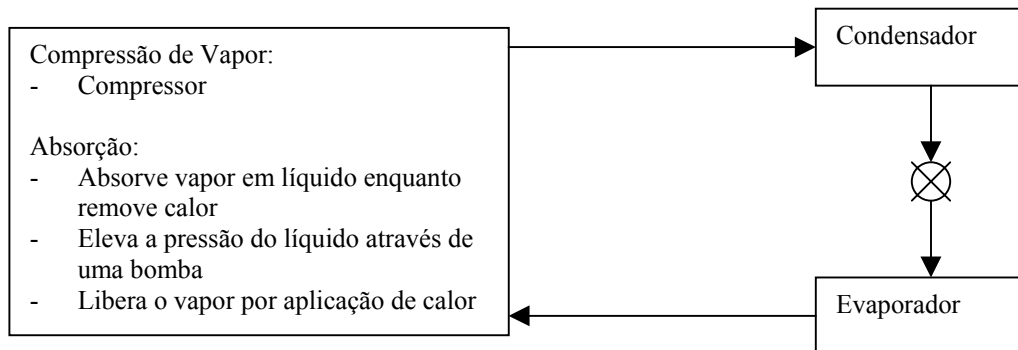


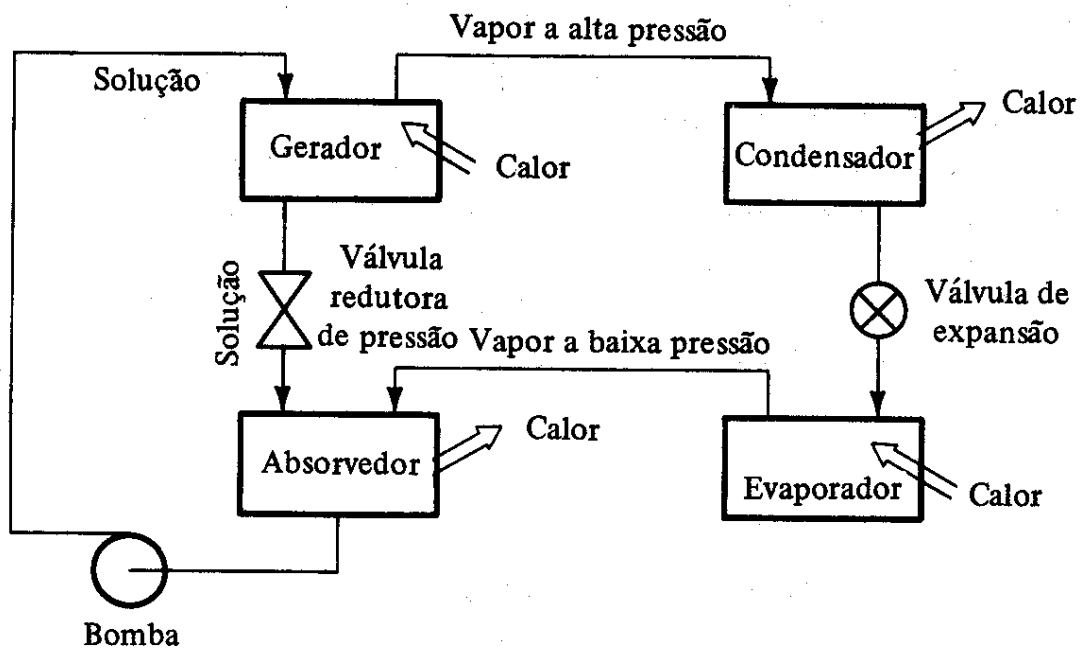
9.0 Refrigeração por Absorção

9.1 Relação entre o Ciclo de Absorção e o de Compressão de Vapor

O ciclo de absorção possui o evaporador, o condensador e o dispositivo de expansão exatamente como o ciclo de compressão de vapor. A compressão, entretanto, é substituída por outra forma de elevação de pressão do vapor.



- Ciclo de compressão => Ciclo operado a trabalho
- Ciclo de absorção => Ciclo operado a calor



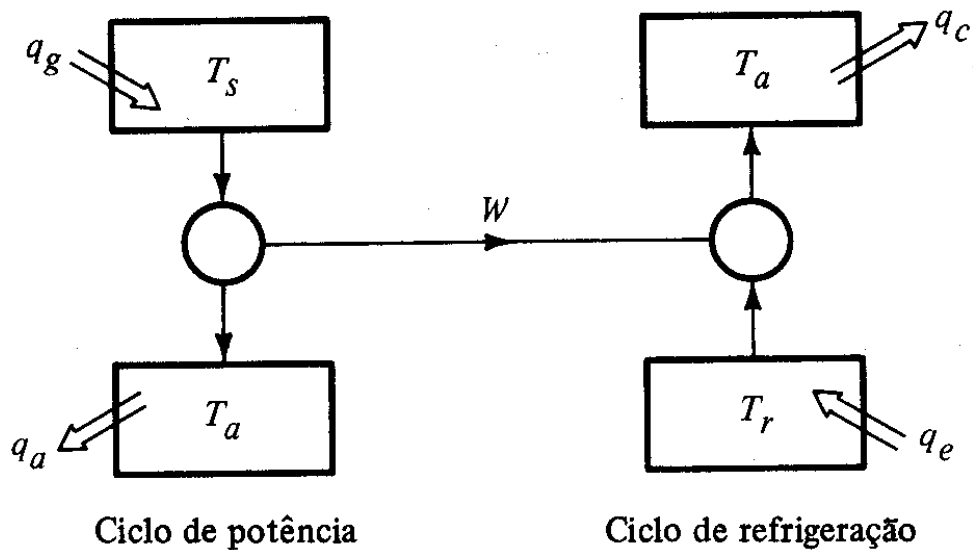
9.2 Coeficiente de Performance

$$COP_{abs} = \frac{\text{Capacidade de Refrigeração}}{\text{Taxa de Adição de Calor no Gerador}} = \frac{Q_e}{Q_g}$$

$COP_{abs} < COP_{comp}$ Isto se deve ao fato da energia na forma de trabalho ser muito mais valiosa.

9.3 Coeficiente de Performance Ideal (Ciclo de Carnot)

O Ciclo ideal de absorção pode ser considerado composto por duas máquinas: uma máquina de potência e uma máquina de refrigeração.



COP do Ciclo de Potência de Carnot

$$COP_{pot} = \frac{Q_g}{W} = \frac{T_g}{T_g - T_a}$$

COP do Ciclo de Refrigeração de Carnot

$$COP_{comp} = \frac{Q_e}{W} = \frac{T_e}{T_a - T_e}$$

COP do Ciclo de Absorção

$$COP_{abs} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{COP_{comp}}{COP_{pot}} = \frac{T_e(T_g - T_a)}{T_g(T_a - T_e)}$$

Exemplo:

Qual é o COP de um sistema de refrigeração ideal por absorção operando com uma fonte de calor a temperatura de 100°C, temperatura de refrigeração de 5°C e uma temperatura ambiente de 30°C?

Solução

$$COP_{pot} = \frac{Q_g}{W} = \frac{T_g}{T_g - T_a} = \frac{100 + 273,15}{100 - 30} = 5,33$$

$$COP_{comp} = \frac{Q_e}{W} = \frac{T_e}{T_a - T_e} = \frac{5 + 273,15}{30 - 5} = 11,13$$

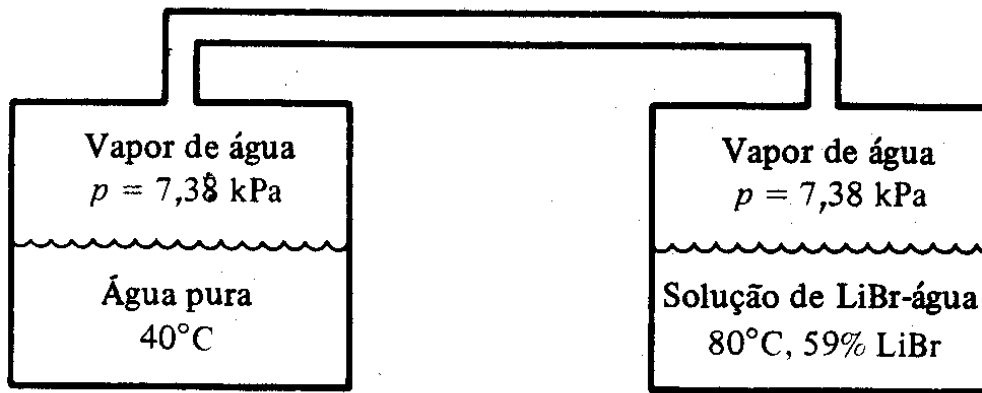
$$COP_{abs} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{COP_{comp}}{COP_{pot}} = \frac{11,13}{5,33} = 2,09$$

Análise da equação do COP:

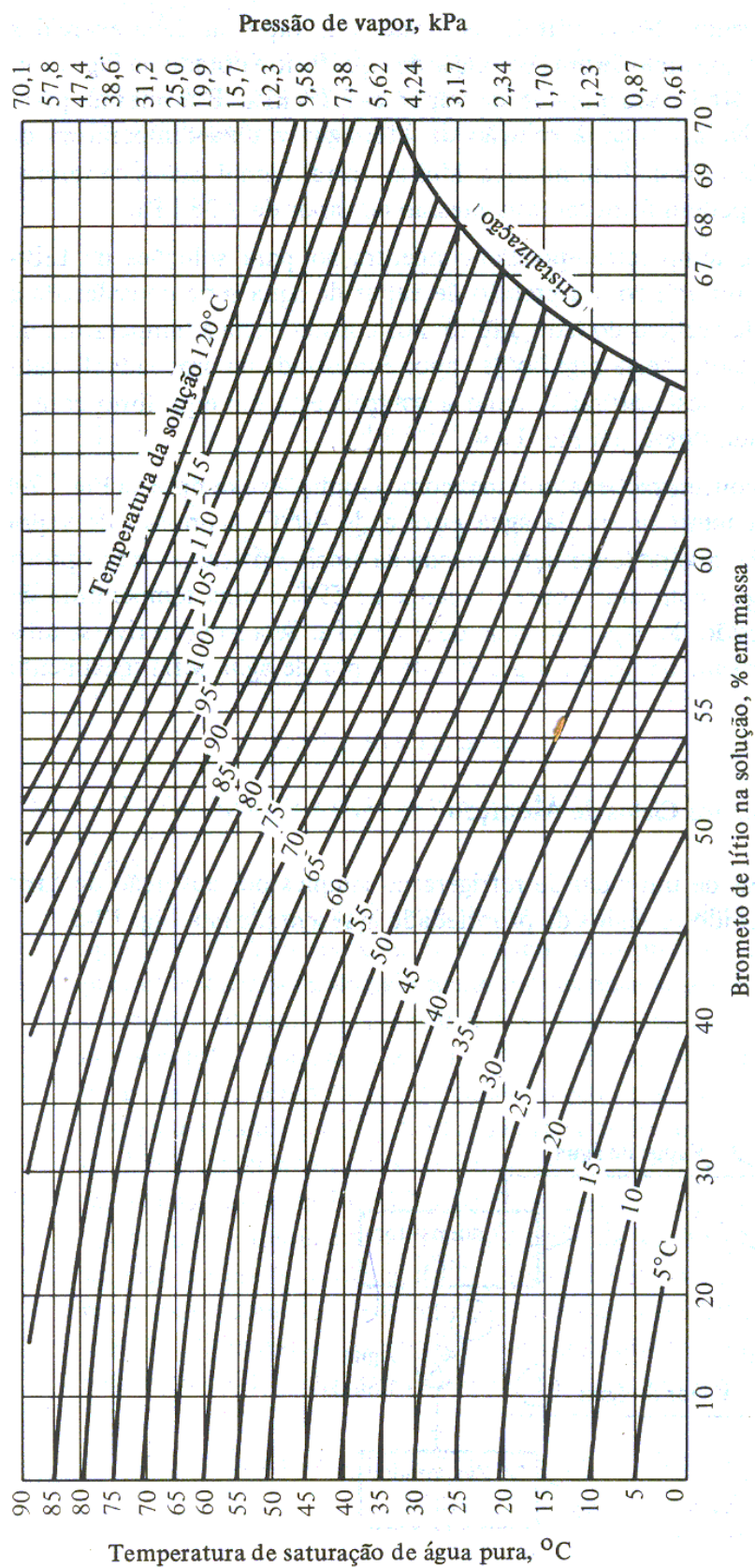
- Aumenta T_g aumenta o COP
- Aumenta T_e aumenta o COP
- Aumenta T_a reduz o COP

9.4 Diagrama Concentração-Temperatura-Pressão de Soluções de Brometo de Lítio-Água (LiBr-H₂O)

- O LiBr é um sal sólido cristalino que a na presença do vapor d'água absorve vapor e torna-se uma solução líquida.
- A solução líquida exerce uma pressão de vapor d'água que é uma função da temperatura e da concentração da solução.

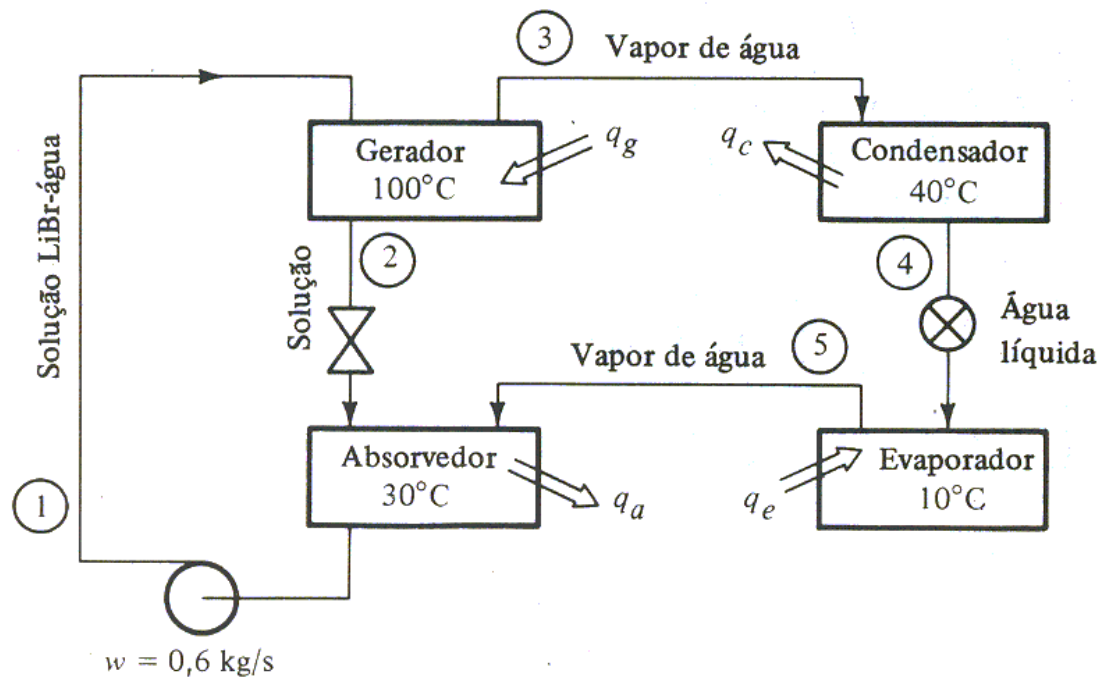


- Cada líquido exerce uma pressão de vapor.
- No equilíbrio as duas pressões são iguais.
- Muitas outras combinações de temperatura e concentração fornecem a pressão de $7,38\text{kPa}$.



9.5 Cálculo das vazões em Massa nos Ciclos de Absorção

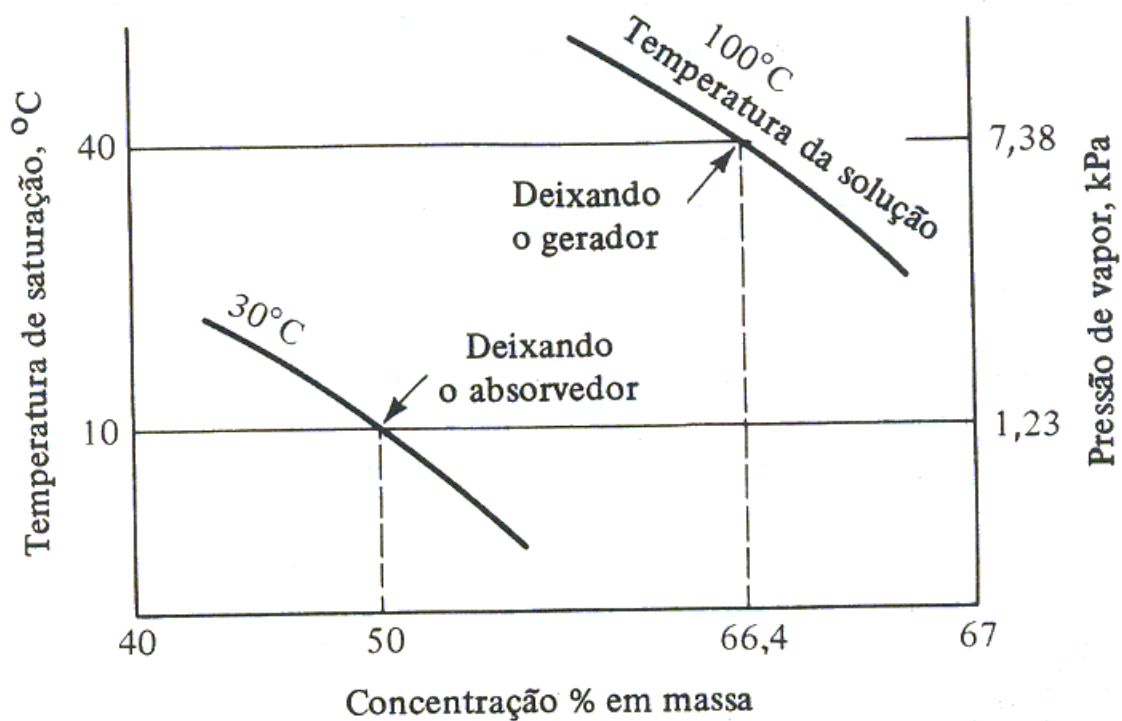
Exemplo: Compute a vazão em massa de refrigerante (água) através do condensador e do evaporador no ciclo mostrado abaixo se a bomba libera 0,6kg/s e se prevalecem as seguintes temperaturas: gerador, 100°C; condensador, 40°C; evaporador, 10°C e absorvedor, 30°C.



Solução

A pressão no condensador e gerador é fixa pela pressão de condensação (saturação da água pura 40°C) => 7,38kPa

A pressão no evaporador e absorvedor é fixa pela pressão de evaporação (saturação da água pura a 10°C) => 1,23kPa



Balanco de massa da solução no gerador

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 = 0,6$$

Balanco de massa de LiBr no gerador

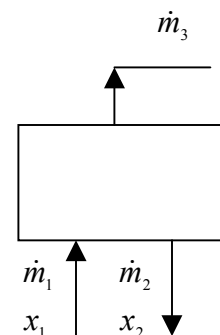
$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2$$

$$0,6 \cdot 0,50 = \dot{m}_2 \cdot 0,664$$

Resolvendo

$$\dot{m}_2 = 0,452 \text{ kg/s}$$

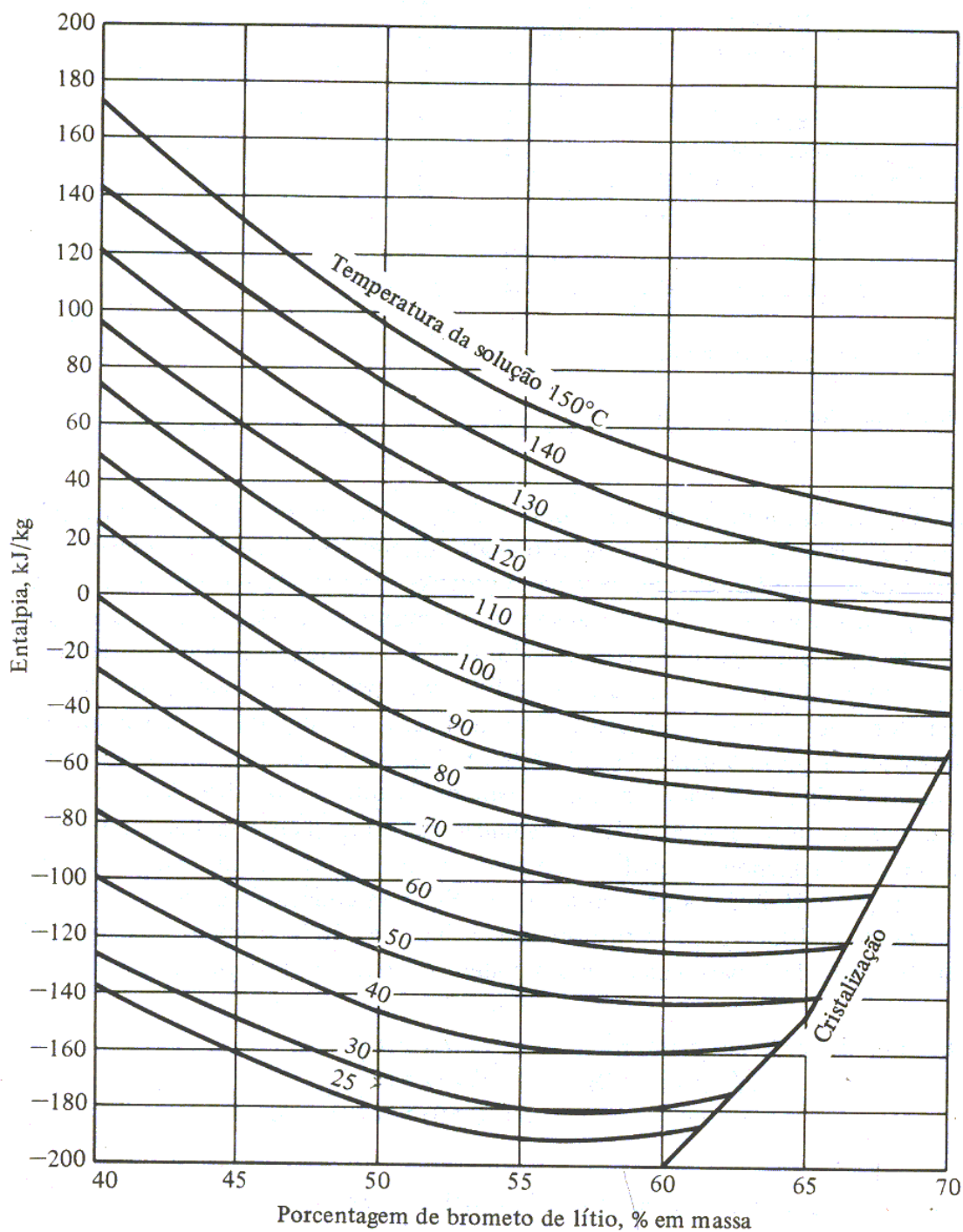
$$\dot{m}_3 = 0,148 \text{ kg/s}$$



9.6 Entalpia de Soluções de LiBr

As tabelas de vapor podem ser utilizadas para avaliar entalpia no condensador e evaporador

No gerador e absorvedor são utilizados diagramas entalpia-temperatura-concentração (h-T-C) para a solução de LiBr.



Entalpia nula para água líquida a 0°C (mesma referência para água pura) e LiBr a 25°C.

9.7 Análise Térmica de Sistemas de Absorção Simples

Exemplo: Para o sistema de absorção do exemplo anterior compute

$\dot{Q}_g, \dot{Q}_a, \dot{Q}_c, \dot{Q}_e$ e o **COP**.

Dados:

$$\dot{m}_1 = 0,6 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = 0,452 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 0,148 \text{ kg/s}$$

$$x_1 = 0,5$$

$$x_2 = 0,664$$

Solução

Entalpias da solução

$$h_1 = h(30^\circ\text{C}; 0,5) = -168 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h(100^\circ\text{C}; 0,664) = -52 \text{ kJ/kg}$$

Entalpias da água líquida e vapor d'água

$$h_3 = h_v(100^\circ\text{C}) = 2676 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_l(40^\circ\text{C}) = 167,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = h_v(10^\circ\text{C}) = 2520 \text{ kJ/kg}$$

Balanco de Energia no gerador

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_1 h_1$$

$$\dot{Q}_g = 0,148 \cdot 2676 + 0,452 \cdot (-52) - 0,6 \cdot (-168) = 473,3 \text{ kW}$$

Balanco de Energia no Condensador

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{Q}_c \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_c$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c (h_3 - h_4) = 0,148(2676 - 167,5) = 371,2 \text{ kW}$$

Balanco de Energia no Absorvedor

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_a$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 = 0,452(-52) + 0,148(2520) - 0,6(-168) = 450,3 kW$$

Balanco de Energia no Evaporador

$$\dot{Q}_e + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 \quad \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_e$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e (h_5 - h_4) = 0,148(2520 - 167,5) = 348,2 kW$$

Finalmente,

$$COP_{abs} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{348,2}{476,6} = 0,736$$

COP de Carnot

$$COP_{carnot} = \frac{T_e (T_g - T_a)}{T_g (T_a - T_e)} = \frac{(10 + 273,15)(100 - 30)}{(100 + 273,15)(30 - 10)} = 2,65$$

Eficiência de Refrigeração

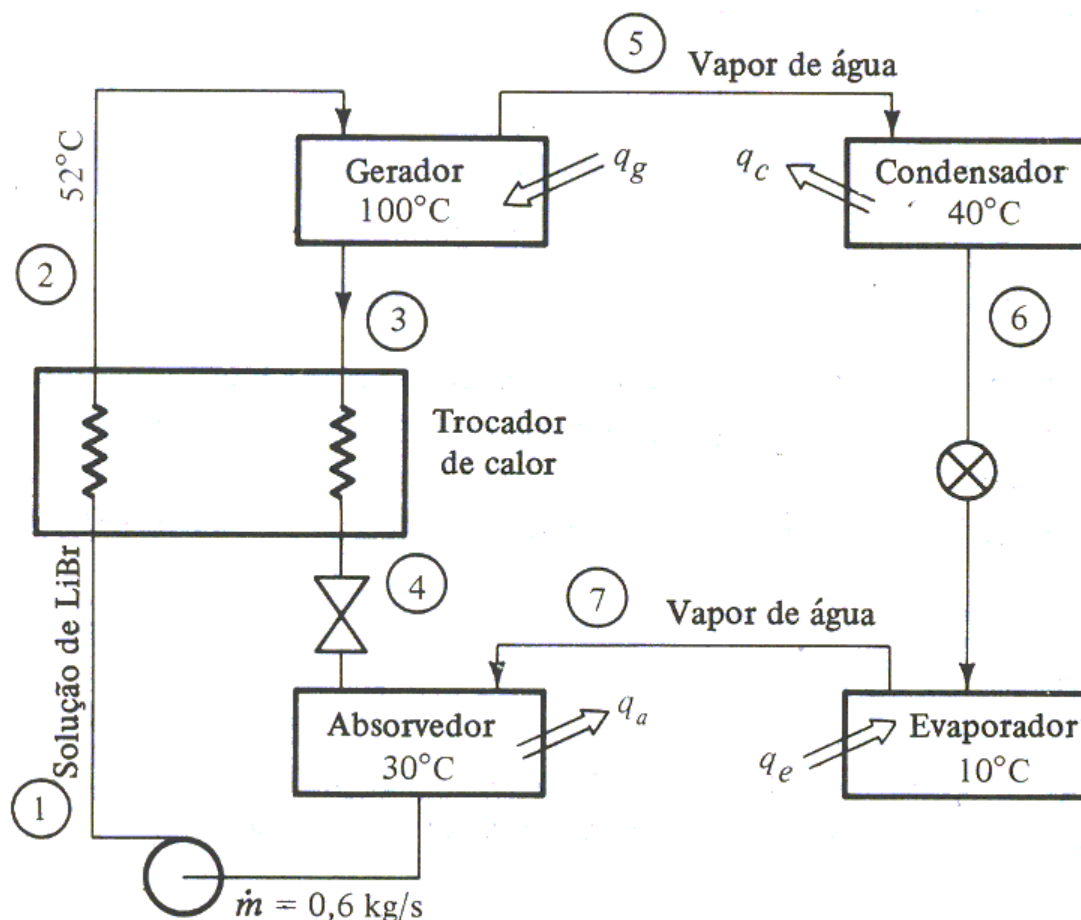
$$\eta_R = \frac{COP_{abs}}{COP_{carnot}} = \frac{0,736}{2,65} = 0,277$$

9.8 Ciclo de Absorção com Trocador de Calor

Note que o ciclo que no ciclo de absorção a solução que deixa o absorvedor necessita ser aquecida de 30 para 100°C, enquanto que a solução que deixa o gerador precisa ser resfriada de 100 para 30°C.

O maior custo de operação está associado à adição de calor no gerador e indiretamente haverá um custo para rejeitar calor no absorvedor.

A introdução de trocador entre as correntes de solução pobre que deixa o gerador e de solução rica que deixa o absorvedor diminui a necessidade de adição de calor no gerador e de rejeição de calor no absorvedor.



Exemplo

O ciclo simples do exemplo anterior é modificado pela inserção de um trocador de calor, como mostrado na figura acima, de tal forma que a temperatura do ponto 2 é de 52°C. A vazão em massa do escoamento liberado pela bomba de solução é de 0,6kg/s. Qual é a taxa de transferência de energia em cada componente e o COP_{abs} deste ciclo?

Solução

Certas quantidades permanecem inalteradas:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0,6 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = 0,452 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = 0,148 \text{ kg/s}$$

As entalpias que permanecem inalteradas são:

$$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}; \quad h_3 = -52 \text{ kJ/kg} \quad h_5 = 2676 \text{ kJ/kg} \quad h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}$$

As taxas de transferência de calor no condensador e evaporador permanecem inalteradas

$$\dot{Q}_c = 371,2kW \quad \text{e} \quad \dot{Q}_e = 348,2kW$$

Pelo diagrama h-T-C, tem-se:

$$h_2 = h(52^\circ\text{C}, 50\%) = -120 \text{ kJ/kg}$$

Balanço de energia no trocador de calor

$$\dot{Q}_{tc} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) = 0,6(-120 - (-168)) = 28,8kW$$

Da mesma forma,

$$\dot{Q}_{tc} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) = 0,452(-52 - h_4) = 28,8kW$$

Assim,

$$h_4 = -116 \text{ kJ/kg}$$

O diagrama h-T-C mostra que a solução de 66,4% com a entalpia de -116kJ/kg tem uma temperatura de 64°C.

Através do balanços de energia no gerador pode se avaliar a taxa de transferência de calor:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{Q}_g = 0,148(2676) + 0,452(-52) - 0,6(-120) = 444,5kW$$

Da mesma forma, no absorvedor:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_1 h_1$$

$$\dot{Q}_a = 0,148(2520) + 0,452(-116) - 0,6(-168) = 421,3kW$$

O Coeficiente de Performance

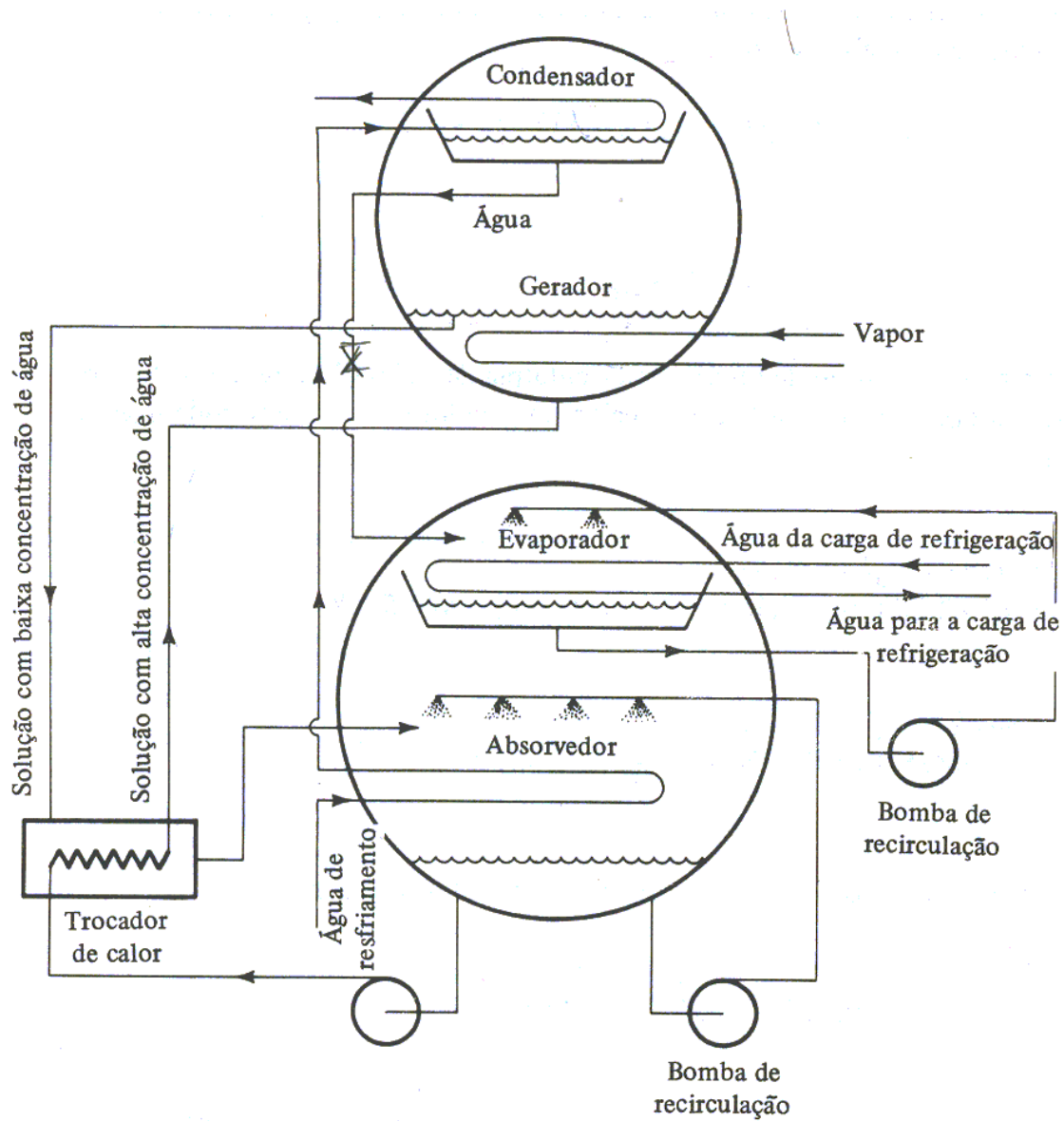
$$COP_{abs} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{348,2}{444,5} = 0,783$$

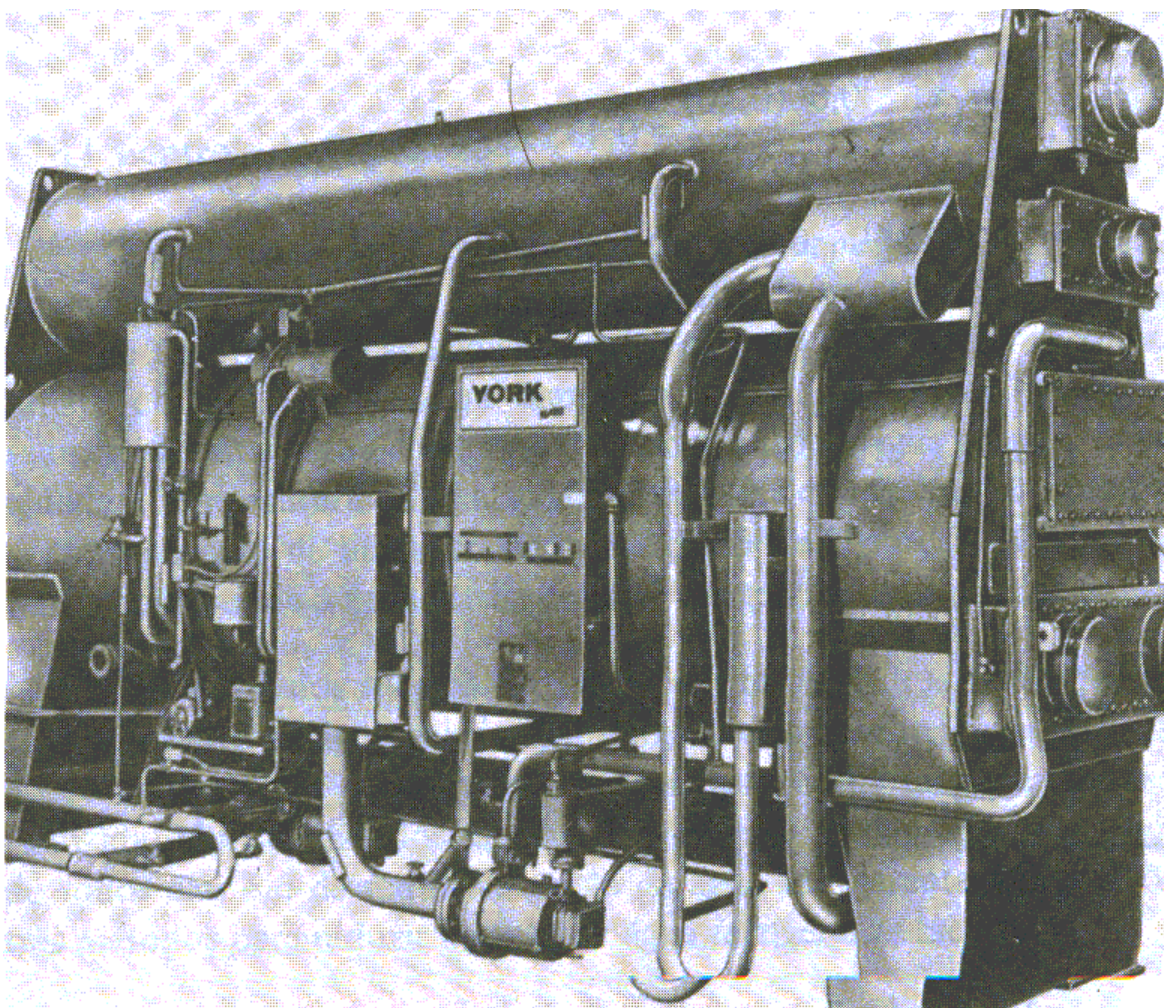
Este COP representa uma melhoria em relação ao valor de 0,736 do sistema sem trocador de calor.

9.9 Configuração de Unidades de Absorção Comerciais

Numa instalação comercial de absorção normalmente:

- 1) o condensador e o gerador são instalados em um mesmo vaso uma vez que operam a uma mesma pressão.
- 2) O evaporador e o absorvedor são instalados em outro vaso uma vez que também operam a uma mesma pressão.





9.10 Cristalização

A região abaixo da linha de cristalização indica solidificação do LiBr. A solidificação do LiBr ocorre de forma que a solução líquida fica diluída. O estado da solução continua sendo representado pela linha de cristalização. Uma queda para a região de cristalização indica formação de lama que pode obstruir o escoamento nos tubos e interromper a operação da unidade de absorção.

Exemplo

No sistema com trocador de calor, a temperatura de bulbo úmido do ambiente decresce de forma que a temperatura da água de resfriamento cai, o que também reduz a temperatura de condensação para 34°C. Todas as outras temperaturas especificadas permanecem inalteradas. Há algum perigo de cristalização?

Solução:

O componente crítico do ponto de vista de cristalização é o trocador de calor.

A redução da temperatura de condensação aumenta a concentração deixando o gerador no ponto 3 (69%).

Considerando que a vazão em massa entregue pela bomba da solução permanece constante em 0,6kg/s, novas vazões se aplicam ao restante do sistema:

Balanço de massa da solução no gerador

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1 = 0,6$$

Balanço de massa de LiBr no gerador

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_1 x_1$$

$$\dot{m}_3 = \frac{\dot{m}_1 x_1}{x_3} = \frac{0,60(0,50)}{0,69} = 0,435 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_5 = 0,6 - \dot{m}_3 = 0,6 - 0,435 = 0,165 \text{ kg/s}$$

As entalpias na vizinhanças do trocador de calor conhecidas neste estágio são:

$$h_1 = h(30^\circ\text{C}; 50\%) = -168 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h(52^\circ\text{C}; 50\%) = -120 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h(100^\circ\text{C}; 69\%) = -54 \text{ kJ/kg}$$

Um balanço de energia em torno do trocador de calor resulta em

$$h_4 = h_3 - \frac{\dot{m}_1 (h_2 - h_1)}{\dot{m}_3} = -54 - \frac{0,6(-120 - (-168))}{0,435} = -120 \text{ kJ/kg}$$

A condição do ponto 4 (determinada por -120kJ/kg e x=69%) encontra-se cristalizada.

Este exemplo ilustra 2 fatos:

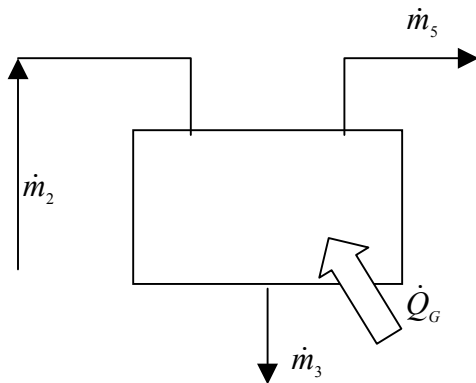
- (1) A posição com maior chance de cristalização é a saída do trocador de calor.
- (2) Baixas temperaturas de condensação são condições de possíveis cristalizações

9.11 Controle de Capacidade

Quando ocorre queda na carga térmica, há uma redução na temperatura de retorno de água gelada à unidade de absorção (admitindo vazão de água gelada constante).

Isto provocaria uma queda de pressão no lado de baixo da unidade de absorção, o que poderia congelar a água refrigerante.

Variáveis que podem ser controladas e que afetam a capacidade de refrigeração



Balanco de massa de solução no gerador

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5 \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_5 = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (1)$$

Balanco de massa de LiBr no gerador

$$\dot{m}_2 x_2 = \dot{m}_3 x_3 \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_3 = \frac{\dot{m}_2 x_2}{x_3} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1), tem-se

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_2 - \dot{m}_2 \frac{x_2}{x_3}$$

Finalmente,

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_2 \left(1 - \frac{x_2}{x_3} \right)$$

Depende da temperatura do absorvedor.

Depende da temperatura do gerador.

Diretamente proporcional à vazão da bomba.

O efeito do controle de capacidade é geralmente na vazão de água refrigerante. Três métodos são geralmente empregados:

a) Redução da vazão pela bomba

A redução da vazão pela bomba implica numa redução direta da vazão de refrigerante. Este método só será eficiente se a taxa de adição de calor deve ser reduzida na mesma proporção que a capacidade de refrigeração.

A variação da vazão de refrigerante só será proporcional à variação da vazão pela bomba se as concentrações não se alterarem.

As concentrações ficam inalteradas apenas se as temperaturas estiverem fixas.

A redução da vazão de refrigerante causa redução na temperatura de condensação; aumenta na temperatura do gerador.

Estas mudanças de temperatura elevam a concentração de LiBr na saída do gerador. Esta condição também pode induzir à cristalização.

Método muito utilizado em unidades comerciais, mas quando há risco de cristalização é combinado com o método 2 e 3.

b) Redução da temperatura do gerador

A redução da temperatura do gerador pode ser obtida através: do estrangulamento do vapor, da redução da vazão de água quente; etc.

Exemplo: O ciclo de absorção com trocador de calor analisado no exemplo anterior é equipado com controle de capacidade para estrangular o vapor que fornece calor para o gerador e assim reduzir para 95°C , enquanto todas as outras temperaturas e a vazão através da bomba permanecem inalteradas, determine a nova capacidade de refrigeração, a taxa de adição de calor no gerador o COP.

Solução:

Dados:

$$x_3 = x(95^{\circ}\text{C}, psat(40^{\circ}\text{C})) = 65\%$$

$$h_3 = h(95^{\circ}\text{C}, 65\%)$$

Balanço de massa de LiBr no gerador:

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_2 x_2$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 \frac{x_2}{x_3} = 0,6 \frac{0,5}{0,65} = 0,462 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = 0,6 - 0,462 = 0,138 \text{ kg/s}$$

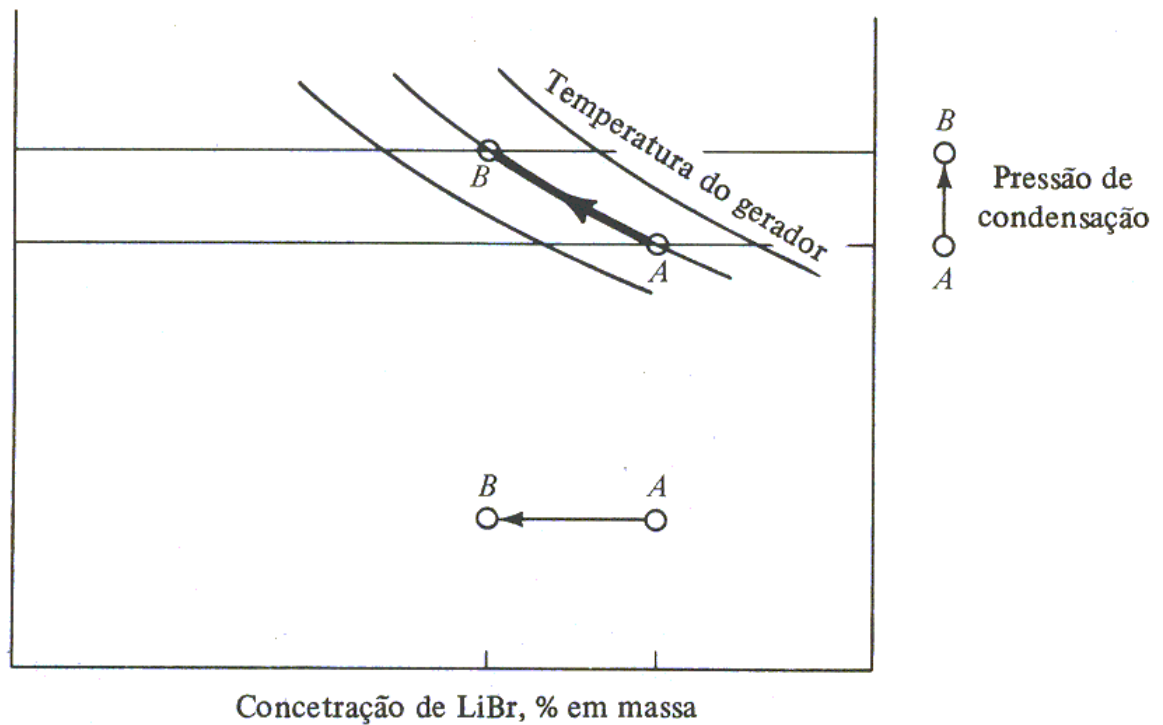
Balanco de energia no gerador

Balanco de energia do evaporador

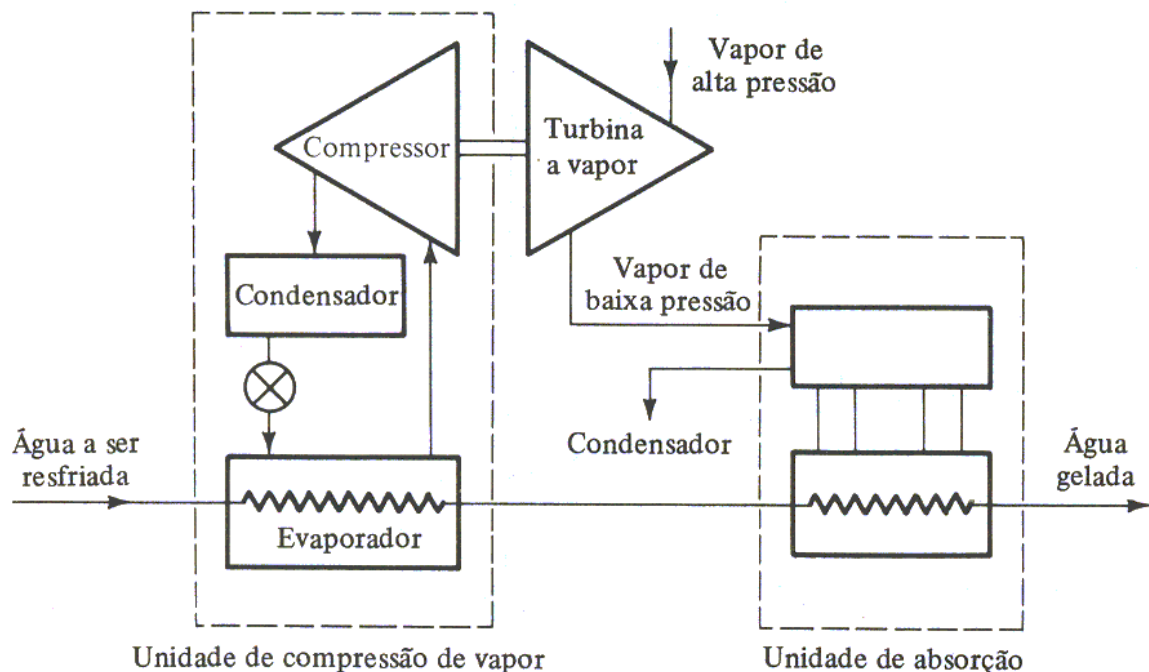
Coefficiente de Performance

c) Aumento da temperatura de condensação

O aumento da temperatura de condensação pode ser conseguido através do desvio da água de resfriamento do condensador.



9.12 Combinações com Sistemas de Compressão de Vapor em Sistemas Operados com Vapor



Exemplo: Um sistema combinado de absorção e compressão de vapor é movido a vapor de alta pressão que passa pelas seguintes condições através da turbina a vapor e unidade de absorção:

Posição	Pressão (kPa)	Entalpia (kJ/kg)	Vazão (kg/s)
Entrando na turbina	1500	3080	1,2
Deixando a turbina e entrando na unidade de absorção	100	2675	1,2
Condensado deixando a unidade de absorção	100	419	1,2

O COP da unidade de compressão de vapor é de 3,6 e o COPabs da unidade de absorção é 0,7. Qual é (a) a capacidade total de refrigeração e (b) o COP do sistema combinado?

Solução

(a) Balanço de energia na turbina

$$P_t = \dot{m}_v (h_1 - h_2)$$

A capacidade de refrigeração do sistema de compressão de vapor é

$$\dot{Q}_e = P_t \cdot COP_{comp}$$

Balanço de energia no gerador:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Balanco de energia no evaporador:

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_g \cdot COP_{abs}$$

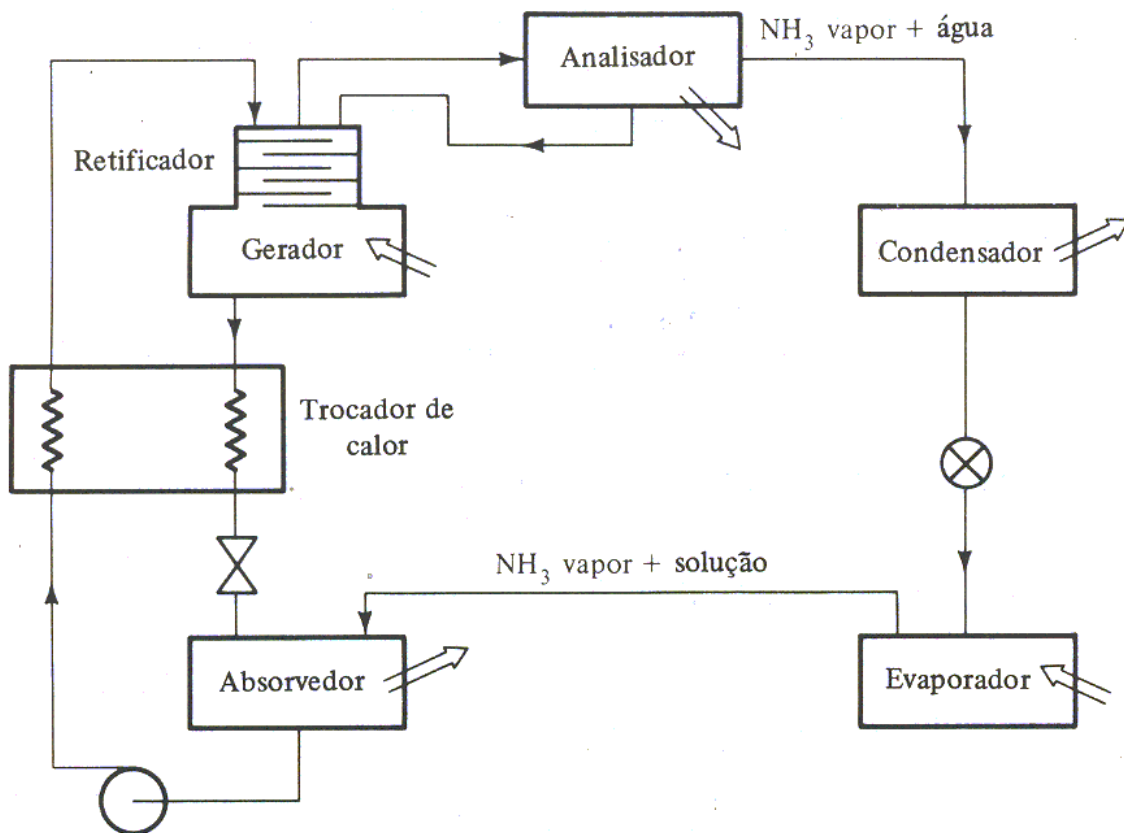
A capacidade total de refrigeração

$$\dot{Q}_e = Q_{e,abs} + Q_{e,comp}$$

b) COP do sistema combinado

$$COP = \frac{Q_{e,tot}}{\dot{Q}_{tot}}$$

9.13 Sistema Água-Amônia



9.14 - Comparação Sistema de Compressão x Sistema de Absorção

Sistema Água-Amônia

Vantagens

- Proporciona temperaturas de evaporação abaixo de 0°C
- Opera com temperaturas acima da atmosfera.

Desvantagens

- Requer componentes extras

Sistema LiBr-Água

Vantagens

- Não necessita de componentes extras

Desvantagens

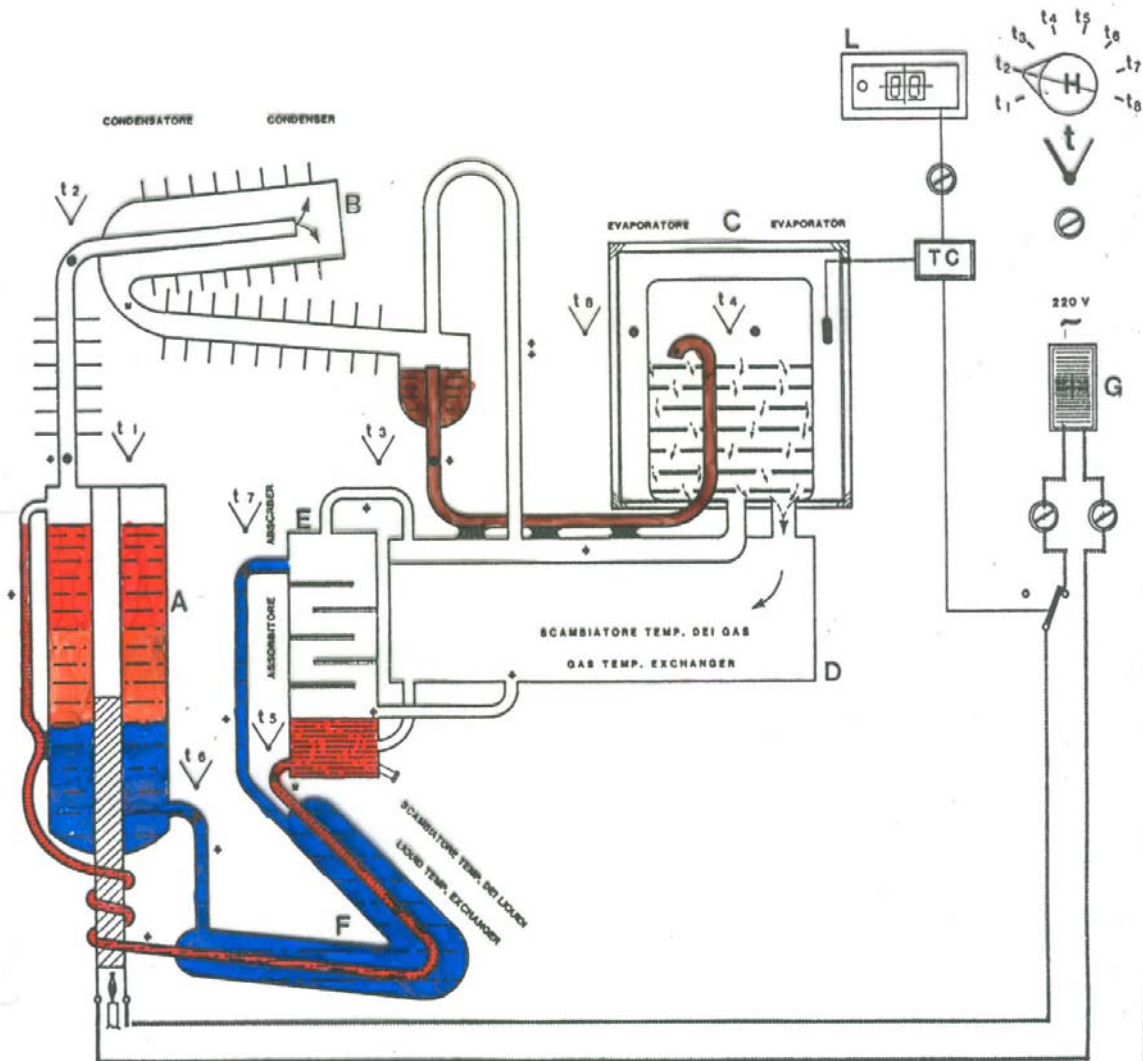
- Opera com pressões abaixo da atmosfera (infiltrações de ar).
- Limitado a temperaturas de evaporação acima de 0°C.
- Corrosão do sistema.

9.15 Sistema Planten-Munters

Nestes sistemas, a bomba e as válvulas de expansão são eliminadas. Isto é obtido graças a uma única pressão no sistema.

A pressão de equalização é obtida introduzindo hidrogênio no sistema no evaporador e absorvedor.

A amônia no evaporador muda de fase devido à baixa pressão parcial de amônia no hidrogênio.



legenda fig. A

- A - generatore
- B - condensatore
- C - evaporatore
- D - scambiatore temp. dei gas
- E - assorbitore
- F - scambiatore temp. dei liquidi
- G - interruttore generale
- H - selettore
- I - indicatore digitale
- L - termostato digitale

key of the figure A

- A - generator
- B - condenser
- C - evaporator
- D - gas temperature exchanger
- E - absorber
- F - liquid temperature exchanger
- G - general switch
- H - selector
- I - digital indicator
- L - digital thermostat