamentais, lembrando que sua concepção exige uma mudança radical na forma de distribuição e consumo de energia. Como os sistemas de refrigeração estão na linha de frente entre os principais consumidores energéticos, uma importante contribuição, seria reduzir ao máximo o uso de energia elétrica dentro desses sistemas (VENTURINI; PIRANI, 2005).

Segundo Pereira (2006), no setor residencial os aparelhos de refrigeração e ar condicionado geram o maior consumo de energia elétrica, representando 33% do total. Uma redução de apenas 1% do consumo desses equipamentos de refrigeração residenciais representaria uma economia de cerca de 30 GWh/ano. Desta forma, percebe-se a oportunidade de ampliar o aproveitamento da energia solar em sistemas de refrigeração, diminuindo o uso de energia elétrica por sistemas que adotam largamente o uso de compressores de vapor. A possibilidade de transferir calor através do uso direto de energia primária, em particular energia solar, vai ao encontro de pesquisas de sistemas de refrigeração por absorção de vapor (EZZINE et al., 2004).

Por outro lado, no ciclo de refrigeração por absorção não se faz necessário o uso de um compressor, substituído por uma bomba hidráulica que consome menos energia. Na refrigeração por absorção utilizam-se basicamente dois fluidos: um refrigerante e um absorvente. Nesse trabalho adota-se a solução de água-amônia, onde a amônia faz o papel de fluido refrigerante e a água de fluido absorvente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ciclo de refrigeração por absorção

Entre os ciclos de refrigeração, os principais são o ciclo padrão por compressão de vapor e por absorção. O mais utilizado é o de compressão a vapor, que consiste em induzir mecanicamente a circulação de um fluido refrigerante em um circuito fechado, criando zonas de alta e baixa pressão para que o fluido absorva calor em um lugar e o dissipe no outro. O trabalho fornecido por um compressor é utilizado para elevar pressão e tem-

peratura de um fluido refrigerante na forma de vapor (STOECKER; JONES, 1985).

Representado na Fig. 1, o ciclo por compressão envia esse vapor com elevada entalpia para o condensador, onde grande parte do seu calor é rejeitado para um meio externo, condensando o refrigerante. O líquido condensado segue em direção a um dispositivo de expansão que diminui sua pressão, passando para uma mistura líquido-vapor a baixa pressão e temperatura. Esse fluido segue para o evaporador, onde retira calor do ambiente a ser refrigerado e vaporiza por completo para seguir ao compressor, onde reinicia o ciclo.

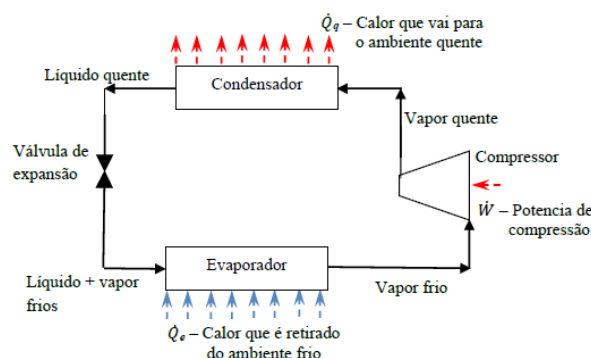


Figura 1: Representação de sistema de refrigeração por compressão a vapor.

Fonte: Adaptado de Stoecker e Jones (1985).

Todavia os sistemas de refrigeração por absorção utilizam energia térmica para produzir refrigeração ou aquecimento. Esses sistemas são compostos por dois fluidos, um absorvente na fase líquida é responsável por absorver o um fluido refrigerante na forma de vapor. Isso só é possível devido à afinidade química de alguns fluidos refrigerantes com absorventes, com os quais formam uma mistura homogênea com temperaturas de vaporização diferentes para cada substância.

Existem vários pares de refrigerantes e absorventes, sendo os mais utilizados os pares amônia/água e água/brometo de lítio (ABREU; HUKAI, 1999). Para que uma substância possa ser usada como refrigerante ela deve apresentar algumas características como: alto calor latente, moderada pressão de vapor, baixa temperatura de congelamento e baixa viscosidade. Já a substância absorvente, deve apresentar: baixa pressão de vapor e baixa viscosidade. Como resultado, a mistura deve apresentar: baixa toxicidade, alta afinidade entre absorvente e refrigerante e não apresentar fase sólida (CHEN; KIM; HEROLD, 1996).

O ciclo de absorção é composto pelos quatro processos ilustrados na Fig. 2, onde pode ser verificado que a solução, após ser aquecida no gerador, libera a amônia

em forma de vapor que entra no condensador. O condensador tem a função de dissipar uma parte do calor absorvido no gerador para o ambiente externo. Ao ceder calor para o ambiente externo a amônia condensará, formando uma solução líquida. É importante ressaltar que pode haver uma pequena quantidade de água retida nesse ponto, mas que não causará problemas para o processo. Por seguinte, o vapor de amônia passará por uma válvula de expansão, a válvula de expansão é um dos principais elementos do sistema de refrigeração de expansão direta. Este componente regula a passagem de fluido, fornece a diferença de pressão necessária entre o absorvedor e o gerador e fornece uma perda de pressão do refrigerante para que o mesmo baixe a temperatura e inicie o processo de recepção de calor no evaporador. Assim como o condensador, o evaporador é um trocador de calor. Tem a função de captar o calor do ambiente ao qual se deseja refrigerar, ou seja, é onde o sistema de refrigeração tem seu objetivo alcançado.

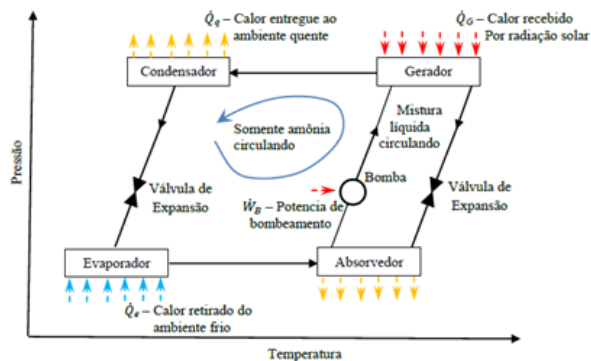


Figura 2: Representação de sistema de refrigeração por absorção.
Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2010).

Um sistema de refrigeração por absorção tem um funcionamento simples, podendo alcançar capacidade de refrigeração maior do que o sistema de compressão a vapor quando usadas outras fontes de energia, como calor residual de processos industriais, turbinas a gás ou vapor, sol ou biomassa, substituindo a eletricidade (ADEWUSI; ZUBAIR, 2004). Segundo Pereira (2006), o coeficiente de desempenho do sistema a absorção é menor do que o do sistema de compressão a vapor, sendo a relação de um para cinco ou mais, considerando as mesmas condições de funcionamento. No entanto, a energia proveniente do sol pode ser debitada da potência fornecida ao sistema. Especificamente no processo avaliado neste trabalho, a energia proveniente do sol é usada para aquecer a mistura de amônia e água no interior do gerador, ao ponto de liberar somente a amônia para o ciclo de refrigeração. A utilização desse sistema com coletores solares ocorre somente durante o

dia, quando há a presença de luz do sol.

2.2 Coletor solar térmico

Quando o objetivo é transferir calor proveniente do sol, utilizamos o coletor solar térmico. O termo é aplicado a painéis solares de água quente, mas também pode ser usado para instalações mais complexas tais como parabólicas solares, calhas solares e torres solares. Os coletores mais complexos são normalmente usados em centrais energéticas solares, onde o calor do sol é indiretamente usado para gerar eletricidade. Neste caso o coletor aquece a água, gerando vapor para acionar uma turbina ligada a um gerador elétrico (IEE, 2004).

O coletor solar converte a energia contida na radiação solar em forma de energia usável ou possível de armazenar. A energia solar chega sob a forma de radiações eletromagnéticas, desde ondas infravermelhas a ultravioletas. A energia solar que atinge a superfície da terra depende das condições atmosféricas assim como da localização e orientação da superfície, alcançando até em dias de céu limpo e com a superfície diretamente perpendicular aos raios solares (IEE, 2004).

O sistema de refrigeração estudado é composto por condensador, válvula de expansão termostática, absorvedor, evaporador e o gerador. Neste caso o gerador é do tipo um coletor solar plano, representado na Fig. 3. Este é conectado por tubulações de cobre a um reservatório, contendo a solução água-amônia, e esses fluidos são os responsáveis pelas trocas de calor nos componentes. O coletor solar plano deve estar sobre a incidência de raios solares na faixa entre 5700 e 6100 Wh/m²·dia. E, entretanto, parte dessa energia é perdida, pois o coletor de calor não consegue reter toda a energia térmica proveniente da radiação solar.



Figura 3: Representação de um coletor solar plano.
Fonte: (BAJPAI, 2012).

2.3 Equações de balanço

O balanço de energia estabelece que, para um determinado intervalo de tempo, o somatório dos fluxos de energia que entram no volume de controle seja igual ao somatório dos fluxos de energia que saem do mesmo. Caso o regime seja transiente, essa soma não será nula e resultará na variação da quantidade de energia armazenada pelo volume de controle durante o intervalo de tempo considerado (VENTURINI; PIRANI, 2005). As equações de balanço de massa, de concentração e de energia (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003) são descritas a seguir.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\frac{d(mC)}{dt} = \sum (\dot{m}_e \times C_e) - \sum (\dot{m}_s \times C_s) \quad (2)$$

$$\frac{d(mu)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum (\dot{m}_e \times h_e) - \sum (\dot{m}_s \times h_s) \quad (3)$$

Onde:

- m → massa;
- u → energia interna;
- t → tempo;
- \dot{m}_e e \dot{m}_s → taxas mássicas de entrada e saída;
- \dot{Q} → taxa de calor;
- \dot{W} → taxa de trabalho;
- C_e e C_s → concentração de entrada e saída;
- h_e e h_s → entalpia de entrada e saída.

2.4 Coletor de calor

O coletor de calor solar faz o papel de gerador no sistema de absorção aqui proposto. A quantidade de calor recebida pelo coletor é diretamente proporcional ao tamanho da sua área. Quanto maior a área de incidência solar, mais calor é absorvido, portanto, mais energia o sistema recebe. A área do coletor de calor é determinado pela Eq. 4.

$$A = \frac{\dot{Q}_g}{K \times S} \quad (4)$$

Onde:

- A → área da placa do coletor;
- \dot{Q}_g → taxa de calor recebida no coletor (gerador);

K → é uma constante que denota a eficiência da placa coletora, com valor de 0,85;

S → incidência solar média na superfície terrestre igual a 250 W/m².

2.5 Coeficiente de performance

O coeficiente de performance (COP) é fundamental na análise de sistemas de refrigeração, é uma classificação que facilita a comparação entre os diferentes tipos de equipamento. Portanto, quanto maior a eficiência energética ou o COP de refrigeração, maior será a economia no gasto energético.

Admitindo-se um ciclo de Carnot, onde todos os componentes do sistema são ideais, ou não possuem perdas, o COP de refrigeração pode ser estimado de acordo com as equações abaixo:

$$COP_{carnot} = \frac{\dot{Q}_e}{W} \quad (5)$$

$$COP_{carnot} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (6)$$

Onde:

- \dot{Q}_e → taxa de calor retirado do ambiente frio;
- W → potência utilizada no compressor;
- T_e → temperatura média no evaporador (temperatura fria);
- T_c → temperatura média do condensador (temperatura quente).

No ciclo por absorção, o COP é determinado pela relação entre a taxa de refrigeração, a potência fornecida à bomba e a taxa de adição de calor no gerador (STOECKER; JONES, 1985), mostrado na Eq. 7.

$$COP_{absor} = \frac{\dot{Q}_e}{W_b + \dot{Q}_g} \quad (7)$$

Onde:

- \dot{Q}_e → taxa de calor retirado do ambiente frio;
- W → potência utilizada na bomba;
- \dot{Q}_g → quantidade de calor recebida no coletor (gerador).

3 METODOLOGIA

Para produzir um sistema de refrigeração por absorção eficiente, primeiramente foi implementado uma bomba de líquido no sistema, pois a energia solar não fornece uma quantidade de calor suficientemente grande para

fazer com que o ciclo se mantenha sem o auxílio de uma bomba. No cálculo do coeficiente de desempenho, a potência de bombeamento foi considerada desprezível.

As equações de balanço de massa, concentração e energia foram usadas para determinar propriedades da solução de água e amônia, as quais possibilitaram o cálculo dos diversos pontos de estados do sistema em estudo. A simulação computacional do modelo foi realizada no software *Engineering Equation Solver*¹ (EES) utilizando as equações apresentadas.

Na simulação utilizou-se uma biblioteca externa no programa EES, que dispõem de funções próprias para o par solução água-amônia. Foi utilizada a função CALL NH₃H₂O do programa, onde necessita de três parâmetros de entrada: temperatura, título e concentração. Com isso, podemos obter vários valores de saída como a entalpia, entropia, pressão e volume específico.

4 RESULTADOS

A partir da simulação do modelo no EES, foram obtidos os valores de troca de calor no condensador, evaporador, gerador, as pressões no gerador e absorvedor, e valores de título em massa para a água e amônia, apresentados na Tab. 1.

Tabela 1: Resultados

Parâmetros	Valor	Unidade
Fluxo de calor no gerador	4,7	kJ/s
Fluxo de calor no condensador	1,4	kJ/s
Fluxo de calor no evaporador	1,3	kJ/s
Fluxo energético no absorvedor	4,494	kJ/s
Capacidade de refrigeração	9000	BTU/h
Área do coletor de calor	22,12	m ²
Pressão no gerador	16,63	Bar
Pressão no absorvedor	0,1443	Bar
Coeficiente de desempenho	0,271	–

Com a análise dos dados, observa-se que o sistema de refrigeração por absorção possui somente dois níveis de pressão: 16,63 Bar e 0,1443 Bar. O fluxo de calor no evaporador (calor retirado do ambiente que se deseja resfriar) apresentou valor satisfatório, mesmo obtendo-se um COP de 0,271, que é relativamente baixo. Porém é importante lembrar que a energia solar é uma fonte gratuita de energia, e segundo Feitosa (2010), com pesquisas na área, pode se ter uma redução dos custos para captá-la, transformá-la e armazená-la.

A área do coletor solar apresentou um valor de 22,12 m², para conseguir absorver uma quantidade de

calor em torno de 4,7 kJ/s pelo gerador. Esta dimensão é relativamente pequena, ocupando pouco espaço para a instalação desse sistema.

5 CONCLUSÕES

O sistema de refrigeração por absorção tem o COP diretamente relacionado com a quantidade de calor fornecida para o gerador do sistema. Assim, quanto mais intensa for a fonte de calor, melhor será seu desempenho. Os resultados obtidos no EES corroboram esse fato. Embora o COP do sistema de absorção seja inferior ao de sistemas por compressão a vapor, o projeto mostra-se viável, pois os resultados obtidos por simulações computacional — COP, área do coletor, pressões no gerador e absorvedor — apresentaram resultados satisfatórios. Outro ponto importante é a viabilidade da construção de um protótipo, visto que além do seu desempenho satisfatório, ele promoverá a menor utilização de energia elétrica, promovendo a conservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. F. de; HUKAI, R. Y. *Sistema de refrigeração por absorção intermitente: concepção, dimensionamento, construção, ensaio e considerações econômicas*. São Paulo: Programa Interunidades de Pós-graduação e energia da Universidade de São Paulo, 1999.
- ADEWUSI, S.; ZUBAIR, S. M. Second law based thermodynamic analysis of ammonia–water absorption systems. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 45, n. 15, p. 2355–2369, 2004.
- ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.
- ARAÚJO, J. J. P. d. et al. Simulação de uma unidade de refrigeração por absorção usando o par água-amônia nos regimes permanente e transiente. Universidade Federal da Paraíba, 2010.
- BAJPAI, V. Design of solar powered vapour absorption system. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2012. v. 3, p. 4–6.
- CHEN, J.; KIM, K.; HEROLD, K. Performance enhancement of a diffusion-absorption refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 208–218, 1996.
- EZZINE, N. B.; BARHOUMI, M.; MEJBRI, K.; CHEMKHI, S.; BELLAGI, A. Solar cooling with the

¹© 2015 F-Chart Software, Programa de solução de equações gerais.

absorption principle: first and second law analysis of an ammonia-water double-generator absorption chiller. *Desalination*, Elsevier, v. 168, p. 137–144, 2004.

FEITOSA, P. H. A. Energia solar no brasil. *Jornal Valor Econômico, São Paulo*, v. 10, p. A12, 2010.

IEE. *Energia solar térmica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação*. Bruxelas: Europe Union, 2004.

PEREIRA, M. V. A. *Análise exergética experimental de uma unidade de refrigeração por absorção de 5 TR movida a gás liquefeito de petróleo (GLP) e/ou gases de exaustão*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2006.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

TIBA, C. et al. *Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados solarimetricos*. 2000.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. *Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial: manual prático*. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. J. *Fundamentos de termodinâmica*. São Paulo: Edgar Blücher, 2003.