

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

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

Marcel Arekaki Sannomia

**São Paulo
2009**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

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

**Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Marcel Arekaki Sannomia

Orientador: José Roberto Simões Moreira

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2009**

FICHA CATALOGRÁFICA

Sannomia, Marcel Arekaki

Modelagem e simulação de um ciclo de refrigeração de absorção de calor por brometo de lítio e água/ M. A. Sannomia. São Paulo, 2009.

40p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Refrigeração 2. Lítio 3. Simulação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

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.

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.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 3 |
| 2.1 Propriedades termodinâmicas de misturas binárias | 5 |
| 2.2 Sistemas de refrigeração por absorção brometo de lítio – água | 7 |
| 2.3 Ciclos de refrigeração de absorção de simples-efeito..... | 8 |
| 2.4 Ciclos de refrigeração de absorção de duplo-efeito | 8 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 11 |
| 4 RESULTADOS..... | 12 |
| 4.1 Modelagem do ciclo de simples-efeito | 12 |
| 4.1.1 Balanço no absorvedor | 13 |
| 4.1.2 Balanço na bomba | 13 |
| 4.1.3 Balanço no gerador | 14 |
| 4.1.4 Balanço nas válvulas | 14 |
| 4.1.5 Balanço no trocador de calor | 15 |
| 4.1.6 Balanço no condensador | 16 |
| 4.1.7 Balanço no evaporador | 16 |
| 4.2 Modelagem do ciclo de duplo-efeito em série | 17 |
| 4.2.1 Balanço no absorvedor | 18 |
| 4.2.2 Balanço na bomba | 18 |
| 4.2.3 Balanço no gerador 1 | 19 |
| 4.2.4 Balanço no gerador 2 | 19 |
| 4.2.5 Balanço nas válvulas | 20 |
| 4.2.6 Balanço no trocador de calor 1 | 20 |
| 4.2.7 Balanço no trocador de calor 2 | 21 |
| 4.2.8 Balanço no condensador | 22 |
| 4.2.9 Balanço no evaporador | 22 |
| 4.3 Simulação | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.1 Ciclo Simples sem Trocador de Calor | 23 |
| 4.3.2 Ciclo Simples com Trocador de Calor | 25 |
| 4.3.3 Ciclo de Duplo Efeito em Série | 26 |
| 4.4 Programa computacional | 29 |
| 4.5 Análise Paramétrica..... | 30 |
| 5 DISCUSSÃO | 32 |
| 6 CONCLUSÕES | 34 |
| ANEXO A – CRONOGRAMA | 35 |
| ANEXO B – ROTINA PARA A SIMULAÇÃO DO CICLO DE DUPLO EFEITO EM SÉRIE | 36 |
| 7 LISTA DE REFERÊNCIAS | 39 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Diagrama temperatura-fração mássica para a mistura A-B..... | 6 |
| Figura 2.2 - Ciclo de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água | 7 |
| Figura 2.3 - Ciclo de refrigeração por absorção de duplo-efeito | 9 |
| Figura 4.1 - Modelo esquemático do ciclo de simples-efeito com trocador de calor | 12 |
| Figura 4.2 - Esquema do absorvedor..... | 13 |
| Figura 4.3 - Esquema da bomba..... | 13 |
| Figura 4.4 - Esquema do gerador | 14 |
| Figura 4.5 - Esquema das válvulas..... | 14 |
| Figura 4.6 - Esquema do trocador de calor | 15 |
| Figura 4.7 - Esquema do condensador | 16 |
| Figura 4.8 - Esquema do evaporador | 16 |
| Figura 4.9 - Modelo esquemático do ciclo de duplo-efeito em série..... | 17 |
| Figura 4.10 - Esquema do absorvedor..... | 18 |
| Figura 4.11 - Esquema da bomba..... | 18 |
| Figura 4.12 - Esquema do gerador 1 | 19 |
| Figura 4.13 - Esquema do gerador 2 | 19 |
| Figura 4.14 - Esquema das válvulas..... | 20 |
| Figura 4.15 - Esquema do trocador de calor 1 | 20 |
| Figura 4.16 - Esquema do trocador de calor 2 | 21 |
| Figura 4.17 - Esquema do condensador | 22 |
| Figura 4.18 - Esquema do evaporador | 22 |
| Figura 4.19 - Modelo esquemático do ciclo de simples-efeito | 23 |
| Figura 4.20 – Tela inicial do software desenvolvido para simulação de sistemas de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água | 29 |
| Figura 4.21 Efeito da variação das temperaturas de condensação e evaporação no COP | 30 |
| Figura 4.22 Efeito da variação da diferença de concentração no COP | 31 |
| Figura 4.23 Efeito da variação da temperatura de evaporação no COP..... | 31 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4. 1 – Resultados da Simulação – modelo 1..... | 24 |
| Tabela 4. 2 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 1..... | 25 |
| Tabela 4. 3 - Resultados da Simulação – modelo 2 | 26 |
| Tabela 4. 4 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 2..... | 26 |
| Tabela 4. 5 - Resultados da Simulação – modelo 3 | 28 |
| Tabela 4. 6 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 3..... | 28 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|--|
| COP | coeficiente de desempenho |
| EES | engineering equation solver |
| h | entalpia específica |
| LiBr | brometo de lítio |
| \dot{m} | vazão mássica |
| P | Pressão |
| \dot{q}, \dot{Q} | taxa de transferência de calor |
| q, Q | calor transferido por unidade de massa e calor transferido total |
| T | Temperatura |
| x | Título |
| x | fração mássica |

Letras gregas

| | |
|---------------|-------------------|
| ε | Efetividade |
| η | Eficiência |
| ν | volume específico |

Índices

| | |
|---------|-------------------|
| 1,2... | pontos do ciclo |
| a | Absorvedor |
| b | Bomba |
| c | Condensador |
| e | Evaporador |
| r, real | Real |
| s | Isoentrópico |
| TC | trocador de calor |

1 INTRODUÇÃO

O ciclo de refrigeração por absorção é uma opção ao ciclo de compressão a vapor. No ciclo de compressão a vapor a transformação de vapor de baixa pressão em vapor de alta pressão ocorre por meio de um compressor. Já no ciclo de refrigeração por absorção a elevação da pressão ocorre através da conversão do vapor em líquido, desde que esse processo é similar ao de condensação, ocorre remoção de calor. Depois, através de uma bomba há a elevação da pressão do líquido e por fim ocorre a liberação do vapor com a adição de calor.

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 trabalho necessário para acionar a bomba, para uma dada quantidade de refrigeração é mínima, comparada àquela que seria necessária no ciclo de compressão a vapor.

O sistema de refrigeração por absorção foi patenteado nos Estados Unidos em 1860 pelo francês Ferdinand Carré. Provavelmente seu primeiro uso foi para o suprimento de gelo durante a Guerra Civil americana, entre os Estados Confederados e os Estados do Norte. Foi um sistema predecessor ao sistema de compressão de vapor, sendo que os sistemas de refrigeração por absorção de água-amônia tinham grande aplicação em refrigeradores domésticos. Nos anos 40 e 50 o sistema de brometo de lítio e água foi comercializado como resfriador de água para ar condicionado de grandes edifícios.

Existem vários pares de substâncias que funcionam como absorvente e refrigerante, mas usualmente são utilizados os pares de brometo de lítio e água, com água como refrigerante e brometo de lítio como absorvente ou amônia e água, com amônia como refrigerante e água como absorvente.

O par água/amônia geralmente necessita de um retificador, diferentemente do par brometo de lítio/água, que tem como absorvente uma substância não volátil. Além do mais, o calor específico da solução água/amônia é aproximadamente o dobro da de sistemas com brometo de lítio e água. Ou seja, se houver alguma

ineficiência na troca de calor da solução ocasionará graves danos ao sistema de água/amônia. A amônia é uma substância tóxica, o que restringe seu uso a áreas bem ventiladas. Uma desvantagem do uso do par brometo de lítio e água é que ele é limitado a temperaturas de refrigeração superiores a 0°C, enquanto que plantas de refrigeração que utilizam amônia podem alcançar temperaturas de refrigeração muito menores. Também existe a possibilidade de cristalização do brometo de lítio, o que pode bloquear o escoamento nos tubos do sistema. Outra desvantagem é que os sistemas que utilizam brometo de lítio e água precisam ser purgados periodicamente, já que operam a pressões abaixo da atmosférica, o que resulta em infiltrações de ar no sistema.

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.

Comparando o ciclo de absorção de estágio único do brometo de lítio/água e da água/amônia em termos de desempenho, o sistema de brometo de lítio/água é mais eficiente.

O ciclo de absorção tem menor eficiência quando comparado ao ciclo de compressão a vapor. Entretanto, o interesse pela utilização de sistemas por absorção deve-se às 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.

Isto posto, o presente estudo destina-se à modelagem e simulação de um ciclo de refrigeração de absorção por água e brometo de lítio com capacidade de refrigeração de 5 TR.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Uma grande vantagem dos ciclos de refrigeração por absorção é o reaproveitamento dos rejeitos térmicos para fins de insumo energético. Esse processo é a cogeração, que consiste no reaproveitamento de maneira eficiente dos rejeitos térmicos para serem reaproveitadas como fonte de calor do ciclo de absorção, além de ser benéfica ao meio ambiente.

Stoecker e Jones (1985) apresentam uma análise dos ciclos de refrigeração por absorção, estabelecem relações entre o ciclo de absorção e o de compressão a vapor e apresentam alguns exemplos de cálculos de sistemas de absorção. A maior ênfase é dada aos sistemas que operam com água como refrigerante e brometo de lítio como absorvente.

Herold, Hadermacher e Klein (1996) abordam os ciclos de refrigeração por absorção de forma mais detalhada, tanto os sistemas operando com brometo de lítio e água como os operados por água e amônia. O texto também contempla as propriedades dos fluidos de trabalho do ciclo de refrigeração por absorção, apresentando diversos diagramas, como por exemplo, temperatura por fração mássica ou entalpia fração mássica. E faz uma introdução ao software EES, traz exemplos e modela os componentes do ciclo, tornando-o uma referência de grande valia, tanto para a modelagem como para a simulação.

Ortigosa (2007) desenvolve a modelagem e a simulação de um ciclo de absorção por água e amônia, com enfoque em ciclos comerciais. Apresenta de modo gradual um modelo complexo mais próximo do real. Também faz uma explicação clara sobre as propriedades termodinâmicas das misturas binárias.

Rodrigues (2005) desenvolve a modelagem de um ciclo de refrigeração por absorção operando com água e amônia, com enfoque em ciclos teóricos. Através da modelagem de um modelo mais simplificado e a utilização do software EES demonstra a validade do modelo.

B. Dorgan, Leight e E. Dorgan (1995) apresentam um guia dos ciclos de refrigeração por absorção. De forma esquemática apresenta os ciclos de duplo efeito para o par brometo de lítio e água utilizados neste trabalho e também indicam passo a

passo o caminho percorrido pelo refrigerante e pelo absorvente no ciclo de refrigeração.

Artigos relacionados ao ciclo de refrigeração por absorção de calor de brometo de lítio e água foram utilizados para efeito de comparação de resultados. Tais artigos foram pesquisados no *Science Direct*, onde artigos científicos de periódicos nas áreas de ciência, tecnologia e medicina estão à disposição. Também foram de grande ajuda para diferenciar os tipos de ciclos existentes.

2.1 Propriedades termodinâmicas de misturas binárias

Os ciclos de refrigeração por absorção dependem do tipo de par refrigerante/absorvente adotado, tornando-se necessário um estudo das propriedades de misturas binárias.

Uma mistura binária não tem seu estado termodinâmico determinado por apenas duas propriedades independentes, como as substâncias puras. É necessário levar em consideração mais uma propriedade, a composição (x). Os diagramas de temperatura-fração mássica ($T-x$) e os de entalpia-fração mássica ($h-x$) são os diagramas mais utilizados. O enfoque desse trabalho será dado ao diagrama de temperatura-fração mássica, uma vez que basta apenas um dos diagramas para a determinação do estado termodinâmico.

A fração mássica é definida como:

$$x = \frac{\text{massa de um dos componentes [kg]}}{\text{massa da mistura [kg]}} \quad (2.1)$$

A figura a seguir apresenta um diagrama temperatura-fração mássica ($T-x$) para uma mistura de dois componentes, A e B , a pressão constante. A escala do eixo da fração mássica parte do 0 (onde apenas o componente A está presente) até 1 (onde apenas o componente B está presente). A região abaixo da linha de ebulição representa um líquido sub-resfriado. A região acima da linha de condensação representa vapor superaquecido. Essas regiões mantêm a composição inicial, já que são regiões sem mudança de fase. Já a área entre as linhas de ebulição e condensação é uma região bifásica. Nessa região as composições das fases variam com a temperatura, apesar da concentração total permanecer a mesma. A concentração de vapor acompanha a linha de condensação, enquanto que a concentração de líquido acompanha a linha de ebulição.

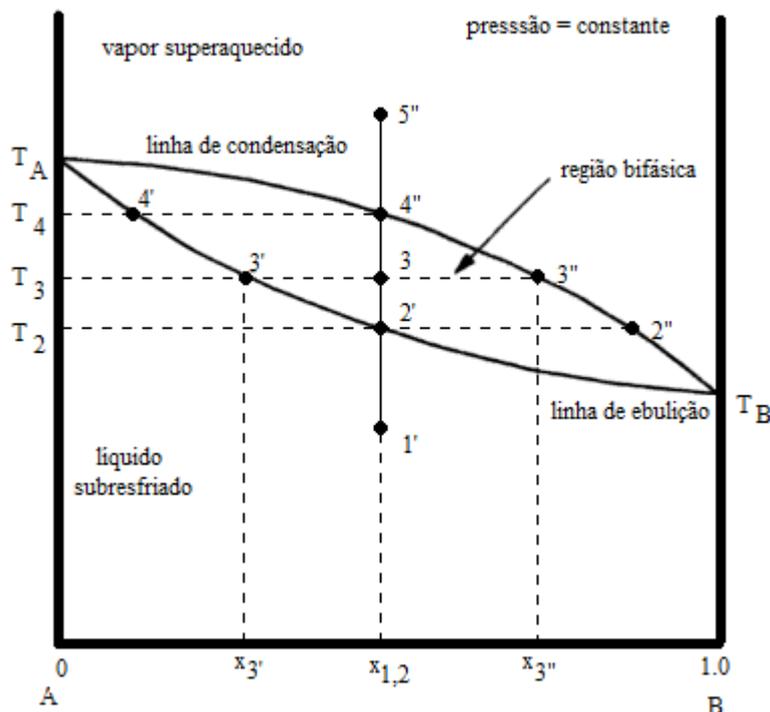


Figura 2.1 - Diagrama temperatura-fração mássica para a mistura A-B

O processo se inicia com líquido sub-resfriado no ponto $1'$. Com a lenta transferência de calor à mistura, a pressão constante, a temperatura aumenta e a linha de ebulição é atingida no ponto $2'$, onde há a formação da primeira bolha de vapor. O vapor formado tem sua fração mássica indicada pelo ponto $2''$.

Na medida em que o aquecimento continua, o processo de evaporação leva ao ponto 3 , onde a fração mássica do vapor em equilíbrio com o líquido restante é representada pelo ponto $3''$. A fração mássica do líquido é agora indicada por $3'$. Conforme o processo de evaporação continua, os pontos correspondentes às fases líquida e de vapor continuam a seguir as linhas de ebulição e condensação, respectivamente. Quando o ponto $4''$ é atingido, o processo de evaporação é completado, o vapor possui a mesma fração mássica que o líquido sub-resfriado original e a fração mássica da última gota de líquido é indicada pelo ponto $4'$. Continuando o aquecimento da mistura, o ponto $5''$ é atingido, produzindo vapor superaquecido.

2.2 Sistemas de refrigeração por absorção brometo de lítio – água

A Figura 2.2 apresenta um ciclo de refrigeração por absorção de simples-efeito com trocador de calor operado com brometo de lítio e água.

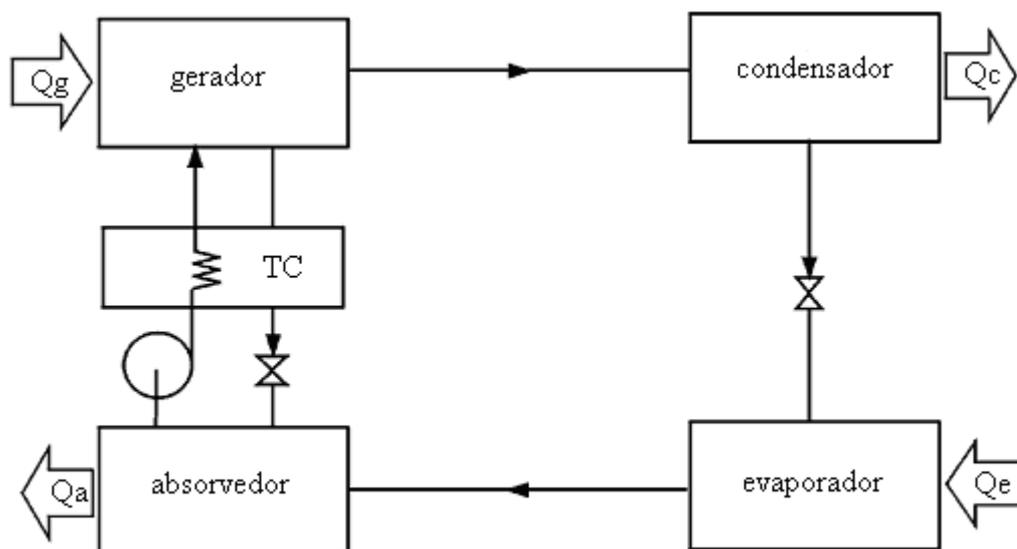


Figura 2.2 - Ciclo de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água (Srikhirin et al.)

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.

Os sistemas de refrigeração por absorção que usam água como refrigerante e brometo de lítio como absorvente podem ser divididos em sistemas de simples-efeito e sistemas de múltiplo-efeito. Sistemas de simples-efeito têm um gerador e um trocador de calor, enquanto que os sistemas de múltiplo-efeito mais usuais são os que têm dois geradores e dois trocadores de calor, chamados de duplo-efeito. O sistema de simples efeito usa a adição de calor uma vez, enquanto que o sistema de duplo-

efeito usa o calor proveniente do efeito de dessorção e o calor do vapor de refrigerante como fonte de aquecimento para o segundo efeito.

2.3 Ciclos de refrigeração de absorção de simples-efeito

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.

O refrigerante vaporizado liberado no gerador é conduzido para o condensador, onde ocorre liberação de calor. Sua pressão é reduzida através de uma válvula de expansão para que, no evaporador, receba calor do ambiente e finalmente retorne para o absorvedor.

Já a solução concentrada retorna para o absorvedor, passando pelo trocador de calor – onde é pré-resfriado - e por uma válvula redutora de pressão para finalmente retornar ao absorvedor.

2.4 Ciclos de refrigeração de absorção de duplo-efeito

A Figura 2.3 apresenta um ciclo de refrigeração por absorção de duplo-efeito operado com brometo de lítio e água.

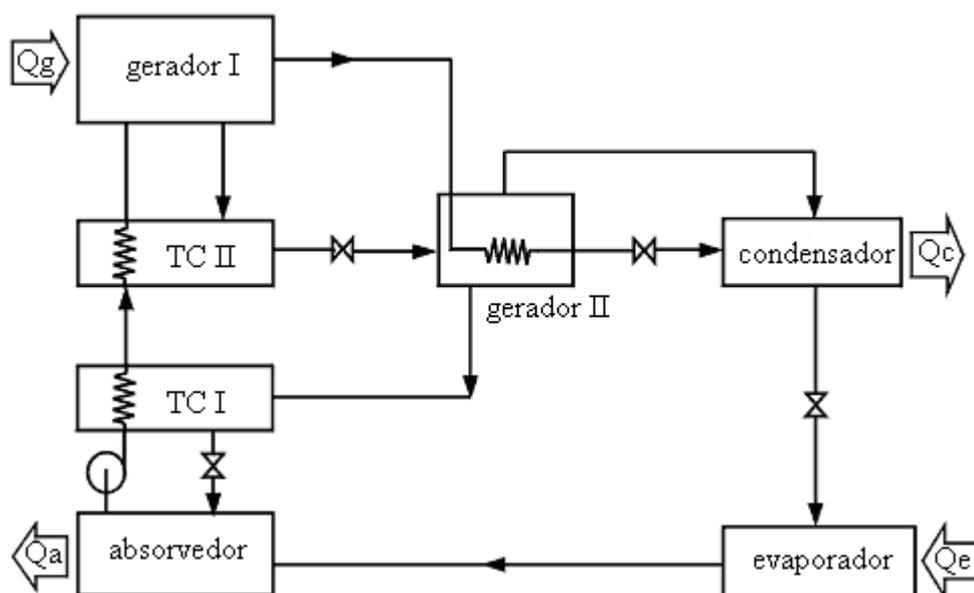


Figura 2.3 - Ciclo de refrigeração por absorção de duplo-efeito (Srikhirin et al.)

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-la 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.

Uma ferramenta importante para a comparação dos diversos modelos que serão desenvolvidos neste trabalho é o coeficiente de desempenho do ciclo de absorção, cuja definição é apresentada a seguir:

$$COP = \frac{\text{Capacidade de refrigeração}}{\text{Taxa de adição de calor ao gerador}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{\dot{Q}_{\text{gerador}}} \quad (2.2)$$

O valor do COP para sistemas de absorção é menor que os dos ciclos de compressão a vapor (0,6 versus 3, por exemplo). Entretanto esse valor comparativamente baixo do COP não deve ser considerado prejudicial para os ciclos

de absorção, pois os coeficientes de desempenho dos dois ciclos são definidos diferentemente. Para o ciclo de compressão a vapor o COP é a relação da taxa de refrigeração pela potência na forma de trabalho fornecida para operar o ciclo. E energia na forma de trabalho é normalmente muito mais cara do que energia na forma de calor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o primeiro semestre foi proposta a modelagem dos sistemas de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água. Através da literatura levantada foi possível estabelecer diversos modelos para esse tipo de sistema, composto por absorvedor, bomba, trocador de calor, gerador, condensador e evaporador. Para cada componente do ciclo foi realizado o balanço de massa e de energia.

No semestre seguinte foi proposta a simulação desses modelos. A partir da modelagem realizada anteriormente e com o auxílio do software EES (*Engineering Equation Solver*), foi possível realizar simulações referentes aos ciclos adotados.

O EES é uma ferramenta muito útil para resolver problemas de termodinâmica, já que possui um amplo repertório de propriedades termodinâmicas para inúmeras substâncias e é capaz de resolver equações não-lineares com certa facilidade. Primeiramente houve um período de familiarização com o software e o aprendizado através do manual do usuário de como a programação é realizada. Também foram realizados exercícios exemplos inclusos no próprio EES, na seção *Getting Started*.

A simulação foi realizada para os modelos simples, simples com trocador de calor e duplo-efeito em série, nessa ordem respectivamente. Assim com a simulação dos três ciclos pode-se realizar uma comparação entre eles.

4 RESULTADOS

4.1 Modelagem 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.

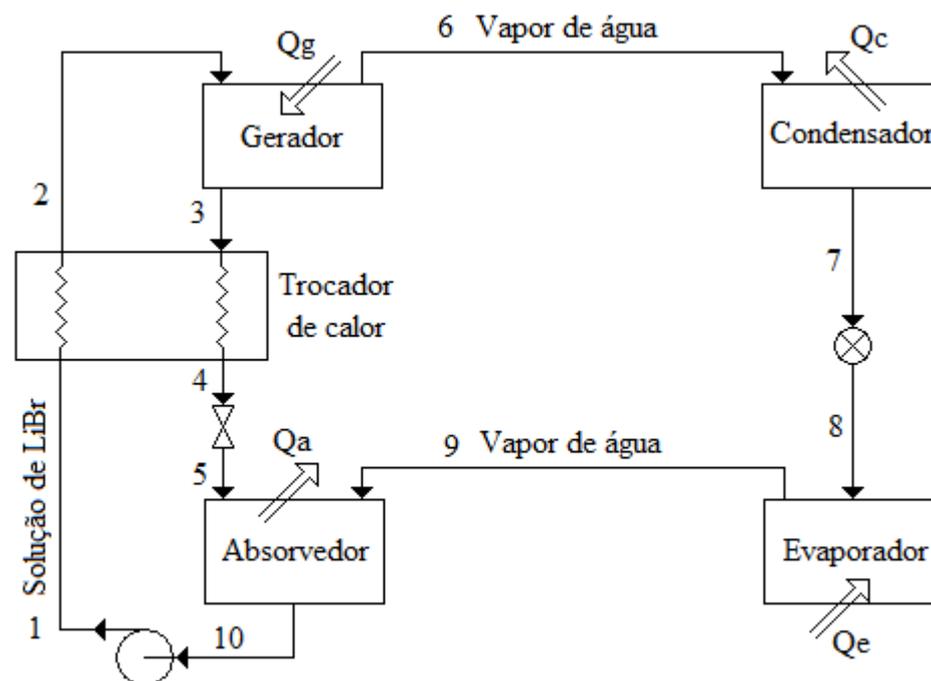


Figura 4.1 - Modelo esquemático do ciclo de simples-efeito com trocador de calor (Stoecker et al., 1985)

4.1.1 Balanço no absorvedor

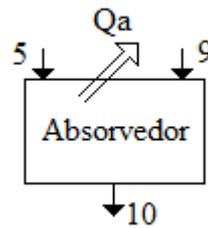


Figura 5.2 - Esquema do absorvedor

Balanço de massa:

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (4.1)$$

$$x_5 \dot{m}_5 = x_{10} \dot{m}_{10} \quad (4.2)$$

Balanço de energia:

$$h_5 \dot{m}_5 + h_9 \dot{m}_9 = \dot{Q}_a + h_{10} \dot{m}_{10} \quad (4.3)$$

4.1.2 Balanço na bomba

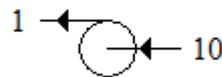


Figura 6.3 - Esquema da bomba

Balanço de massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{10} \quad (4.4)$$

$$x_1 = x_{10} \quad (4.5)$$

Balanço de energia (processo isentrópico):

$$h_{1s} = h_{10} + w_{BS} = h_{10} + v_{10} \cdot (P_1 - P_{10}) = h_{10} + v_{10} \cdot \Delta P \quad (4.6)$$

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

$$w_B = \frac{w_{BS}}{\eta_B} \quad (4.7)$$

4.1.3 Balanço no gerador

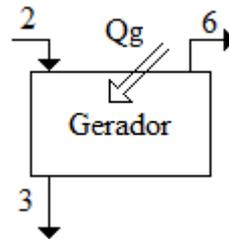


Figura 7.4 - Esquema do gerador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_6 = \dot{m}_2 \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_3 \cdot x_3 = \dot{m}_2 \cdot x_2 \quad (4.9)$$

Balanço de energia:

$$h_3 \dot{m}_3 + h_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_g + h_2 \dot{m}_2 \quad (4.10)$$

4.1.4 Balanço nas válvulas



Figura 8.5 - Esquema das válvulas

Balanço de massa:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (4.11)$$

$$x_4 = x_5 \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (4.13)$$

Balanço de energia:

$$h_5 = h_4 \quad (4.14)$$

$$h_8 = h_7 \quad (4.15)$$

4.1.5 Balanço no trocador de calor

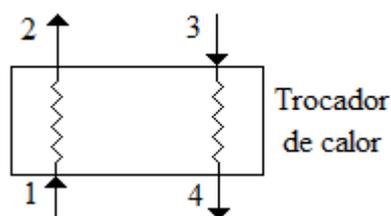


Figura 9.6 - Esquema do trocador de calor

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

$$\varepsilon = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_1} \quad (4.16)$$

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

$$T_1 - T_2 = T_4 - T_3 \quad (4.17)$$

Balanço de massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (4.18)$$

$$x_1 = x_2 \quad (4.19)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (4.20)$$

$$x_3 = x_4 \quad (4.21)$$

Balanço de energia:

$$h_1 \dot{m}_1 + h_3 \dot{m}_3 = h_2 \dot{m}_2 + h_4 \dot{m}_4 \quad (4.22)$$

4.1.6 Balanço no condensador

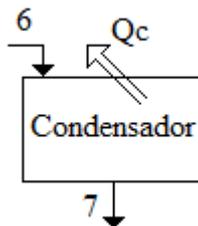


Figura 10.7 - Esquema do condensador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (4.23)$$

Balanço de energia:

$$h_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_c + h_7 \dot{m}_7 \quad (4.24)$$

4.1.7 Balanço no evaporador

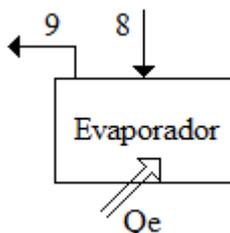


Figura 11.8 - Esquema do evaporador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (4.25)$$

Balanço de energia:

$$h_9 \dot{m}_9 = \dot{Q}_e + h_8 \dot{m}_8 \quad (4.26)$$

4.2 Modelagem do ciclo de duplo-efeito em série

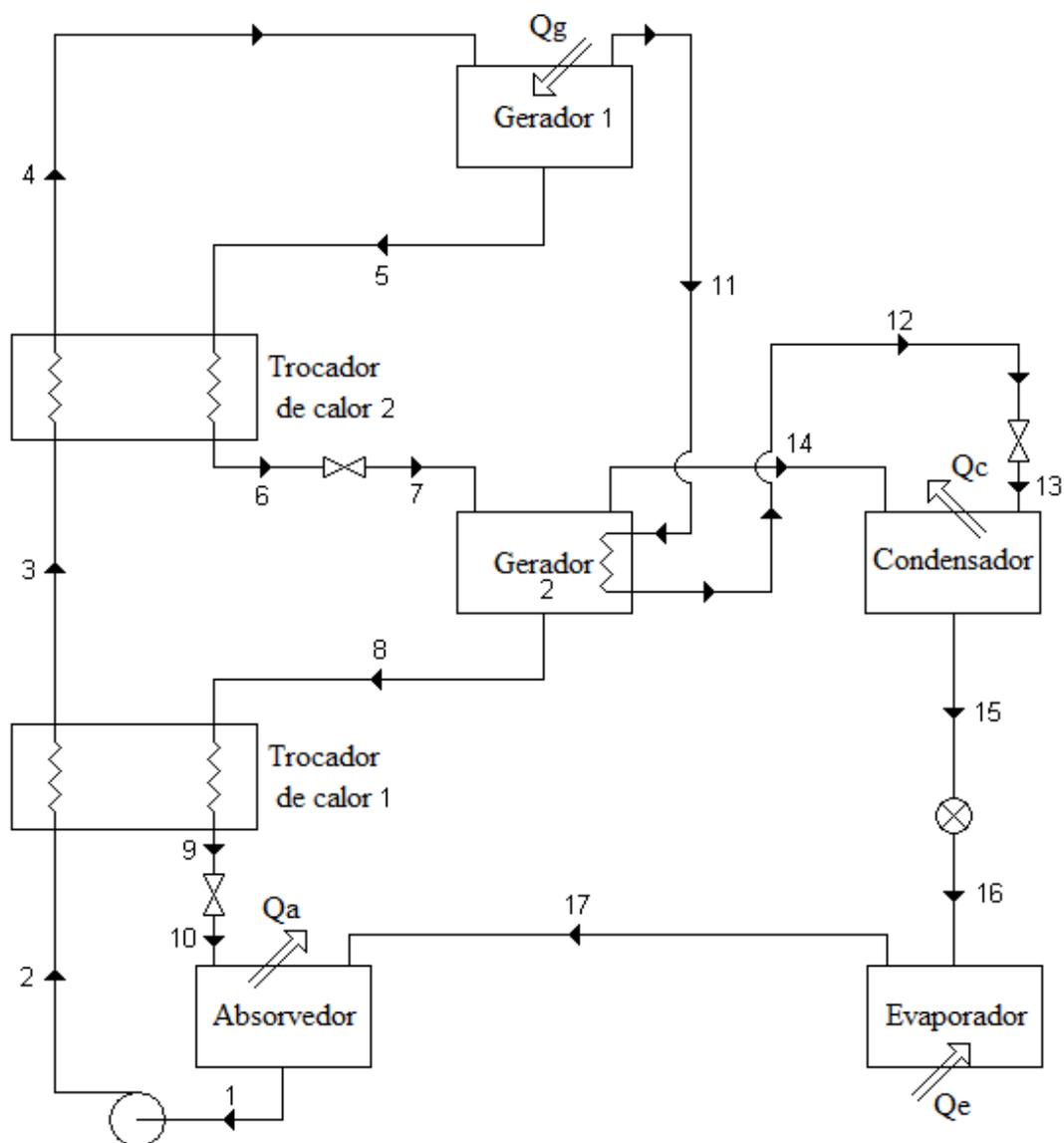


Figura 12.9 - Modelo esquemático do ciclo de duplo-efeito em série (Dorgan ET AL., 1995)

4.2.1 Balanço no absorvedor

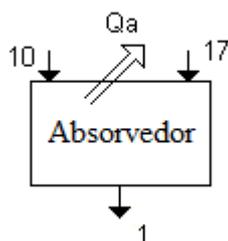


Figura 13.10 - Esquema do absorvedor

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{17} = \dot{m}_1 \quad (4.27)$$

$$x_{10}\dot{m}_{10} = x_1\dot{m}_1 \quad (4.28)$$

Balanço de energia:

$$h_{10}\dot{m}_{10} + h_{17}\dot{m}_{17} = \dot{Q}_a + h_1\dot{m}_1 \quad (4.29)$$

4.2.2 Balanço na bomba

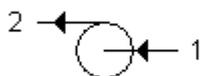


Figura 14.11 - Esquema da bomba

Balanço de massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (4.30)$$

$$x_1 = x_2 \quad (4.31)$$

Balanço de energia (processo isentrópico):

$$h_{2S} = h_1 + w_{BS} = h_1 + v_1 \cdot (P_2 - P_1) = h_1 + v_1 \cdot \Delta P \quad (4.32)$$

$$w_B = \frac{w_{BS}}{\eta_B} \quad (4.33)$$

4.2.3 Balanço no gerador 1

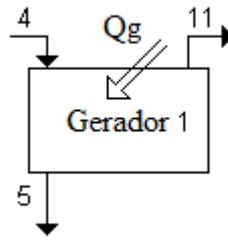


Figura 15.12 - Esquema do gerador 1

Balanço de massa:

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_4 \quad (4.34)$$

$$x_4 \dot{m}_4 = x_5 \dot{m}_5 \quad (4.35)$$

Balanço de energia:

$$h_5 \dot{m}_5 + h_{11} \dot{m}_{11} = \dot{Q}_g + h_4 \dot{m}_4 \quad (4.36)$$

4.2.4 Balanço no gerador 2

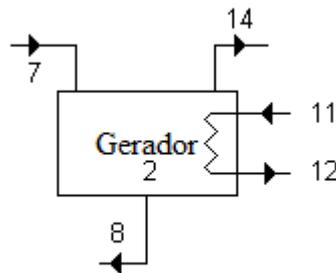


Figura 16.13 - Esquema do gerador 2

Balanço de massa:

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_7 \quad (4.37)$$

$$x_8 \dot{m}_8 = x_7 \dot{m}_7 \quad (4.38)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (4.39)$$

Balanço de energia:

$$h_8 \dot{m}_8 + h_{14} \dot{m}_{14} + h_{12} \dot{m}_{12} = h_{11} \dot{m}_{11} + h_7 \dot{m}_7 \quad (4.40)$$

4.2.5 Balanço nas válvulas



Figura 17.14 - Esquema das válvulas

Balanço de massa:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (4.41)$$

$$x_6 = x_7 \quad (4.42)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (4.43)$$

$$x_9 = x_{10} \quad (4.44)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (4.45)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} \quad (4.46)$$

Balanço de energia:

$$h_6 = h_7 \quad (4.47)$$

$$h_9 = h_{10} \quad (4.48)$$

$$h_{12} = h_{13} \quad (4.49)$$

$$h_{15} = h_{16} \quad (4.50)$$

4.2.6 Balanço no trocador de calor 1

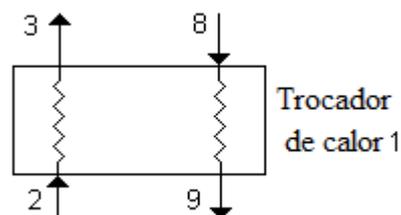


Figura 18.15 - Esquema do trocador de calor 1

A efetividade do trocador de calor 1 é definida como:

$$\varepsilon_1 = \frac{T_8 - T_9}{T_8 - T_2} \quad (4.51)$$

As diferenças de temperaturas do ramo 2-3 e 8-9 serão consideradas iguais:

$$T_2 - T_3 = T_9 - T_8 \quad (4.52)$$

Balanço de massa:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (4.53)$$

$$x_2 = x_3 \quad (4.54)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (4.55)$$

$$x_8 = x_9 \quad (4.56)$$

Balanço de energia:

$$h_2\dot{m}_2 + h_8\dot{m}_8 = h_3\dot{m}_3 + h_9\dot{m}_9 \quad (4.57)$$

4.2.7 Balanço no trocador de calor 2

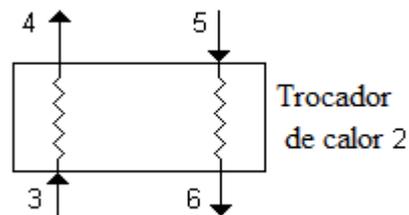


Figura 19.16 - Esquema do trocador de calor 2

Utilizando o mesmo método apresentado anteriormente:

A efetividade do trocador de calor 2 é definida como:

$$\varepsilon_2 = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_3} \quad (4.58)$$

As diferenças de temperaturas do ramo 3-4 e 5-6 serão consideradas iguais:

$$T_3 - T_4 = T_6 - T_5 \quad (4.59)$$

Balanço de massa:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (4.60)$$

$$x_3 = x_4 \quad (4.61)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (4.62)$$

$$x_5 = x_6 \quad (4.63)$$

Balanço de energia:

$$h_3\dot{m}_3 + h_5\dot{m}_5 = h_4\dot{m}_4 + h_6\dot{m}_6 \quad (4.64)$$

4.2.8 Balanço no condensador

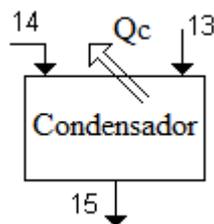


Figura 20.17 - Esquema do condensador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad (4.65)$$

Balanço de energia:

$$h_{13}\dot{m}_{13} + h_{14}\dot{m}_{14} = \dot{Q}_c + h_{15}\dot{m}_{15} \quad (4.66)$$

4.2.9 Balanço no evaporador

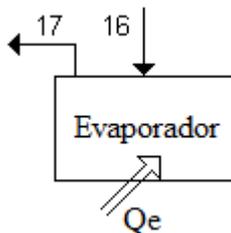


Figura 21.18 - Esquema do evaporador

Balanço de massa:

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (4.67)$$

Balanço de energia:

$$h_{17}\dot{m}_{17} = \dot{Q}_e + h_{16}\dot{m}_{16} \quad (4.68)$$

4.3 Simulação

4.3.1 Ciclo Simple sem Trocador de Calor

O ciclo simples sem trocador de calor teve sua simulação realizada apenas para comparar os valores obtidos com os dos outros ciclos. A modelagem é análoga à modelagem do trocador de calor de simples efeito com TC, tirando o trocador de calor do modelo e alterando os índices. A temperatura em 5 foi adotada como sendo igual a temperatura em 3, já que a diferença de temperatura entre os dois pontos é pequena.

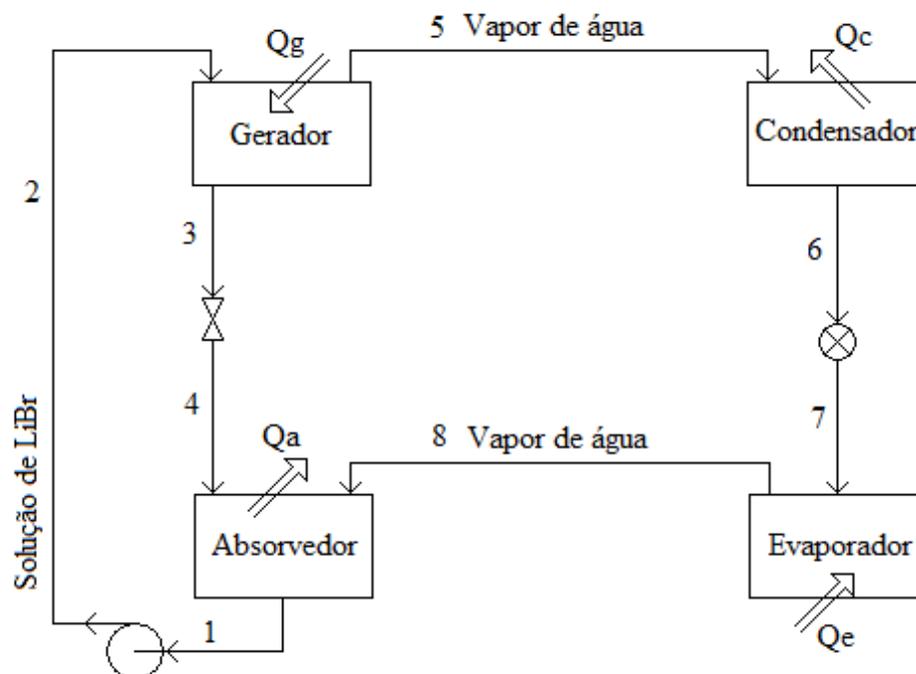


Figura 22.19 - Modelo esquemático do ciclo de simples-efeito (Stoecker et al., 1985)

Com base na literatura estudada, foram adotados os seguintes valores para dados de entrada e condições operacionais:

Dados de entrada

Temperatura de condensação: $T_6 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de evaporação: $T_8 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Carga térmica: $Q_{\text{evap}} = 5\text{TR}$

Fração mássica na saída do gerador: $x_3 = 59\%$

Fração mássica na saída do absorvedor: $x_1 = 55\%$

Eficiência da bomba: $\eta_b = 0,85$

Condições Operacionais:

Título na saída do absorvedor: $q_1 = 0$ (líquido saturado)

Título na saída do gerador: $q_5 = 1$ (vapor saturado)

Título na saída do condensador: $q_6 = 0$ (líquido saturado)

Título na saída do evaporador: $q_8 = 1$ (vapor saturado)

Igualdade de pressões:

$P_1 = P_4 = P_8 = P_7 = P_{\text{baixa}}$

$P_2 = P_3 = P_5 = P_6 = P_{\text{alta}}$

| | qabs (kW) | qcond (kW) | qger (kW) | w_br (kW) |
|-----|--------------|---------------|--------------|--------------|
| COP | 28,91 | 18,6 | 29,92 | 0,0004412 |

Tabela 4. 1 – Resultados da Simulação – modelo 1

| 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 | 0,1101 |
| 2 | 6,28 | 69,99 | 80,65 | 55 | 0,1101 |
| 3 | 6,28 | 78,32 | 185,6 | 59 | 0,1027 |
| 4 | 0,8726 | 41,36 | 185,6 | 59 | 0,1027 |
| 5 | 6,28 | 78,32 | 2646 | 0 | 0,007466 |
| 6 | 6,28 | 37 | 155 | 0 | 0,007466 |
| 7 | 0,8726 | 5,013 | 155 | 0 | 0,007466 |
| 8 | 0,8726 | 5 | 2510 | 0 | 0,007466 |

Tabela 4. 2 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 1

4.3.2 Ciclo Simples com Trocador de Calor

Novamente considerou-se que a temperatura em 6 é igual a temperatura em 3. Os dados de entrada e condições de operação permaneceram inalterados, porém há necessidade da introdução do valor da efetividade do trocador de calor.

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: $Q_{\text{evap}} = 5\text{TR}$

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: $\epsilon_{\text{TC}} = 0,7$

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:

$$P_{10} = P_5 = P_9 = P_8 = P_{\text{baixa}}$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_6 = P_7 = P_{\text{alta}}$$

| COP | q _{abs} (kW) | q _{cond} (kW) | q _{ger} (kW) | w _{br} (kW) |
|--------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0,8649 | 27,73 | 18,6 | 20,33 | 0,0004412 |

Tabela 4. 3 - Resultados da Simulação – modelo 2

| 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 |

Tabela 4. 4 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 2

4.3.3 Ciclo de Duplo Efeito em Série

Para esse ciclo houve a necessidade de considerar mais parâmetros na simulação, além dos anteriores que foram mantidos constantes. Nos geradores 1 e 2 a

condição operacional não é mais de vapor saturado e sim superaquecido. Também existe agora uma pressão intermediária, definida na saída do condensador.

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:

$$P_1 = P_{10} = P_{17} = P_{16} = P_{\text{baixa}}$$

$$P_7 = P_8 = P_9 = P_{13} = P_{14} = P_{15} = P_{\text{intermediária}}$$

$$P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_{11} = P_{12} = P_{\text{alta}}$$

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

Tabela 4. 5 - Resultados da Simulação – modelo 3

| 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 |

Tabela 4. 6 – Propriedades Termodinâmicas e Vazões – modelo 3

4.4 Programa computacional

Através da programação realizada no EES para a simulação do ciclo de duplo-efeito em série, foi desenvolvido um software para o cálculo das principais propriedades termodinâmicas deste tipo de ciclo de refrigeração por absorção. O programa permite a visualização dos diversos componentes do ciclo separadamente, mostrando em detalhe os resultados obtidos. Os dados de entrada são definidos pelo usuário e o programa calcula as propriedades em todos os pontos do ciclo.

A Figura 4.20 ilustra a tela inicial do software desenvolvido.

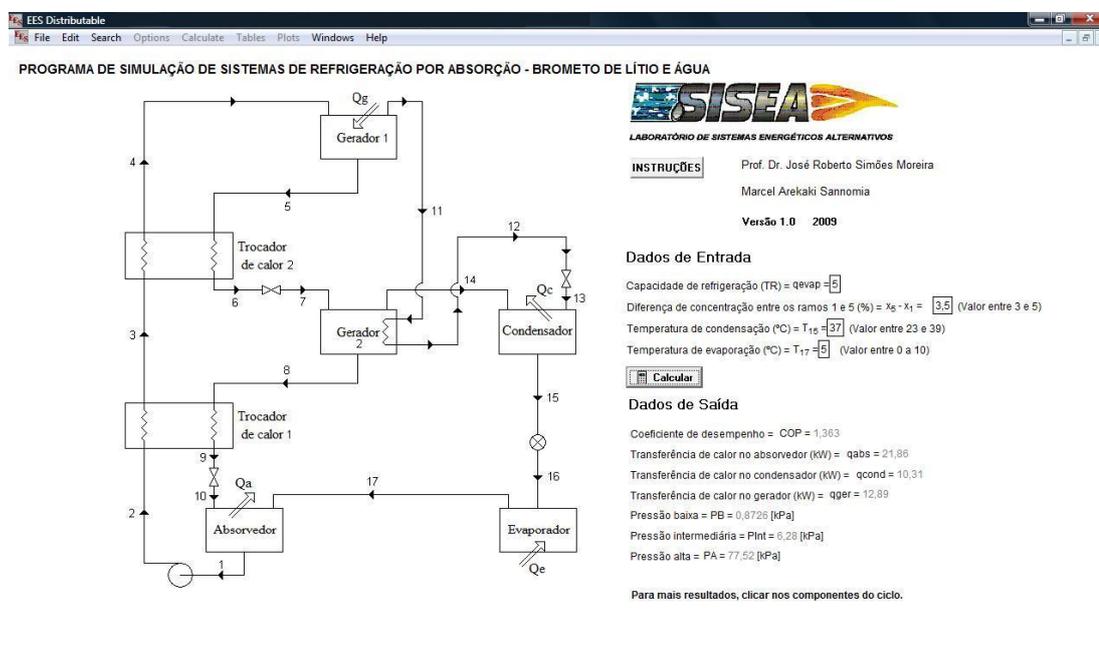


Figura 23.20 – Tela inicial do software desenvolvido para simulação de sistemas de refrigeração por absorção de brometo de lítio e água

4.5 Análise Paramétrica

Com a ajuda do software desenvolvido para o ciclo de duplo efeito em série é possível estudar o efeito da variação de determinados parâmetros no coeficiente de desempenho do ciclo. É interessante analisar a influência das temperaturas de condensação e evaporação e da diferença de concentração na recirculação do absorvedor (entre os pontos 1 e 5 da Figura 4.9).

A figura a seguir permite verificar o efeito da variação da temperatura de condensação no COP do ciclo de duplo efeito sendo que cada uma das curvas se refere a uma temperatura de evaporação. Nesta simulação, a diferença de concentração na recirculação é mantida constante e igual 3,5%.

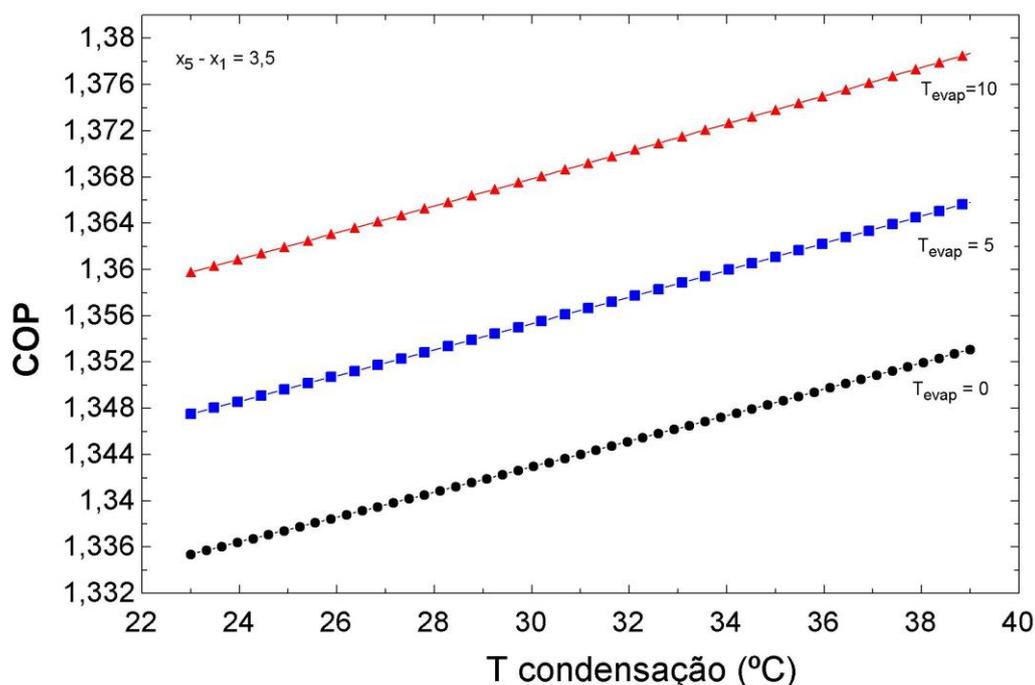


Figura 24.21 Efeito da variação das temperaturas de condensação e evaporação no COP

Na Figura 4.22 é possível verificar o efeito da diferença de concentração entre os pontos 1 e 5 para diferentes situações de temperatura de condensação, mantendo a temperatura de evaporação constante e de valor nulo.

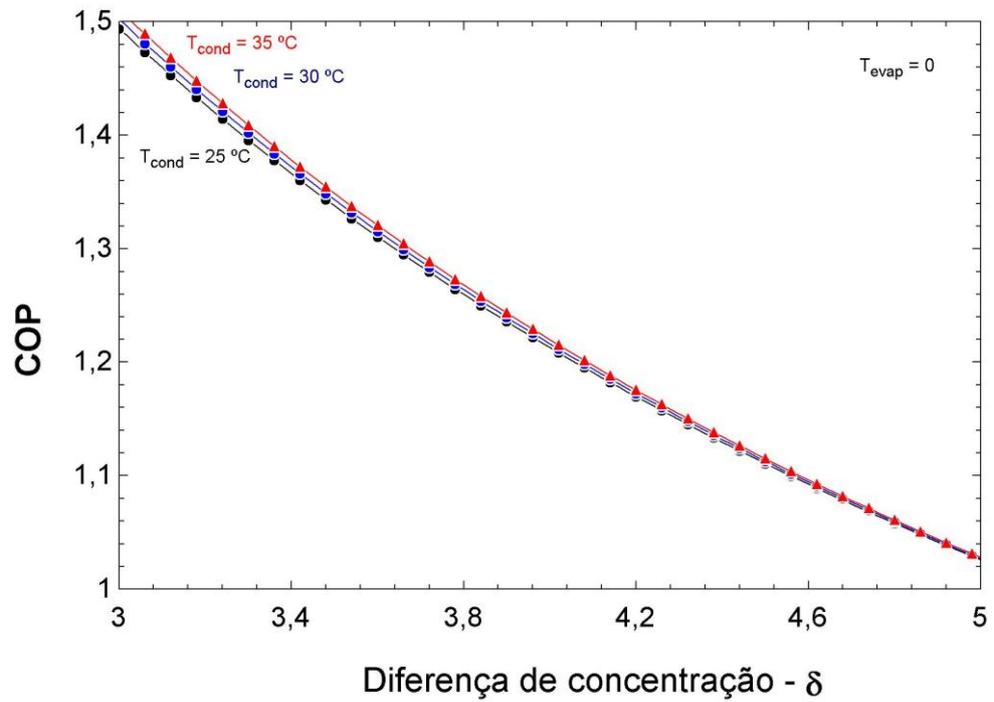


Figura 25.22 Efeito da variação da diferença de concentração no COP

Já a Figura 4.23 apresenta o efeito da temperatura de evaporação e da diferença de concentração no COP, mantida a temperatura de condensação em 30 °C.

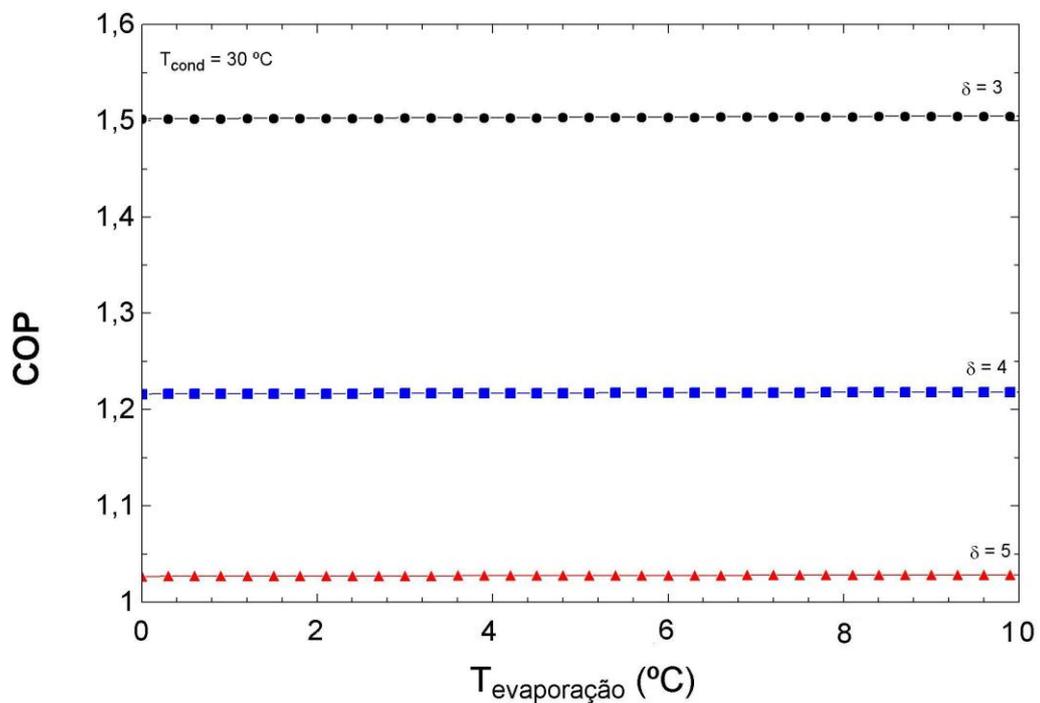


Figura 26.23 Efeito da variação da temperatura de evaporação no COP

5 DISCUSSÃO

A partir do balanço de massa e de energia foi possível modelar os componentes dos ciclos de refrigeração estudados. Primeiramente foi adotado o modelo de simples-efeito e depois foram adotados os modelos de duplo-efeito, em série e em paralelo.

A modelagem do sistema de simples-efeito consistiu apenas do balanço de massa e de energia de seus componentes, enquanto que a modelagem dos ciclos de duplo-efeito conduziu a elaboração de um modelo mais detalhado que considera também a efetividade dos trocadores de calor.

As seguintes hipóteses foram adotadas: operação em regime permanente, na saída do evaporador e do condensador o refrigerante (água) é suposto em condição de saturação, potência da bomba da solução considerada desprezível e perdas por atrito ou transferência de calor entre os componentes desprezíveis.

A literatura levantada indica valores maiores de COP para sistemas de duplo-efeito, o que pode ser confirmado com as simulações realizadas. O alto valor de COP encontrado na simulação do ciclo de duplo efeito deve-se em grande parte aos parâmetros adotados que foram necessários, como a concentração da solução na saída do gerador 2, x_8 . Uma diferença de 1% nessa concentração para mais ou para menos dá uma diferença no COP de mais ou menos 0,2. Essa concentração não pode ser menor que a concentração x_5 então x_8 deve ser maior que 59%. De acordo com a literatura foi adotado o valor de 62 %. A variação das temperaturas nas saídas dos geradores 1 e 2 e o valor da pressão alta adotada não afetam muito o valor do COP.

Comparando o ciclo simples sem o trocador de calor e o ciclo simples com trocador de calor nota-se uma melhoria no valor do COP, fato ocasionado pela adição do trocador de calor. Como os demais parâmetros foram iguais a adição do TC realmente contribuiu bastante para o aumento do COP.

Portanto, para os parâmetros adotados ficou evidente que o ciclo de duplo efeito em série tem um COP maior que os ciclos de simples efeito.

Com a realização da análise paramétrica foi possível ver a influência da variação de alguns parâmetros no COP. Pela Figura 4.21 nota-se que as curvas são praticamente paralelas umas as outras o que demonstra que quanto maior a

temperatura de evaporação maior é o valor do COP. Também é possível notar que o valor do COP aumenta também com o aumento da temperatura de condensação. Na Figura 4.22 percebe-se que a mudança no valor do COP é praticamente nula e independe da temperatura de condensação, para uma variação da concentração dos pontos 1 e 5. Já na Figura 4.23 o valor do COP permanece inalterado variando apenas a temperatura de evaporação. Há o deslocamento da curva do COP à medida que a diferença de concentração muda. Quanto menor essa diferença de concentração entre os pontos 1 e 5 maior é o valor do COP.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou um estudo dos ciclos de refrigeração por absorção operados com brometo de lítio e água. A complexidade dos modelos elaborados foi apresentada de modo gradual, de tal forma que houvesse uma seqüência lógica.

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. 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 foi desenvolvido um software executável que calcula as principais propriedades nos diversos pontos do ciclo de duplo-efeito em série, a partir de dados de entrada definidos pelo usuário.

ANEXO A – CRONOGRAMA

| Atividades | Semestre 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------|----|----|----|-------|----|----|----|------|----|----|----|-------|----|----|----|
| | Março | | | | Abril | | | | Maio | | | | Junho | | | |
| | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 |
| Definição do problema | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Teoria | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Revisão bibliográfica | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Configurações existentes | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| Definição da configuração | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Modelagem dos componentes | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Redação do trabalho parcial | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

| Atividades | Semestre 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|----|----|----|----------|----|----|----|---------|----|----|----|----------|----|----|----|
| | Agosto | | | | Setembro | | | | Outubro | | | | Novembro | | | |
| | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 | s1 | s2 | s3 | s4 |
| Uso do EES | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Integração do sistema | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Testes de compatibilidade | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Programa de modelagem | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Simulação | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Redação do trabalho final | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

ANEXO B – ROTINA PARA A SIMULAÇÃO DO CICLO DE DUPLO EFEITO EM SÉRIE

"PROGRAMA PARA CICLO DE DUPLO EFEITO EM SÉRIE"

\$IFNOT DIAGRAMWINDOW

```

delta=3
qevap=5
T[15]=37 "Temperatura no condensador"
T[17]=5 "Temperatura no evaporador"

```

\$ENDIF

"Dados de entrada e condições operacionais"

```

T[12]=92
T[11]=135

```

```

q15=0
q17=1

```

```

x[1]=55
x[5]=x[1]+delta
x[8]=62
x[11]=0
x[12]=0
x[13]=0
x[14]=0
x[15]=0
x[16]=0
x[17]=0

```

```

P[17]=pressure(water;T=T[17];x=q17) "Pressão Baixa"
PB=P[17]
P[15]=pressure(water;T=T[15];x=q15) "Pressão Intermediária"
PInt=P[15]
P[4]=77,52 "Pressão Alta"
PA=P[4]
P[1]=PB
P[2]=PA
P[3]=PA
P[5]=PA
P[6]=PA
P[7]=PInt
P[8]=PInt
P[9]=PInt
P[10]=PB
P[11]=PA
P[12]=PA
P[13]=PInt
P[14]=PInt
P[16]=PB

```

```

h[1]=H_LIBR('SI';T[1];x[1])

```

$h[2]=H_LIBR('SI';T[2];x[2])$
 $h[3]=H_LIBR('SI';T[3];x[3])$
 $h[4]=H_LIBR('SI';T[4];x[4])$
 $h[5]=H_LIBR('SI';T[5];x[5])$
 $h[6]=H_LIBR('SI';T[6];x[6])$
 $h[8]=H_LIBR('SI';T[8];x[8])$
 $h[9]=H_LIBR('SI';T[9];x[9])$
 $h[11]=enthalpy(water;T=T[11];P=P[11])$
 $h[12]=enthalpy(water;T=T[12];P=P[12])$
 $h[15]=enthalpy(water;T=T[15];x=q15)$
 $h[17]=enthalpy(water;T=T[17];x=q17)$

$T[1]=T_LIBR('SI' ; P[1]; x[1])$
 $T[5]=T_LIBR('SI' ; P[5]; x[5])$
 $T[7]=T_LIBR('SI' ; P[7]; x[7])$
 $T[8]=T_LIBR('SI' ; P[8]; x[8])$
 $T[10]=T_LIBR('SI' ; P[10]; x[10])$
 $T[13]=Temperature(Water;P=P[13];v=v[13])$
 $T[14]=Temperature(Water;P=P[14];v=v[14])$
 $T[16]=Temperature(Water;P=P[16];v=v[16])$

$v[1]=V_LIBR('SI';T[1];x[1])$
 $v[13]=Volume(Water;T=T[13];P=P[13])$
 $v[14]=Volume(Water;T=T[14];P=P[14])$
 $v[16]=Volume(Water;T=T[16];P=P[16])$

"Absorvedor"

$m[10]+m[17]=m[1]$
 $x[10]*m[10]=x[1]*m[1]$
 $h[10]*m[10]+h[17]*m[17]=q_{abs}+h[1]*m[1]$

"Bomba"

$m[1]=m[2]$
 $x[1]=x[2]$
 $m[1]*h[1]+w_br=m[2]*h[2]$
 $w_bs=m[1]*v[1]/1000*(P[2]-P[1])$
 $w_br=w_bs/eta_b$
 $eta_b=0,85$

"Efetividade TC"

$epsilon_TC1=0,7$
 $epsilon_TC1=(T[8]-T[9])/(T[8]-T[2])$
 $epsilon_TC2=0,7$
 $epsilon_TC2=(T[5]-T[6])/(T[5]-T[3])$

"Diferença de temperatura constante nos TCs"

$T[3]-T[4]=T[6]-T[5]$
 $T[2]-T[3]=T[9]-T[8]$

"Trocador de Calor 1"

$m[2]=m[3]$
 $x[2]=x[3]$
 $m[8]=m[9]$

$$x[8]=x[9]$$

"Trocador de Calor 2"

$$m[3]=m[4]$$

$$x[3]=x[4]$$

$$m[5]=m[6]$$

$$x[5]=x[6]$$

"Gerador 1"

$$\{ m[4]=m[5]+m[11] \}$$

$$m[4]*x[4]=m[5]*x[5]$$

$$q_{ger}+h[4]*m[4]=h[5]*m[5]+h[11]*m[11]$$

"Gerador 2"

$$m[7]=m[8]+m[14] \{$$

$$m[7]*x[7]=m[8]*x[8] \}$$

$$m[11]=m[12]$$

$$h[7]*m[7]+h[11]*m[11]=h[8]*m[8]+h[14]*m[14]+h[12]*m[12]$$

"Válvulas"

$$m[9]=m[10]$$

$$x[9]=x[10]$$

$$h[9]=h[10]$$

$$m[6]=m[7]$$

$$x[6]=x[7]$$

$$h[6]=h[7]$$

$$m[12]=m[13]$$

$$h[12]=h[13]$$

$$m[15]=m[16]$$

$$h[15]=h[16]$$

"Condensador"

$$m[14]+m[13]=m[15]$$

$$h[14]*m[14]+h[13]*m[13]=q_{cond}+h[15]*m[15]$$

"Evaporador"

$$m[16]=m[17]$$

$$h[16]*m[16]+q_{evap}*3,516=h[17]*m[17]$$

"COP"

$$COP=q_{evap}*3,516/q_{ger}$$

7 LISTA DE REFERÊNCIAS

HEROLD, K.E.; RADERMACHER, R.; KLEIN, S.A. **Absorption Chillers and Heat Pumps**. New York: CRC Press, 1995. 329p.

RODRIGUES, S. A. de O. **Modelagem de um Ciclo de Refrigeração por Absorção de Amônia**. 2005. 46p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ORTIGOSA, A. S. P. **Modelagem, Simulação e Otimização de um Ciclo Comercial de Produção de Água Gelada por Absorção de Amônia**. 2007. 66p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STOECKER, J. G.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 481p.

DORGAN, C. B.; LEIGHT, S. P.; DORGAN, C. E. **Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration Using Recovered Heat**. 1995. 186p.

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.; CHUNGPABULPATANA, S. **A Review of Absorption Refrigeration Technologies.** Patumthani: Thammasat University, 30p.

GOMRI, R.; HAKIMI, R.; **Second Law Analysis of Double Effect Vapour Absorption Cooler 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 Refrigeration Systems,** Turkey, University of Uludag, 11p.