

ANÁLISES ENERGÉTICA E EXERGÉTICA EM CÂMARAS FRIGORÍFICAS

Lair de Souza Bartolomeu

UFBA/Escola Politécnica/DEQ/PPEQ/LEN, Rua Aristides Novis, nº2, 3º andar, Federação, CEP: 40210-630. Salvador-BA, lair_sb@click21.com.br

Ednildo Andrade Torres

UFBA/Escola Politécnica/DEQ/PPEQ/LEN, Rua Aristides Novis, nº2, 3º andar, Federação, CEP: 40210-630. Salvador-BA, ednildo@ufba.br

Gabriel Francisco da Silva

Universidade Federal de Sergipe/DEQ, Av Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, CEP: 49100-000. São Cristóvão-SE, gabriel@ufs.br

Resumo. *O trabalho consiste na análise energética e exergética de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito usando o par amônia-água como fluido de trabalho, e utilizando como fonte energética o gás natural. O Projeto é apoiado pela RedeGásEnergia-PETROBRAS. O equipamento, um chiller da marca Robur, o qual encontra-se no campus da UFS/LTA, foi avaliado para uma taxa de transferência de calor de 28,28 kW, cuja capacidade de produção de frio do equipamento varia de 10,55 a 24,61 kW (de 3 a 7 TR), fornecendo frio para três câmaras frigoríficas para conservação de frutas. A análise energética teve como objetivo estudar o processo envolvendo o ciclo e seus componentes. Da análise de primeira lei obteve-se uma potência de refrigeração de 17,58 kW e um COP=0,62 e da análise de segunda lei $\beta = 0,35$. A análise exergética teve por propósito avaliar a quantidade e a qualidade da energia no sistema. O gerador de calor foi o componente que apresentou a maior irreversibilidade, cuja relação com a irreversibilidade total foi de 60%. No absorvedor foi verificada a menor eficiência exergética.*

Palavras-chave: *Refrigeração, Absorção, Eficiência Exergética, Análise Energética, Amônia.*

1. INTRODUÇÃO

Tem-se constatado um interesse crescente pelos ciclos de refrigeração por absorção, primeiro porque podem ser operados com fontes de calor de baixa temperatura, e podem conseqüentemente fornecer meios para converter o calor perdido no processo para produzir o frio e segundo, porque não fazem uso de refrigerantes do tipo CFC e os conseqüentes danos ambientais são evitados.

O uso racional da energia está se tornando cada vez mais importante e há uma necessidade de otimizar os processos termodinâmicos para que se consuma o mínimo de energia. Muitos parâmetros afetam o desempenho do ciclo de refrigeração por absorção. A fim de otimizar o projeto térmico uma análise termodinâmica completa se faz necessária. O método mais comumente utilizado é o da análise de primeira lei da termodinâmica e é representado pelo coeficiente de performance (COP), que quantifica a relação de energia produzida e a necessária pra obtê-la, esta metodologia é também conhecida como análise energética; entretanto, ela não mostra como ocorrem as irreversibilidades em um sistema ou em um processo.

A análise de segunda lei da termodinâmica é outro método utilizado para analisar ciclos termodinâmicos, mas para alguns ainda pode ser novo. Ao contrário da análise de primeira lei, a análise de segunda lei apresenta propósitos mais vastos que incluem o conceito da qualidade da energia. A análise exérgica constitui um referencial importante aos progressos em sistemas de pesquisas na redução das irreversibilidades detectadas nos equipamentos, na produção, e concorre na melhora da qualidade e na eficiência nos mesmos.

Da análise da literatura, (Bejan, 1988), (Kotas, 1985) e (Szargut, 1988) identificaram metodologias de análises exérgicas para diversos sistemas térmicos. Para o ciclo de absorção em simples efeito (Aphornratana e Eames 1995) apresentaram uma análise exérgica de um ciclo de refrigeração por absorção tendo como fluido de trabalho o brometo de lítio/água. Ng et al (1997) apresentaram um modelo termodinâmico para o estudo do sistema de refrigeração por absorção, incluindo algumas equações de processo, como temperatura média, e termos que internamente causam irreversibilidades, do par água/amônia como também o par brometo de lítio/água. Silveira et al (1999), apresentaram uma análise do experimento que transfere calor, e realizou uma análise exérgica associada ao estudo termoeconômico na avaliação do equipamento. Santana e Torres (2003) realizaram uma análise energética e exérgica de um sistema de cogeração para produção de energia elétrica e frio para um *shopping center*, de grande porte.

No presente trabalho é realizada uma análise de primeira e segunda leis da termodinâmica, de um sistema de refrigeração por absorção, usando o par Água/Amônia, que tem capacidade de produzir frio entre 10,55 a 24,61 kW (de 3 a 7 TR). O sistema trabalha em simples efeito e usa como fonte de energia a queima direta do gás natural no gerador de calor. O frio gerado é utilizado em três câmaras frigoríficas para conservação de frutas.

1.1. Caracterização do Sistema

O sistema de refrigeração por absorção operado em simples efeito foi instalado no Laboratório de Tecnologias Alternativas da Universidade Federal de Sergipe, projeto apoiado pela RedeGásEnergia-PETROBRAS, sendo constituído de um *chiller* de absorção com queima direta, três câmaras frigoríficas, sistema de armazenamento de gás natural e painel de controle do processo. O *chiller* é apresentado na fig. (1), e é composto basicamente de: gerador, absorvedor, condensador, evaporador, uma solução trocadora de calor, retificador, trocador de calor e duas bombas.

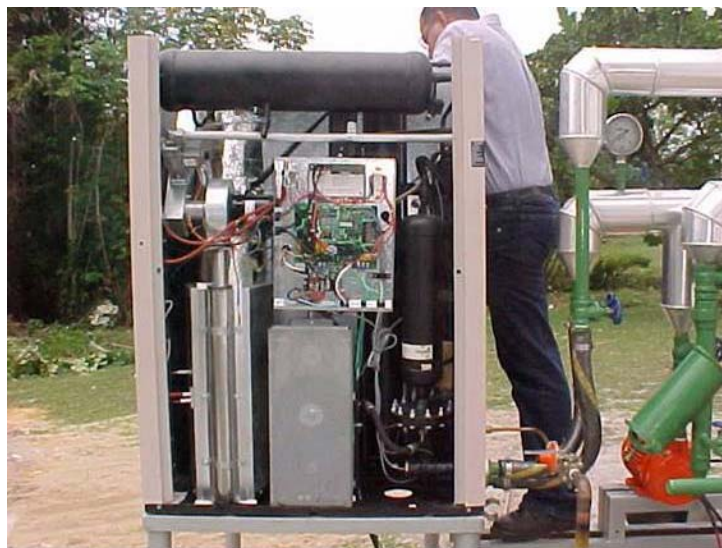


Figura 1. *Chiller* de absorção em simples efeito.

A Figura (2) mostra um diagrama esquemático de um ciclo de refrigeração por absorção em simples efeito. No gerador é queimado o gás natural e a energia térmica é transferida para o vapor de amônia à alta pressão e temperatura. O vapor de amônia vai para o condensador onde troca calor com o meio e é condensado, dirige-se para válvula de expansão e em seguida entra no evaporador produzindo o frio necessário ao sistema. O vapor de amônia à baixa pressão entra no absorvedor, onde é posto em contato com a solução pobre de amônia, trocando calor com o meio. Esse processo ocorre a uma temperatura próxima da do ambiente. A solução forte de amônia é então bombeada, passando pelo trocador de calor, sendo pré-aquecida com a solução fraca proveniente do gerador de calor, iniciando um novo ciclo (Wylen e Sontang, 1995).

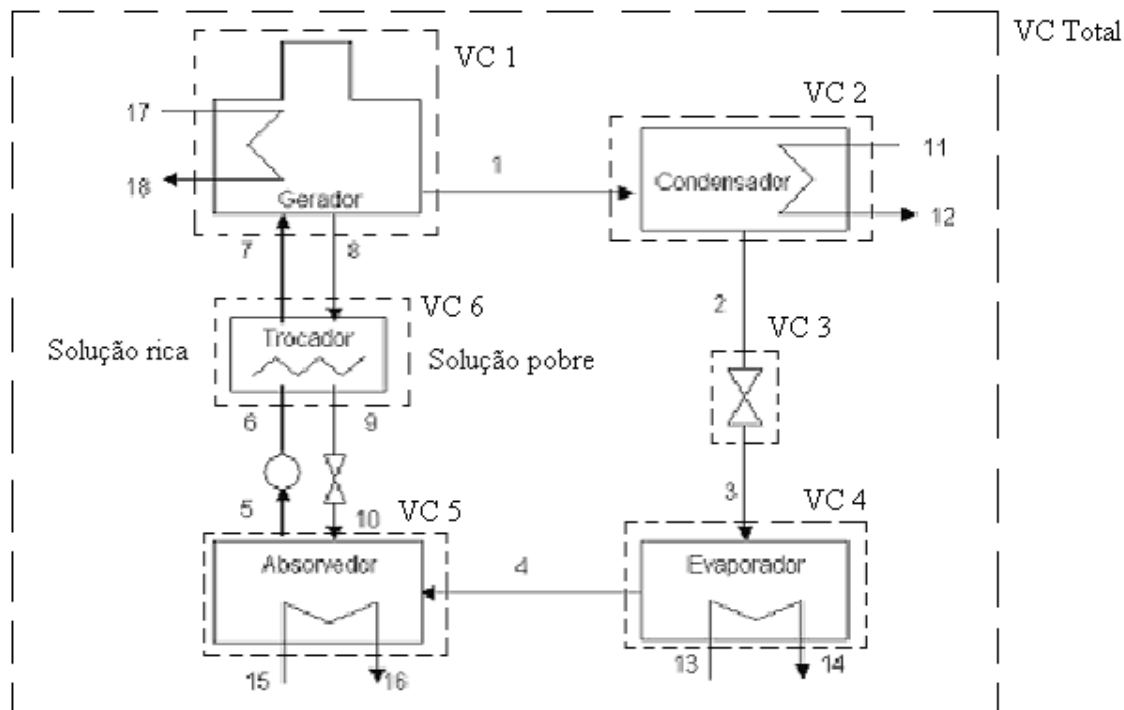


Figura 2. Diagrama esquemático do ciclo de refrigeração por absorção em simples efeito.

2. METODOLOGIA

2.1. Análise Energética e Exergética

Para a análise termodinâmica inicialmente dividiu-se o sistema em seis volumes de controle de acordo como mostrado na fig. 1. A seguir, aplicou-se a conservação da massa na eq. (1), a conservação da energia na eq. (2), para cada volume de controle admitindo o processo em regime estacionário.

A primeira lei estabelece a conservação da energia, isto é, a energia da entrada de um sistema é igual a da saída. Entretanto, a segunda lei impõe limitações sobre a conversão da energia. Por exemplo, o trabalho pode ser convertido completamente em calor, mas não se pode converter todo o calor disponível em trabalho. Na primeira lei, o calor e o trabalho são definidos como energia que se conserva. Mas pela análise de segunda lei, as interações do calor e do trabalho são mais bem compreendidas quando definidas pela exergia, que diminui a cada processo de transformação gerando as irreversibilidades.

Estabelecendo seis volumes de controle para cada componente e um geral envolvendo todo o sistema, vide fig. (1). Foi considerando que todos componentes operam em estado estacionário, e a contribuição energética proveniente das energias cinética e potencial é desprezada.

$$\sum m_{\text{saí}} = \sum m_{\text{ent}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{vc}} = \sum m_{\text{saí}} h_{\text{saí}} - \sum m_{\text{ent}} h_{\text{ent}} \quad (2)$$

onde: m = vazão (kg/s) , Q_{vc} = Calor no volume de controle (kW) e h = entalpia (kJ/kg).

O coeficiente de performance (COP) do sistema é definido como a razão entre a energia obtida no evaporador (Q_e) a energia transferida pela queima do gás natural ao gerador de calor (Q_g):

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (3)$$

O coeficiente de performance ideal (COP_{ideal}) é determinado em função das temperaturas absolutas do sistema (Stoecker e Jabardo, 1995):

$$COP_{\text{ideal}} = \frac{T_{\text{ev}}(T_g - T_{\text{ab}})}{T_g(T_c - T_{\text{ev}})} \quad (4)$$

A seguir a eq. (5), mostra a relação entre o COP real e o COP ideal (Bejan, 1988). Esta relação identifica o quanto o sistema real se afasta do ideal.

$$\eta_{\text{sis}} = \frac{COP_{\text{real}}}{COP_{\text{ideal}}} \quad (5)$$

A análise exergetica ou de segunda lei da termodinâmica leva em consideração outros parâmetros, como por exemplo: as entropias e as irreversibilidades dos processos, o que contribui para identificar a qualidade da energia.

A exergia pode ser interpretada como o máximo de energia disponível, que pode ser transformada em outras formas de energia ou trabalho útil de cada processo; para calcular a exergia é necessário que se defina o estado de referencia (P_0 , T_0 , μ_0). As condições de referencias usadas nesta análise foram $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (298,15 K) , $P_0 = 101,3$ kPa e $\mu_0 = 0$.

Segundo Torres (1999), a exergia total pode ser dividida em: exergia cinética (EX_{cin}), potencial (EX_{pot}) e térmica; a exergia térmica se divide termomecânica ou física (EX_{tm}) e química (EX_{ch}).

Para esta análise foi considerado que o sistema opera em estado estacionário, e a exergia física para cada estado é dada pela eq. (6) (Kotas, 1985).

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6)$$

Para solução binária (amônia/água), os cálculos da entropia e entalpia são dados pelas eq. (7) e (8), (Cortez, 1998), respectivamente, que em seguida retornam a eq. (6) para o cálculo da exergia:

$$s = x_f \cdot s_{\text{aL}} + (1-x_f) \cdot s_{\text{wL}} + s_E + s_{\text{mix}} \quad (7)$$

$$h = x_f \cdot h_{aL} + (1-x_f) \cdot h_{wL} + h_E \quad (8)$$

onde: x_f = a concentração de amônia na solução; s_{aL} = a entropia da amônia; s_{wL} = a entropia da água. s_E = entropia de excesso; h_E = entalpia de excesso e s_{mix} = entropia da mistura ideal.

2.2. Irreversibilidade

Para o cálculo da irreversibilidade pode-se fazer pelo teorema de Gouy-Stodola (Kotas, 1985) a eq. (9) ou pela variação de exergia entre insumo e produto eq. (10).

$$I = T_0 \cdot \Delta s \quad (9)$$

onde T_0 = Temperatura de referencia (298,15 K) e Δs = a variação de entropia do sistema.

$$I = \text{Exergia do Insumo (F)} - \text{Exergia do Produto (P)} \quad (10)$$

onde, “insumo” é a diferença de exergia dos fluxos que são entregues ao processo, e que por sua vez produz um “produto” na forma de uma outra diferença de exergias.

2.3. Eficiência Exergética

A *eficiência exergética ou eficiência racional* (β) (Kotas, 1985), é a uma relação entre a variação da exergia dos produtos e a exergia necessária para os insumos dos processos, assim definida por:

$$\beta = \frac{\Delta ex_{\text{produtos}}}{\Delta ex_{\text{insumos}}}, \text{ onde } 0 < \beta < 1 \quad (11)$$

2.4. Parâmetros Termodinâmicos

Na tabela (1), são apresentados os valores das diversas temperaturas da entrada e saída de cada componente do sistema térmico, as concentrações da solução e o calor disponibilizado pelo gerador de calor, utilizados nesta simulação.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema.

Calor disponível pelo gerador (Q_g)	28,28 kW
Temperatura de saída do condensador (t_c)	28,00°C
Temperatura de saída do evaporador (t_{ev})	-14,14°C
Concentração da solução concentrada (X_2)	99,97%
Concentração mínima da solução diluída (X_{7min})	37,09%
Temperatura dos produtos de combustão de entrada (t_{17})	25,00°C
Temperatura dos produtos de combustão de saída (t_{18})	170,00°C
Temperatura de entrada da água gelada (t_{13})	12,80°C
Temperatura da saída da água gelada (t_{14})	7,20°C
Temperatura do ar de refrigeração na entrada do absorvedor (t_{15})	27,5°C
Temperatura do ar de refrigeração na saída do absorvedor (t_{16})	34,00°C

3. PROPRIEDADES TERMODINÂMICA

Para o cálculo das funções termodinâmicas (entalpia, entropia e exergia) foram utilizadas as propriedades (temperatura, pressão e vazão) explicitadas na tab. (2) e as equações descritas na metodologia deste trabalho. Foi desenvolvido um simulador tendo como base a plataforma computacional *EES-Engineer Equation Solver*, onde foram calculadas as funções termodinâmicas.

Um valor de taxa de transferência de calor foi utilizado no gerador (Q_g) igual a 28,28 kW, que corresponde a um consumo de gás natural de 2,0 kg/h e o seu poder calorífico inferior foi de 49528 kJ/kg.

Tabela 2. Propriedades termodinâmicas dos pontos considerados.

	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	X _{Am} (%)	m (kg/s)	s (kJ/(kg.K))	ex (kJ/kg)	Ex (kW)
1	44,00	1,728	1491	99,97	0,01667	5,113	68,76	1,1462
2	28,00	1,728	390,6	99,97	0,01667	1,645	2,695	0,0450
3	-14,14	0,243	390,6	99,97	0,01667	1,744	-26,86	-0,4480
4	-14,14	0,243	1445	99,97	0,01667	5,816	-186,20	-3,1040
5	40,00	0,243	-57,9	37,09	0,1038	0,263	-131,70	-13,67
6	40,00	1,728	-57,9	37,09	0,1038	0,263	-33,93	-3,522
7	111,00	1,728	275,2	37,09	0,1038	1,224	12,62	1,310
8	130,00	1,728	396,9	27,09	0,0806	1,375	89,33	7,200
9	40,75	1,728	-9,635	27,09	0,0806	0,170	-55,72	-4,491
10	40,75	0,243	-9,635	27,09	0,0806	0,170	-55,72	-4,491
11	31,51	-	305,1	0,00	2,8300	5,718	0,070	0,200
12	37,00	-	310,6	0,00	2,8300	5,736	0,240	0,679
13	12,80	-	53,71	0,00	0,7495	0,192	1,072	0,803
14	7,20	-	30,25	0,00	0,7495	0,109	2,315	1,735
15	27,50	-	301,1	0,00	2,8300	5,704	0,010	0,028
16	34,00	-	307,6	0,00	2,8300	5,726	0,134	0,379
17	25,00	-	-	-	0,00057	-	52004,4	29,694
18	170,00	-	-	-	0,00057	-		

4.0. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a tabela (2), a exergia dos pontos 3, 4, 5, 6, 9 e 10 apresentaram valores negativos pelo fato dos valores das propriedades estarem abaixo das condições de referência (T_0 , P_0). No ponto 2, a condição do fluido é de vapor superaquecido onde os valores da entalpia e da entropia são elevados. Os pontos 17 e 18 estão à pressão atmosférica.

A figura (3) ilustra os valores da eficiência dos volumes de controle adotados, determinados pela eq. (11); a fig. (4) apresenta os valores das irreversibilidades de cada componente do sistema pela eq. (10). Estes valores foram calculados tendo como energia primária no gerador de calor $Q_g = 28,28$ kW.

Para o cálculo das funções termodinâmicas da solução amônia-água, entalpia e entropia, fez-se necessário o uso de correlações específicas de acordo com as eq. (6), (7) e (8).

É de se esperar que o crescimento da irreversibilidade de todos os componentes seja proporcional ao aumento da quantidade de calor introduzida no sistema, o que leva ao conseqüente aumento do fluxo

de massa e transferência de calor. O gerador apresenta uma irreversibilidade muito maior do que as dos demais componentes, enfatizada pela variação de temperatura dos gases de combustão e o ambiente e pela cinética da reação de combustão. Como também, devido às perdas que ocorrem tanto nos produtos de combustão como no próprio processo de separação da solução refrigerante, por causa da diferença de temperatura entre os mesmos.

A irreversibilidade que ocorre no absorvedor é também destacada comparando com os valores da irreversibilidade dos demais componentes, justificada pela ocorrência da liberação de calor durante o processo de absorção do vapor refrigerante para o meio. Da mesma maneira pela transferência de massa, onde a mesma depende da pressão e da transferência de calor durante esse processo.

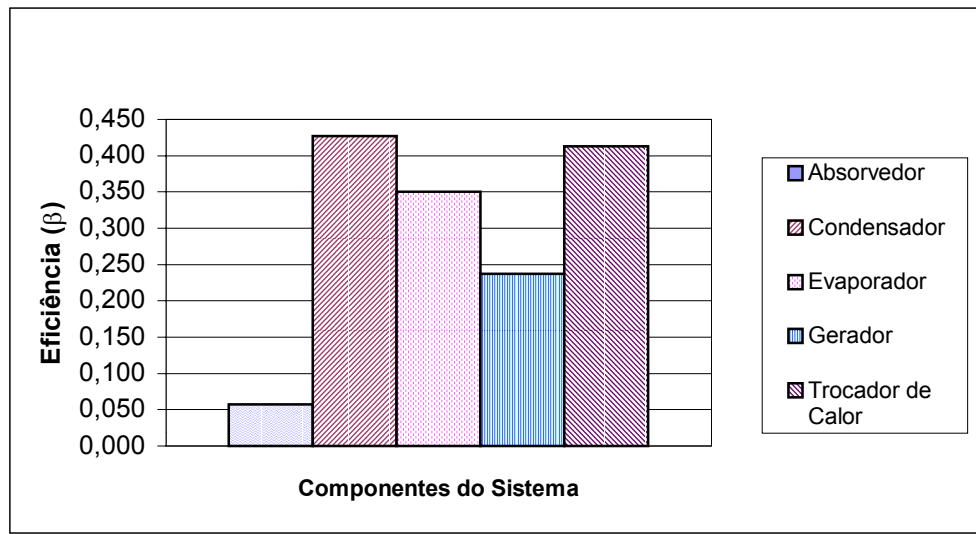


Figura 3. Eficiência exergetica dos componentes do sistema.

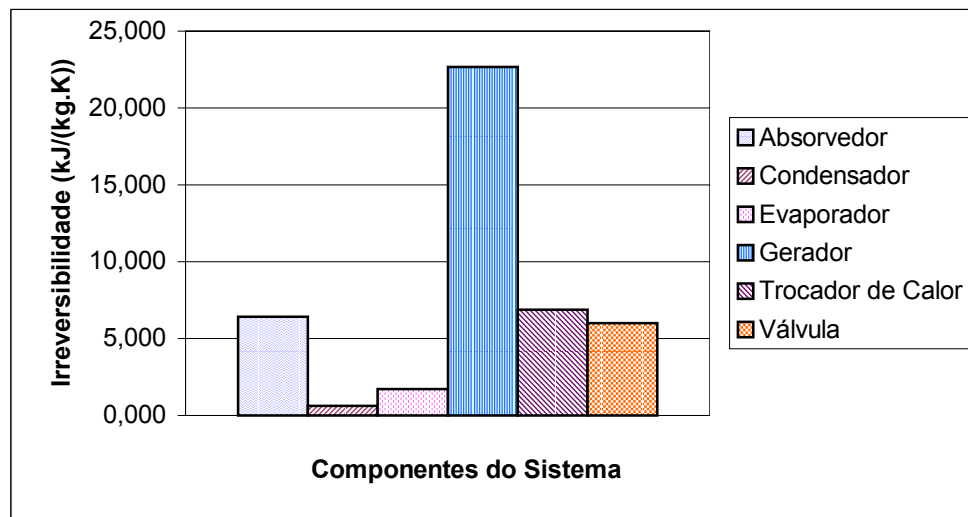


Figura 4. Irreversibilidades dos componentes do sistema.

Nos outros componentes a transferência de calor é reduzida quando comparado ao gerador e o absorvedor e, portanto, a irreversibilidade tem um menor valor. De forma análoga foi determinada a irreversibilidade na válvula de expansão do refrigerante e no trocador de calor, tendo este último uma

acentuada irreversibilidade comparada com a do anterior, devido as maiores diferenças de temperatura e concentração entre as soluções que passam pelo mesmo. Para o condensador o valor da eficiência exergética foi de $\beta = 0,4274$, o maior valor calculado.

O sistema teve uma avaliação completa do coeficiente de desempenho, COP, (pela primeira lei) e da eficiência exergética (pela segunda lei, β). Seus resultados foram: $COP_{real} = 0,62$ (eq. (3)), $COP_{ideal} = 1,26$ (eq. (4)) e $\eta_{sys} = 49,2 \%$ (eq. (5)), mostrando a ordem de grandeza do desvio da idealidade. A eficiência exergética do evaporador, $\beta = 0,35$, evidencia que as eficiências exergéticas apresentam sempre valores inferiores às eficiências energéticas, por conta das irreversibilidades (inerentes e geradas) dos processos.

4. CONCLUSÃO

O sistema operado em simples efeito e nessa simulação produz uma potência de frio de 17,58 kW e apresenta um COP = 0,62. A análise energética, além de fornecer dados para o projeto do sistema, contribuiu também para o embasamento da análise exergética.

O componente que apresentou a maior irreversibilidade foi o gerador, cuja participação com a irreversibilidade total do sistema foi de aproximadamente 60%. As menores eficiências exergéticas foram estabelecidas no gerador e no absorvedor.

A eficiência exergética, foi de $\beta = 0,35$. A análise exergética mostra resultados que confirmam a degradação da qualidade da energia pelo efeito das irreversibilidades existentes no sistema.

A refrigeração por absorção é uma tecnologia que utiliza fundamentalmente calor (e pouca ou nenhuma eletricidade) para a geração do frio, elimina a emissão de poluentes inerentes da refrigeração convencional, tem a possibilidade de operar com temperatura de evaporação abaixo da de projeto e pode utilizar como fonte de calor o gás natural, um energético alternativo disponível no mercado.

Esta unidade está sendo estudada para viabilizar o uso de câmaras frigoríficas com pouca dependência da energia elétrica, isto é, com sistema de absorção, visando a conservação de frutas na região.

5. REFERÊNCIAS

- Aphornratana S and Eames IW., 1995, "Thermodynamic Analysis of Absorption Refrigeration Cycles Using the Second Law of Thermodynamic Method", International Journal of Refrigeration.
- Bejan A., 1988, "Advanced Engineering Thermodynamics", New York: John-Wiley and Sons Inc.
- Herold KE, Radermacher R and Klein AS., 1996, "Absorption Chillers and Heat Pumps", USA: CRC Press.
- Kotas TJ., 1985, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis". London: Anchor Brendon Ltd., pp. 53-81.
- Cortez LA., 1998, "Estudos Técnicos e Economia de Energia em Refrigeração Aplicações da Amônia", Manaus: Editora da Universidade do Amazonas., pp. 239-253.
- Ng KC, Chua HT, Tu K, Chong NM., 1997, "Performance Study of Absorption Chillers: Thermodynamic Modeling and Experimental Verification", In: Proceedings of the International Symposia on Transport Phenomena in Thermal Science and Process Engineering, Kyoto/Japan.
- Santana GC e Torres EA., 2003, "Análise Exergética em dois Sistemas de Refrigeração por Absorção para uma Empresa do Setor Terciário", Anais do VI CIBEM, Coimbra, Portugal.
- Silveira JL, Freitas ES, Reis JA, Gouvêa PEM., 1999, "Produção de Ar Quente e Seco: Análise Experimental de uma Bomba de Calor", Anais do COBEM 1999, Água de Lindóia/SP., 178 p.
- Stoecker WF e Jabardo JMS., 1995, "Refrigeração Industrial", Editora Edgard Blücher, S. Paulo/Brazil, pp. 68-91.

- Szargut J, Morris DR, Steward FR., 1988, "Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process". New York: hemisphere Publishing Corporation.
- Torres EA., 1999, "Avaliação Exergética e Termoeconômica de uma Planta de Cogeração do Pólo Petroquímico" Tese (Doutor em Engenharia Mecânica).Departamento de Energia UNICAMP, Campinas-SP., 202 p.
- Wylen GV, Sontang R, Borgnake C., 1995, "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", Edgard Blücher Ltda., pp. 86-104.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ENERGETIC AND EXERGETIC ANALYSIS IN COLD CHAMBERS

Lair de Souza Bartolomeu

UFBA/Escola Politécnica/DEQ/PPEQ/LEN, Rua Aristides Novis, nº2, 3ºandar, Federação, CEP: 40210-630. Salvador-BA, lair_sb@click21.com.br

Ednildo Andrade Torres

UFBA/Escola Politécnica/DEQ/PPEQ/LEN, Rua Aristides Novis, nº2, 3ºandar, Federação, CEP: 40210-630. Salvador-BA, ednildo@ufba.br

Gabriel Francisco da Silva

Universidade Federal de Sergipe/DEQ, Av Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, CEP: 49100-000. São Cristóvão-SE, gabriel@ufs.br

Abstract. *The work consists of the energetic and exergetic analysis of a single effect absorption refrigeration system using the pair ammonia-water, as cooling, and using the direct burning of the natural gas. This project is supported by the RedeGásEnergia-PETROBRAS. The energy analysis had as objective to study the process involving the components of the cycle. Chiller Robur mark, which meets in the campus of the UFS/LTA and it was evaluated for an heat transfer rate the 28,28 kW, whose equipment cooling capacity changes from 10,55 to 24,61 kW (3 to 7 TR) and it supplied cooling for three cool chambers for fruits preservation. The intention of the energetic analysis was to study the process including the cycle and its components. According to the first law of thermodynamics a refrigeration power value it was found equals 17,58 kW and a COP=0.62 and from the second law $\beta = 0,35$. The exergetic analysis had as purpose evaluate the quantity and the quality of the energy in the system. The generator was the component that presented a great irreversibility, whose relationship with the total irreversibility is about 60%. In the absorber was observed the lesser exergetic efficiency.*

Keywords. Refrigeration, Absorption, Exergetic Efficiency, Energetic Analysis, Ammonia.