

Refrigeração

Parte 1: Introdução

Introdução

- Transformação de energia mecânica em térmica
 - Sistemas de Refrigeração
 - Bombas de calor
- Exemplos:
 - Geladeira
 - Ar condicionado
 - Aquecedor doméstico
- 3 Tipos principais:
 - Compressão de vapor
 - Absorção
 - Sistemas de refrigeração a gás

Sistemas de Compressão de Vapor

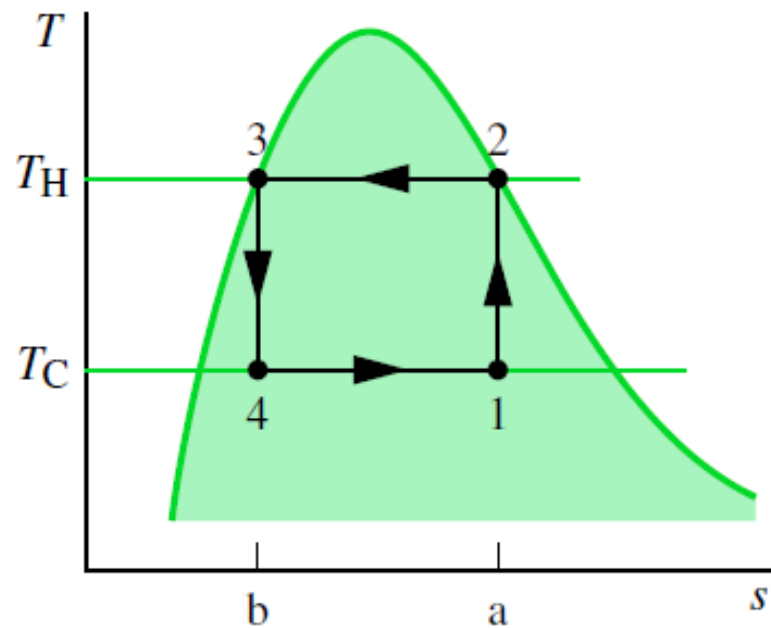
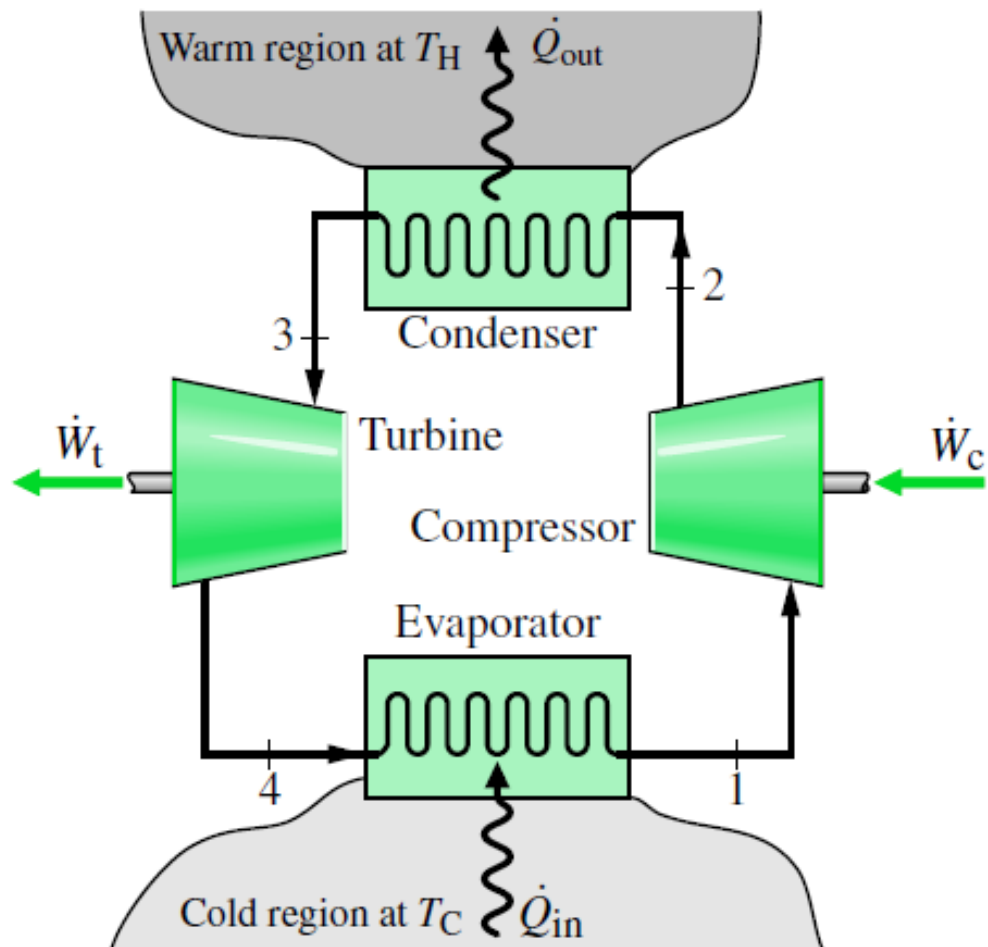
- Injeta-se trabalho para promover transf. de calor no sentido “inverso”
 - Trabalho para fazer transf calor da região a baixas temperaturas para região a altas temperaturas
- Refrigerador
 - Foco é na remoção de calor
 - Mantém Temperatura abaixo da Temp da vizinhança
- Bomba de calor:
 - Foco é no fornecimento de calor
 - Mantém Temperatura acima da Temp da vizinhança

Sistemas de Compressão de Vapor

- Em ambos os casos: ciclo é o mesmo, o que muda é o foco da análise
 - Fluido de trabalho é condensado e vaporizado alternadamente
- Iniciaremos aqui com refrigeradores, porém as análises podem ser extendidas para bombas de calor.

Ciclo de refrigeração de Carnot

- Ciclo de potência de Carnot com sentido invertido
- Possui maior eficiência possível
- Impossível de ser realizado na prática
- Base de comparação com outros ciclos
- Composto de 4 processos internamente reversíveis
 - Compressão adiabática
 - Rejeição de calor à T e P ctes
 - Expansão adiabática
 - Adição de calor a T e P ctes



Ciclo de Carnot

- Coeficiente de performance para refrigerador

$$\begin{aligned}\beta_{\max} &= \frac{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m} - \dot{W}_t/\dot{m}} \\ &= \frac{\text{area 1-a-b-4-1}}{\text{area 1-2-3-4-1}} = \frac{T_C(s_a - s_b)}{(T_H - T_C)(s_a - s_b)} \\ &= \frac{T_C}{T_H - T_C}\end{aligned}$$

Ciclo de Carnot

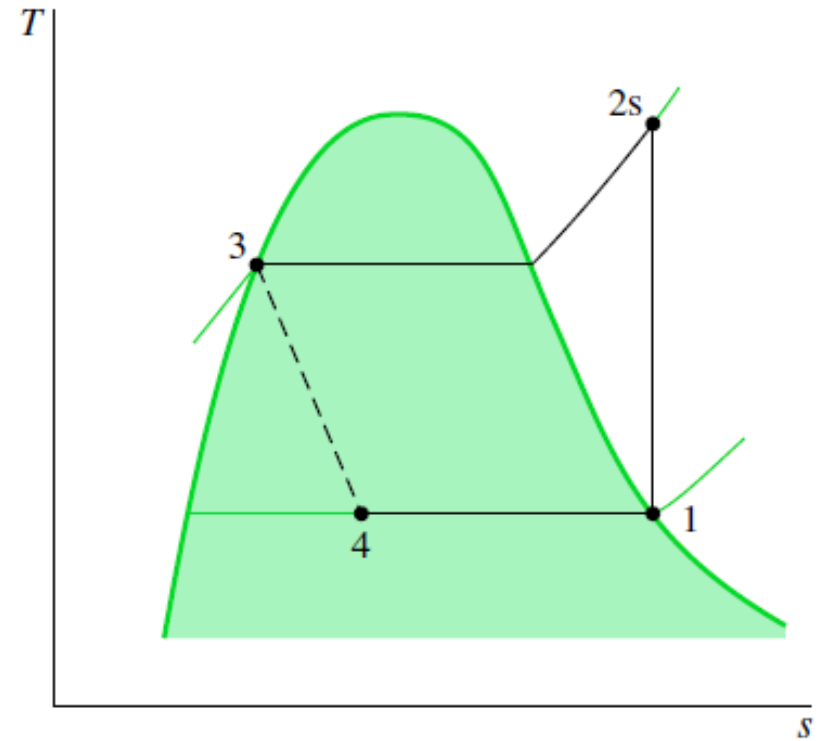
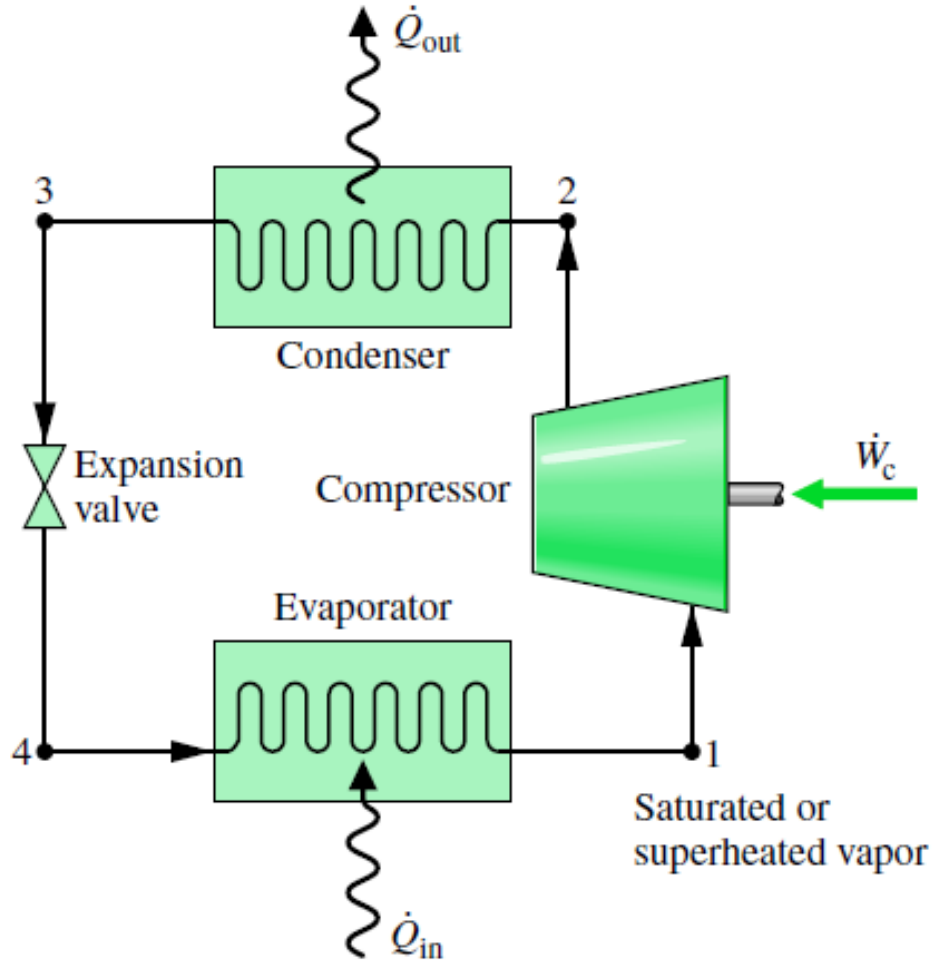
- Coeficiente de performance para bomba de calor

$$\begin{aligned}\gamma_{\max} &= \frac{\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m} - \dot{W}_t/\dot{m}} \\ &= \frac{\text{area } 2\text{-a-b-3-2}}{\text{area } 1\text{-2-3-4-1}} \\ &= \frac{T_H(s_a - s_b)}{(T_H - T_C)(s_a - s_b)} = \frac{T_H}{T_H - T_C}\end{aligned}$$

Ciclo de Carnot

- Na prática, Ciclo de Carnot não pode ser obtido
 - Irreversibilidades
 - Compressão 1- \rightarrow 2 ocorre na região bifásica
 - Refrigerante deve estar a $T'_c < T_c$ e a $T'_H > T_H$ para fazer transf. calor em evaporador e condensador
 - W_T é muito pequeno, logo não é factível utilizar turbina
 - Normalmente se opta por uma válvula de expansão

Ciclo Ideal com compressão de vapor



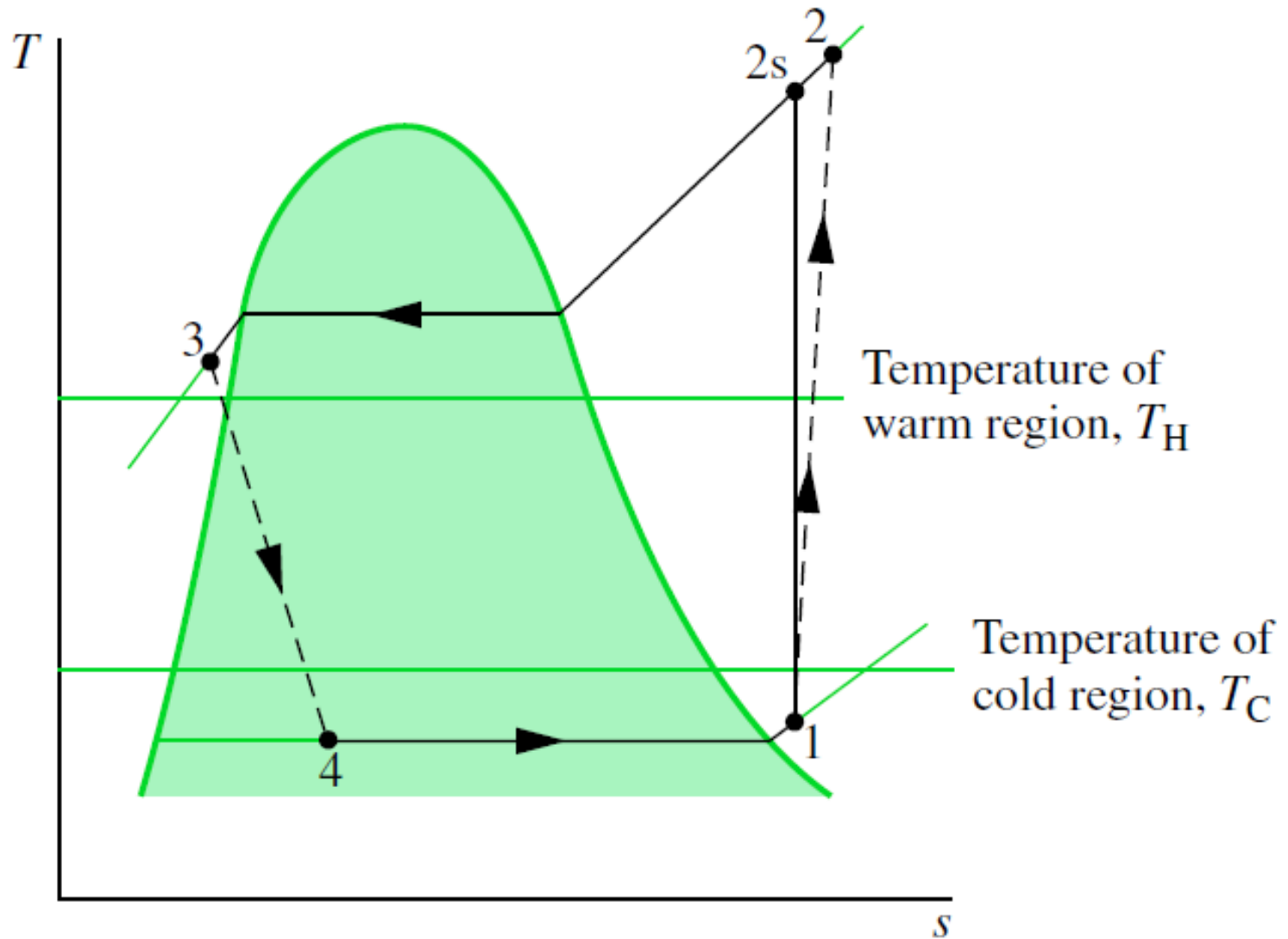
Ciclo Ideal com compressão de vapor

- 3 proc. reverssíveis e 1 proc. irreverssível (3 -> 4)
 - 1->2s: compressão isentrópica
 - 2s->3: rejeição de calor a $P=\text{cte}$ (vapor -> liq. sat)
 - 3->4: expansão na válvula a $h=\text{cte}$ (liq sat -> liq + vap)
 - 4->1: adição de calor a $P=\text{cte}$ (liq+vap -> vap sat)
- Obs: vale tanto para bomba de calor como para refrigeração

Ciclos reais

- Diferenças que ocorrem em situações reais:
 - Q_{in} e Q_{out} de forma irreversível
 - $T_{ref.evap.} < T_C$
 - $T_{ref.cond.} > T_H$
 - Irreversibilidades na compressão
 - $S_2 > S_{2s} \Rightarrow$ aumento do trabalho compressão
 - Perda de carga no condensador e no evaporados
 - Embora normalmente sejam desprezíveis
 - Estado 1 às vezes vapor superaquecido
 - Estado 3 às vezes líquido comprimido

Ciclos reais



W, Q, rendimento e Coef. Performance

- Aplica-se conservação massa e energia para VC englobando cada componente

- Evaporador $\frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$

- Compressor $\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1$

- Condensador $\frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$

- Válv. Expansão $h_4 = h_3$

W, Q, rendimento e Coef. Performance

- Coef. Performance refrigerador

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

- Coef. Performance bomba de calor

$$\gamma = \frac{\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

- Rendimento

$$\eta_c = \frac{(\dot{W}_c/\dot{m})_s}{(\dot{W}_c/\dot{m})} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

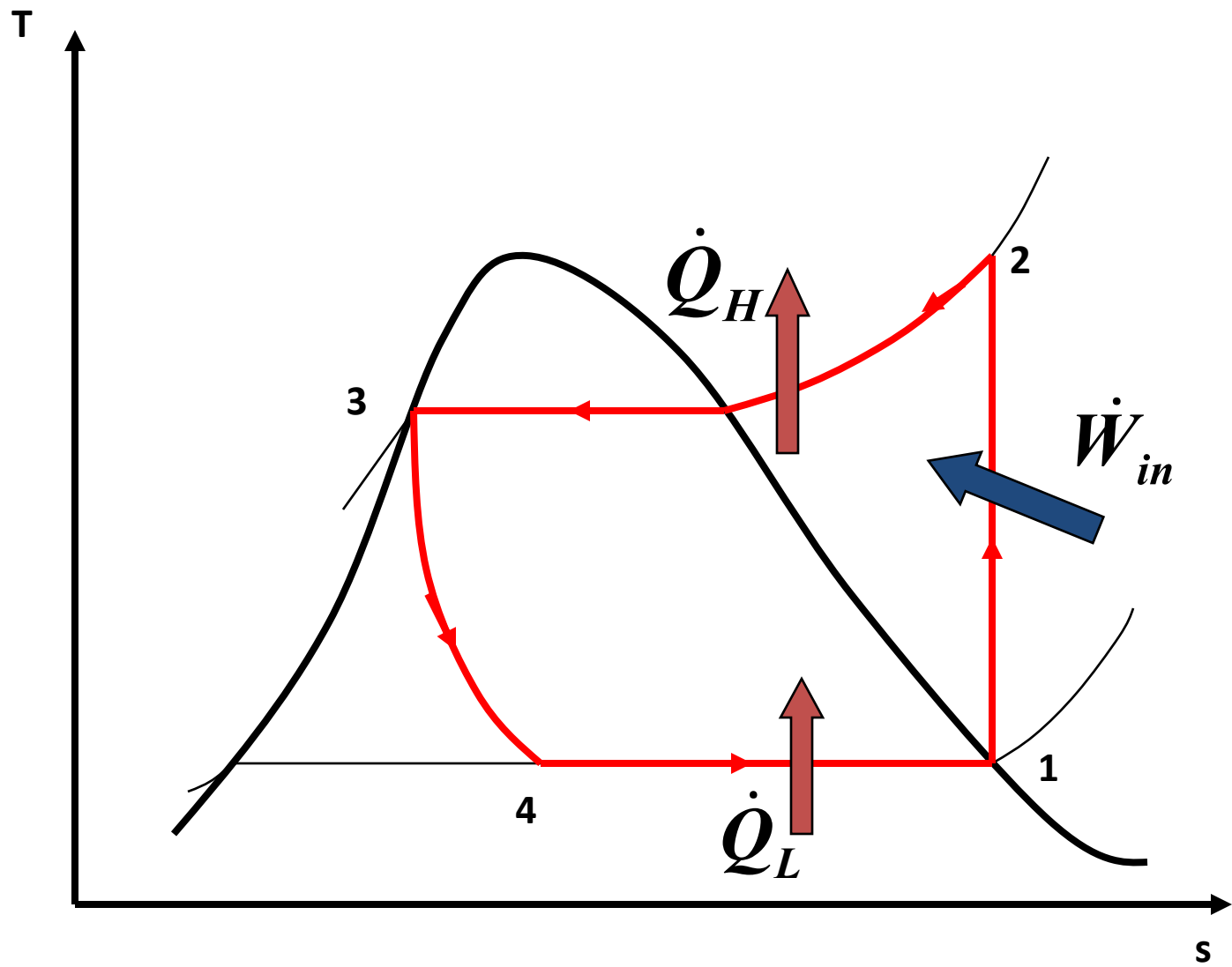
Exemplo

Considere um sistema de refrigeração resfriando a uma taxa de 300 kJ/min em um ciclo ideal de vaporização-compressão com refrigerante R-134a. O refrigerante entra no compressor como vapor saturado a 140 kPa e é comprimido a 800 kPa. Mostre o ciclo em um diagrama T-s (com as linhas de saturação). Determine: (a) o título do refrigerante na saída da válvula de expansão,; (b) o coeficiente de performance; (c) a potência fornecida ao compressor.

Considerações

- **Regime permanente**
- **Compressão isentrópica no compressor**
- **Variações de energia cinética e potencial desprezíveis**

- **$P_1 = 0.14 \text{ MPa}$, $x_1 = 1.0$**
- **$P_2 = 0.8 \text{ MPa}$, $s_2 = s_1$**
- **$P_3 = 0.8 \text{ MPa}$, $x_3 = 0$**
- **$h_4 = h_3$ (válvula de expansão)**



State	T (C)	P(MPa)	v(m³/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	x
1		0.14				1.0
2		0.8				
3		0.8				0.0
4						

State	T (C)	P(MPa)	v(m ³ /kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	x
1	-18.80	0.14		236.04	<u>0.9322</u>	1.0
2		0.8		272.05	<u>0.9322</u>	
3	31.33	0.8		<u>93.42</u>		0.0
4				<u>93.42</u>		

Compressão isentrópica: $s_2 = s_1$

Válvula de expansão: $h_4 = h_3$

(a)

$$\begin{aligned}x_4 &= \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}} \\ &= \frac{93.42 - 25.77}{210.27} = 0.322\end{aligned}$$

$P_4 = 140 \text{ kPa}$

(b)

$$\begin{aligned} COP_R &= \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{q_L}{w_{in}} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{236.04 - 93.42}{272.05 - 236.04} \end{aligned}$$

$$COP_R = 3.96$$

(c)

$$COP_R = \frac{\text{cooling effect}}{\text{work input}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}}$$

$$\dot{Q}_L = 300 \text{ kJ/min} = 5 \text{ kJ/s} = 5 \text{ kW}$$

Compressor Power Input

$$\dot{W}_{in} = \frac{\dot{Q}_L}{COP_R} = \frac{5 \text{ kW}}{3.96} = 1.26 \text{ kW}$$

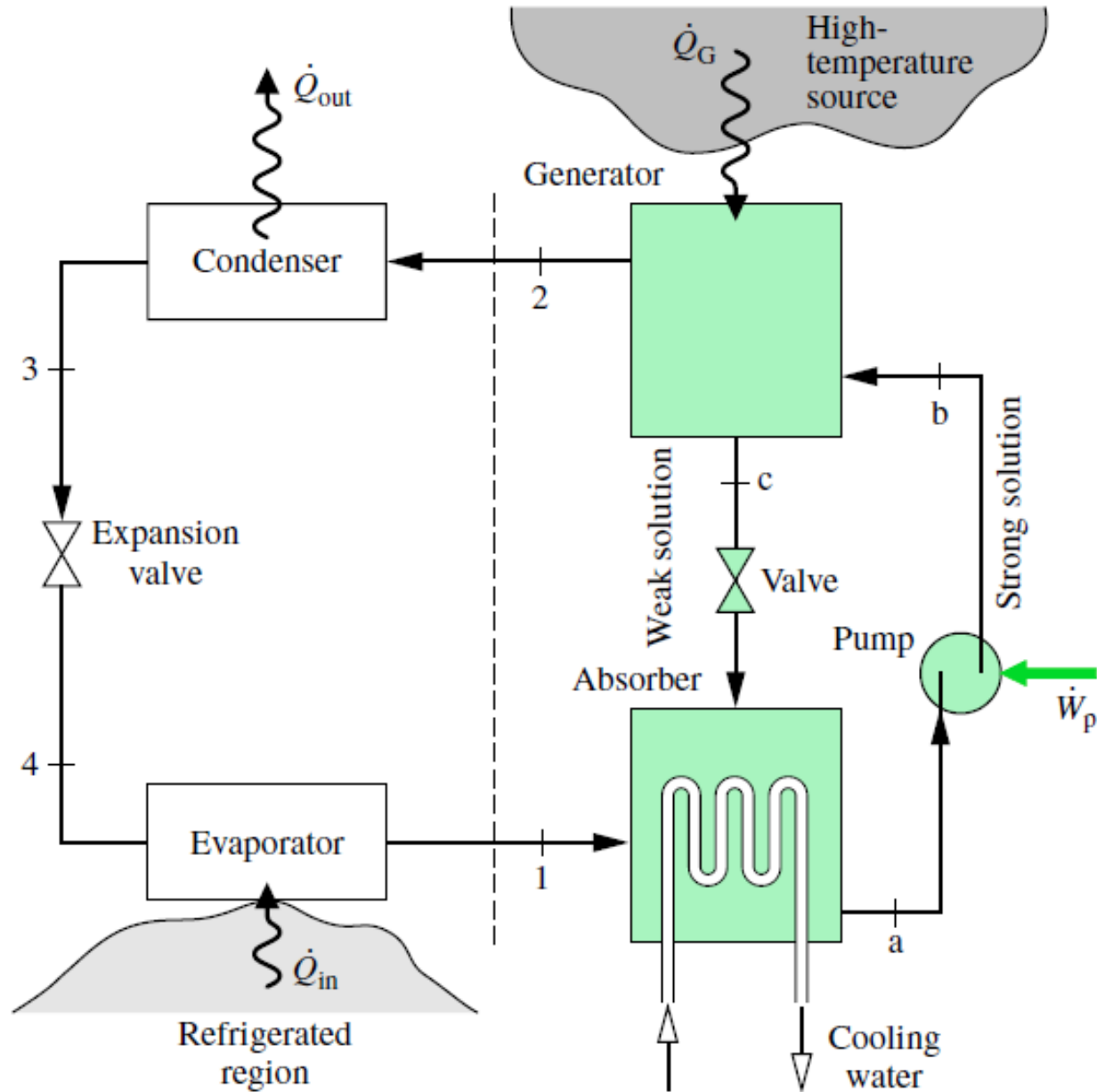
Observações sobre sist. comp. vapor

- Há sistemas “reversíveis” (no sentido de funcionamento)
 - Circuitos + válvulas permitem “alternar” condensador e evaporador
- Refrigerantes:
 - Devem ter T_{evp} e T_{cond} compatíveis com a aplicação
 - De 1940 a 1970 utilizavam-se CFCs (ex: R12)
 - CFCs hoje são proibidos
 - De 1990 para cá: HFCs (R134a), HCFCs (R22) e amônia (NH_3)

Observações sobre sist. comp. vapor

- Alguns sistemas utilizam variações do ciclo básico para melhorar performance
 - Cascata: sistemas em série, utilizando refrigerantes diferentes
 - Compressão multiestágio com resfriamento intermediário
 - Reduz trabalho de compressão

Refrigeração por Absorção



Refrigeração por absorção

- Semelhante ao sistema de compressão por vapor
- Diferença é que compressor é substituído por sistema absorvedor + bomba + gerador de vapor + válvula
 - Ao sair do evaporador, vapor é absorvido por absorvente no absorvedor => solução líquida
 - Solução líquida é bombeada (pressurizada) por uma bomba
 - No GV, calor é adicionado para liberar o vapor da solução líquida
 - Vapor segue para o condensador
 - Absorvente retorna ao absorvedor

Refrigeração por absorção

- Ao invés de W_C , o input é $W_P + Q_{in}$
- $W_P < W_C$
 - Se houver disponibilidade de calor, ciclo por absorção pode ser vantajoso
 - Por ex., é interessante em cogeração, utilizando-se calor antes rejeitado como Q_{in}
- Em geral:
 - Refrigerante = amônia
 - Absorvente = água
 - Obs: gás + absorvente => solução líquida + calor, logo há troca de calor no absorvedor.

Refrigeração por absorção

- Equipamentos adicionais:
 - Trocador de calor para transf. calor entre saída da bomba e retorno do absorvente
 - Diminui calor fornecido ao gerador
 - Retificador na saída do gerador
 - Remove absorvente residual
 - Elimina formação de gelo na válvula de expansão e no evaporador