

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO USANDO ENERGIA SOLAR COMO FONTE DE CALOR

Alexandre Atilio Ramos de Alencar Filho, alexandreatilio@gmail.com¹

Suellen Cristina Sousa Alcântara, s.alcaantara@gmail.com²

Danilo César Rodrigues Azevedo, danilo.azevedo@ufpi.edu.br²

Kleber Lima César, kleberneue3@gmail.com²

¹ Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, 60455-760 Fortaleza – CE, Brasil

² Universidade Federal do Piauí, Campus Ministro Petrônio Portela, 64049-550, Teresina – PI, Brasil

Resumo: Nesse trabalho, através do software EES (Engineering Equation Solver), foi realizada a modelagem de um sistema de refrigeração por absorção, utilizando o par amônia – água como fluido refrigerante e devido à alta disponibilidade de energia solar na cidade que esse estudo foi feito, Teresina – PI, um coletor de energia solar foi utilizado como fonte de calor para o sistema. O escritório do Laboratório de Energias Renováveis foi utilizado como referência para o cálculo da carga térmica e através da modelagem feita no software EES estabeleceu-se a quantidade de calor que o coletor deveria disponibilizar ao sistema. Os resultados obtidos mostraram que o coletor selecionado, por possuir dimensões pequenas, não seria capaz de refrigerar o espaço escolhido, sendo necessário entre oito e doze coletores de dimensões iguais ao coletor disponível para fornecer calor suficiente para o sistema. Isso inviabiliza economicamente o projeto do sistema.

Palavras-chave: Energia solar, refrigeração por absorção, climatização solar.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Teresina-PI (Latitude: 05° 05' 21" S e Longitude: 42° 48' 07" W) está localizada geograficamente em uma região que possui aspectos peculiares em relação à umidade relativa do ar, as chuvas, a carência ventos e principalmente altas temperaturas o ano todo. As médias de temperatura mínima e máxima anuais está disposta entre 24,0°C e 29,0°C (RADIASOL2, 2001). Esses fatores climáticos correlacionados proporcionam um grande desconforto térmico sendo necessário o uso de ar condicionado em locais fechados.

Devido também a localização geográfica da cidade, Teresina possui uma alta incidência solar durante o ano inteiro, os índices de radiação solar da cidade variam na faixa de 4,72 kWh/m²-dia e 6,56 kWh/m²-dia (RADIASOL2, 2001), sendo um dos maiores índices do Brasil. Essa característica proporciona uma alta disponibilidade de energia solar, havendo assim a possibilidade de climatizar ambientes fechados utilizando-a como fonte energética, consistindo em uma alternativa ao uso de energia elétrica fornecida por concessionárias para manter os sistemas convencionais de condicionamento de ar.

Estudos realizados por Kim e Ferreira (2008) mostraram que o sistema de absorção de simples efeito é a melhor opção para converter a energia solar em efeito de refrigeração, examinando dois fatores, a eficiência energética e a viabilidade econômica, sendo seguido de perto pelos sistemas de adsorção de único efeito e pelo sistema de absorção de duplo efeito, sendo os sistemas solares elétricos, que utilizam células fotovoltaicas, mais dispendiosos do que os térmicos.

Segundo ASHRAE (2009), um ciclo de refrigeração por absorção, é um ciclo ativado por calor, ele troca energia térmica com seus arredores, não havendo assim energia mecânica apreciável trocada (o trabalho de bomba pode ser considerado desprezível). Estes ciclos apresentam diversas vantagens frente aos demais ciclos com mesma finalidade, uma delas é de que qualquer fonte de calor pode ser utilizada, incluindo fontes de baixa temperatura.

A energia solar é a fonte de energia mais antiga a ser utilizada. Para a utilização desse tipo de energia são necessários coletores de energia solar, que são equipamentos descritos como tipos especiais de trocadores de calor, responsáveis por transformar a energia de radiação solar em energia térmica (Kalogirou, 2009).

A partir do calor fornecido sob um coletor de energia solar é possível calcular a capacidade de refrigeração de um sistema de condicionamento de ar de um ciclo de absorção, assim como modelar as dimensões do coletor utilizando como

dado de entrada, o valor da carga térmica do ambiente estudado. Além disso, para um projeto de sistema de climatização é necessário que sejam feitos os cálculos das trocas térmicas, afim de determinar a capacidade necessária dos componentes do sistema para que se mantenha um nível de conforto térmico no ambiente, (Stoecker e Jones, 1985).

Através dessas modelagens matemáticas é possível verificar a viabilidade de instalação do sistema no escritório do Laboratório de Energias Renováveis – LER, localizado na Universidade Federal do Piauí, para gerar conforto térmico.

Considerando o potencial de energia solar disponível na cidade em estudo, o objetivo deste trabalho é modelar um sistema de condicionamento de ar por absorção utilizando o par amônia – água para o escritório do laboratório de energias renováveis do Centro de Tecnologia – UFPI que seja alimentado por uma fonte coletora de energia solar.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Um sistema de ar condicionado, ou VAAC (ventilação, aquecimento e ar condicionado), é composto por equipamentos dispostos em sequência para condicionar o ar, transportá-lo para o espaço desejado e para controlar os parâmetros internos do ambiente disposto em um espaço específico dentro de limites requeridos (Wang, 2001).

O VAAC implementado para a refrigerar o escritório do laboratório de energias renováveis do Centro de Tecnologia – UFPI será um sistema de refrigeração por absorção utilizando o par amônia-água alimentado por energia solar, formado por um coletor solar, gerador, retificador, condensador, válvula de expansão, evaporador, absorvedor, regenerador de calor contracorrente, bomba e válvula redutora de pressão. O sistema será modelado a partir do cálculo da carga térmica do ambiente a ser climatizado para que possa proporcionar um conforto térmico. O esquema do ciclo estudado é demonstrado na Fig.1.

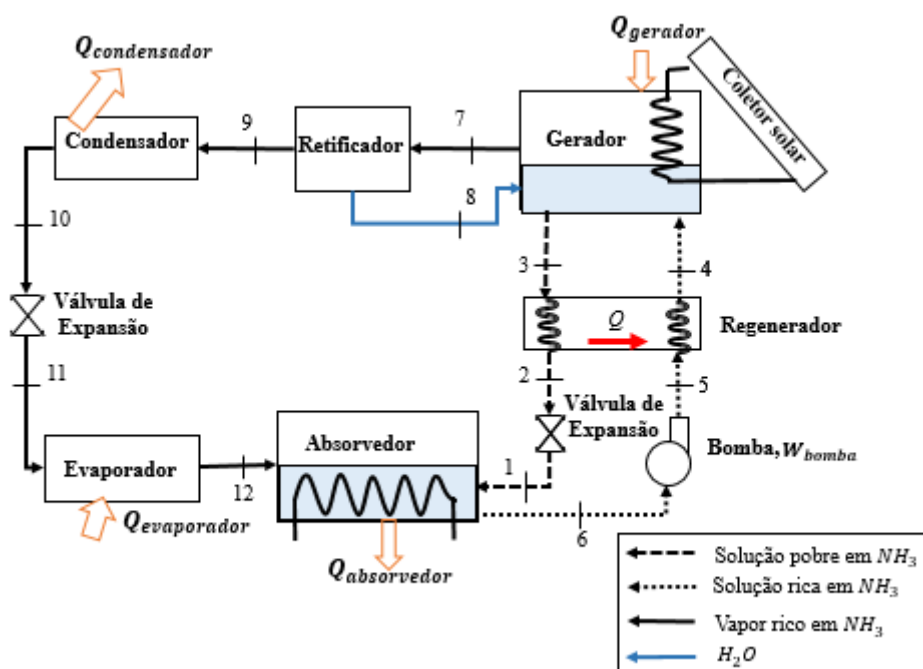


Figura 1. Esquema do ciclo de absorção de $NH_3 + H_2O$ elaborado pelos autores.

No ciclo estudado, a amônia (NH_3) desempenha o papel de refrigerante e a água é o meio de transporte ou absorvente. Segundo Çengel e Boles (2003) este é o par de fluidos de trabalho mais utilizados nos sistemas de refrigeração por absorção.

Os sistemas de absorção funcionam da seguinte maneira: o vapor de amônia sai do evaporador e entra no absorvedor, onde é absorvido e reage com a água para formar o $NH_3 + H_2O$, reação exotérmica, onde calor é liberado. Como a quantidade de amônia que pode ser dissolvida em água é inversamente proporcional à temperatura, é preciso resfriar o absorvedor para manter sua temperatura o mais baixa possível, maximizando assim, a quantidade de amônia absorvida na água (Çengel e Boles, 2003).

A solução $NH_3 + H_2O$, rica em amônia, é posteriormente bombeada para o gerador. Calor é transferido para a solução com a finalidade de vaporizar parte da solução, formando vapor rico em amônia. Esse vapor passa por um retificador que separa a água e retorna para o gerador. O vapor de amônia e a alta pressão segue as etapas do ciclo. A solução em alta temperatura de amônia e água, com pouco NH_3 passa por um regenerador, onde transfere parte do calor para a solução rica que sai da bomba e é estrangulada até a pressão do absorvedor (Çengel e Boles, 2003).

Para concentrar a radiação proveniente do sol e transferi-la na forma de calor para a solução no gerador se faz necessário o uso de coletores solares. Segundo Duffie e Beckman (2013), existem vários tipos de coletores com diferentes

configurações de concentradores, afim de aumentar o fluxo de radiação nos receptores, podendo ser refletivos ou refratários, cilíndricos com foco em uma linha ou circulares com foco em um ponto, côncavos, planos ou convexos.

A Figura 2 mostra o coletor solar de calha parabólica do Laboratório de Energias (LER) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí, ele foi utilizado para calcular a quantidade de calor que o mesmo pode fornecer para o sistema e posteriormente verificar se as necessidades requeridas para a refrigeração do LER serão supridas.

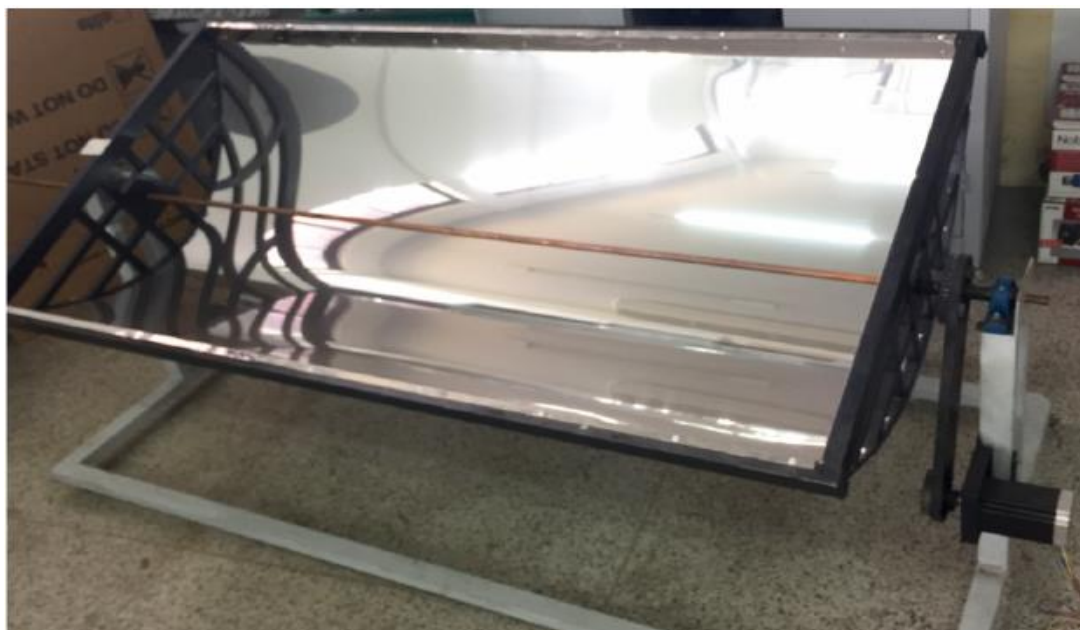


Figura 2. Coletor solar de calha parabólica do Laboratório de Energias Renováveis da UFPI.

Kalogirou (2004) mostra através de gráfico a eficiência de coletores solares dependendo do seu tipo de configuração. Na Figura 3, é possível verificar que os coletores de calha parabólica, PTC (Parabolic trough collector) apresentam eficiência entre 0,8 e 0,7 para diversas amplitudes de temperatura (temperatura do fluido e temperatura do ar).

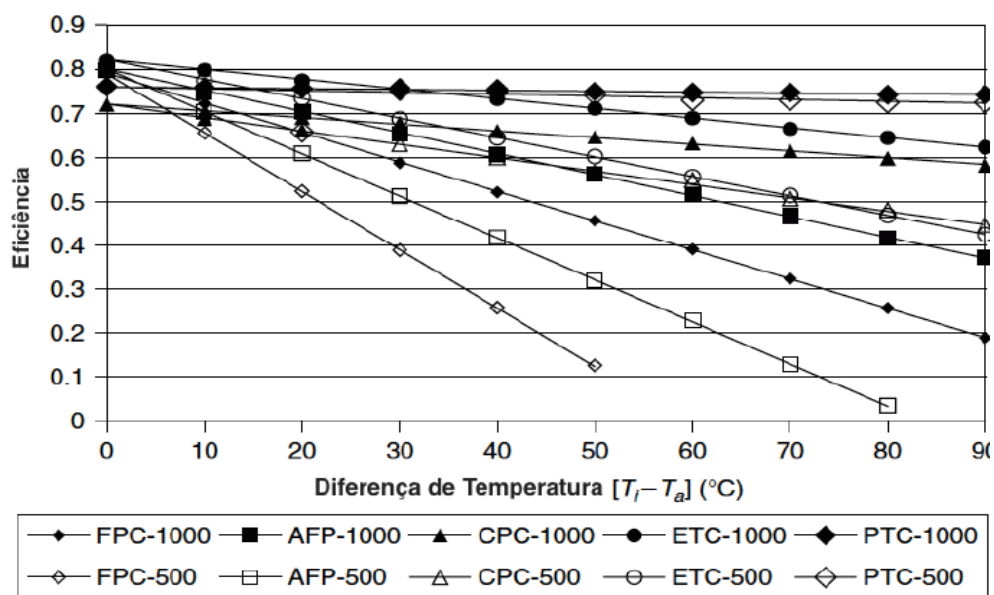


Figura 3. Eficiência de diversos coletores a dois níveis de irradiação, 500 W/m² e 1000 W/m², adaptado de Kalogirou (2004).

3. MODELAGEM DO SISTEMA

3.1 Cálculo da Carga Térmica

Os valores de temperatura bulbo seco e umidade relativa para o dia mais quente (14/Outubro) da cidade de Teresina-PI (Latitude aproximada 5° ao Sul) é de 32,5°C e 60% respectivamente (INMET,2015).

A radiação solar do mês de outubro é em média 6,39 kWh/m², e sua temperatura máxima, mínima e a média são respectivamente 36,4°C, 22,8°C e 29°C (RADIASOL2, 2001).

A temperatura interna do ambiente ideal para conforto térmico é de 24°C com uma umidade relativa de 55%. O mês com maior radiação e média de temperatura é Outubro (ABRAVA, 2015).

As dimensões do escritório do laboratório, assim como das janelas do mesmo encontram-se na Tab. 1.

Tabela 1. Dimensões do escritório do LER e das janelas do mesmo.

Comprimento da sala (m)	8,85
Largura da sala (m)	3,13
Pé direito da sala (m)	3,50
Altura Janela Sul (m)	0,625
Comprimento Janela Sul (m)	3,03
Altura Janela Norte (m)	0,625
Comprimento Janela Norte (m)	2,31

A Figura 4 apresenta a planta baixa do ambiente a ser climatizado. A faixa sul sofre insolação direta e a faixa norte não sofre. As fachadas leste e oeste fazem divisa com salas refrigeradas.

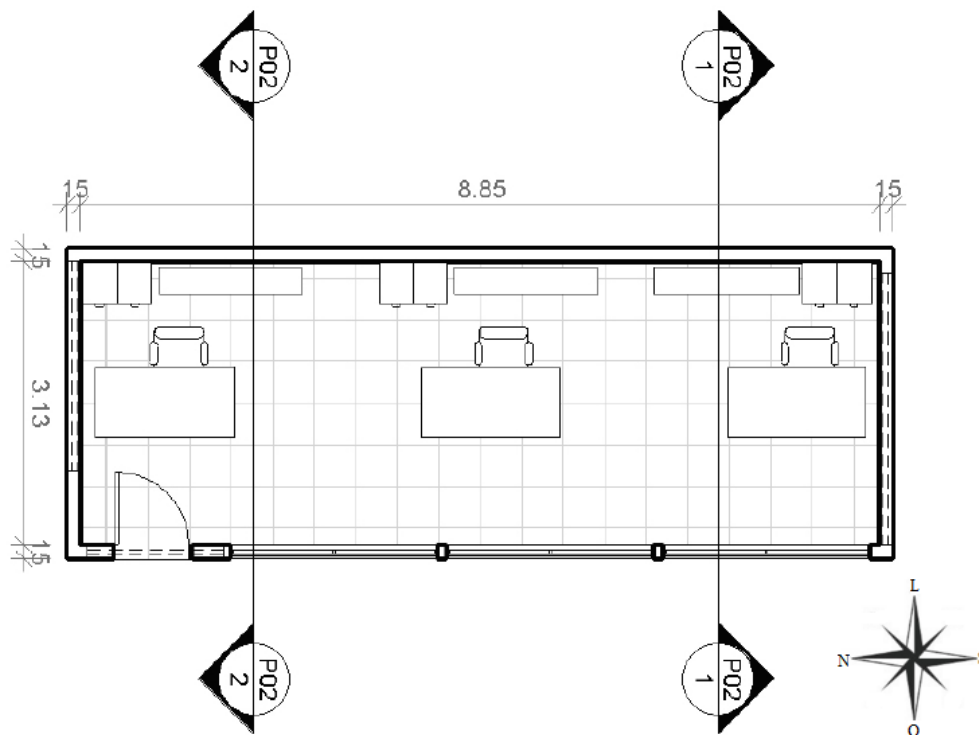


Figura 4. Planta baixa do escritório do LER elaborada pelos autores.

A carga térmica total para a sala estudada foi dada pela soma de os componentes de carga térmica calculados mostradas nos tópicos seguintes, são eles: transmissão, insolação, filtração e geração interna.

3.1.1 Transmissão

A carga térmica gerada por transmissão foi calculada utilizando a Eq. (1):

$$q = U A (t_e - t_i) \quad (1)$$

onde, q é a carga térmica gerada por transmissão; U é o coeficiente global da transferência de calor; A é a área que transmite calor para o ambiente climatizado; t_e é a temperatura máxima externa para o mês definido e t_i é a temperatura de conforto.

3.1.2 Insolação

Stoecker e Jones (1985), mostra que a transferência de calor resultante da insolação dependerá das propriedades físicas da superfície. Considerando superfícies transparentes, a energia solar que vai atravessá-la em condições de regime permanente é representada pela Eq. (2):

$$q_{sg} = A I_t \left(\tau + \frac{U_\alpha}{h_e} \right) \quad (2)$$

sendo, q_{sg} é a transferência de calor resultante da insolação; I_t é a irradiação total; τ é a transmissividade; α é a absorvidade e h_e depende da velocidade do vento, e pode ser considerado para áreas externas como $h_e = 15 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3.1.3 Infiltração

Utilizando-se a Eq. (3), é calculado a carga de calor sensível (q_s):

$$q_s = 1,23 Q (t_o - t_i) \quad (3)$$

onde, Q é a infiltração para cada fachada.

Utilizando-se a Eq. (4), é calculado a carga de calor latente, q_l .

$$q_l = 3000 \dot{Q} (W_o - W_i) \quad (4)$$

onde, W é a umidade absoluta, kg de vapor de água/kg ar seco e $\dot{Q}$ é o fluxo de ar em m^3/h .

3.1.4 Geração interna

Segundo Stoecker e Jones (1985), as fontes principais de calor por geração interna são luzes, equipamentos de operação interna e os ocupantes do ambiente. O calor gerado por lâmpadas, por exemplo, é na forma de radiação, o calor gerado é absorvido pelas paredes, piso, mobília, o que acarreta em um aumento de temperatura dos mesmos, elevando a carga térmica produzida dentro do recinto. O calor gerado pelos ocupantes é, também, liberado na forma de radiação.

3.2 Sistema de absorção

Utilizou-se um software de modelagem matemática, EES (Engineering Equation Solver), que possui uma biblioteca de informações para ciclos de amônia-água. Usou-se parâmetros estabelecidos através de informações contidas nas literaturas, Çengel e Boles (2003), Stoecker e Jones (1985), e dados coletados a partir deste trabalho. Tomando também como referência o ciclo da Fig. 1 e os seus respectivos pontos temos:

Dados de entrada:

Temperatura de condensação: $T_{\text{condensação}} = 55^\circ\text{C}$;

Temperatura de evaporação: $T_{\text{evaporação}} = 24^\circ\text{C}$;

Carga térmica: $Q_{\text{evaporador}} = 2,0654 \text{ TR}$;

Eficiência da bomba: $\eta_b = 0,5$.

Condições de operação

Títulos: $q_1 = q_2 = q_4 = q_{10} = 0$ (líquido saturado); $q_7 = q_9 = 1$ (vapor saturado);

Título na saída do evaporador: $q_{12} = 0,998$;

Fração mássica na saída do retificador: $x_9 = 0,999634$;

Diferença de composição na recirculação do absorvedor: $x_1 - x_4 = 0,1$.

Os ciclos de absorção têm seu Coeficiente de desempenho (COP) determinado pela razão entre a taxa de refrigeração e a taxa de adição de calor ao gerador mais o trabalho de bomba (Eq. 5).

$$\text{COP}_{\text{abs.}} = \frac{Q_0}{Q_G + W_B} \quad (5)$$

Onde:

Q_0 é a capacidade de climatização;

Q_G é a soma do calor fornecido ao gerador;

W_B é a energia de alimentação da bomba.

3.3 Coletor solar

Utilizou-se os dados da Tab. 2, fornecidos pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2016) para determinar a irradiância a ser utilizada, afim de selecionar a situação que esse valor seria mínimo, para poder modelar o sistema para a pior situação.

Tabela 2. Horas de insolação diária (Média mensal) e irradiância adaptado de CRESESB (2016).

Meses	Horas	Irradiação Solar (kWh/m ² dia)	Irradiância (W/m ²)
Janeiro	6	5,00	833,33
Fevereiro	5	4,86	972,00
Março	5	4,78	956,00
Abril	6	4,72	786,67
Maio	8	5,00	625,00
Junho	9	5,28	586,67
Julho	9	6,08	675,56
Agosto	10	6,56	656,00
Setembro	9	6,11	678,89
Outubro	8	6,39	798,75
Novembro	7	5,67	810,00
Dezembro	6	5,39	898,33

O coletor solar disponível possui 1,80 metros de comprimento e 1,10 metros de largura. Por não possuir eficiência de 100%, para calcular o calor gerado pelo coletor utilizou-se os dados fornecidos por Kalogirou (2004) para o coletor de calha plana já mostrado anteriormente na Fig. 3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cálculo da carga térmica foi feito utilizando dados do ambiente estudado no trabalho bem como dados retirados da literatura, parâmetros definidos e tabelados. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 3.

Tabela 3. Carga térmica do escritório do LER

Resultados		
$Q_{\text{Transmissão}}$		877,552 kcal/h
$Q_{\text{Insolação}}$		736,695 kcal/h
$Q_{\text{Infiltração}}$	$Q_{\text{Sensível}}$	257,37 kcal/h
	Q_{Latente}	2531,25 kcal/h
$Q_{\text{Geração Interna}}$	Lâmpadas	165,14 kcal/h
	Computadores	1031,81 kcal/h
	Pessoas	650,04 kcal/h
Q_{TOTAL}		6249,85 kcal/h

A carga térmica total do escritório do LER é 6249,85 kcal/h, ou seja, são necessários cerca de 2,0654 TR para refrigerar o ambiente até uma temperatura de 24°C, isso para o dia mais quente do ano.

A partir do resultado do cálculo da carga térmica e dos dados presentes na literatura a respeito de sistemas de refrigeração por absorção, foi possível modelar o sistema utilizando o software EES (Engineering Equation Solver) como ferramenta. Os resultados obtidos a partir dessa modelagem são mostrados na Tab. 4.

Tabela 4. Resultado da modelagem do sistema de refrigeração

Coeficiente de desempenho e taxas de troca de calor nos componentes		
COP	$\dot{Q}_{\text{evaporador}}$ [kW]	$\dot{Q}_{\text{gerador}}$ [kW]
0,679	7,264	10,55

O sistema de absorção apresentou um coeficiente de performance de 0,679, valor esperado para ciclos de absorção, e o gerador do sistema, necessita de 10,55 kW de potência para operar o ciclo com essa eficiência. Essa potência deverá ser fornecida pela fonte de energia do sistema, ou seja, o coletor solar.

Com base nos dados do coletor foi possível determinar que ele é capaz de gerar entre 871,20 W e 1443,42 W, porém, a quantidade necessária para o sistema estudado é de 10550 W. Assim, a partir dos dados obtidos através desse trabalho, verificou-se que é possível climatizar o ambiente estudado, entretanto, seriam necessários entre oito a treze coletores de mesma geometria ao que se tem disponível no laboratório.

5. CONCLUSÃO

Nesse presente trabalho foi feita a análise do ambiente estudado para definir os parâmetros necessários para o desenvolvimento do cálculo de carga térmica, com a finalidade de, através desse valor, modelar um sistema de refrigeração por absorção utilizando o par amônia – água ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$) como fluido refrigerante, através do software EES (Engineering Equation Solver). Com os resultados obtidos através do software, foi possível determinar a quantidade de calor necessária a ser entregue pelo coletor.

Por possuir dimensões pequenas, o coletor solar do Laboratório de Energias Renováveis, CT – UFPI, não possui capacidade necessária para fornecer a quantidade de calor requerida por um sistema de refrigeração de 2,0654 TR (24.784,82 BTU/h), seriam necessários entre oito e doze coletores de dimensões iguais ao coletor disponível, o que inviabiliza economicamente o projeto do sistema.

Como proposta para trabalhos futuros, deve ser analisado através de estudos termoeconômicos, utilizando o mesmo sistema de refrigeração, a viabilidade de climatizar um ambiente de menores dimensões, ou mesmo a aplicação do sistema em dispositivos de refrigeração, tais como refrigeradores que possuem um pequeno volume interno.

6. REFERÊNCIAS

- ABRAVA. Relação de temperatura e umidade e o conforto térmico. Disponível em <<http://www.abrava.com.br/a-relacao-do-ar-condicionado-e-o-conforto-humano-1>> Acesso em: 27 dez. 2015
- ASHRAE. Handbook Fundamentals Atlanta: American Society of Heating, Air-Conditioning and Refrigeration Engineers. Inc, 2009.
- Çengel, Y. A. e Boles, M. A., 2003, “Termodinâmica”, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 695p.
- CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Irradiação Solar diária média. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>> Acesso em 02 fev. 2016
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A., 2013, “Solar engineering of thermal processes”, Ed. Wiley, New York etc, 928p.
- INMET. Gráficos de parâmetros diários e mensais de temperatura, umidade relativa do ar e insolação total diária. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>> Acesso em 27 dez. 2015
- Kalogirou, S. A., 2004, “Solar thermal collectors and applications”, Progress in energy and combustion science, Vol. 30, No. 3, pp. 231-295.
- Kalogirou, S. A., 2009, “Solar energy engineering: processes and systems”, Ed. Elsevier, Califórnia, 756p.
- Kim, D. S. e Ferreira, C. A. I., 2008, “Solar refrigeration options—a state-of-the-art review”, International Journal of refrigeration, Vol. 31, No. 1, pp. 3-15.
- RADIASOL, versão 2.1. Laboratório de Energia Solar – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001. Disponível em <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>> Acesso em: 08 jul. 2015.
- Stoecker, W. F. e Jones, J. W., 1985, “Refrigeração e Ar Condicionado”, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil, 481p.
- Wang, S. K., 2001, “Handbook of air conditioning and refrigeration”.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

MODELING OF A REFRIGERATION ABSORPTION SYSTEM USING SOLAR ENERGY AS HEAT SOURCE

Alexandre Atilio Ramos de Alencar Filho, alexandreatilio@gmail.com¹

Suellen Cristina Sousa Alcântara, s.alcantara@gmail.com²

Danilo César Rodrigues Azevedo, danilo.azevedo@ufpi.edu.br²

Kleber Lima César, kleberneue3@gmail.com²

¹ Federal University of Ceará, Campus do Pici, 60455-760 Fortaleza – CE, Brazil

² Federal University of Piauí, Campus Ministro Petrônio Portela, 64049-550, Teresina – PI, Brazil

Abstract: In this work, through the EES (Engineering Equation Solver) software, it was performed a modeling of a cooling system by absorption using the pair ammonia - water as refrigerant and due to the high availability of solar energy in the city that this study was done, Teresina - PI, a solar energy collector was used as a heat source for the

system. The Office of Renewable Energy Laboratory was used as reference for the calculation of the thermal load and by modeling done in EES software it was established the amount of heat that the collector should make available to the system. The results showed that the selected collector, because it has small dimensions, would not be able to cool the chosen space, requiring between eight to twelve collectors of equal size of the collector available to provide sufficient heat to the system. This made the system project economically unfeasible.

Keywords: Solar energy, refrigeration by absorption, solar air conditioning.