

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM CICLO DE REFRIGERAÇÃO DE ABSORÇÃO DE CALOR POR BROMETO DE LÍCIO E ÁGUA

Marcel Arekaki Sannomia
marcel.sannomia@gmail.com

Resumo. O presente trabalho destina-se à modelagem e simulação de um sistema de refrigeração de absorção de calor por brometo de lítio e água. Trata-se de um sistema similar ao ciclo de compressão de vapor, mas com menor consumo energético e de menor impacto ambiental. As simulações serão realizadas com o auxílio do software comercial EES - Engineering Equation Solver - uma importante ferramenta computacional para a resolução de problemas de termodinâmica. Em um primeiro momento foi adotado um modelo simples de refrigeração por absorção. Em seguida foi adotado um modelo mais eficiente, com mais elementos incorporados ao sistema de refrigeração simples. Os modelos adotados foram o sistema de simples efeito, o de simples efeito com trocador de calor e o de duplo efeito em série. A modelagem dos ciclos adotados foi realizada através do balanço de massa e de energia.

Palavras chave: Refrigeração por absorção, brometo de lítio, modelagem, simples-efeito, duplo-efeito, simulação.

1. Introdução

Os ciclos de compressão a vapor são caracterizados por operarem com grande consumo de trabalho de eixo, pois a elevação da pressão do refrigerante é conseguida por um compressor. Por outro lado, os ciclos de refrigeração por absorção são ciclos operados a calor, pois a maior parte do custo de operação está associada ao fornecimento de calor que libera o vapor do líquido a alta pressão. O interesse pela utilização de sistemas por absorção deve-se as possibilidades de utilização de rejeitos térmicos de processos industriais como insumo energético e o menor consumo de energia elétrica. Também é um sistema mais silencioso, livre de vibrações e causa menos impacto ambiental.

Os ciclos de absorção são operados por um par refrigerante/absorvente. Os pares mais comumente utilizados são o de amônia (refrigerante) e água (absorvente) e o par brometo de lítio (absorvente) e água (refrigerante). O par amônia e água é utilizado em aplicações industriais de baixas temperaturas, enquanto que o par brometo de lítio e água é predominantemente utilizado para aplicações com ar condicionado.

O presente estudo destina-se à modelagem e simulação de um ciclo de refrigeração de absorção por água e brometo de lítio. A modelagem consistiu nos balanços de massa e energia para cada componente do ciclo. A simulação será feita com o auxílio do software EES (*Engineering Equation Solver*), no próximo semestre.

2. Sistema de refrigeração por absorção brometo de lítio-água

A Figura (1) apresenta um ciclo de refrigeração por absorção de simples-efeito operado com brometo de lítio e água.

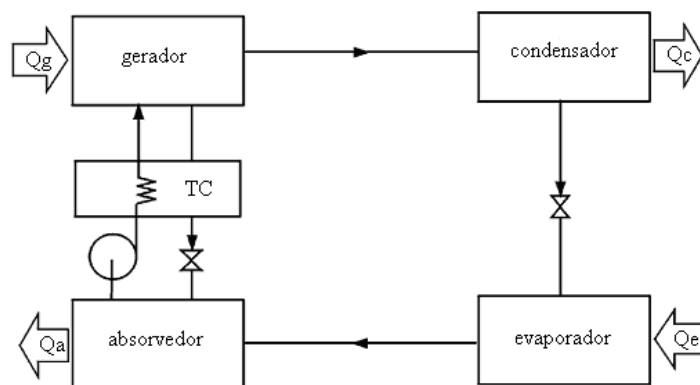


Figura 1. Sistema de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água (Srikhirin et al.)

O ciclo de absorção é composto por, basicamente, quatro processos, sendo dois deles caracterizados por trocas de calor e os outros dois caracterizados por trocas simultâneas de calor e massa. Estes processos são os seguintes:

- vaporização do refrigerante no evaporador;
- absorção do refrigerante pela solução no absorvedor;
- separação (dessorção) do refrigerante no gerador;
- condensação do refrigerante no condensador.

Refrigerante vaporizado proveniente do evaporador é absorvido pela solução forte de LiBr-água no absorvedor, o que dilui o absorvente transformando-o em solução fraca. Durante a absorção desse refrigerante ocorre condensação, liberando calor devido à mudança de fase. A bomba recebe essa solução, eleva sua pressão e a conduz para um trocador de calor – onde esta é pré-aquecida – e então para o gerador, onde calor de uma fonte de alta temperatura faz a separação (dessorção) do refrigerante através do processo de evaporação. Assim há a produção de um refrigerante vaporizado puro e de uma solução concentrada.

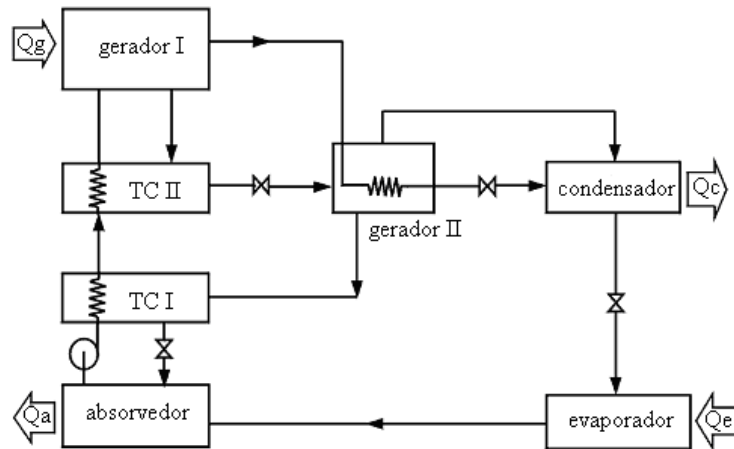


Figura 2. Sistema de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água de duplo-efeito (Srikhirin et al.)

Existem dois meios mais usuais de circular a solução fraca que vem do absorvedor. Um meio é de bombear essa solução para o gerador 1 e concentrá-lo numa solução concentrada intermediária. Essa solução concentrada intermediária é então encaminhada para o gerador 2 para se tornar uma solução concentrada forte. Esse tipo de ciclo é denominado duplo-efeito em série.

Outro meio é de concentrar a solução diretamente enviando a solução fraca para os dois geradores. Neles o absorvente fraco é concentrado e retorna para o absorvedor. Esse tipo de ciclo é denominado duplo-efeito em paralelo.

3. Modelagem

3.1. Modelo do ciclo de simples-efeito

A modelagem inicial consistiu no desenvolvimento do seguinte modelo esquemático de um ciclo de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água. Para cada componente foram realizados os balanços de massa e de energia.

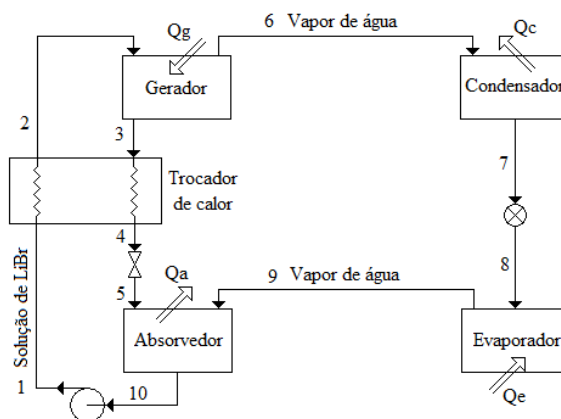


Figura 3. Modelo esquemático do ciclo de simples-efeito (Stoecker et al., 1985)

Absorvedor

Balanço de massa:

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \text{ (mistura)} \quad (1)$$

$$x_5 \dot{m}_5 + x_9 \dot{m}_9 = x_{10} \dot{m}_{10} \text{ (LiBr)} \quad (2)$$

Balanço de energia:

$$h_5 \dot{m}_5 + h_9 \dot{m}_9 = \dot{Q}_a + h_{10} \dot{m}_{10} \quad (3)$$

Bomba

Balanço de massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{10} \quad (4)$$

$$x_1 = x_{10} \quad (5)$$

Balanço de energia (processo isentrópico):

$$h_{1S} = h_{10} + w_{BS} = h_{10} + v_{10} \cdot (P_1 - P_{10}) = h_{10} + v_{10} \cdot \Delta P \quad (6)$$

O trabalho da bomba real deve considerar a eficiência da bomba:

$$w_B = \frac{w_{BS}}{\eta_B} \quad (7)$$

Gerador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_6 = \dot{m}_2 \quad (8)$$

$$\dot{m}_3 \cdot x_3 = \dot{m}_2 \cdot x_2 \quad (9)$$

Balanço de energia:

$$h_3 \dot{m}_3 + h_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_g + h_2 \dot{m}_2 \quad (10)$$

Válvulas

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{4,7} = \dot{m}_{5,8} \quad (11)$$

$$x_{4,7} = x_{5,8} \quad (12)$$

Balanço de energia:

$$h_{4,7} = h_{5,8} \quad (13)$$

Trocador de calor

A efetividade do trocador de calor é definida como a razão da transferência de calor atual pela máxima transferência de calor possível, portanto:

$$\varepsilon = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_1} \quad (14)$$

As diferenças de temperaturas do ramo 1-2 e 3-4 serão consideradas iguais:

$$T_1 - T_2 = T_4 - T_3 \quad (15)$$

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{1,3} = \dot{m}_{2,4} \quad (16)$$

$$x_{1,3} = x_{2,4} \quad (17)$$

Balanço de energia:

$$h_1 \dot{m}_1 + h_3 \dot{m}_3 = h_2 \dot{m}_2 + h_4 \dot{m}_4 \quad (18)$$

Condensador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (19)$$

Balanço de energia:

$$h_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_c + h_7 \dot{m}_7 \quad (20)$$

Evaporador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (21)$$

Balanço de energia:

$$h_9 \dot{m}_9 = \dot{Q}_e + h_8 \dot{m}_8 \quad (22)$$

3.2 Modelo do ciclo de duplo-efeito em série

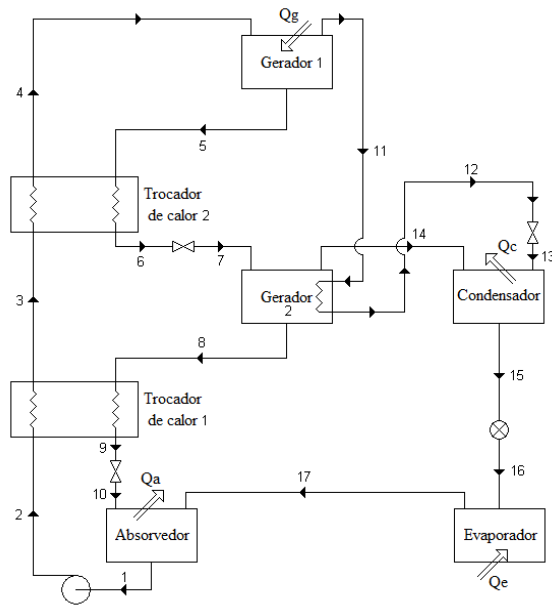


Figura 4. Modelo esquemático do ciclo de duplo-efeito em série (Dorgan et al., 1995)

O gerador 1 é análogo ao gerador do ciclo de simples-efeito, mas o gerador 2 e o condensador precisam ser formulados. Mesmo havendo mudança de configuração desse ciclo com o ciclo apresentado anteriormente, os balanços de massa e energia para os demais componentes do ciclo são análogos, bastando alterar o índice das variáveis.

Gerador 2

Balanço de massa:

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_7 \quad (23)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (24)$$

Balanço de energia:

$$h_8 \dot{m}_8 + h_{14} \dot{m}_{14} + h_{12} \dot{m}_{12} = h_{11} \dot{m}_{11} + h_7 \dot{m}_7 \quad (25)$$

Condensador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad (26)$$

Balanço de energia:

$$h_{13} \dot{m}_{13} + h_{14} \dot{m}_{14} = \dot{Q}_c + h_{15} \dot{m}_{15} \quad (27)$$

O coeficiente de desempenho (COP) para o ciclo de refrigeração por absorção é determinado pela Eq. (28).

$$COP = \frac{\text{Capacidade de refrigeração}}{\text{Taxa de adição de calor no gerador}} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{ger}} \quad (28)$$

4. Simulações

4.1. Dados de entrada e condições operacionais

A partir do equacionamento apresentado, um programa foi desenvolvido no EES para determinação dos principais estados termodinâmicos dos pontos do ciclo indicado na Fig. (4), assim como as vazões mássicas, as trocas de calor nos diversos componentes e o COP. Com base na literatura levantada, os seguintes dados de entrada e condições operacionais foram considerados:

4.1.1. Ciclo Simples com Trocador de Calor

Levou-se em consideração que a temperatura no ponto 6 é igual a temperatura no ponto 3.

Dados de entrada

Temperatura de condensação: $T_7 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de evaporação: $T_9 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Carga térmica: $Q_{\text{evap}} = 5\text{TR} = 17,58\text{kW}$
Fração mássica na saída do gerador: $x_3 = 59\%$
Fração mássica na saída do absorvedor: $x_{10} = 55\%$
Eficiência da bomba: $\eta_b = 0,85$
Efetividade do trocador de calor: $\varepsilon_{\text{TC}} = 0,7$

Condições Operacionais:

Título na saída do absorvedor: $q_{10} = 0$ (líquido saturado)
Título na saída do gerador: $q_6 = 1$ (vapor saturado)
Título na saída do condensador: $q_7 = 0$ (líquido saturado)
Título na saída do evaporador: $q_9 = 1$ (vapor saturado)

Igualdade de pressões:

$P_{10} = P_5 = P_9 = P_8 = P_{\text{baixa}}$
 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_6 = P_7 = P_{\text{alta}}$

4.1.2 Ciclo de Duplo Efeito em Série

Dados de entrada

Temperatura de condensação: $T_{15} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de evaporação: $T_{17} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura na saída do gerador 1: $T_{11} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura na saída do gerador 2: $T_{12} = 92 \text{ }^\circ\text{C}$
Carga térmica: $Q_{\text{evap}} = 5\text{TR}$
Fração mássica na saída do gerador 1: $x_5 = 59\%$
Fração mássica na saída do absorvedor: $x_1 = 55\%$
Fração mássica na saída do gerador 2: $x_8 = 62\%$
Pressão Alta: $P_5 = 77,52 \text{ kPa}$
Eficiência da bomba: $\eta_b = 0,85$
Efetividade do trocador de calor: $\varepsilon_{\text{TC}} = 0,7$

Condições Operacionais:

Título na saída do absorvedor: $q_1 = 0$ (líquido saturado)
Título na saída do condensador: $q_{15} = 0$ (líquido saturado)
Título na saída do evaporador: $q_{17} = 1$ (vapor saturado)

Igualdade de pressões:

$P_1 = P_{10} = P_{17} = P_{16} = P_{\text{baixa}}$
 $P_7 = P_8 = P_9 = P_{13} = P_{14} = P_{15} = P_{\text{intermediária}}$
 $P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_{11} = P_{12} = P_{\text{alta}}$

4.2. Resultados

4.2.1. Ciclo Simples com Trocador de calor

Tabela 1 - Resultados da Simulação 1

COP	qabs (kW)	qcond (kW)	qger (kW)	w_br (kW)
0,8649	27,73	18,6	20,33	0,0004412

Tabela 2 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 1

Pontos do Ciclo	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	x (% de LiBr)	\dot{m} (kg/s)
1	6,28	69,99	80,65	55	0,1101
2	6,28	75,82	167,8	55	0,1101
3	6,28	78,32	185,6	59	0,1027
4	6,28	72,49	174,1	59	0,1027
5	0,8726	41,36	174,1	59	0,1027
6	6,28	78,32	2646	0	0,007466
7	6,28	37	155	0	0,007466
8	0,8726	5,002	155	0	0,007466
9	0,8726	5	2510	0	0,007466
10	0,8726	33,71	80,65	55	0,1101

4.2.2. Ciclo de Duplo Efeito em Série

Tabela 3 - Resultados da Simulação 2

COP	qabs (kW)	qcond (kW)	qger (kW)	w_br (kW)
1,232	21,86	11,8	14,27	0,003756

Tabela 4 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 2

Pontos do Ciclo	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	x (% de LiBr)	\dot{m} (kg/s)
1	0,8726	33,71	80,65	55	0,06613
2	77,52	33,74	80,7	55	0,06613
3	77,52	69,68	155,1	55	0,06613
4	77,52	120,8	261,2	55	0,06613
5	77,52	142,7	311,9	59	0,06164
6	77,52	91,59	211,6	59	0,06164
7	6,28	78,32	211,6	59	0,06164
8	6,28	85,09	211,4	62	0,05866
9	6,28	49,14	144,1	62	0,05866
10	0,8726	47,39	144,1	62	0,05866
11	77,52	135	2748	0	0,004483
12	77,52	92	385,4	0	0,004483
13	6,28	37,17	385,4	0	0,004483
14	6,28	89,86	3766	0	0,002983
15	6,28	37	155	0	0,007466
16	0,8726	5,013	155	0	0,007466

17	0,8726	5	2510	0	0,007466
----	--------	---	------	---	----------

5. Conclusões

A proposta inicial foi obter a modelagem do ciclo de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água com capacidade de 5 TR e depois desenvolver a simulação no software EES.

Utilizando o balanço de massa e de energia foi possível modelar os componentes dos ciclos. Através do software EES foi possível atingir o principal objetivo deste trabalho, que foi a simulação do ciclo de duplo-efeito. Também foi feita a simulação do ciclo simples com trocador de calor, para efeitos de comparação com o ciclo de duplo-efeito em série. Com a simulação foi possível determinar as principais propriedades termodinâmicas de cada ponto do ciclo, assim como os valores dos coeficientes de desempenho. Os valores obtidos pelo programa são compatíveis e próximos de valores obtidos em outros trabalhos na literatura. Também ficou confirmado que o valor do COP do ciclo de duplo-efeito é maior do que o do ciclo de simples efeito, fato levantado na literatura.

6. Referências

- Rodrigues, S. A. de O., 2005, “Modelagem de um Ciclo de Refrigeração por Absorção de Amônia”, 46p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Ortigosa, A. S. P., 2007, “Modelagem, Simulação e Otimização de um Ciclo Comercial de Produção de Água Gelada por Absorção de Amônia”, 66p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Dorgan, C. B.; Leight, S. P.; Dorgan, C. E., 1995, “Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration Using Recovered Heat”, 186p.
- Herold, K.E.; Radermacher, R.; Klein, S.A, 1995, “Absorption Chillers and Heat Pumps”, CRC Press, New York, 329p.
- Stoecker, J. G.; Jones, J. W., 1985, “Refrigeração e Ar Condicionado”, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 481p.
- Júnior, S. O.; Tribess, A.; Neto, A. H.; Fiorelli, F. A. S. Sistemas de Refrigeração por Absorção. São Paulo, 2004 (Apostila da disciplina Refrigeração Industrial e Comercial, curso de engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).
- Santos, P. H. D.; Santos, C. A. C.; Varani, C. M. R.; Souza, C. A.; Moreira, H. L. Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração por Absorção de Duplo Efeito Utilizando a Solução de Brometo de Lítio-Água e Gás Natural como Fonte de Calor. Universidade Federal da Paraíba, 10p.
- Srikhirin, P.; Aphornratana, S.; Chungpaibulpatana, S. A Review of Absorption Refrigeration Technologies. Patumthani: Thammasat University, 30p.
- Gomri, R.; Hakimi, R.; Second Law Analysis of Double Effect Vapour Absorption Coller System. Constantine: Constantine University, 6p.
- Kaushik, S. C.; Arora, A. Energy and Exergy Analysis of Single Effect and Series Flow Double Effect Water-Lithium Bromide Absorption Refrigeration Systems. Nova Delhi: Indian Institute of Technology, 12p.
- Hartnett, J. P.; Minkowycz, W. J. A Comparison Between Ammonia-Water and Water-Lithium Bromide Solutions in Vapor Absorption Refrigerations Systems, Turkey, University of Uludag, 11p.

7. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

MODELING AND SIMULATION OF A REFRIGERATION CYCLE OF ABSORPTION OF HEAT BY LITHIUM BROMIDE AND WATER

Marcel Arekaki Sannomia
marcel.sannomia@gmail.com

Abstract. This report is a modeling and a simulation of an absorption refrigeration system by lithium bromide and water. It is a system similar to the vapor compression cycle, but with less energy consumption and lower environmental impact. The simulations will be carried through the commercial software EES - Engineering Equation Solver - an important computational tool for solving problems of thermodynamics. At first, a simple model of absorption refrigeration system was used. Further, a more efficient model was used, with more elements into the simple-effect refrigeration system. The models used were the simple-effect system, the simple-effect system with heat exchanger and the double-effect system in series. The modeling of the cycles was taken through the balance of mass and energy.

Keywords. *absorption refrigeration, lithium bromide, modeling, single-effect, double-effect, simulation.*