

Análise termodinâmica de um ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água – EVR2021-0035

Erick P. Cerqueira*, Beethoven Narváez-Romo, Wellorzzon R.I. Novais, José R. Simões-Moreira

SISEA – Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis
Depto. De Enga. Mecânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo, São Paulo, Brasil, CEP: 05508-900
*erickcerqueira@usp.br

Resumo

A demanda por energia elétrica aumentará significativamente nos próximos anos, sendo cada vez mais importante analisar os sistemas energéticos e procurar aperfeiçoá-los. Assim, a análise termodinâmica dos sistemas se mostra relevante em sistemas de conversão de energia, especialmente nos sistemas de refrigeração/climatização que são grandes responsáveis pelo aumento da demanda global de energia. O presente artigo tem como objetivo realizar uma análise termodinâmica de um ciclo real de refrigeração por absorção usando amônia-água como fluido de trabalho, a partir de balanços de massa e energia nos componentes do sistema. O software *Engineering Equation Solver* (EES) foi usado para cálculo de propriedades termodinâmicas e resolução do sistema de equações. Resultados da modelagem definem as condições de operação do ciclo, determinando cada um dos pontos do sistema, e o e coeficiente de desempenho.

Palavras-chave: Ciclo de refrigeração, Análise Termodinâmica, Absorção, Amônia-água.

Introdução

Conforme relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), a energia global necessária para aplicações de refrigeração e climatização será três vezes maior nos próximos 30 anos, caso as políticas, metas e projeções atuais se mantenham. Essa demanda de energia está amplamente relacionada ao crescimento econômico e populacional, principalmente nas regiões mais quentes do mundo. Visto isso, o aumento do número total de equipamentos de ar-condicionado e de refrigeração provocará ascensão na capacidade global de energia elétrica para que ocorra suprimento dessa demanda.

Atualmente o mercado global de ar-condicionado e refrigeração é dominado pelos sistemas de compressão de vapor, movidos a eletricidade e utilizando refrigerantes sintéticos, com considerável impacto no aquecimento global. Por consequência, torna-se cada vez mais necessário o estudo, desenvolvimento e aperfeiçoamento de outros modelos de resfriamento não convencionais, mais “limpos” e que demandem menor uso de energia elétrica.

Dessa forma, os sistemas HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) que utilizam do princípio de absorção de vapor ganham cada vez mais atenção de estudo e estão sendo mais utilizados, principalmente pela capacidade desses sistemas aproveitarem interações de calor residuais de baixa qualidade, energia solar, energia de fluidos geotérmicos e entre outros tipos de energia (SOTO e RIVERA, 2019). O presente projeto está fundamentado no ciclo de absorção de calor de amônia-água, uma vez que é possível atingir temperaturas menores que 0°C, considerando que o fluido refrigerante é amônia. Outra tecnologia corrente é o ciclo de absorção de calor de brometo de lítio-água, limitado às aplicações em ar-condicionado, já que o fluido de refrigeração é água. Ressalta-se que um dos grandes desafios

do futuro será voltado a gestão dos recursos naturais, e desse modo, a busca da melhor eficiência dos sistemas se torna ainda mais necessária. A análise mais completa de sistemas energéticos, portanto, se mostra importante.

Nessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo realizar a análise termodinâmica de um ciclo de refrigeração por absorção de amônia-água, avaliando os fluxos de calor e trabalho, através do balanço de massa e energia nos componentes do sistema. O sistema está localizado no Laboratório de sistemas energéticos alternativos e renováveis – SISEA, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Metodologia

O sistema que será estudado é um ciclo de refrigeração por absorção, composto por duas substâncias: amônia (NH₃), comportando-se como fluido refrigerante; e a água (H₂O), que se comporta como fluido absorvedor. Na maioria dos componentes do ciclo as duas substâncias coexistem em equilíbrio, com exceção do circuito do condensador e do evaporador, onde circula amônia pura (no caso ideal). A Fig. (1) apresenta uma fotografia do ciclo construído por Narváez-Romo (2020), e uma representação esquemática do circuito de amônia do ciclo (Fig. 2).

O sistema é composto por: (a) bomba de circulação da solução de amônia, conforme apresentado em Fig. (1); (b) dois trocadores de calor (TC1 e SC-100), para reaproveitamento de energia; (c) duas válvulas de expansão para redução da pressão do sistema; (d) absorvedor, que possui troca calor com o circuito de água; (e) condensador, que rejeita calor para um sistema à água; (f) evaporador, que absorve calor de um sistema de água e etileno glicol; (g) pré-aquecedor, responsável pelo aquecimento inicial da solução de amônia/água; (g) gerador, componente responsável por

gerar vapor de amônia em concentrações elevadas; (h) retificador, responsável por purificar o vapor de amônia através de troca térmica com um circuito de água; e (i) resfriador, que trabalha como regulador de temperatura da solução fraca no absorvedor.

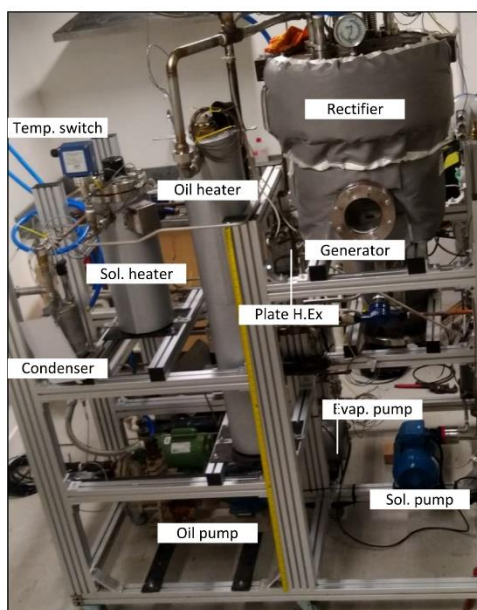


Figura 1: Sistema de refrigeração por absorção (Narváez-Romo, 2020)

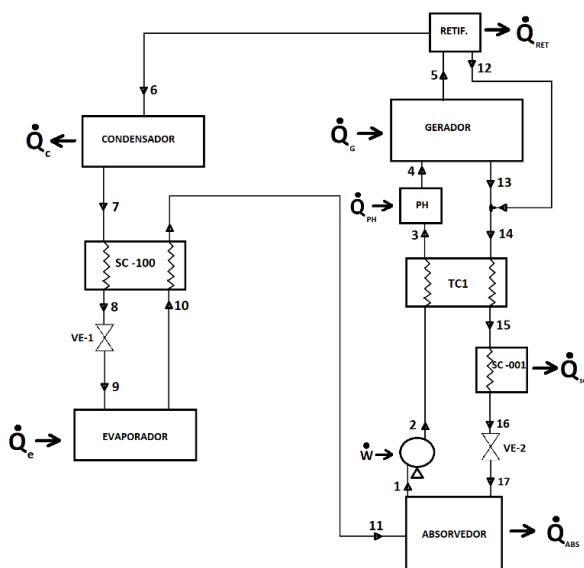


Figura 2: Representação esquemática do circuito de amônia do sistema estudado.

A Tab. (1) apresenta os pontos característicos do ciclo, com dados de pressão P (bar), temperatura T (K), vazão mássica $\dot{m}$ (kg/s) e fração mássica da mistura ($m_{NH_3}/m_{mistura}$).

Tabela 1: Pontos característicos do sistema de refrigeração por absorção

Ponto	Pressão (bar)	Temperatura (K)	Vazão (kg/s)	Fração mássica NH_3
1	1,902	297,57	0,02871	0,42
2	15,55	297,64	0,02871	0,42
3	15,55	356,37	0,02871	0,42
4	15,55	367,65	0,02871	0,42
5	15,55	383,15	0,00304	0,939
6	15,55	313,12	0,00264	1
7	15,55	313,15	0,00264	1
8	15,55	252,93	0,00264	1
9	1,902	253,16	0,00264	1
10	1,902	253,15	0,00264	1
11	1,902	378,12	0,00264	1
12	15,55	348,13	0,00041	0,5423
13	15,55	383,15	0,02567	0,3585
14	15,55	382,58	0,02607	0,3614
15	15,55	318,43	0,02607	0,3614
16	15,55	314,03	0,02607	0,3614
17	1,902	309,30	0,02607	0,3614

No ponto 1 há solução de concentração forte de amônia/água na pressão de baixa (líquido saturado) e, após passar pela bomba (ponto 2), a pressão do fluido aumenta, mas não altera significativamente a temperatura, enquanto a concentração é conservada.

Depois, o fluido passa pelo trocador de calor TC1 (ponto 3), absorvendo calor do fluido que retorna do gerador como solução fraca, ou seja, a temperatura aumenta, mas o fluido se mantém como líquido subresfriado. Em seguida, o fluido ganha ainda mais energia quando passa pelo pré-aquecedor (ponto 4), ainda se mantendo líquido subresfriado ou saturado.

Nesse momento o fluido entra no gerador (ponto 5), processo no qual é fabricado vapor com alta concentração de amônia, mas que precisa ser purificado. Também, no processo de separação, é gerada solução fraca de água/amônia que sai na base do gerador (ponto 13). O vapor que sai do gerador passa pelo retificador (ponto 6), onde é purificado devido a uma troca térmica, gerando vapor puro de amônia. O retificador também produz solução fraca de amônia/água, que sai na base do retificador (ponto 12).

Posteriormente, o vapor de amônia passa pelo processo de condensação no condensador (ponto 7) e se transforma em líquido saturado. No ponto 8, o fluido entra em um outro trocador de calor, perdendo assim energia térmica. No ponto 9, o fluido passa por uma válvula de expansão, onde ocorre a transição para pressão de baixa.

Em sequência, o fluido passa pelo evaporador (ponto 10), onde se torna vapor a baixa pressão, e depois passa pelo outro lado do trocador ganhando energia (ponto 11). Cabe ressaltar que a instalação desse trocador de calor pode incrementar em

8% a eficiência do ciclo de refrigeração por absorção, em especial, quando ele opera em cargas parciais.

No ponto 11, o vapor superaquecido de amônia entra no absorvedor, onde é absorvido pela solução fraca de amônia proveniente do ponto 17. Por consequência, o absorvedor gera solução forte de amônia no estado 1 e o ciclo se repete.

Também é importante notar que o condensado do retificador e do gerador se misturam no ponto 14, e logo após essa solução fraca passa pelo trocador de calor onde é resfriado, no ponto 15. Em seguida, passa pelo resfriador, onde perde ainda mais calor, saindo no ponto 16. O fluido passa pela válvula de expansão, reduzindo sua pressão (pressão de baixa) no ponto 17, onde o fluido entra no absorvedor.

Os estudos realizados nesse artigo ficaram restritos à análise da 1ª lei da termodinâmica, e para a definição das propriedades foi necessária a realização de balanços de massa e energia. As propriedades dos fluidos em todos os pontos do ciclo relatadas na Tab. (1) foram obtidas por meio de modelo computacional, utilizando o software EES (*Engineering Equation Solver*), a partir de resultados de testes e definição de condições operacionais. Da mesma forma, as propriedades termodinâmicas também foram obtidas a partir da simulação, mostrados na Tab. (2).

Tabela 2: Propriedades termodinâmicas do sistema de refrigeração por absorção.

Ponto	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Ponto	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	-123,507	0,2282	10	1243,52	4,9142
2	-121,912	0,22823	11	1525,34	5,8196
3	140,138	1,0313	12	104,561	0,92403
4	192,385	1,17560	13	274,93	1,3786
5	1558,6	4,9177	14	272,28	1,3727
6	1293,14	4,1698	15	-	0,5483
7	191	0,65702	15	-	0,4876
8	-90,8242	-0,34059	17	-	0,4930
9	-90,8242	-0,33252			

Resultados

Para a definição das propriedades termodinâmicas em cada ponto foram utilizadas as equações referentes aos balanços de massa e energia sobre a condição de regime permanente (adequadas ao caso estudado).

$$\sum_{entrada}^i \dot{m}_i = \sum_{saída}^j \dot{m}_j \quad (1)$$

$$\sum_{entrada}^i x_i \dot{m}_i = \sum_{saída}^j x_j \dot{m}_j \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{saída}^j \dot{m}_j h_j - \sum_{entrada}^i \dot{m}_i h_i \quad (3)$$

Na Tab. (3) se mostram as taxas energéticas e o COP, calculados com os balanços de massa e energia.

Tabela 3: Fluxos de energia nos componentes do sistema

Equipamento	Símbolo	Taxa de energia (kW)
Bomba	W _b	0,05388
PH	Q _{PH}	1,5
Gerador	Q _G	6,274
Retificador	Q _R	1,289
Condensador	Q _C	2,905
Evaporador	Q _E	3,517
Absorvedor	Q _A	6,642
SC-001	Q _{SC001}	0,5
Coefficiente de Performance	COP	0,5606

O coeficiente de performance calculado é considerado baixo se comparado a sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Entretanto, a análise mais precisa indica que o ciclo demanda uma fonte de energia solar ou residual, contrariamente aos ciclos de compressão a vapor tradicionais que são acionados por eletricidade.

Nota-se que existem grandes trocas de calor no absorvedor e no gerador, equipamentos responsáveis por realizar misturas e separações de fluidos nesse tipo de sistema. Também é possível perceber que os valores de vazão mássica são bem pequenos, pois o sistema opera com uma carga térmica relativamente baixa.

Conclusões

Os sistemas de refrigeração por absorção se mostram equipamentos ideais para utilização com energia solar e aproveitamento de energia térmica residual, como acontece com os sistemas de cogeração e trigeração. Os resultados apresentados do modelo indicam que podem ser considerados realistas, os quais farão parte de uma comparação com dados experimentais no futuro próximo. Uma dificuldade relativa no que diz respeito ao baixo coeficiente de performance quando comparado aos sistemas de compressão de vapor tradicionais deve ser relativizado e contextualizado, uma vez que os ciclos tradicionais são acionados por eletricidade, uma fonte secundária e nobre de energia ao passo que o equipamento é operado com fontes de energia térmica de baixo nível.

Agradecimentos

O primeiro e terceiro autor agradecem o apoio financeiro pessoal da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. O segundo autor agradece o apoio financeiro pessoal da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo. Este projeto foi suportado pela FAPESP - Projeto Nº. 2016/09509-1.

Referências

- Abbott, M.M., Van Ness, H.G, (1989). Thermodynamics with chemical applications. 2º edition. McGraw-Hill.
- Bejan, A. (2002). Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. International Journal of Energy Research, 26: 545-565.
- Çengel, Y., Boles, M. (2001). Thermodynamics: An engineering approach. 4th Edition. McGraw-Hill Science. 1056 pages.
- Narváez-Romo, B. (2020). An experimental study of an ammonia-water absorption refrigeration cycle using a novel modified horizontal liquid film absorption system / B. Narváez-Romo São Paulo.
- OECD/IEA. (2018). The Future of Cooling. Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning; OECD/IEA: Paris, France.
- Soto,P., Rivera,W. (2019). Experimental assessment of an air-cooled absorption cooling system. Applied Thermal Engineering 155, pages 147-146.
- Santos, P.H.D., Varani, C.M.R., Santos, C.A.C., Moreira, H.L. (2005) Dimensionamento de um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito, água-brometo de lítio, com gás natural como fonte térmica. IX Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar condicionado, Aquecimento e Tratamento de ar. São Paulo.
- Stegou-Sagia, A., Pagnigiannis, N. (2003). Exergy losses in refrigeration systems: A study for performance comparisons in compressor and condenser. International Journal of Energy Research 27:1067-1078.
- Talbi, M.M., Agnew, B. (2000). Exergy analysis: an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids. Applied Thermal Engineering, vol.20, pp. 619-630.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.