

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE TRABALHO NO DESTILADOR DE UM CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

E.W. Zavaleta-Aguilar, eli.zavaleta@itapeva.unesp.br

Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Itapeva, Rua Geraldo Alckmin, 519, 18409-010 - Itapeva, SP, Brasil

Resumo: Este trabalho constitui o estudo experimental de um componente importante de um ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água - o destilador. O destilador neste ciclo é o encarregado de produzir vapor de amônia de elevada pureza a partir de uma solução líquida concentrada de amônia-água. É proposto aqui um destilador de filme descendente composto somente por dois elementos: o gerador e o retificador. O objetivo deste trabalho é verificar a aplicabilidade da tecnologia de filme descendente no destilador de amônia-água e analisar experimentalmente a influência de diferentes parâmetros no funcionamento do destilador no que diz respeito à concentração e à vazão mássica de destilado de amônia produzida. Para isso, foi construído um arranjo experimental que permite variar temperatura, vazão e concentração da solução amônia-água, bem como, a temperatura do óleo térmico no gerador e da água de resfriamento no retificador. O aparelho pode trabalhar com pressão interna até 20 bar e temperatura até 150 °C. Os resultados foram satisfatórios e mostraram que é possível o uso da tecnologia de filme descendente no destilador sem a necessidade de uso de analisadores, além disso, mostrou-se que a concentração de amônia destilada aumenta quando incrementada a vazão mássica da solução concentrada e quando a temperatura do retificador, do gerador e da solução concentrada diminui. Porém, exceto na diminuição da temperatura do retificador, sempre quando o grau de pureza do destilado de amônia aumentava, sua vazão mássica diminuía. Foram realizados ensaios com duas concentrações de solução concentrada que são: 37 e 49 %. A pureza do destilado de amônia aumenta quanto maior for essa concentração, chegando até 99,74 %.

Palavras-chave: Destilador, transferência de calor, amônia-água, refrigeração.

1. INTRODUÇÃO

Problemas ambientais e preocupação com uso racional e eficiente da energia trazem novamente o interesse em utilizar ciclos de refrigeração por absorção (CRA). Os fluidos de trabalho mais comuns desses equipamentos são os pares amônia-água ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) e brometo de lítio-água ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$), os quais não contribuem na intensificação de fenômenos ambientais. Os CRAs consomem pouca energia elétrica para sua operação (10 % de um ciclo de refrigeração por compressão a vapor). Porém, precisam de energia térmica para seu funcionamento, que pode ser suprida por gases residuais de processos térmicos, também por energia solar, entre outros.

O ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água consegue temperaturas de refrigeração de até -60 °C (Colibri, 2014) por ser a amônia (R-717) a que produz o efeito refrigerante. Esse ciclo também pode trabalhar para condicionamento de ar com temperaturas no evaporador maiores que 0 °C. Por outro lado, esses ciclos são pesados. ARKLA Industries, Inc. (1972) informa que o destilador é, geralmente, o maior componente em um CRAA (ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água).

O destilador usado em ciclos de refrigeração por absorção de amônia-água de pequena capacidade usa pratos, que nesse caso é chamado de coluna de destilação. O projeto da coluna de um CRAA de 8 TR foi analisado por Anand e Erickson (1999) e a análise térmica e, o projeto da coluna de um CRAA de 5 TR foi analisado por Zavaleta-Aguilar e Simões-Moreira (2012). Uma nova geração de destiladores para CRAA's, em que a solução concentrada de amônia-água escoar ao redor de tubos horizontais do gerador em forma de filme descendente, que aqui chamaremos de tipo filme descendente, é estudada neste trabalho. Determan e Garimella (2011) indicaram que, nesta configuração, para o caso dos CRAA, ocorre transferência de calor e massa tal que dispensa o uso de analisador, fazendo com que o destilador seja de menor tamanho.

O estudo dos componentes dos ciclos de refrigeração por absorção que usam amônia-água estão presentes em menor número que os que usam $\text{BrLi-H}_2\text{O}$ e, para o caso do gerador esse estudo é ainda mais reduzido como apontado em Narváez-Romo *et al.* (2017). O presente trabalho apresenta o estudo do desempenho do destilador do ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água quando as variáveis de trabalho: vazão mássica da solução, temperatura do

óleo, temperatura da solução concentrada e concentração da solução concentrada são alteradas em condições de trabalho realísticas de pressão (12-16 bar). Esse desempenho está basicamente refletido no comportamento da vazão mássica e da concentração do vapor destilado de amônia quando alteradas as variáveis mencionadas. Deve ser notado que, segundo Herold *et al.* (1996), Fernandez-Seara e Sieres (2006), uma quantidade significativa de água na saída do destilador pode ser consequência de o evaporador não estar conseguindo resfriar o meio de interesse devido ao aumento da temperatura *glide*.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para análise dos parâmetros que influenciam no desempenho do destilador de filme descendente foi construído um arranjo experimental composto por três circuitos: solução de amônia-água, de aquecimento (óleo) e de resfriamento (água). Um esquema do arranjo construído é mostrado na Figura 1. Os elementos constituintes do circuito de solução amônia-água (circuito principal) foram fabricados em aço inoxidável (AISI 304 e AISI 316) e foram usados materiais vedantes como teflon (PTFE), o-ring de EPDM e outros, compatíveis quimicamente com essa solução nas temperaturas e pressões de trabalho. O gerador do ciclo foi constituído por 70 tubos horizontais de 8 mm OD, 1 mm de espessura e 150 mm de comprimento. Um distribuidor de solução localizado acima do gerador homogeneizou a solução concentrada nos primeiros tubos de cima. O gerador foi instalado dentro de uma cuba provida de dois visores de borosilicato, de 130 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, dispostos em lados opostos. Outros elementos desse circuito foram: o aquecedor de solução de amônia-água (com PID), o retificador, o condensador, o trocador de calor de solução, a bomba de solução, o aquecedor de solução, o misturador de solução e o tanque de solução. Esse circuito contava com uma válvula de alívio com pressão de abertura de 17 bar.

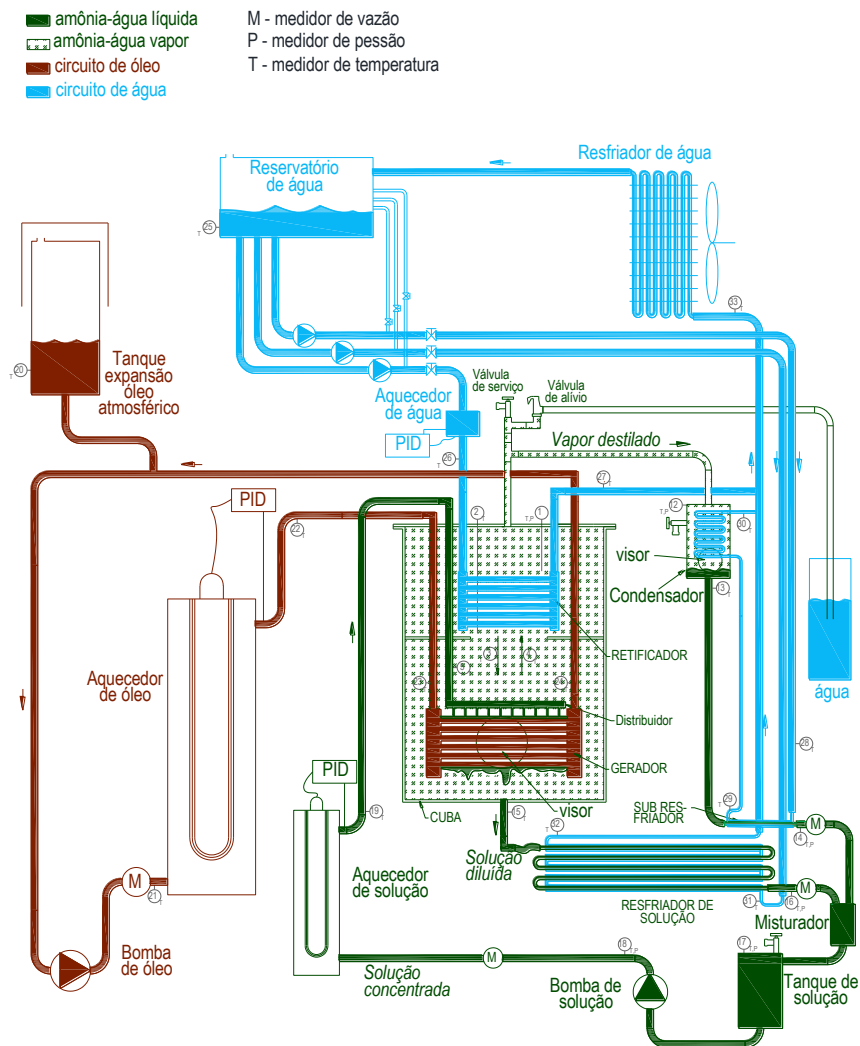


Figura 1: Esquema do arranjo experimental.

O circuito de aquecimento foi construído em aço carbono. O fluido de aquecimento, em óleo térmico sintético Therminol[®] 59. O óleo foi aquecido por resistência elétrica (com PID) e, posteriormente, esse óleo aquecia os tubos do gerador e estes à solução de amônia-água. O terceiro circuito foi o de resfriamento, cujo fluido de trabalho foi água, a

qual percorria o retificador, condensador e resfriador de água, sendo que cada sub-circuito contava com uma bomba independente. Foram instalados: sensores de temperatura (termopares) na entrada e na saída de cada trocador de calor, medidores de vazão mássica e densidade em três pontos do circuito de amônia-água (solução concentrada, solução diluída e amônia destilada), medidores de vazão nos circuitos de aquecimento e resfriamento e sensores de pressão. A concentração da solução amônia-água foi obtida de forma indireta usando o programa EES (*Engineering Equation Solver*, Klein, 2014) a partir de dados de densidade, pressão e temperatura. Todos os dados foram lidos e registrados usando dois sistemas de aquisição de dados (NI e Agilent).

A solução concentrada de amônia-água era aquecida no aquecedor de solução, e, em seguida, era dirigida até o distribuidor de solução e os tubos do gerador, onde acontecia a evaporação por filme descendente. O vapor formado, ainda com água, era purificado no retificador, depois esse vapor era liquefeito no condensador. A solução diluída saía pela parte inferior da cuba, continuava até o resfriador de solução e depois se encontrava com a amônia condensada no misturador. Posteriormente, essa solução concentrada prosseguia até o tanque de solução e a bomba de solução onde era dirigida ao aquecedor de solução elétrico.

A carga de fluido no circuito de amônia-água consistiu inicialmente na evacuação do mesmo até 2 mmHg (abs), seguidamente foi carregado com água deionizada e, finalmente, foi carregado com amônia. No carregamento de amônia, foi necessário, primeiramente, transferir esse fluido de um cilindro de 160 kg (80 de amônia + 80 kg do tanque) para um cilindro menor, de 10 L de capacidade, assim conseguiu-se uma melhor manobrabilidade. Para isso, foram colocadas mangueiras, engates rápidos, válvulas e um regulador de pressão como indicado na Figura 2. O cilindro menor foi carregado com 5,2 kg (Figura 2a).

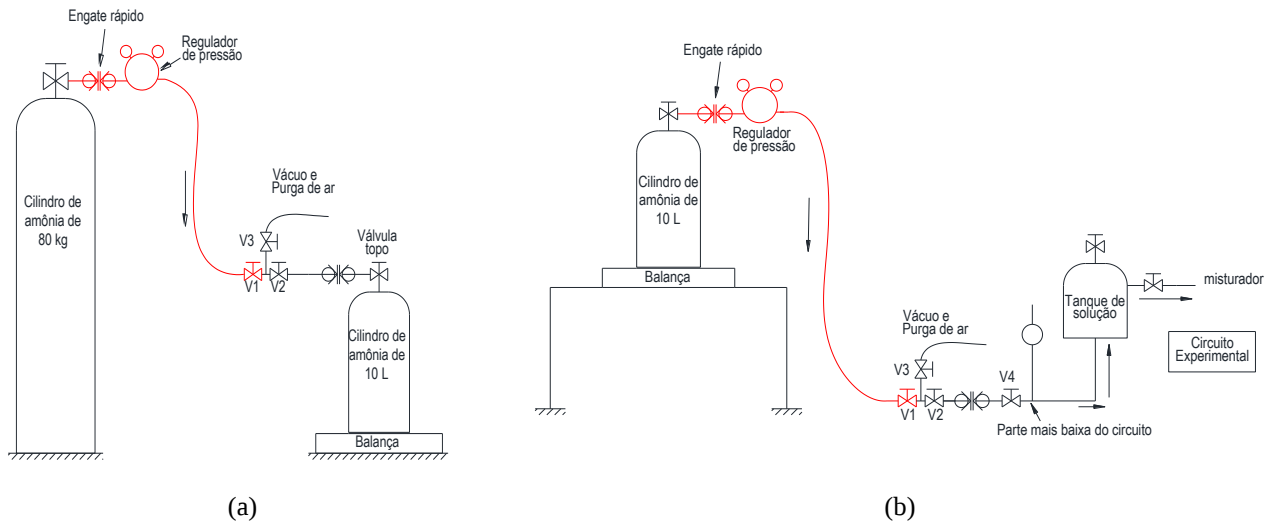


Figura 2: Esquema de (a) transferência de amônia para o cilindro de 10 L, (b) do tanque de 10 L para o circuito de amônia-água.

Seguidamente a amônia foi transferida do cilindro de 10 L para o circuito de amônia-água do arranjo experimental (Figura 2a). Foram testadas duas concentrações de solução de amônia-água: 0,37 e 0,49. Para cada caso foram verificadas a influência de: temperatura de aquecimento, temperatura de retificação, temperatura de solução concentrada e vazão mássica da solução concentrada, na concentração e vazão mássica da amônia destilada (purificada). Um esquema mostrando a posição dos parâmetros mencionado estão indicados na Figura 3 e as faixas de operação testadas estão indicado na Tabela 1.

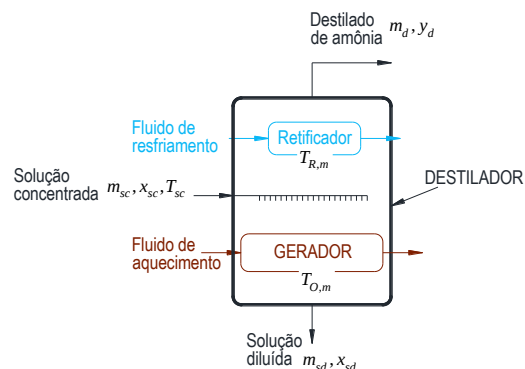


Figura 3: Esquema mostrando os parâmetros da Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de testes

Parâm	Descrição	Unid	Valor		Observação
x_{sc}	Concentração da solução concentrada	-	0,37	0,49	Segundo o programa PSSRA (Ortigosa, 2008) essas concentrações correspondem à temperatura de evaporação de -13 °C e 5 °C respectivamente.
m_{sc}	Vazão mássica da solução concentrada	kg/s	0,0160 – 0,0276		Indicada para um ciclo com capacidade de 1200 W e diferença de concentração entre solução concentrada e diluída de 3,4 a 2 % respectivamente (PSSRA)
$T_{R,m}$	Temperatura do retificador	°C	61,7 e 34,0		Uso de água de torre se resfriamento ou troca de calor com fluidos internos ao CRAA.
$T_{O,m}$	Temperatura do óleo	°C	110 – 135	97 – 125	Uso de fontes térmicas de cogeração ou energia solar.
T_{sc}	Temperatura da solução concentrada	°C	87 – 103	69 – 82	Temperaturas próximas à saturação devido ao reaproveitamento de energia térmica de fluidos internos só CRAA, especificamente da solução diluída que deixa o gerador.

3. RESULTADOS

A Figura 4a mostra a variação da concentração do destilado de amônia de acordo com a temperatura do óleo que é usado para aquecimento da mistura amônia-água seguido da sua evaporação. As curvas mostradas são para concentrações da solução concentrada de 0,37 e 0,49, e as mesmas indicam um decréscimo da concentração do destilado de amônia à medida que aumenta a temperatura do óleo, isso é devido ao aumento da massa evaporada de solução com menor concentração no gerador. Nota-se que a pureza do vapor destilado alcançada com a concentração da solução concentrada de 0,49 foi maior, como esperado. A vazão mássica da solução concentrada e a temperatura do retificador foram mantidas constantes. A Figura 4b indica a variação da vazão mássica do destilado de amônia de acordo com a temperatura do óleo. A vazão mássica do destilado de amônia aumenta com a temperatura do óleo para as duas concentrações. Porém, nota-se que a vazão mássica do destilado de amônia com $x_{sc} = 0,49$, foi menor que o esperado, isso aconteceu porque a temperatura ambiente aumentou, fazendo com que a pressão do destilador aumentasse (até 15,9 bar), bem como, a temperatura de saturação da solução concentrada, provocando uma menor taxa de evaporação. Percebe-se na Fig. 4b que a temperatura mínima média do óleo para obtenção de vapor destilado de amônia diminui com o aumento da concentração da solução concentrada, sendo que, para a concentração de 0,37 foi de 110 °C e para 0,49 foi de 98 °C.

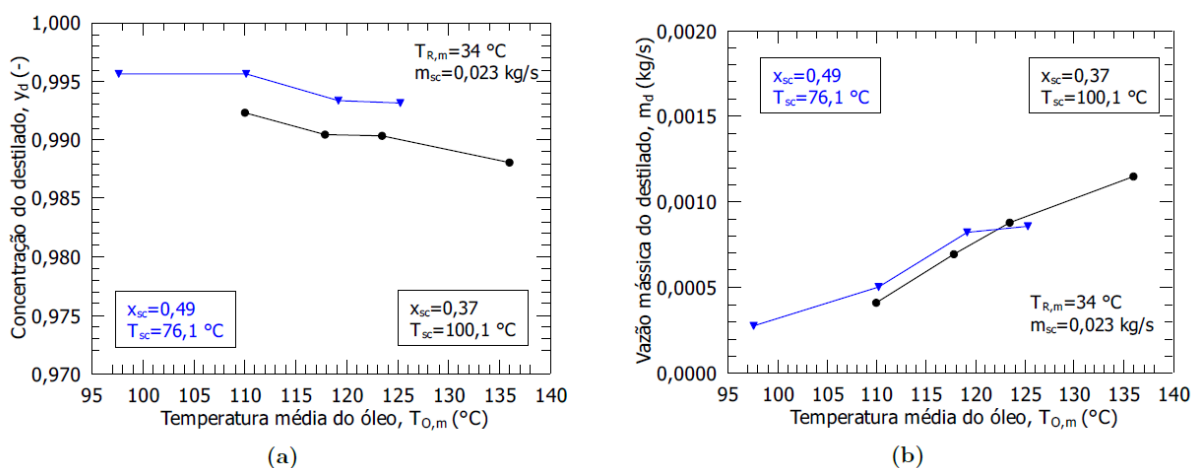


Figura 4: Variação da (a) concentração e; (b) vazão mássica do destilado de amônia com a temperatura do óleo.

A Figura 5a indica a comparação da variação da concentração do destilado de amônia em função da temperatura da solução concentrada, T_{sc} , para as duas concentrações da solução concentrada (0,37 e 0,49). A pureza do destilado diminui com o aumento da temperatura da solução concentrada para as duas concentrações de solução concentrada, conseguindo-se maior pureza para a concentração de 0,49. A pureza do vapor diminui com o aumento da temperatura da solução concentrada, já que o nível de sub-resfriamento diminui e os tubos conseguiram evaporar maior quantidade

de mistura líquida, inclusive os tubos superiores que tem o primeiro contato com a solução. Por outro lado, se a solução concentrada ingressa sub-resfriada os tubos superiores terão de aquecer o fluido até seu ponto de saturação para começar a evaporá-lo. O limite superior da temperatura da solução concentrada ensaiada foi a temperatura de saturação, T_{sat} , que é função da pressão do destilador e da concentração da solução concentrada na entrada do destilador e o limite inferior foi a temperatura onde não foi possível obter destilado de amônia, as quais foram de: 67,7 °C para a concentração de 0,49 e 87,0 °C para a concentração de 0,37. As tendências das curvas das vazões mássicas do destilado de amônia (como mostradas na Figura 5b) para as duas concentrações (0,37 e 0,49) foram as esperadas e seus valores foram semelhantes em função da diferença de temperaturas $T_{sat} - T_{sc}$.

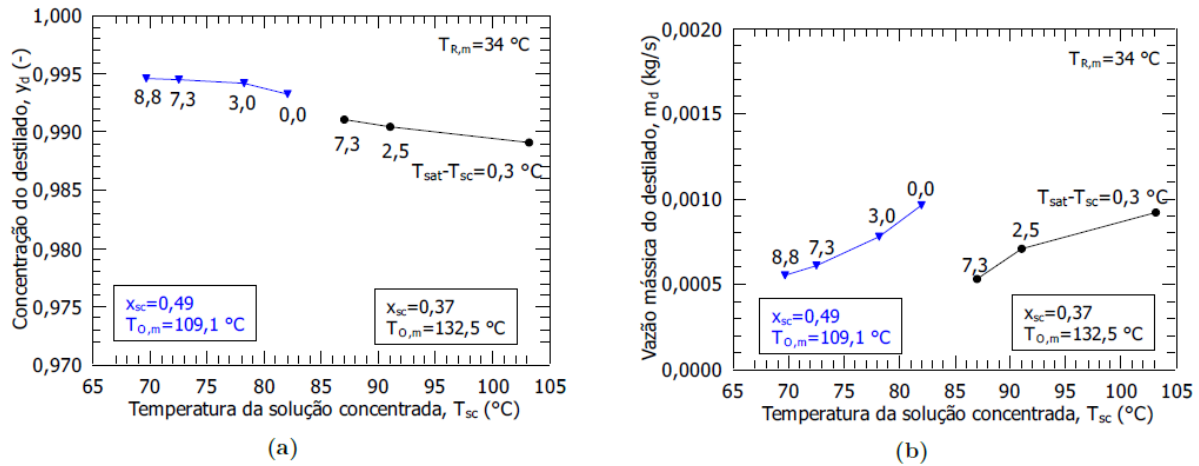


Figura 5: Variação da (a) concentração e; (b) vazão mássica do destilado de amônia com a temperatura da solução concentrada.

A Figura 6 indica que, para as duas concentrações de solução concentrada, a pureza do destilado de amônia aumenta com a vazão mássica da solução concentrada e com uma menor temperatura de retificação, esse aumento é menos sensível para a $T_{R,m} = 34$ °C. Para a concentração de 0,49, o aumento da pureza, em função da temperatura de retificação (espaçamento b), foi menos sensível que para a concentração de 0,37 (espaçamento a), isso se deve possivelmente a limites de purificação física. É provável que esse comportamento se repita para concentrações de solução concentrada maiores, isto é, para maiores concentrações x_{sc} haverá menores mudanças de y_d quando diminuída a temperatura de retificação. A vazão mássica do destilado diminuiu com o aumento da vazão mássica da solução concentrada para as duas concentrações da solução concentrada e para as duas temperaturas de retificação, sendo essa vazão sempre maior para a menor temperatura de retificação (34 °C), porém, essa variação não é significativa. A redução de m_d com o aumento de m_{sc} pode ser explicado pelo aumento da espessura do filme nos tubos, e, com isso, aumento da resistência térmica.

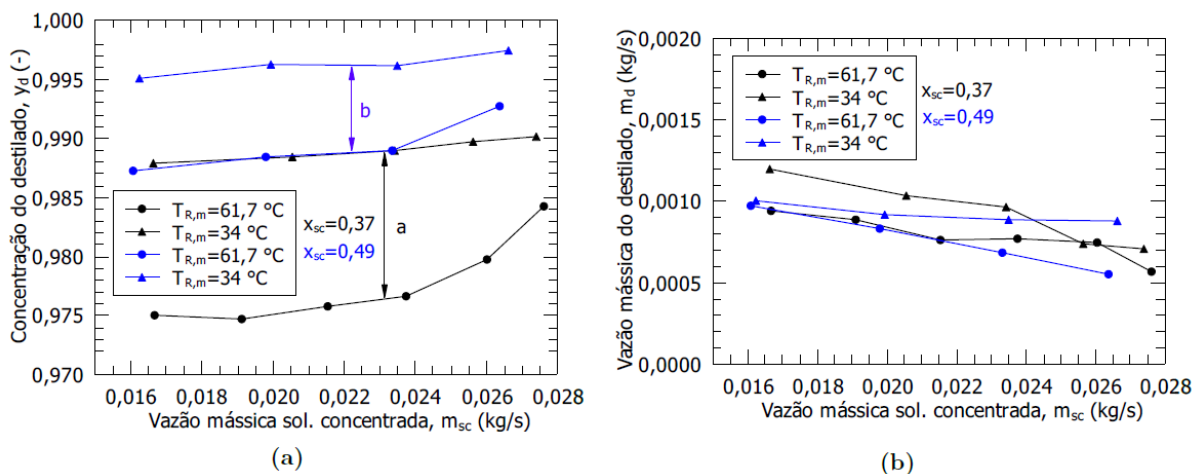


Figura 6: Variação (a) da concentração e; (b) da vazão mássica do destilado de amônia de acordo com a temperatura de retificação e da vazão mássica da solução concentrada.

4. CONCLUSÃO

Os testes experimentais mostraram que é possível aplicar a tecnologia de filme descendente a um destilador (gerador + retificador) de filme descendente para ser usado em um ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água, já que obteve-se vapor de amônia com pureza de até 99,74 % nas condições de temperatura e pressão reais de um CRAA. É possível obter amônia com concentrações maiores que 99 % em massa sem a necessidade de uso de um analisador (ou coluna de destilação com enchimentos randômicos ou estruturados). Nesta nova configuração (sem enchimento) o tamanho do destilador é reduzido. A pureza de amônia obtida neste trabalho foi superior à obtida por Mendes (2008) onde atingiu-se purezas máximas de 99,03 % numa coluna de pulverização e 99,12 % numa coluna de enchimento com selas novalox 1/2" (as mínimas foram de 97,54 e 98,25 % respectivamente). Parâmetros de influenciam no desempenho do gerador foram estudados.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) com processo nº 2010/10858-4.

6. REFERÊNCIAS

- ANAND, G.; ERICKSON, D. Compact sieve-tray distillation column for ammonia-water absorption heat pump: Part I - Design methodology. ASHRAE Transactions, v. 105, n. 1, p. 796 – 803, 1999.
- ARKLA Industries, Inc. Michael H. Sivak. Horizontal firing of generator in absorption refrigeration refrigerator, 1972. US 37500421, 21 jul. 1972.
- COLIBRI. Technical information on ammonia absorption refrigeration. 2014. Disponível em: <<http://www.colibri-bv.com/>>. Acesso em: 16.08.2014.
- DETERMAN, M. D.; GARIMELLA, S. Ammonia-water desorption heat and mass transfer in microchannel devices. International Journal of Refrigeration, v. 34, n. 5, p. 1197 – 1208, 2011.
- FERNÁNDEZ-SEARA, J.; SIERES, J. Ammonia-water absorption refrigeration systems with flooded evaporators. Applied Thermal Engineering, v. 26, n. 17–18, p. 2236 – 2246, 2006.
- HEROLD, K.; RADERMACHER, R.; KLEIN, S. Absorption Chillers and Heat Pumps. New York, EUA: CRC Press, 1996.
- KLEIN, S.A., Engineering Equation Solver, Academic Professional version V9.698-3D, F-Chart Software, 2014.
- MENDES, G. de A. Estudo de sistemas de refinação de vapor numa máquina de absorção de pequena potência alimentada por energia solar. Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2008.
- NARVAEZ-ROMO, B.; CHHAY, M.; ZAVALA-AGUILAR, E. W.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. A critical review of heat and mass transfer correlations for LiBr-H₂O and NH₃-H₂O absorption refrigeration machines using falling liquid film technology, v. 123, P. 1079 – 1095, 2017.
- ORTIGOSA, A. S. P.; PRETER, F. C.; LABOZETTO, R. L.; ZAVALA-AGUILAR, E. W.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. Modeling, and simulation of a commercial ammonia – water absorption refrigeration cycle for production of chilled water. Proceedings of the ENCIT – Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, p. 8p, 2008.
- ZAVALA-AGUILAR, E. W.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. Thermal design of a tray type distillation column of an ammonia/water absorption refrigeration cycle. Applied Thermal Engineering, v. 41, p. 52 – 60, 2012.

7. RESPONSABILIDADE AUTORMAL

“O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho”.

INFLUENCE OF WORKING PARAMETERS IN THE DISTILLER OF AN ABSORPTION REFRIGERATION CYCLE

E.W. Zavaleta-Aguilar, eli.zavaleta@itapeva.unesp.br

São Paulo State University (Unesp), Campus of Itapeva, Rua Geraldo Alckmin, 519, 18409-010 Itapeva, São Paulo, Brazil.

Abstract. This paper presents the experimental study of an important component of an ammonia-water absorption refrigeration cycle - the distiller. The distiller in this cycle is responsible for producing high purity ammonia vapor from a concentrated ammonia-water liquid solution. It is analyzed here a falling film distiller composed solely of two elements: the generator and the rectifier. The aim of this work is to verify the applicability of the falling film technology in the ammonia-water distiller and to analyze experimentally the influence of different parameters on the distiller performance, respecting the concentration and the mass flow rate of distillate ammonia produced. For that, an experimental setup that allows varying temperature, mass flow rate and ammonia-water solution concentration, as well as, the thermal oil temperature in the generator and the cooling water temperature in the rectifier was built. The experimental setup can work at an internal pressure up to 20 bar and temperature up to 150 °C. The results were satisfactory and showed that it is possible to use the falling film technology in the distiller without the use of analyzers, in addition, it was shown that the distilled ammonia concentration enhances when increased the concentrated solution mass flow rate and when the temperature of the rectifier, the generator and the concentrated solution decreases. However, except in the reduction of the rectifier temperature, whenever the purity of distilled ammonia increased, its mass flow rate decreased. There were performed tests with two concentrated solution concentrations: 37 and 49 %. As the concentration goes higher, the ammonia distillate purity increases, reaching up to 99.74 %.

Keywords: Distiller, heat transfer, ammonia-water, refrigeration