

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR ABSORÇÃO ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR COM FUNCIONAMENTO CONTÍNUO

Suellen Cristina de Sousa Alcântara, s.alcaantara@gmail.com¹

Ana Livia Formiga Leite, analiviafl@yahoo.com.br¹

Kléber Lima César, kleberneue3@gmail.com¹

Danilo Cesar Rodrigues Azevedo, danilo.azevedo@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí, Campus Ministro Petrônio Portela, 64049-550, Teresina – PI, Brasil

Resumo: Este trabalho tem por objetivo modelar um sistema de absorção alimentado por um coletor solar. Para obter um resfriamento contínuo durante todo o dia, o sistema é equipado com um tanque de armazenamento de frio (água gelada). O fluido refrigerante utilizado é o par água-brometo de lítio. A carga de resfriamento foi estimada para cumprir os requisitos de resfriamento de uma residência localizada na cidade de Teresina-PI. Realizou-se uma análise termodinâmica do ciclo de absorção através do software EES (Engineering Equation Solver®). O sistema possui um coeficiente de desempenho (COP) satisfatório para ciclos de absorção alimentados por energia solar, e necessita de uma grande área de coletor solar e de um tanque de armazenamento pequeno com isolamento.

Palavras-chave: Climatização, Absorção, Energia Solar, Funcionamento contínuo, Refrigeração.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, o Brasil enfrentou uma crise energética com fortes reflexos nas contas de luz. Uma das razões dessa crise tem sido a falta de chuvas e o consequente desabastecimento das hidrelétricas. O Brasil é bastante dependente dessa fonte de energia, com cerca de 95% da matriz energética proveniente das hidrelétricas (Araújo, 2010). Mesmo com esse cenário, possuir vários condicionadores de ar em casa é uma realidade em todo o Nordeste, incrementando, assim, os custos com energia. Por conta disso, a energia solar pode ser utilizada como fonte alternativa para mover um sistema de condicionamento de ar.

Um dos sistemas que podem utilizar energia solar são os de ciclos por absorção e podem ser movidos tanto por células fotovoltaicas como por coletores solar, sendo mais vantajoso o uso de coletores solares (Al-Ugla *et al.*, 2015). O sistema por absorção, basicamente, substitui o compressor por um dispositivo térmico, composto por um absorvedor, por um gerador, por um trocador de calor e por uma bomba.

Há um desafio para o uso de energia solar para o condicionamento do ar. Como de noite não há sol, não há geração de energia. Para conseguir climatizar uma residência ininterruptamente, é necessário instalar um sistema de armazenamento que possa garantir que o sistema funcione durante a noite. O armazenamento pode ser de calor, de frio ou de refrigerante (Said *et al.*, 2012). Neste trabalho, será realizada a modelagem termodinâmica de um ciclo de absorção com armazenamento de frio.

Comparado com as demais técnicas, o armazenamento de frio se torna bastante interessante visto que, no armazenamento refrigerante é necessário integrar outro sistema para manter os níveis de refrigerante dentro de limites aceitáveis no absorvedor e há a dificuldade de manter o controle do sistema no armazenamento. No armazenamento de calor, por sua vez, o maior problema está relacionado a perda de calor para a área circundante. Ward e Lof (1975) relatam que a perda de calor em um dia pode chegar a 2h de operação do sistema. Além disso, seria necessário um grande volume de água quente armazenada para suprir o sistema quando a insolação não fosse o suficiente para ocorrer a dessorção no gerador.

O objetivo deste trabalho é realizar uma modelagem matemática, por meio da Primeira Lei da Termodinâmica com aplicações da lei de conservação da massa e das espécies de um ciclo de absorção utilizando o par água -brometo de lítio

alimentado por um coletor de energia solar e com um tanque de armazenamento de frio para um condicionamento ininterrupto de uma residência.

A modelagem será feita por meio do *software* EES (*Engineering Equation Solver*®) e será realizada com base nos parâmetros da cidade de Teresina - PI. Devido ao seu posicionamento geográfico, com 05° 05' 21" S e 042° 48' 07" W, Teresina possui um grande potencial energético em relação à energia solar, visto que há alta incidência solar durante quase todo o ano.

2. SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR ABSORÇÃO

O ciclo de absorção utiliza dois processos para transferir calor da região de baixa temperatura para a região de alta temperatura, absorção e dessorção (Araújo, 2010). O fluido de trabalho desse sistema é uma solução binária constituída por um refrigerante e um absorvente.

Durante o processo de absorção, o fluido absorvente (brometo de lítio) se combina com o refrigerante (água) havendo transferência de calor para uma região de temperatura intermediária. Durante o processo de dessorção, há fornecimento de calor para o ciclo separando o refrigerante e a solução absorvente devido à diferença de temperaturas de evaporação das substâncias (Araújo, 2010). Stoecker e Jones (1985) relatam que esse tipo de sistema é conhecido como ciclo operado a calor, devido ao seu maior custo de operação ser associado com o fornecimento de calor necessário para separar o refrigerante do absorvente no gerador.

O sistema de absorção tem essencialmente calor como insumo energético, uma vez que a energia consumida pela bomba de solução (trabalho de bombeamento) é muito menor que as quantidades de calor envolvidas nos trocadores de calor de massa, podendo até ser desprezada em análises simplificadas (Fig.1). Desta forma, podem ser identificadas duas entradas de calor no sistema, a saber, no gerador e no evaporador e dois rejeitos térmicos no condensador e no absorvedor (Guimarães, 2011).

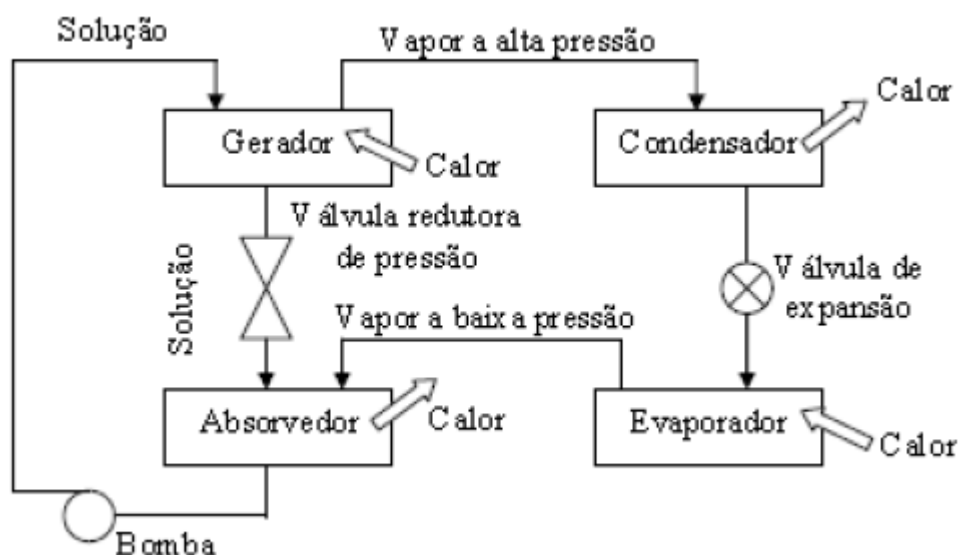


Figura 1. Unidade de absorção de simples efeito de Stoecker e Jones (1985).

O ciclo de absorção é composto por, basicamente, quatro processos, vaporização do refrigerante no evaporador através da troca de calor com o ambiente a ser climatizado seguido pela absorção do refrigerante pela solução absorvente no absorvedor. Em seguida, tem-se a dessorção do refrigerante no gerador e condensação do refrigerante com mudança de fase no condensador. As válvulas utilizadas são responsáveis pela expansão do refrigerante vindo do condensador e a redução da pressão da solução binária fraca em refrigerante vinda do gerador.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 2 apresenta o esquema do ciclo estudado. Utiliza-se um coletor solar que transforma a radiação solar em calor para fornecer ao gerador para separar o refrigerante do absorvente iniciando assim o ciclo de absorção. A temperatura do gerador depende da quantidade de calor produzido nos coletores solares. No entanto, uma temperatura mínima de 80°C deve ser mantida para proporcionar um funcionamento eficiente do refrigerador (Praene *et al.*, 2011).

No evaporador, o refrigerante recebe calor do espaço refrigerado e da água do tanque de armazenamento. Nesse tipo de sistema, o objetivo é resfriar a água do tanque de armazenamento durante as horas de alta insolação. Assim, a água gelada acumulada pode ser posteriormente direcionada para o espaço refrigerado, atendendo os requisitos de conforto térmico da residência nos períodos de baixa ou de nenhuma insolação. Dessa forma o sistema é capaz de fornecer um resfriamento ininterrupto (Al-Ugla *et al.*, 2015).

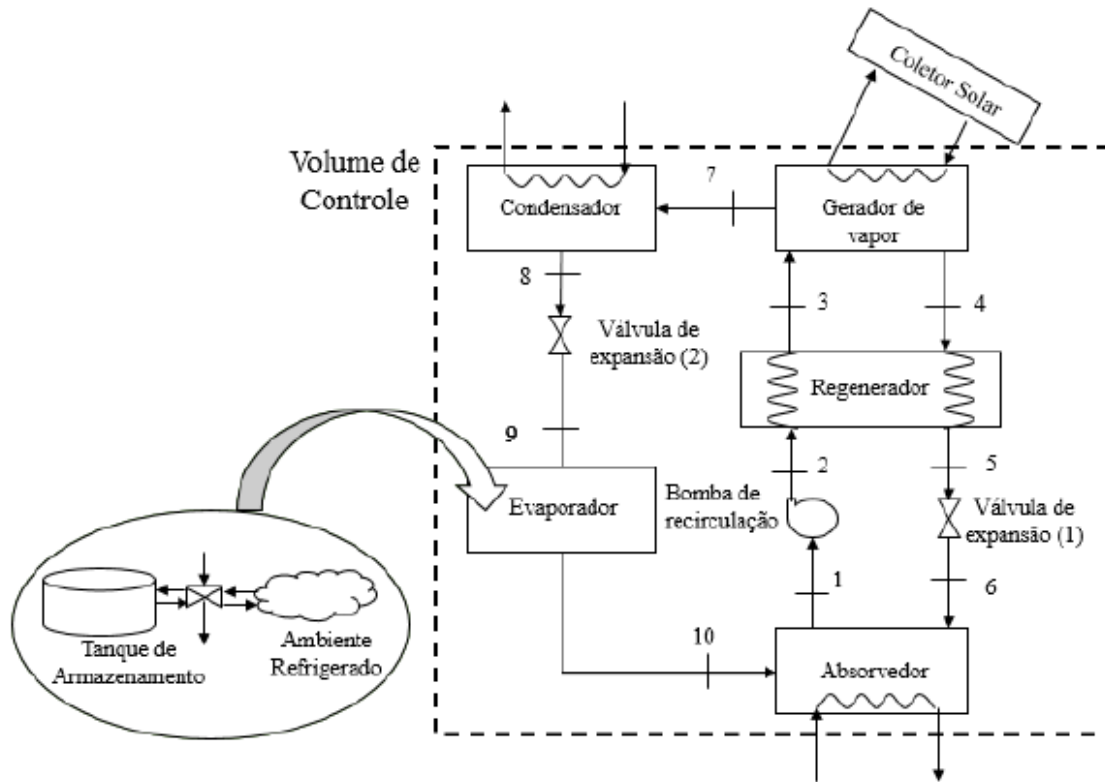


Figura 2. Esquema do ciclo de climatização solar com funcionamento contínuo elaborado pelos autores.

O tanque de armazenamento de frio tem uma baixa taxa de ganho de calor, pois a diferença de temperatura entre o tanque e seus arredores é pequena, principalmente se comparados com a estratégia de armazenamento de calor. Além disso, se o tanque de armazenamento fosse instalado perto do espaço refrigerado, a perda de calor seria menor (Li e Sumathy, 2000).

As vantagens dessa estratégia de armazenamento estão ligadas principalmente aos componentes do sistema operarem apenas de dia, causando menos desgastes, e o fato de não necessitar de um tanque muito grande para o armazenamento de frio (Al-Ugla *et al.*, 2015).

4. MODELAGEM DO SISTEMA

4.1 Análise energética

A modelagem do sistema de condicionamento de ar por absorção foi realizada através do software *Engineering Equation Solver®* (EES), utilizando a equação da primeira lei da termodinâmica, aplicando o balanço de energia (Eq. 1), o balanço de massa (Eq. 2) e a conservação das espécies (Eq. 3), considerado um volume de controle para cada componente do sistema de refrigeração por absorção com armazenamento de frio, facilitando assim a análise do sistema:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (2)$$

$$\frac{dmx_{vc}}{dt} = \sum_{in} \dot{m}x - \sum_{out} \dot{m}x \quad (3)$$

onde, dE/dt é a taxa de energia trocada no tempo t , $\dot{Q}$ é a taxa de calor transferido no tempo t e $\dot{W}$ é a taxa de trabalho no tempo t , dm/dt é a variação de massa no tempo t , $\dot{m}_{in,out}$ taxa de massa fluido que entra e sai dos equipamentos e x é a concentração de brometo de lítio na solução (Moran e Shapiro, 2006).

Para simplificar a formulação e a consequente implementação do modelo, foram assumidas as seguintes condições simplificadoras:

- Operação em regime estacionário;
- As variações de energia cinética e potencial são desprezíveis;
- As perdas de calor para o meio são desprezíveis;
- As válvulas de expansão são adiabáticas;
- Somente refrigerante puro passa pelo condensador e evaporador;
- O refrigerante na saída do condensador e evaporador é saturado;
- A solução de brometo de lítio tem condição de equilíbrio nas saídas do absorvedor e do gerador de vapor

No cálculo do calor recebido pelo evaporador ($\dot{Q}_{\text{evaporador}}$), consideram-se as parcelas recebidas do tanque de armazenamento e do espaço refrigerado. Para isso tem-se uma relação entre a carga necessária para o resfriamento do espaço desejado ($\dot{Q}_e$), que é o calor recebido do ambiente refrigerado, o tempo de uso diário do sistema (24h) e quantidade de horas solares disponíveis para a produção calor a partir da energia solar ($\text{Horas}_{\text{solares}}$). Essa relação pode ser vista na Eq. (4).

$$\dot{Q}_{\text{evaporador}} = \frac{\dot{Q}_e \cdot 24}{\text{Horas}_{\text{solares}}} \quad (4)$$

Finalizando a análise de primeira lei do sistema, o COP (coeficiente de performance) é calculado pela razão entre a taxa de refrigeração, $\dot{Q}_{\text{evaporador}}$, e a soma da taxa de adição de calor, $\dot{Q}_{\text{gerador}}$ e o trabalho de bomba $\dot{W}_{\text{bomba}}$ (Eq.5).

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{\dot{Q}_{\text{gerador}} + \dot{W}_{\text{bomba}}} \quad (5)$$

4.2 Tanque de armazenamento

Para o dimensionamento do tanque de armazenamento é necessário primeiramente calcular a massa de água gelada armazenada ($m_{\text{armazenado}}$). Segundo El-Shaarawi e Al-Ugla (2016), esta massa pode ser obtida pela Eq. (6):

$$m_{\text{armazenado}} = \frac{\dot{Q}_{\text{armazenado}} \cdot 3600 \cdot (24 - \text{Horas}_{\text{solares}})}{h_{10} - h_{10f}} \quad (6)$$

onde, h_{10} é a entalpia de vapor refrigerante na saída do evaporador, e h_{10f} é a entalpia de refrigerante líquido no tanque de armazenamento. A taxa de calor armazenado, $\dot{Q}_{\text{armazenado}}$, é a diferença entre o calor do evaporador e a carga de resfriamento do sistema.

O volume do tanque depende diretamente da massa específica da água (ρ) na temperatura e pressão da água gelada, e pode ser calculada pela Eq. (7):

$$V = \frac{m_{\text{armazenado}}}{\rho} \quad (7)$$

4.3 Coletor Solar

Para fornecer o calor necessário para ocorrer a dessorção no gerador, foi utilizado um coletor de placa plana. A área (A_c) do coletor necessária foi calculada pela Eq. 5, e depende da eficiência do coletor, η_c , da irradiância solar do local de aplicação do sistema, I , e da taxa de adição de calor que é o calor fornecido ao gerador.

$$A_c = \frac{\dot{Q}_{\text{gerador}}}{I \cdot \eta_c} \quad (5)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema foi modelado para atender as exigências de conforto térmico de uma casa situada na cidade de Teresina-PI que utilize condicionamento em 2 quartos, 1 sala, com ar condicionados de 12.000, 18.000 e 9.000 Btus/h, respectivamente. Assim, o calor retirado do ambiente climatizado será igual a 15,83kW ($\dot{Q}_e$).

Para a cidade de Teresina – PI (05° 05' 21" S e 042° 48' 07" W) serão adotados os seguintes parâmetros iniciais:

- I. Possui média anual de aproximadamente 7,5 horas solares diárias (CRESSEB, 2016)
- II. Irradiância média de aproximadamente 732 W/m² (CRESSEB, 2016)

Kalogirou (2004) relacionou a eficiência de diversos tipos de coletores e a diferença entre a temperatura do fluido que entra no coletor (T_i) e a temperatura do ambiente (T_f). Os resultados podem ser vistos na Fig. 3. Utilizando o gráfico gerado a eficiência do coletor de placa plana (FPC) solar será de aproximadamente 50%.

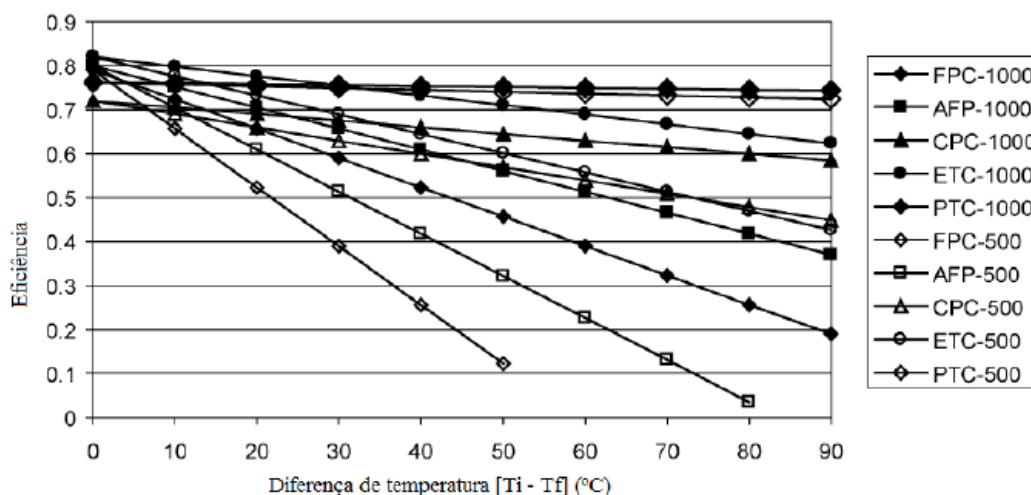


Figura 3. Eficiência dos coletores solares a dois níveis de irradiância, 500 W/m² e 1000 W/m², adaptado de Kalogirou (2004).

Os outros parâmetros de entrada, mostrados na Tabela 1, são baseados no trabalho de Herold *et al.* (1996)

Tabela 1. Parâmetros de entrada para o modelo computacional do sistema de absorção proposto.

PARÂMETROS DE ENTRADA	
Temperatura da solução forte em refrigerante na saída do absorvedor, T_1	32,7 °C
Temperatura da solução fraca em refrigerante na saída do gerador, T_4	89,9 °C
Pressão alta do ciclo	7,445 kPa
Pressão baixa do ciclo	0,673 kPa
Efetividade do regenerador	0,64

Na Tabela 2, são mostrados os resultados da simulação computacional para cada ponto do sistema, representado na Fig. 2, nessa tabela T é temperatura, P é pressão, X é concentração, h é entalpia, $\dot{m}$ é fração mássica, q é título.

Tabela 2. Propriedades relativas ao sistema de absorção proposto

PONTOS	PROPRIEDADES					
	T (°C)	P (kPa)	X (%)	h (kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)	q
1	32,7	0,673	56,7	85,2	0,2351	-
2	32,7	7,445	56,7	85,2	0,2351	-
3	63,3	7,445	56,7	147,0	0,2351	-
4	89,9	7,445	62,5	222,5	0,2134	-
5	53,3	7,445	62,5	154,5	0,2134	-
6	44,7	0,673	62,5	154,5	0,2134	-
7	77,0	7,445	0,0	2643,7	0,0217	-
8	40,2	7,445	0,0	168,2	0,0217	0,0
9	1,3	0,673	0,0	168,2	0,0217	0,065
10	1,3	0,673	0,0	2503,0	0,0217	1,0

Com a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica e da Lei da Conservação das Massas e das Espécies, obtiveram-se as taxas de calor trocadas para o ambiente e pelo ambiente de cada componente do ciclo em estudo. Além disso, foram obtidos o trabalho da bomba e o coeficiente de desempenho do sistema (COP). Através desses dados, foi possível calcular a área necessária do coletor solar para que houvesse geração de energia suficiente no gerador para climatizar uma residência durante o dia e durante a noite. A massa de água gelada que deve ser armazenada para que haja o condicionamento do ar na casa ao longo das 16,5 horas do dia em que não há incidência solar suficiente também foi calculada. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tab.3.

Tabela 3. Resultados da análise energética, do dimensionamento do tanque de armazenamento e coletor solar do ciclo de absorção com o par água/brometo de lítio

ANÁLISE TERMODINÂMICA	
COP	0,721
Calor liberado para o gerador	70,282 kW
Calor cedido pelo condensador	53,709 kW
Calor fornecido para o evaporador	50,656 kW
Calor provido pelo absorvedor	67,23 kW
Trabalho da bomba	0,000983 kW
Massa de água gelada armazenada	828,3 kg
Volume de água gelada armazenada	0,8284 m ³
Área do coletor	181,8 m ²

O valor do COP foi o esperado para sistemas de climatização por absorção alimentado por energia solar. O trabalho da bomba, único consumo de energia elétrica do ciclo de absorção, é bastante inferior ao trabalho exigido por um compressor em ciclo por compressão a vapor. Com esses dados, verifica-se a grande economia de energia elétrica devido à implantação de um sistema movido por um coletor solar.

Durante as 7,5 horas de sol, é necessária a produção de frio para suprir a carga térmica ao longo do dia e para resfriar os 828,3 kg de água do tanque de armazenamento para efetuar a climatização da residência durante as 16,5 horas que o coletor não fornece energia para o gerador.

Para isso, uma grande área de coletor é indispensável para absorver a energia solar. Isso ocorre por ser necessário um alto valor de calor liberado para o gerador e principalmente pela baixa eficiência do coletor solar plano.

Ademais, com os resultados, pode ser analisado como a quantidade de calor cedida para o gerador pelo coletor solar varia conforme a carga térmica solicitada pela residência. O sistema foi modelado para suprir a carga térmica máxima durante as 24 horas. Entretanto, essa é uma situação crítica. Isso implica na variação de energia requerida pelo gerador, conforme analisado na Fig.4.

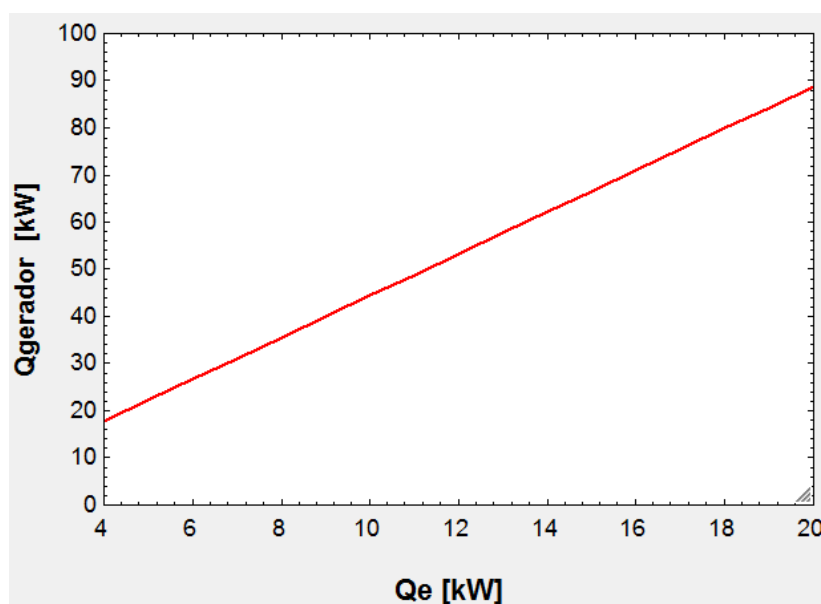


Figura 4. Quantidade de calor necessária ao gerador variando com a quantidade de calor requerida pelo ambiente a ser refrigerado.

No gráfico, é possível verificar como a quantidade de calor cedida ao gerador aumenta de forma linear ao aumento da carga térmica. Analogamente a essa situação, a área do coletor solar também é variável com a carga térmica da residência, ou seja, para residências em que a necessidade de resfriamento é menor, a área de coletor solar também será menor, como pode-se notar no gráfico abaixo (Fig.5)

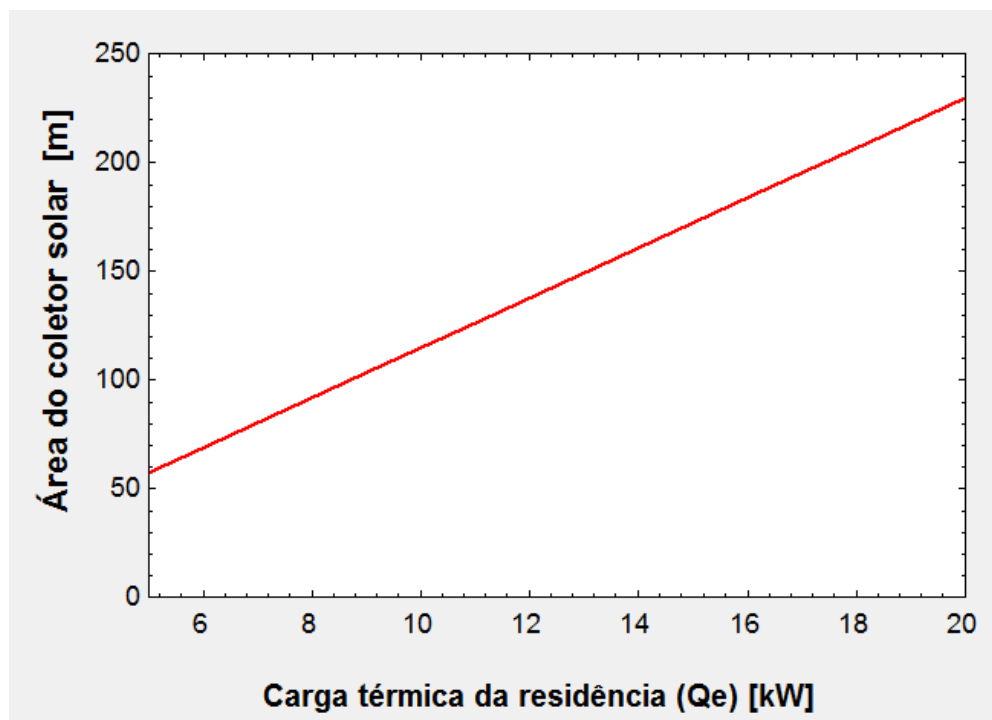


Figura 5. Relação entre a área do coletor solar e da carga térmica

Outros fatores que influenciam na área do coletor solar são as horas solares da cidade em que o sistema está sendo implementado e o tempo que esse sistema funcionará por dia. Quando a cidade possuir um maior período de alta insolação, menor será a área do coletor. Da mesma forma, quando for requisitada uma menor quantidade de horas para o resfriamento da residência, menor será a área do coletor solar. A Figura 6 mostra essa relação com as horas solares variando de 6 à 10h para os seguintes tempos de uso do sistema: 24, 20 e 16h.

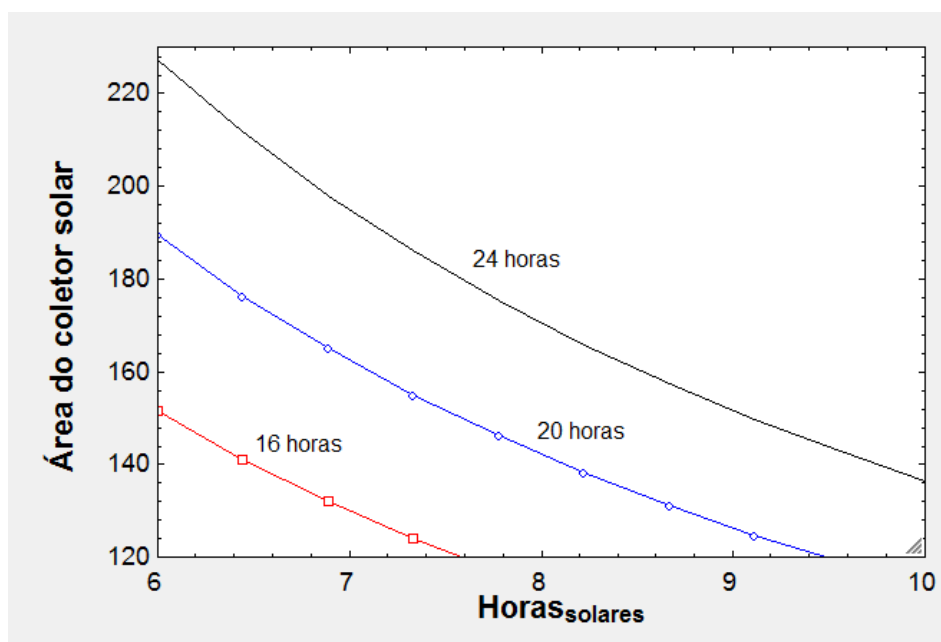


Figura 6. Relação entre a área do coletor solar, as horas solares e o tempo de uso do sistema de absorção

6. CONCLUSÃO

Os sistemas de climatização por absorção alimentado por energia solar com armazenamento de frio são uma ótima opção para substituir a alta demanda de energia elétrica, consumida atualmente pelos sistemas de condicionamento de ar por compressão de vapor. Pois, apesar do alto custo inicial para instalação, devido à grande área de coletor solar, há uma economia de energia elétrica notável e há a utilização de uma energia renovável que não poluirá diretamente o meio ambiente.

Com as análises realizadas nesse trabalho, é importante destacar que a implantação do sistema modelado em uma residência em Teresina –PI seria bastante eficaz visto que apresenta um bom COP. A viabilidade do sistema também é garantida pela capacidade do tanque de armazenamento que é facilmente acomodável nas residências com o porte descrito no trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, é interessante o dimensionamento e construção de um protótipo do sistema modelado nesse trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Al-Ugla, A. A., El-Shaarawi, M. A. I. e Said, S. A. M., 2015, “Alternative designs for a 24-hours operating solar-powered LiBr–water absorption air-conditioning technology”, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 53, No 53, pp. 90-100.
- Araújo, J. J. P., 2010, “Simulação de uma Unidade de Refrigeração por Absorção Usando o Par Água-Amônia nos Regimes Permanente e Transiente”, Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Irradiação Solar diária média. Disponível em < http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_332 > Acesso em 07 maio de 2016
- El-Shaarawi, M. A. I. e Al-Ugla, A. A., 2016, “Hybrid storage designs for continuous operation of solar-powered LiBr–water absorption air-conditioning”, *International Journal of Energy Research*, Vol. 40, pp 791-805.
- Guimarães, L. G. M., 2011, “Modelagem e construção de protótipo de refrigerador por absorção de vapor de baixa potência operando com o par água-brometo de lítio e utilizando fontes térmicas de baixa temperatura”. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei.
- Herold, K. E., Radermacher, R. e Klein, S. A., 1996. “Absorption Chillers and Heat Pumps”. Ed. CRC Press, Inc, 329p.
- Kalogirou, S. A., 2004, “Solar thermal collectors and applications”, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 30, No. 3, pp. 231-295.
- Li, Z. F. e Sumathy, K., 2000, “Technology development in the solar absorption air-conditioning systems”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol 4, pp 267-293.
- Moran, M. J. e Shapiro, H. N., 2006. “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”. Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, 847p.
- Praene, J. P., Marc, O., Lucas, F. e Miranville, F., 2011, “Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island”, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 88, pp 831-839.
- Said, S. A. M., El-Shaarawi, M. A. I. e Siddiqui, M. U., 2012, “Alternative designs for a 24-h operating solar-powered absorption refrigeration technology”, *International journal of refrigeration*, Vol. 35, No. 7, pp. 1967-1977.
- Stoecker, W. F. e Jones, J. W., 1985, “Refrigeração e Ar Condicionado”, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil, 481p.
- Ward, D. S., e Lof, G. O. G., 1975, “Design and construction of a residential solar heating and cooling system”, *Solar Energy*, Vol. 17, pp 13-20.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING OF A AIR CONDITIONING ABSORPTION SYSTEM POWERED BY SOLAR ENERGY WITH CONTINUOUS OPERATION

Suellen Cristina de Sousa Alcântara, s.alcaantara@gmail.com¹

Ana Livia Formiga Leite, analiviafl@yahoo.com.br¹

Kléber Lima César, kleberneue3@gmail.com¹

Danilo César Rodrigues Azevedo, danilo.azevedo@ufpi.edu.br¹

¹ Federal University of Piauí, Campus Ministro Petrônio Portela, 64049-550, Teresina – PI, Brazil

Abstract: *This paper aims modeling an absorption system powered by a solar collector. For a continuous cooling throughout the day, the system is equipped with a cold storage tank. The refrigerant used is the pair of water-lithium bromide. The cooling load was estimated to accomplish the cooling requirements of a residence located in the city of Teresina-PI. A thermodynamic analysis of absorption cycle was carried out through the EES software (Engineering Equation Solver®) and was observed that the system has a satisfactory coefficient of performance (COP) and needs a solar collector with a great area and a small tank to storage the cold with isolation.*

Keywords: *Air conditionig; Absorption; Solar energy; Continuos Operation, Refrigeration.*