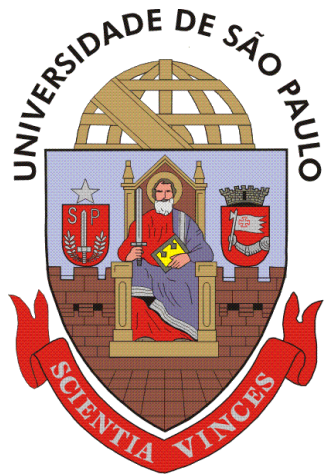




Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



PME 3344

Termodinâmica Aplicada

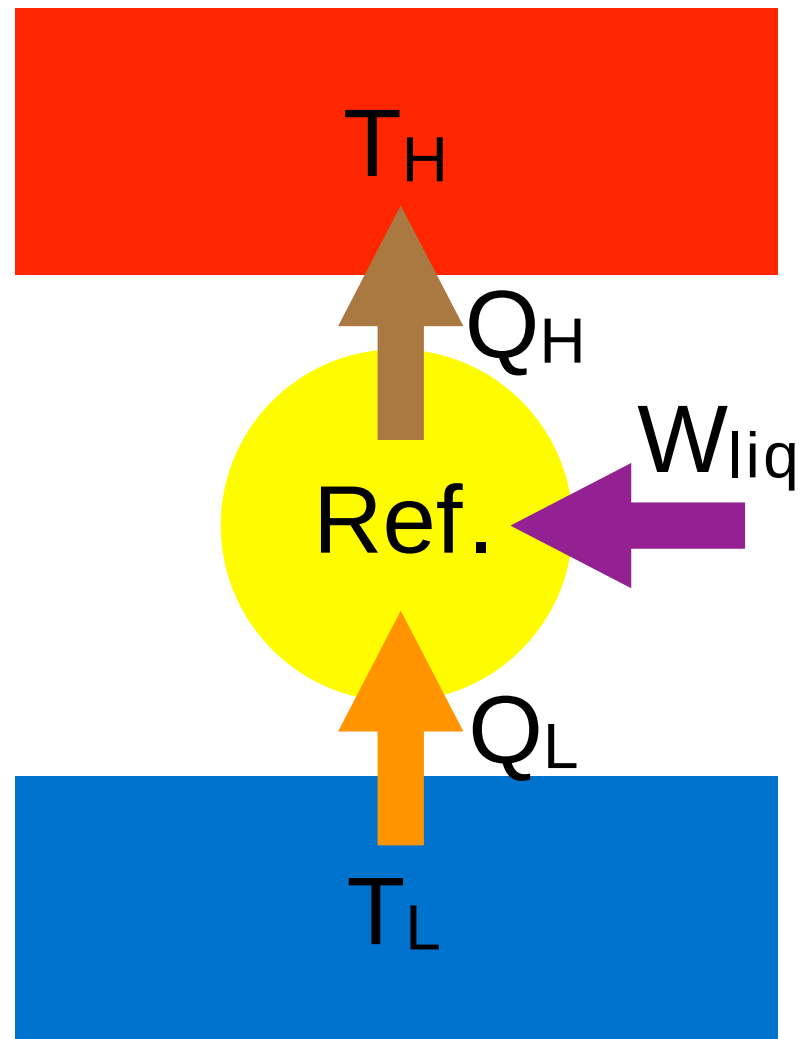
12) Ciclos de Refrigeração



- ✱ A transferência de calor de compartimentos de baixa temperatura para outros a temperaturas maiores é chamada de refrigeração.
- ✱ Equipamentos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores, e operam segundo um ciclo frigorífico.
- ✱ O fluido de trabalho dos refrigeradores são os refrigerantes.
- ✱ Os refrigeradores utilizados com o propósito de aquecer um espaço fazendo uso do calor de um reservatório mais frio são denominados bombas de calor.

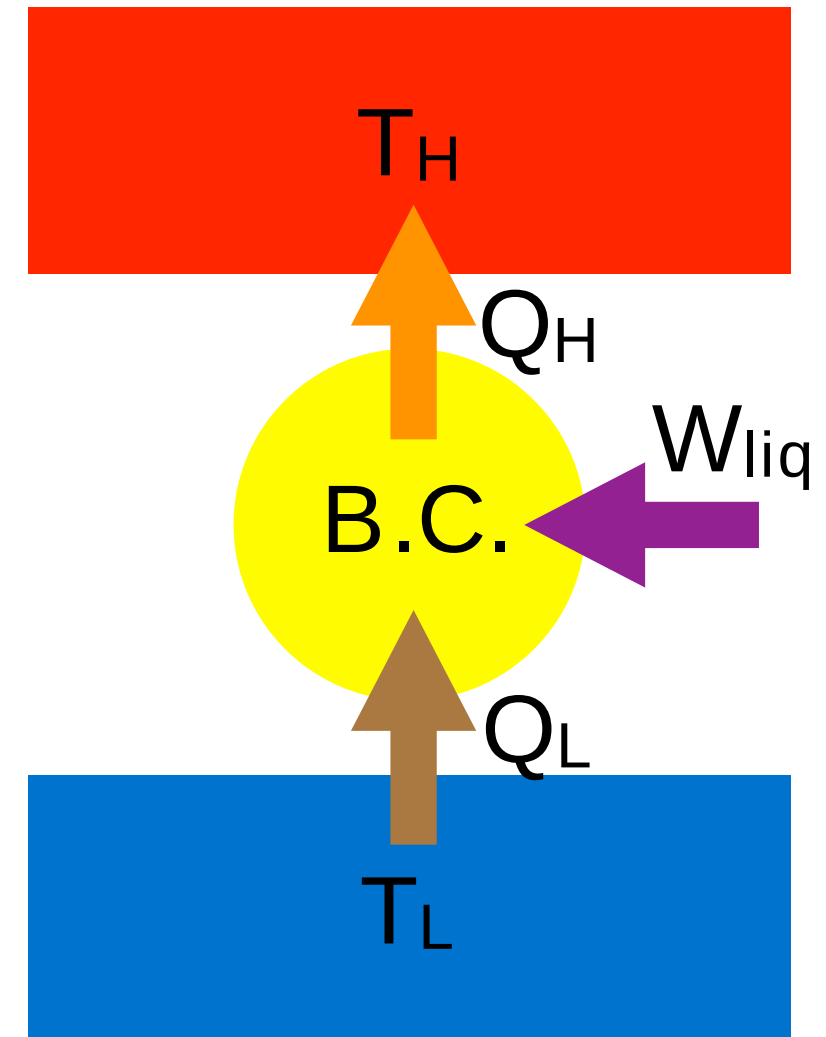


Refrigerador:



Efeito útil $\rightarrow Q_L$

Bomba de calor:



Efeito útil $\rightarrow Q_H$



Ciclo de refrigeração:

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Bomba de calor:

$$\beta' = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

Ciclo de refrigeração ideal (Carnot): $\beta = \frac{T_L}{T_H - T_L}$

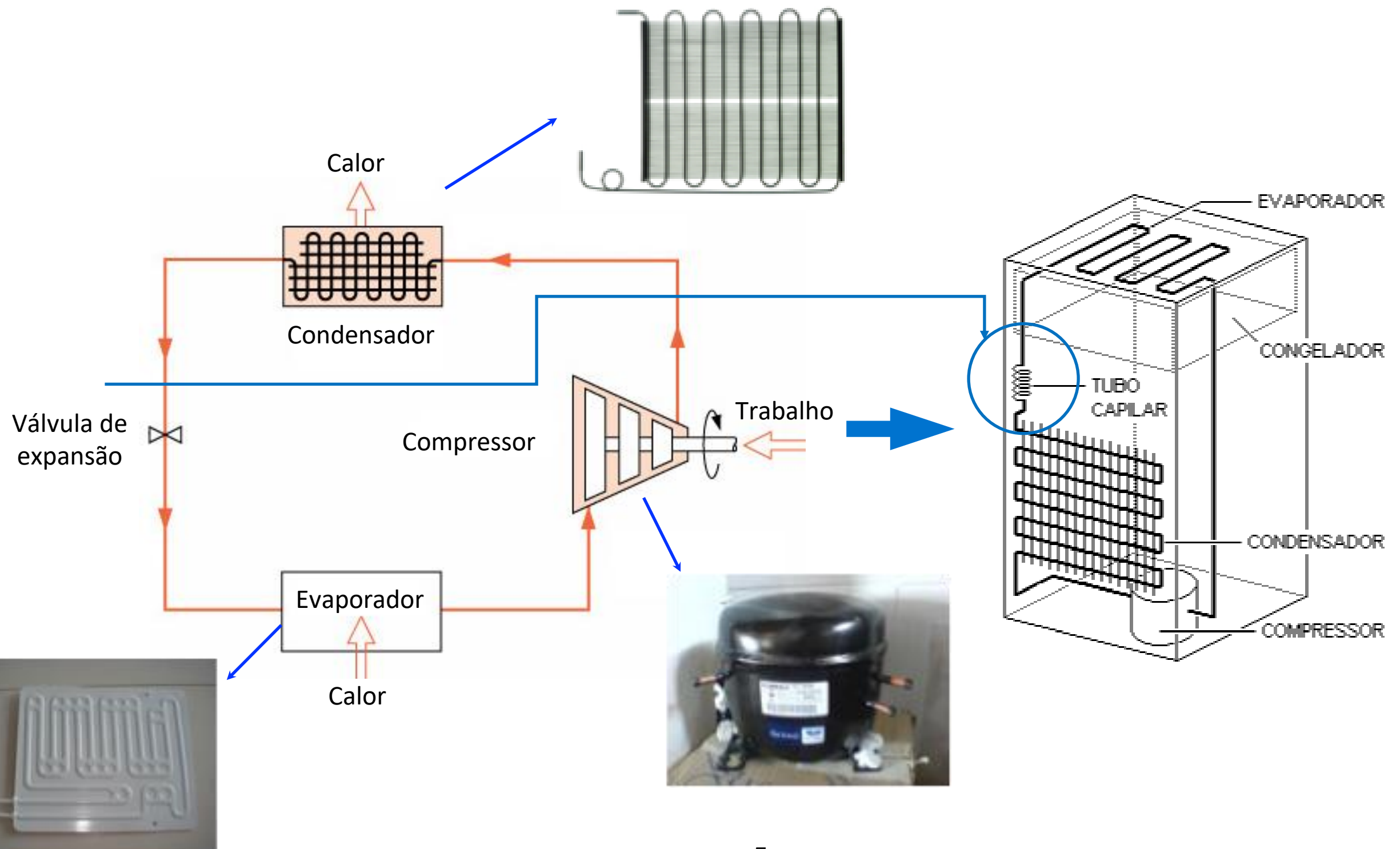
Bomba de calor ideal (Carnot): $\beta' = \frac{T_H}{T_H - T_L}$

Ciclo de refrigeração por compressão



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Fluido de trabalho: fluido refrigerante





Fluidos refrigerantes

CFC: clorofluorcarbonos (camada de ozônio),
R11 e R12 (diclorodifluormetano CCl_2F_2).

HCFC: hidroclorofluorcarbonos
(camada de ozônio), R22.

HFC: Hidrofluorcarbonos (efeito estufa),
R134a.

Blends de HCFCs e HFCs: R401A.

Blends de HFCs: R404A e R410A.

Principais fluidos em uso:

R134a, R22, R410A, R404A, R290 (propano), R610a
(isobutano), R744 (CO_2), R117 (amônia) e R729 (ar).

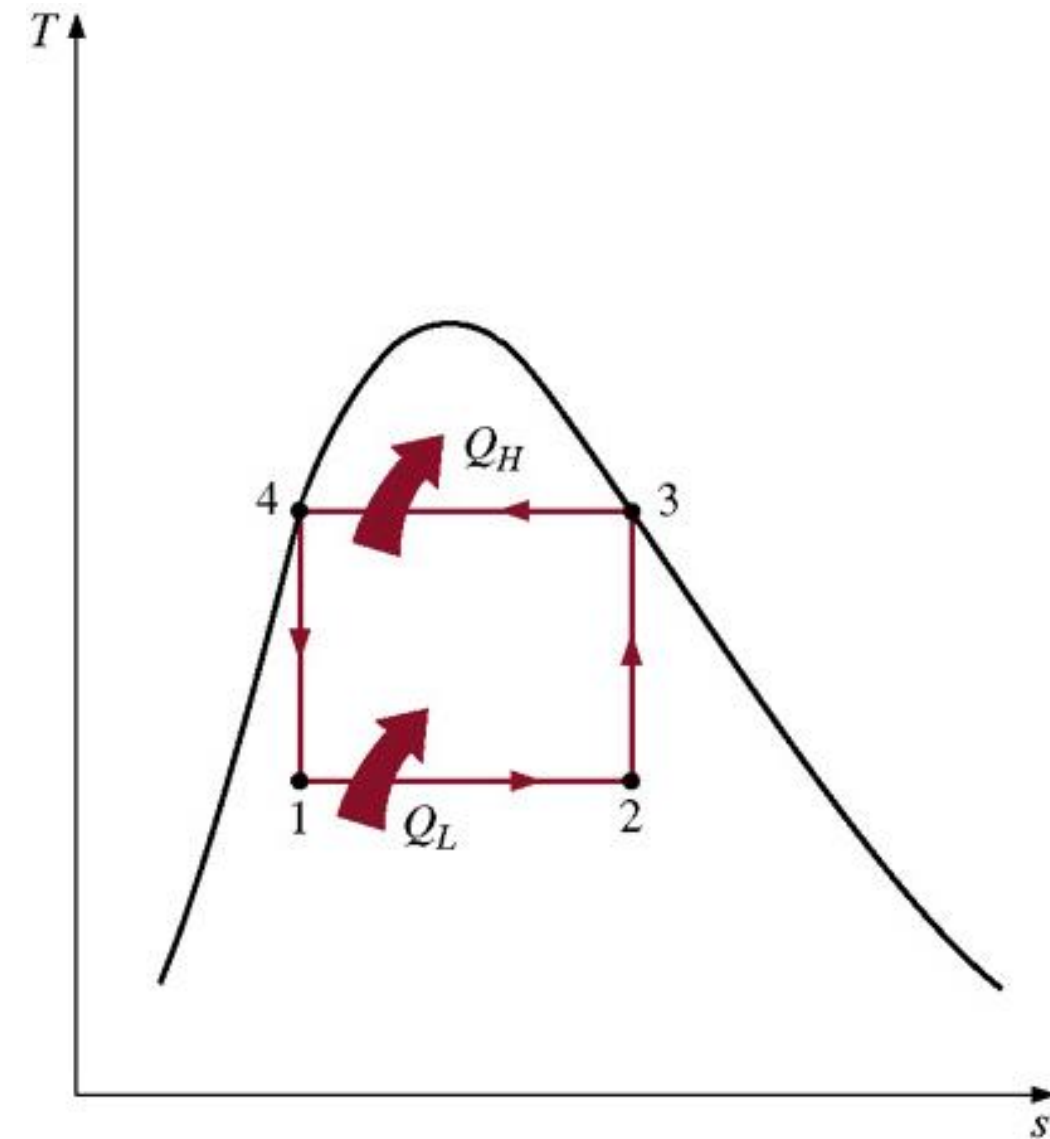
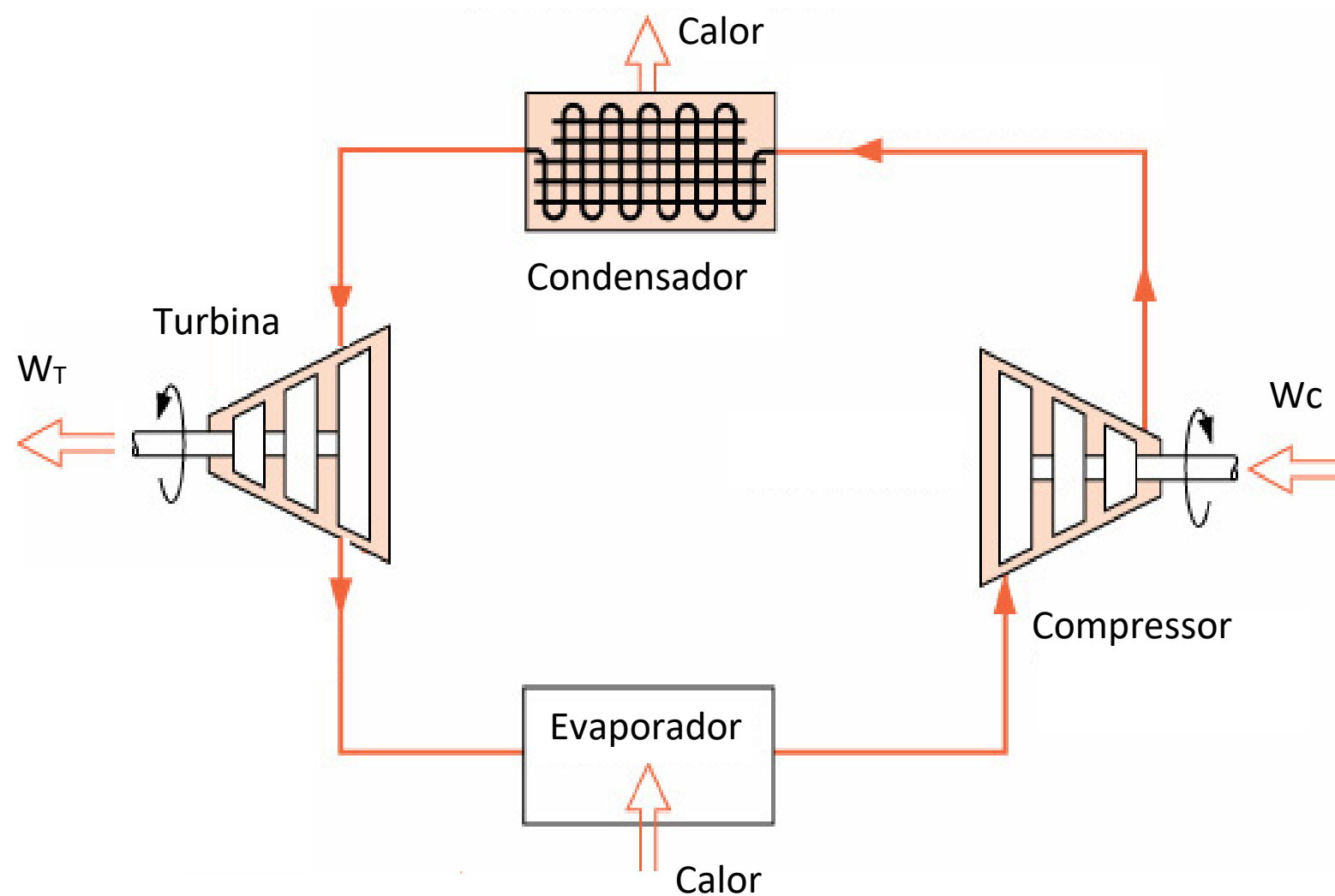


Vida
média

Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor: Carnot



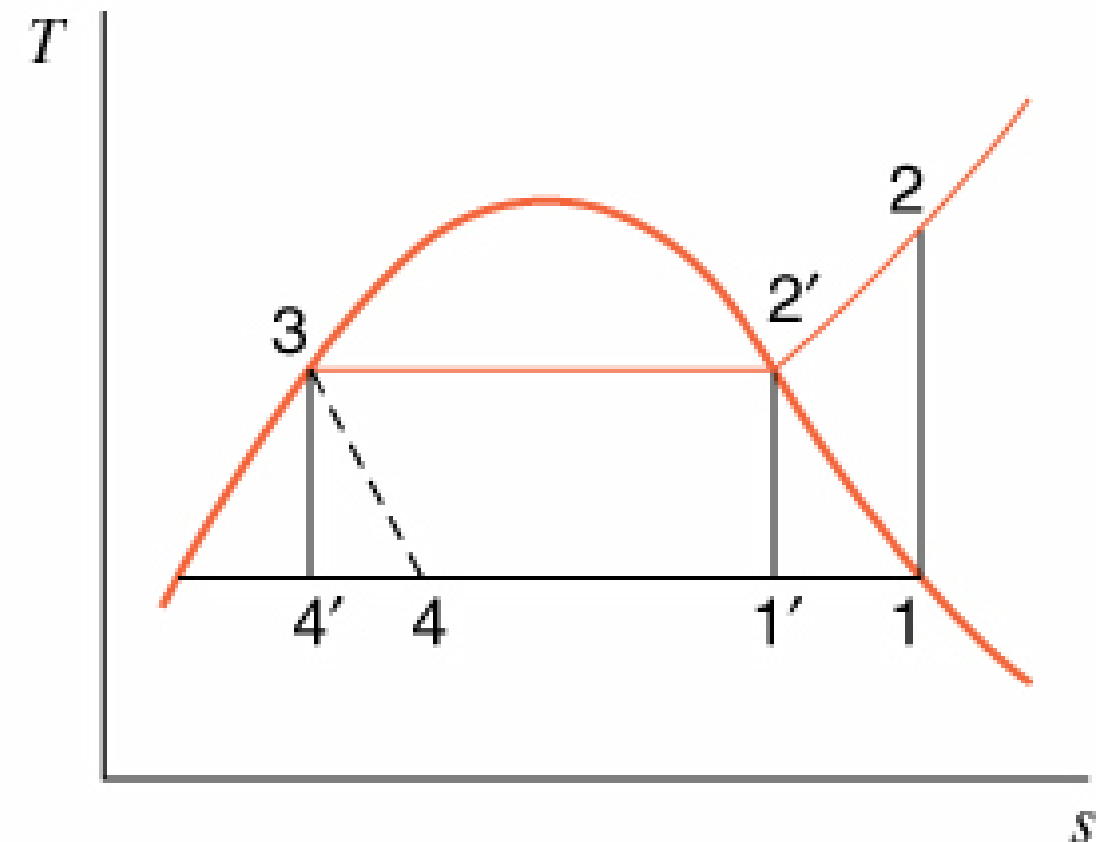
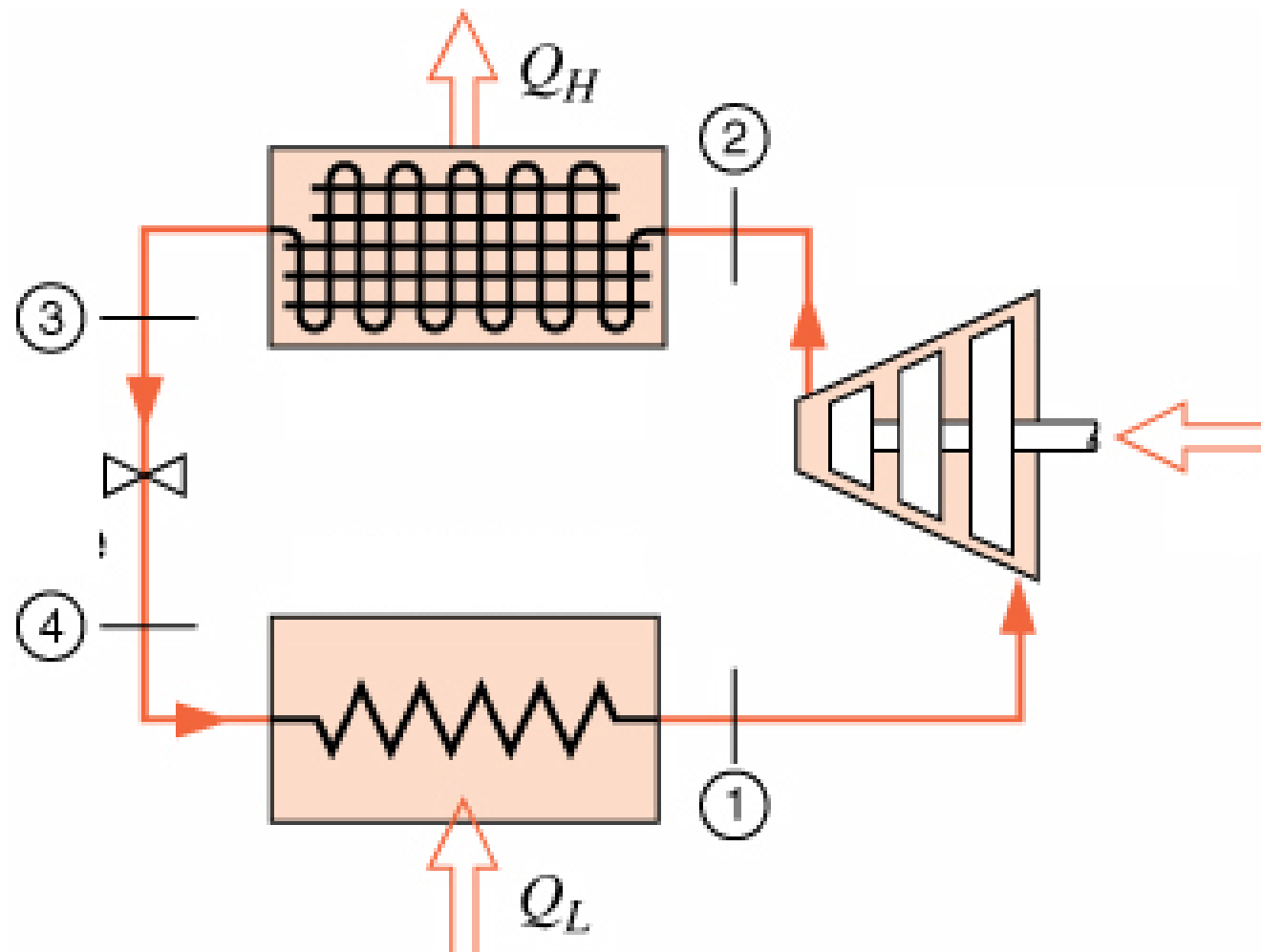
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor



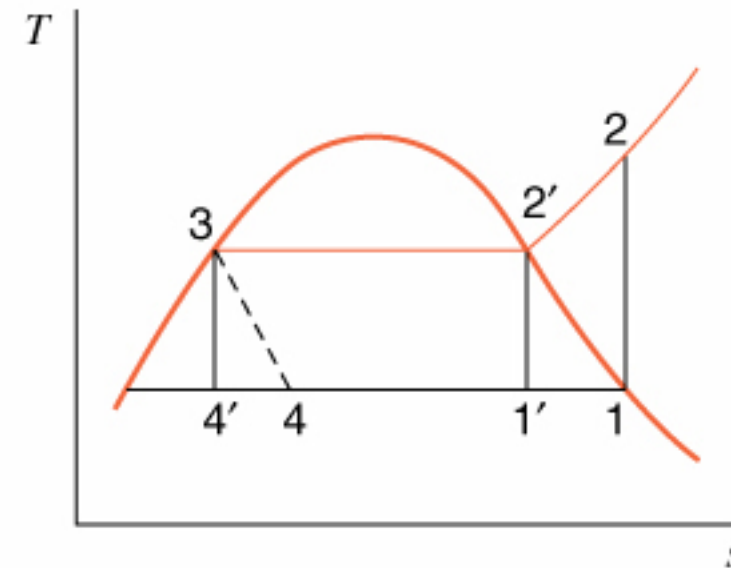
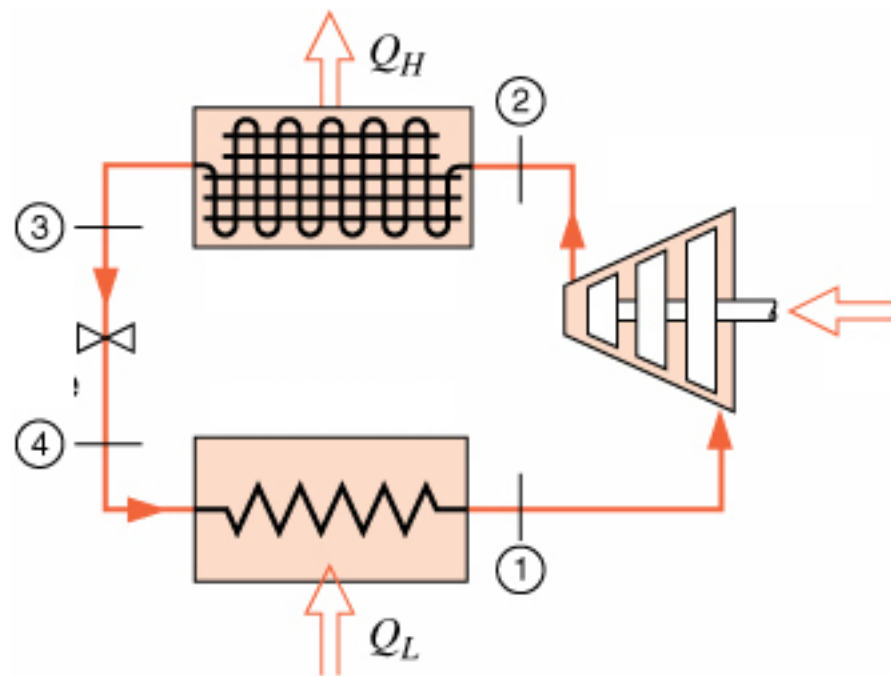
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Processo 1-2: compressão isentrópica do fluido refrigerante.

Processo 2-3: transferência de calor a pressão constante para o reservatório H.

Processo 3-4: expansão isentálpica.

Processo 4-1: transferência de calor a pressão constante do reservatório L.

Diagrama T-s: isentálpicas (H_2O)



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

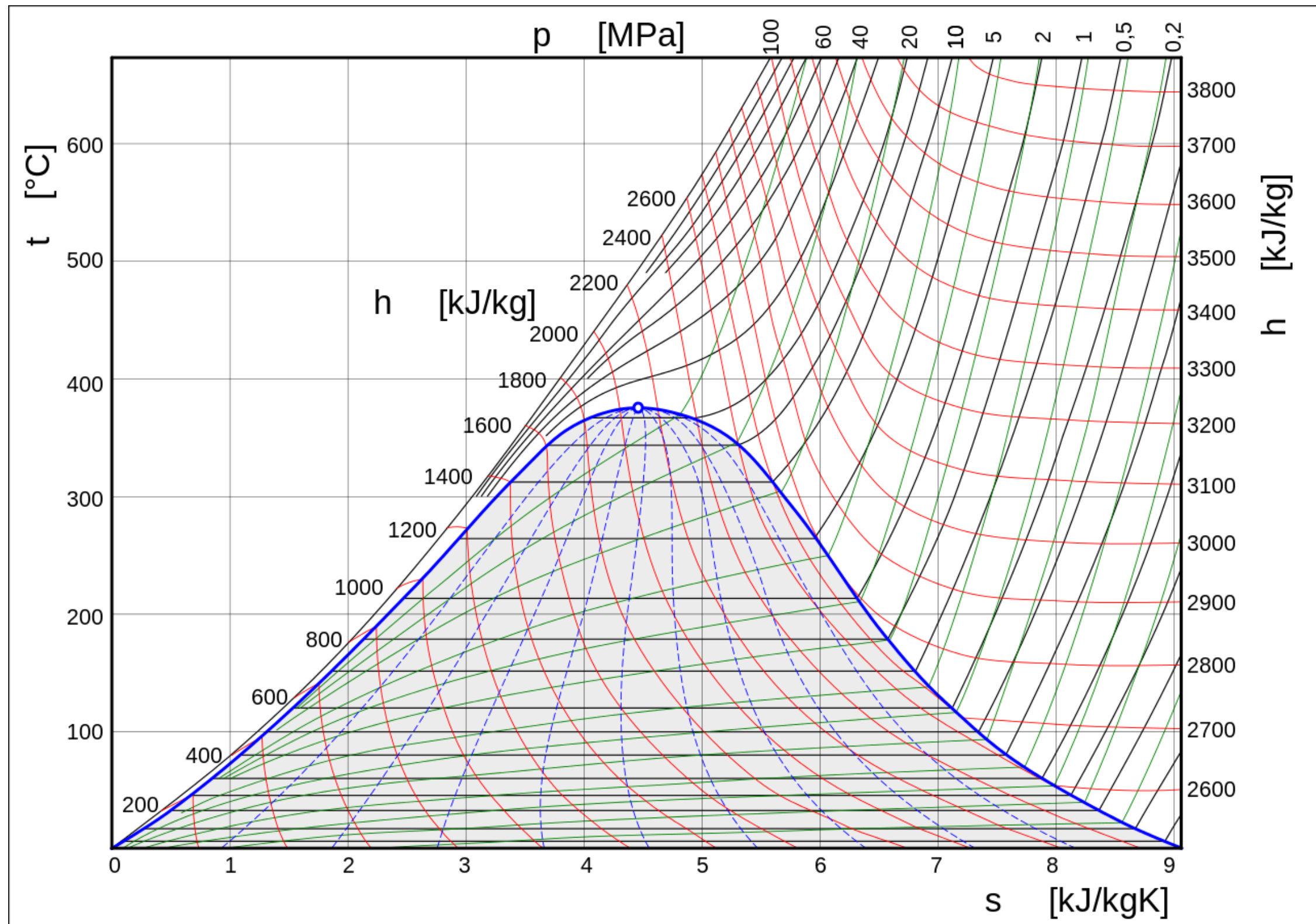
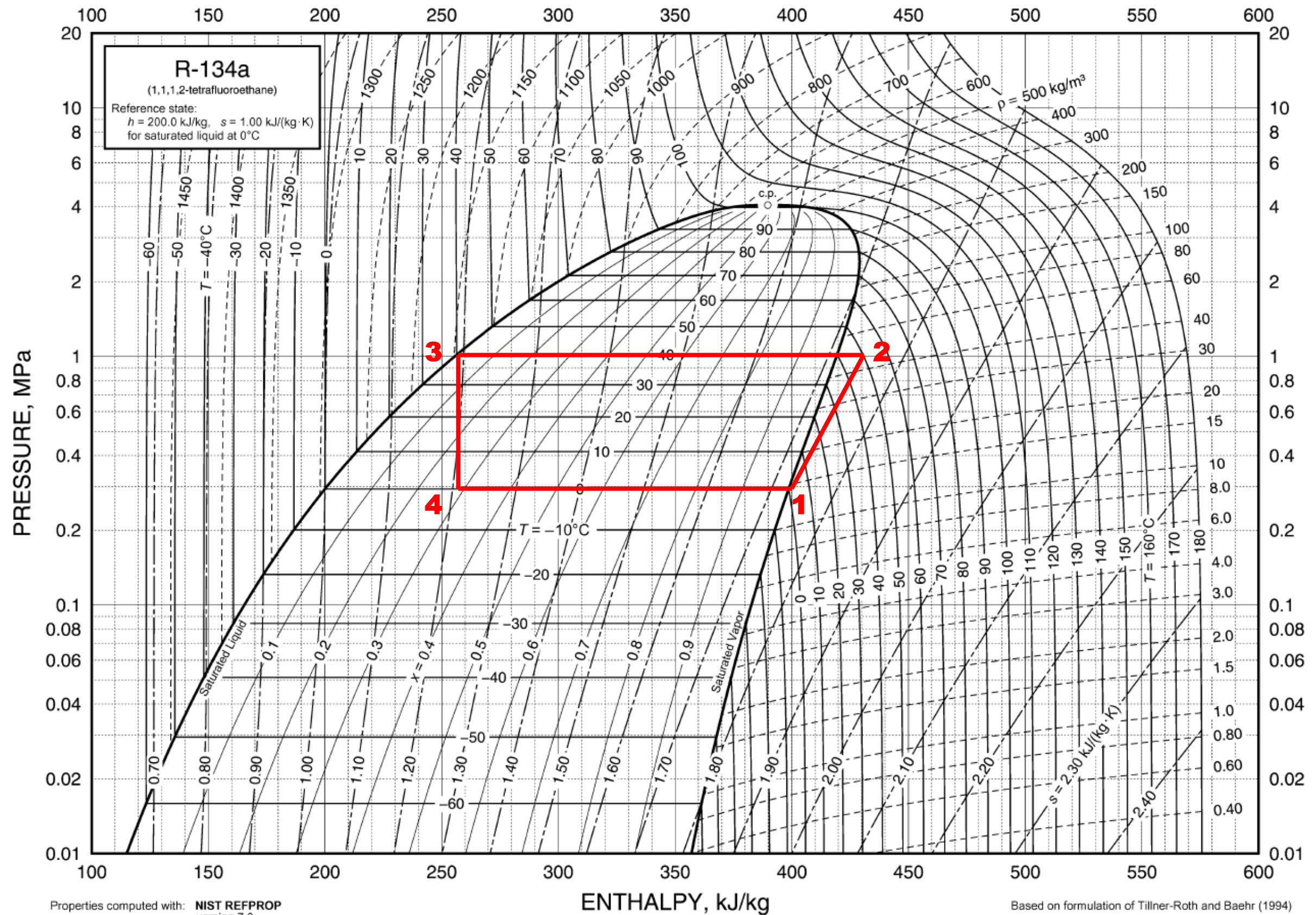
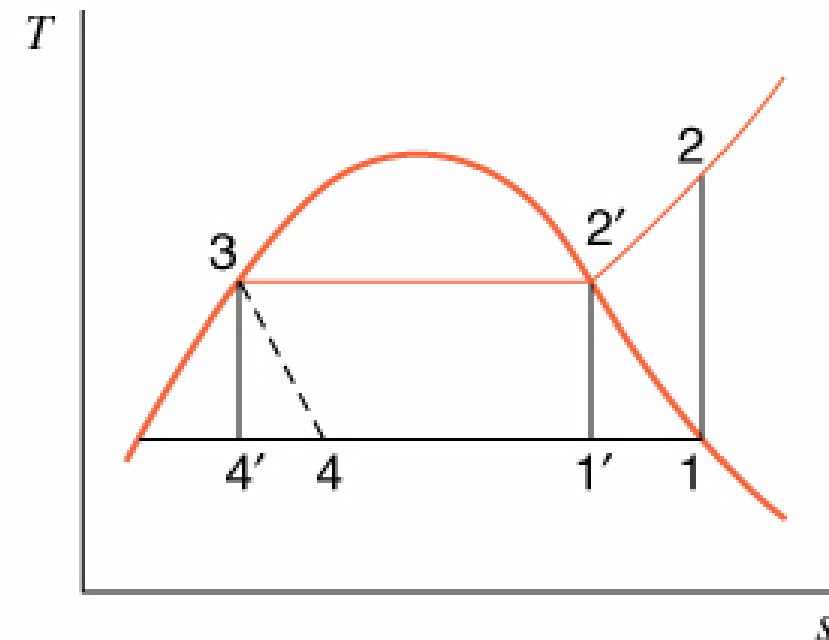
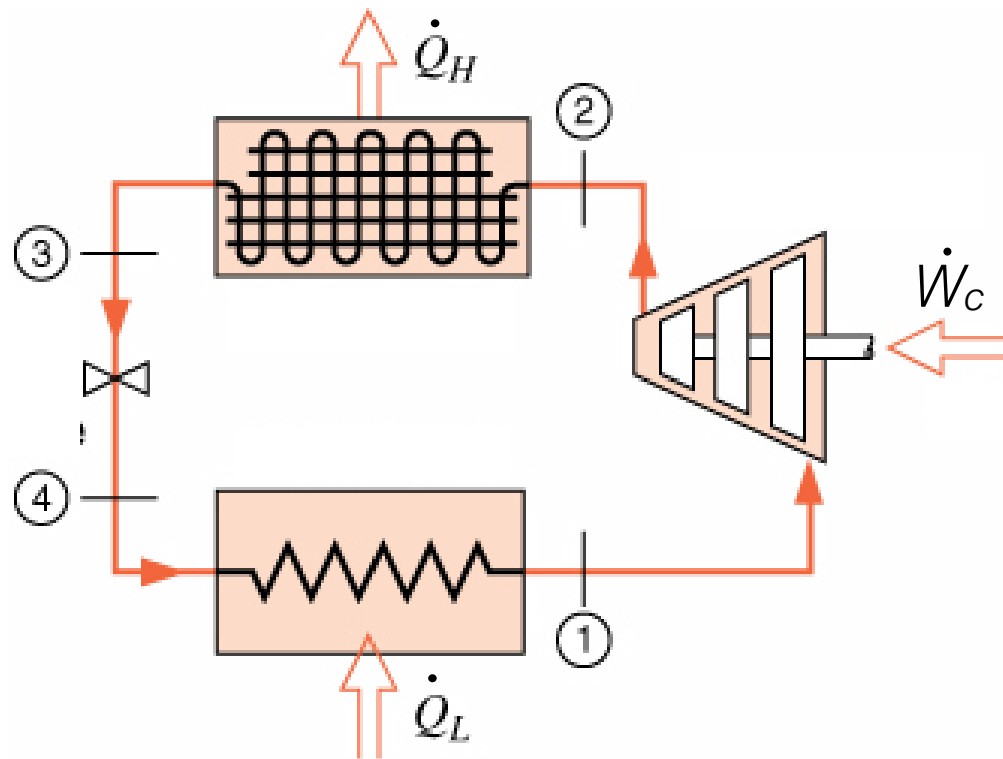


Diagrama P-h: Mollier



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo





1ª Lei

Processo

Compressor:

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

s constante

Condensador:

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

P constante

Válvula de expansão:

$$h_3 = h_4$$

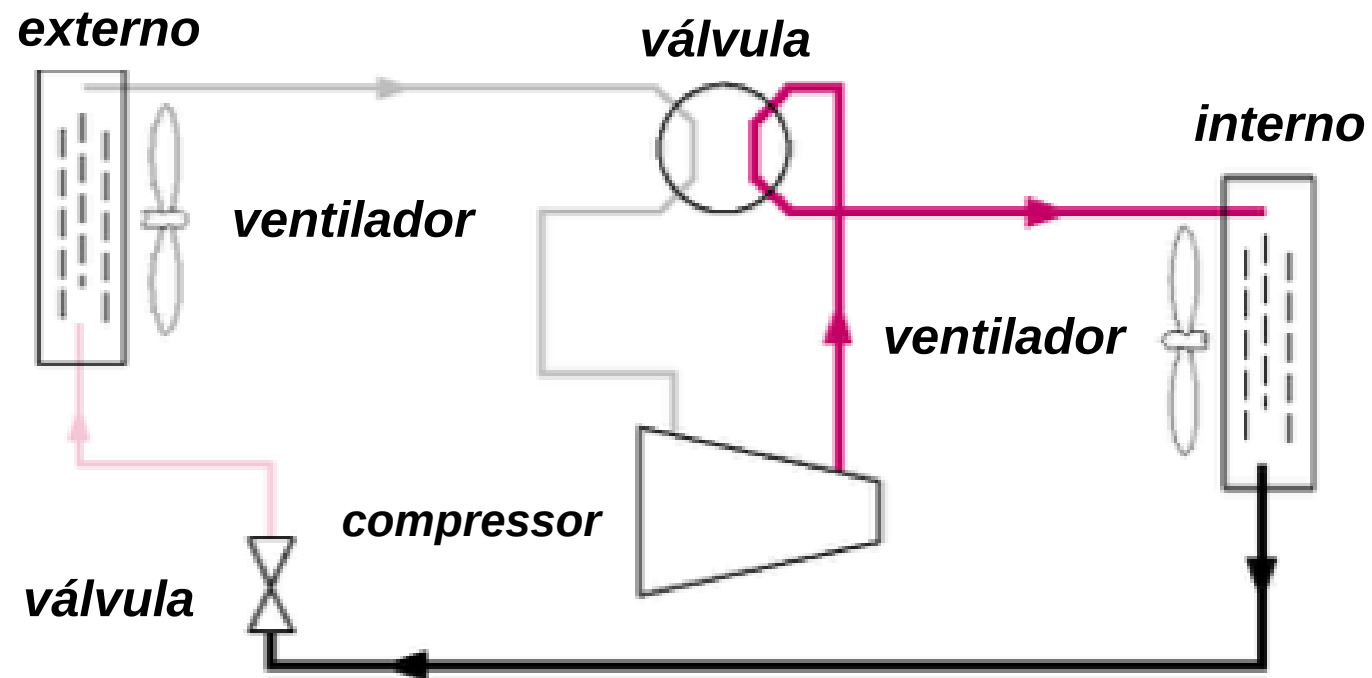
h constante ($\Delta s > 0$)

Trocador de calor:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

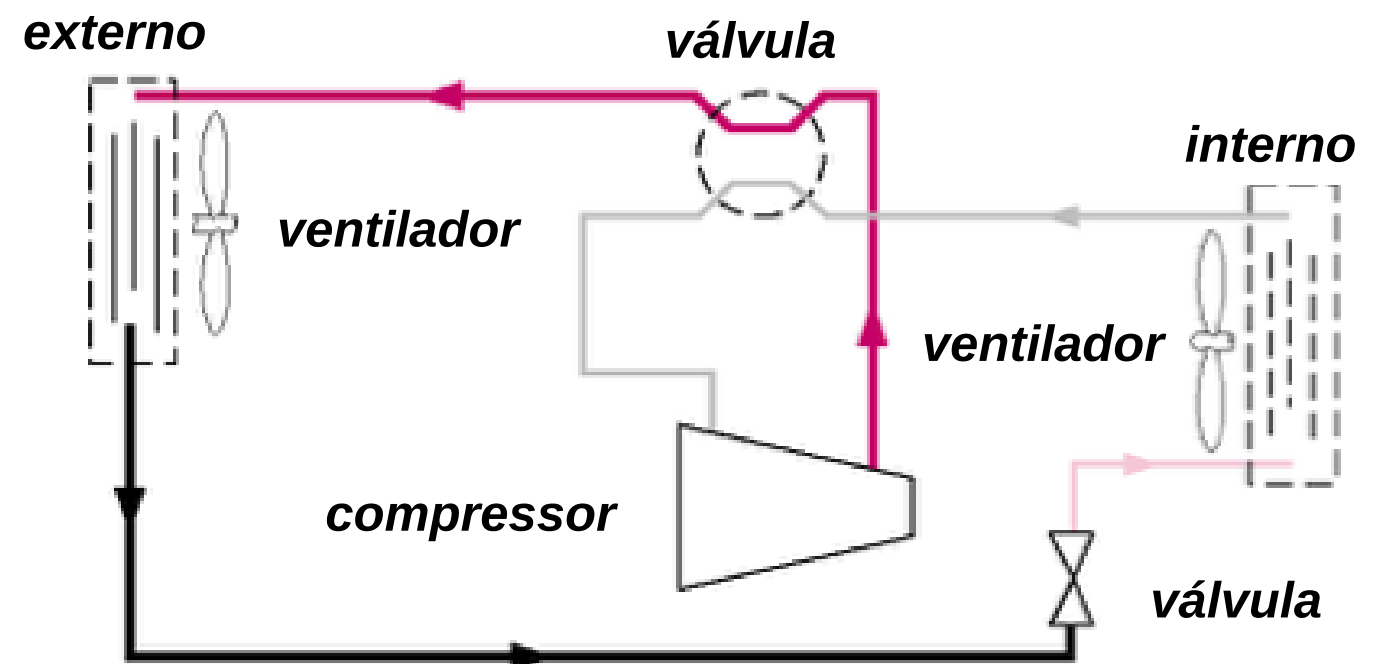
P constante

Aquecimento



- líquido a alta pressão
- líq.+vapor a baixa pressão
- vapor a baixa pressão
- vapor a alta pressão

Resfriamento



1) Considere um ciclo de refrigeração em cascata operando entre os limites de pressão de 0,8 e 0,14MPa. Cada estágio opera segundo um ciclo de refrigeração por compressão ideal com R134a como fluido de trabalho. A rejeição de calor do ciclo inferior ocorre em um trocador de calor contracorrente em que ambas as correntes entram a 0,32MPa (na prática o fluido do ciclo inferior entra no trocador de calor a uma pressão e temperatura maiores para uma efetiva transferência de calor). Se a vazão mássica no ciclo superior é de 0,05kg/s, determine (a) a vazão mássica no ciclo inferior, (b) a taxa de transferência de calor do espaço refrigerado e a potência fornecida aos compressores e (c) o coeficiente de desempenho do ciclo em cascata.

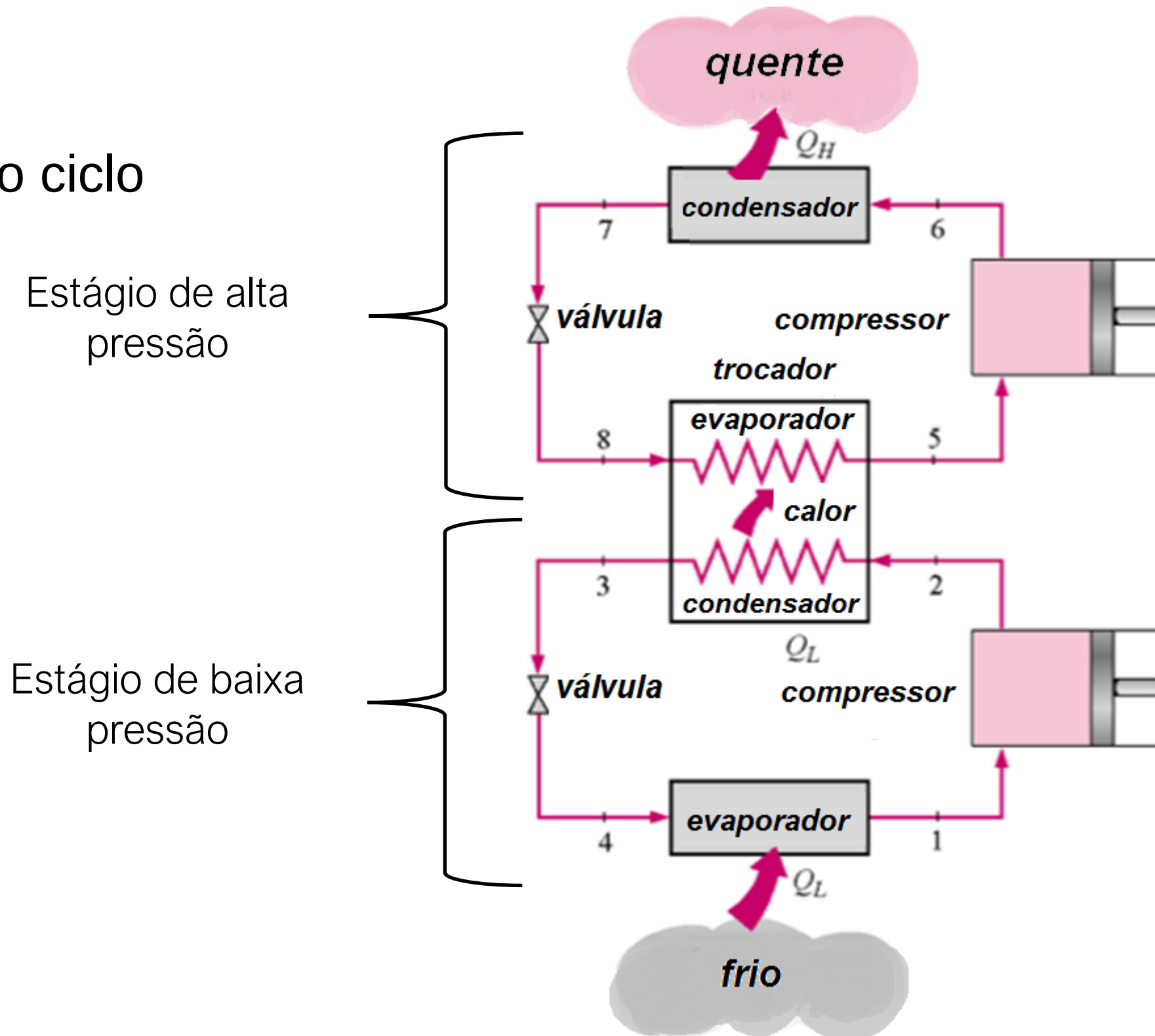
Solução

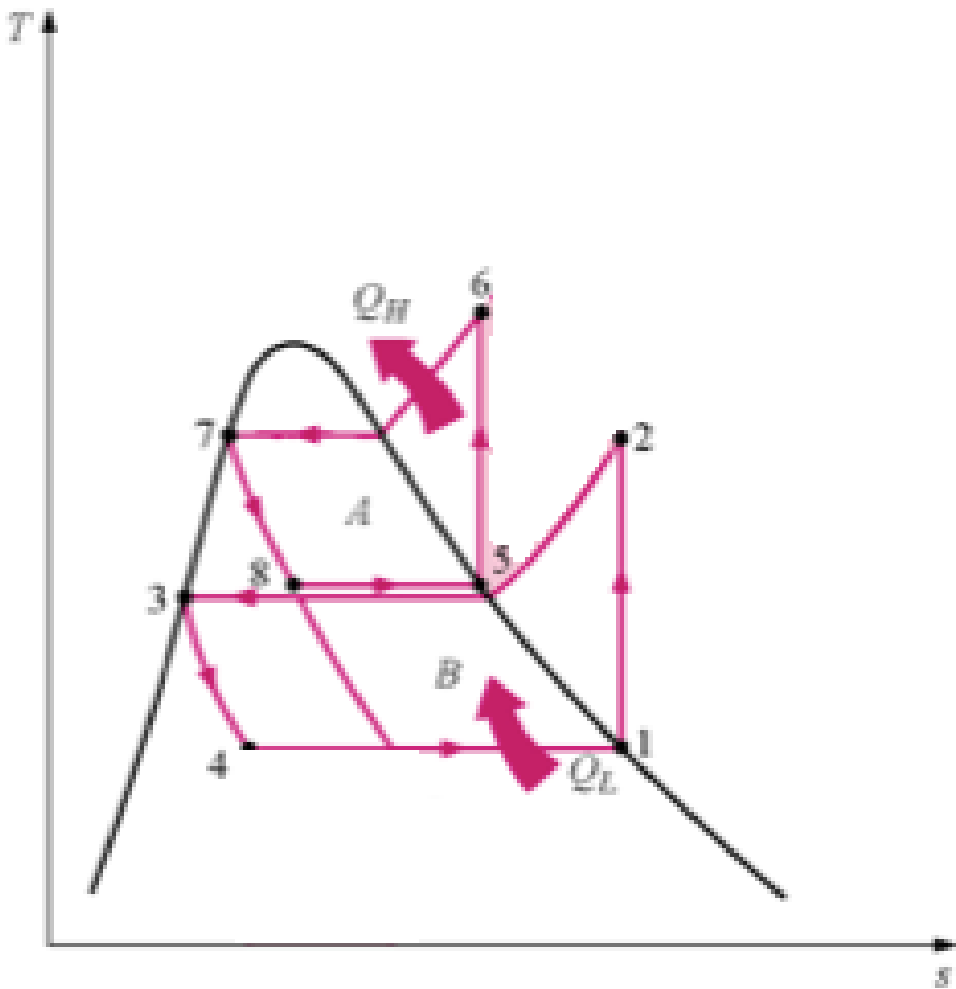
Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Trocador de calor adiabático (ambiente);
5. Válvulas de expansão isentálpica;
6. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

Solução

Esquema do ciclo

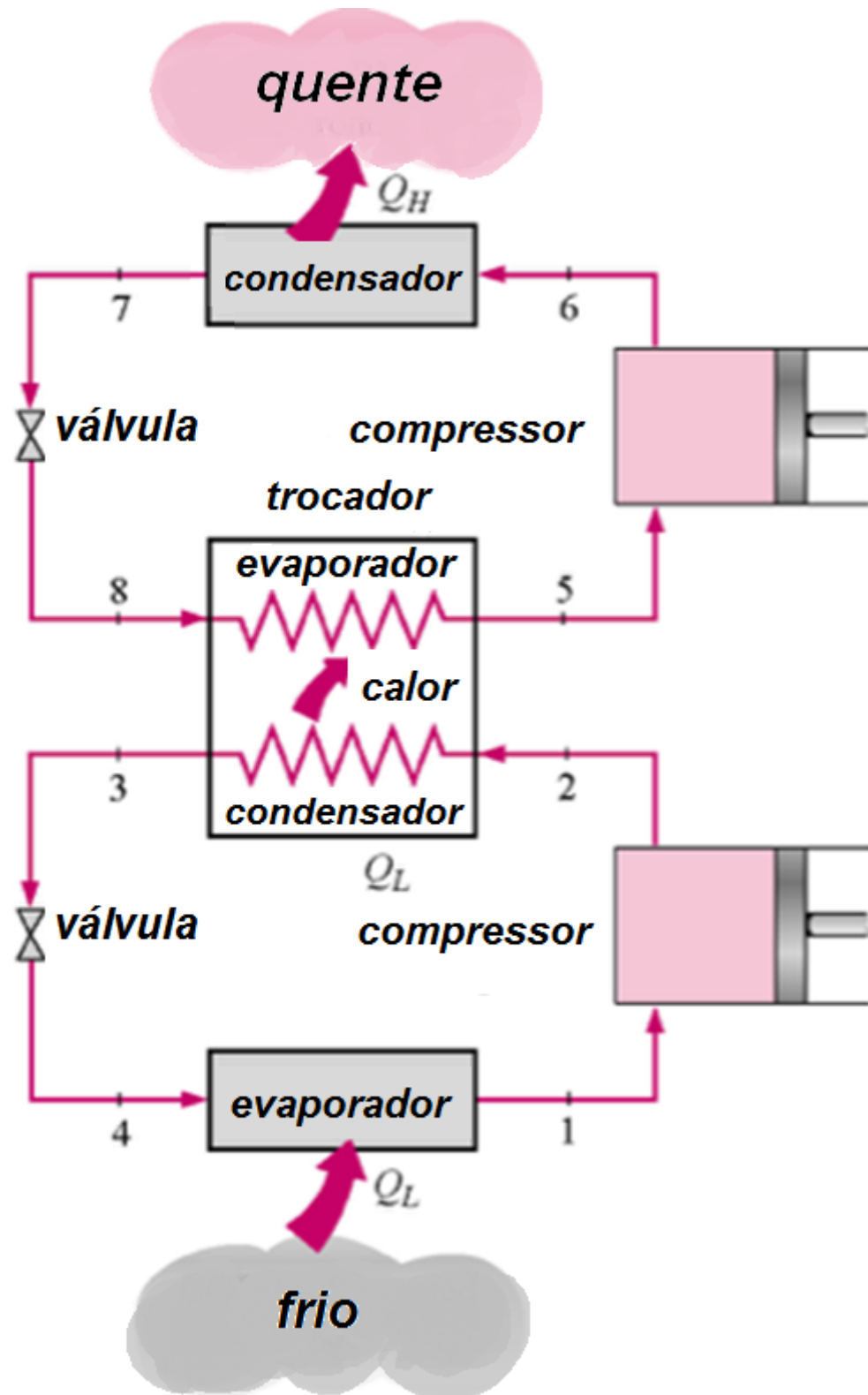




Estado	h / (kJ/kg)	s / (kJ/kgK)	x
1	239,16		
2	255,93		
3	55,16		
4	55,16		
5	251,88		
6	270,92		
7	95,47		
8	95,47		

Preencha os demais campos a título de exercício!

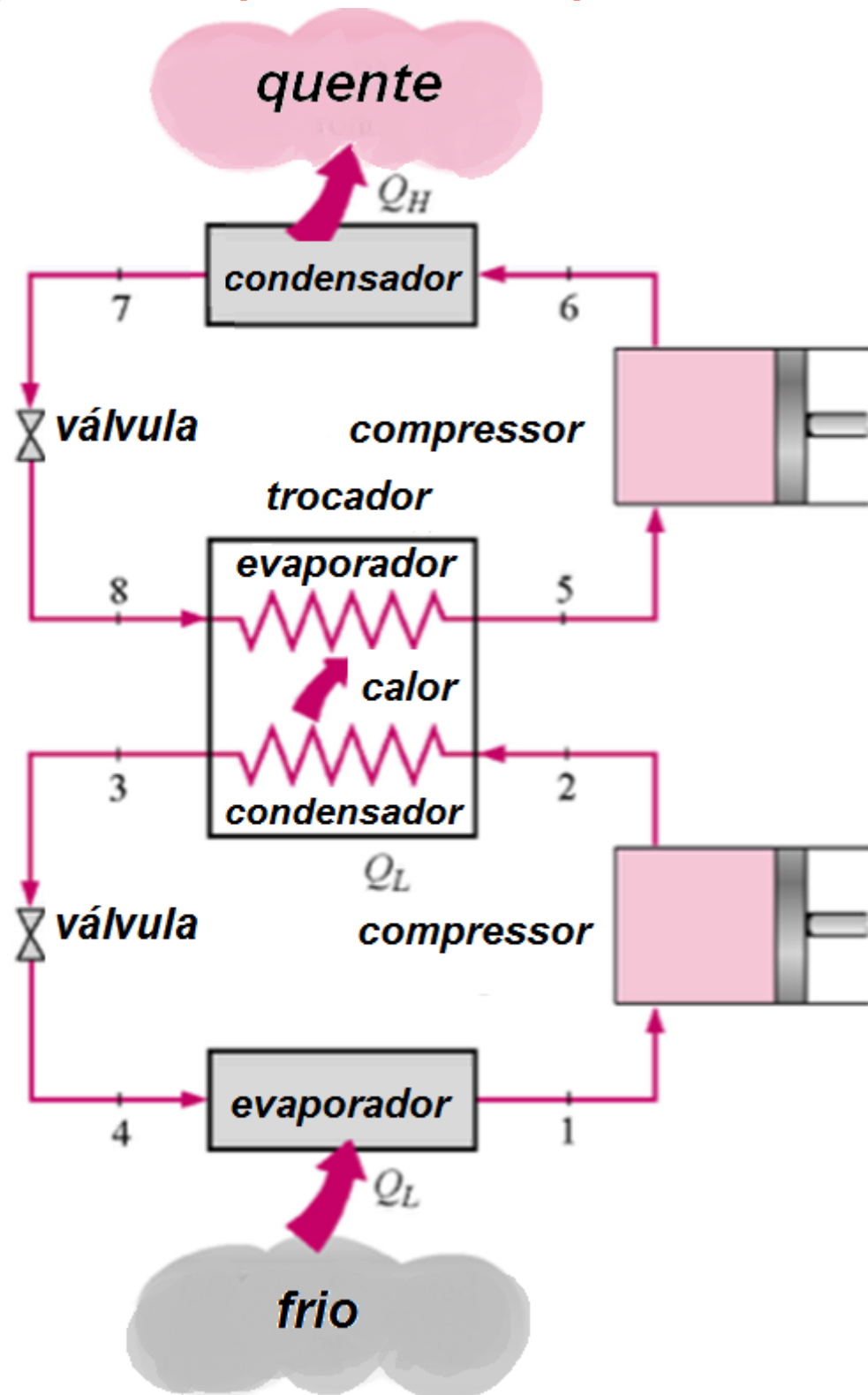
(a) 1ª Lei para o trocador de calor:



$$\dot{m}_A h_8 + \dot{m}_B h_2 = \dot{m}_A h_5 + \dot{m}_B h_3$$

$$\dot{m}_B = 0,039 \text{ kg/s}$$

(b) 1ª Lei para o evaporador B e para os compressores:



$$\dot{Q}_L = \dot{m}_B (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = 7,18 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_C &= \dot{W}_{C,A} + \dot{W}_{C,B} = \\ &= \dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1) \end{aligned}$$

$$\dot{W}_C = -1,61 \text{ kW}$$



(c) Coeficiente de desempenho

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{|\dot{W}_c|} = 4,46$$

Considerando um único ciclo (sem a cascata) o coeficiente de desempenho seria de 3,97!



2) Considere um ciclo de refrigeração com remoção de gás de “flashing” operando entre os limites de pressão de 0,8 e 0,14MPa. O fluido refrigerante R134a deixa o condensador como líquido saturado, passa pela válvula e entra no tanque a 0,32MPa. Parte evapora durante o processo e esse vapor é misturado com o refrigerante que deixa o compressor de baixa pressão. A mistura é comprimida no compressor de alta. O líquido da câmara passa por uma válvula e entra no evaporador, deixando-o como vapor saturado. Determine (a) a fração de refrigerante que evapora na câmara (b) o calor removido do espaço refrigerado e o trabalho fornecido aos compressores por unidade de massa e (c) o coeficiente de desempenho do ciclo.



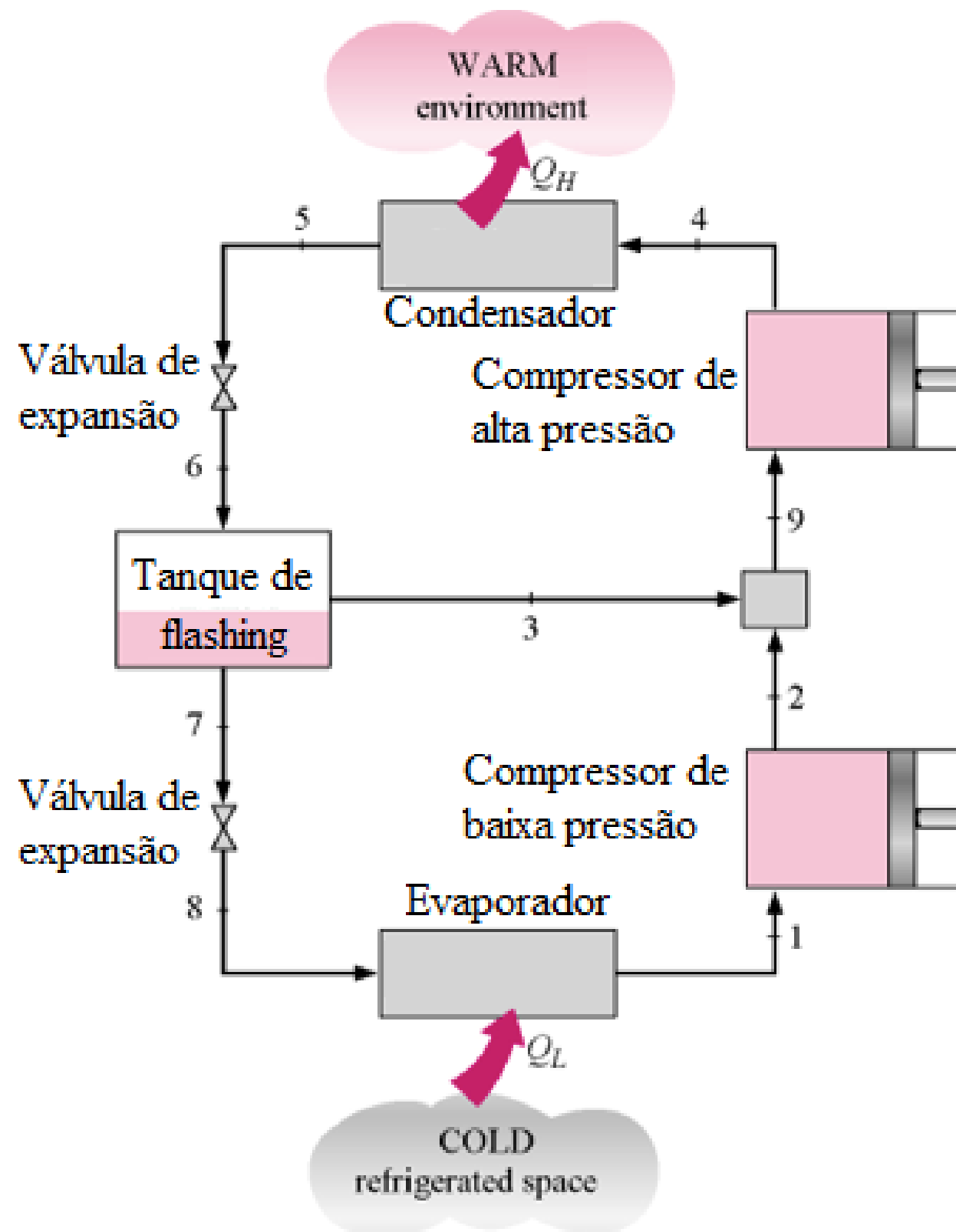
Solução

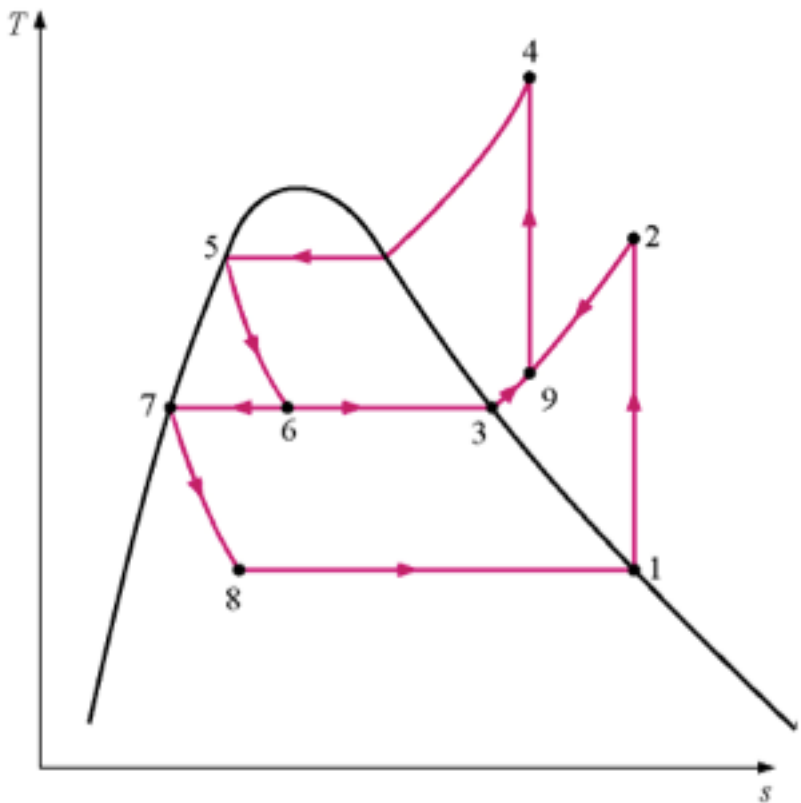
Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Câmara adiabática;
5. Válvulas de expansão isentálpica;
6. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

Solução

Esquema do ciclo

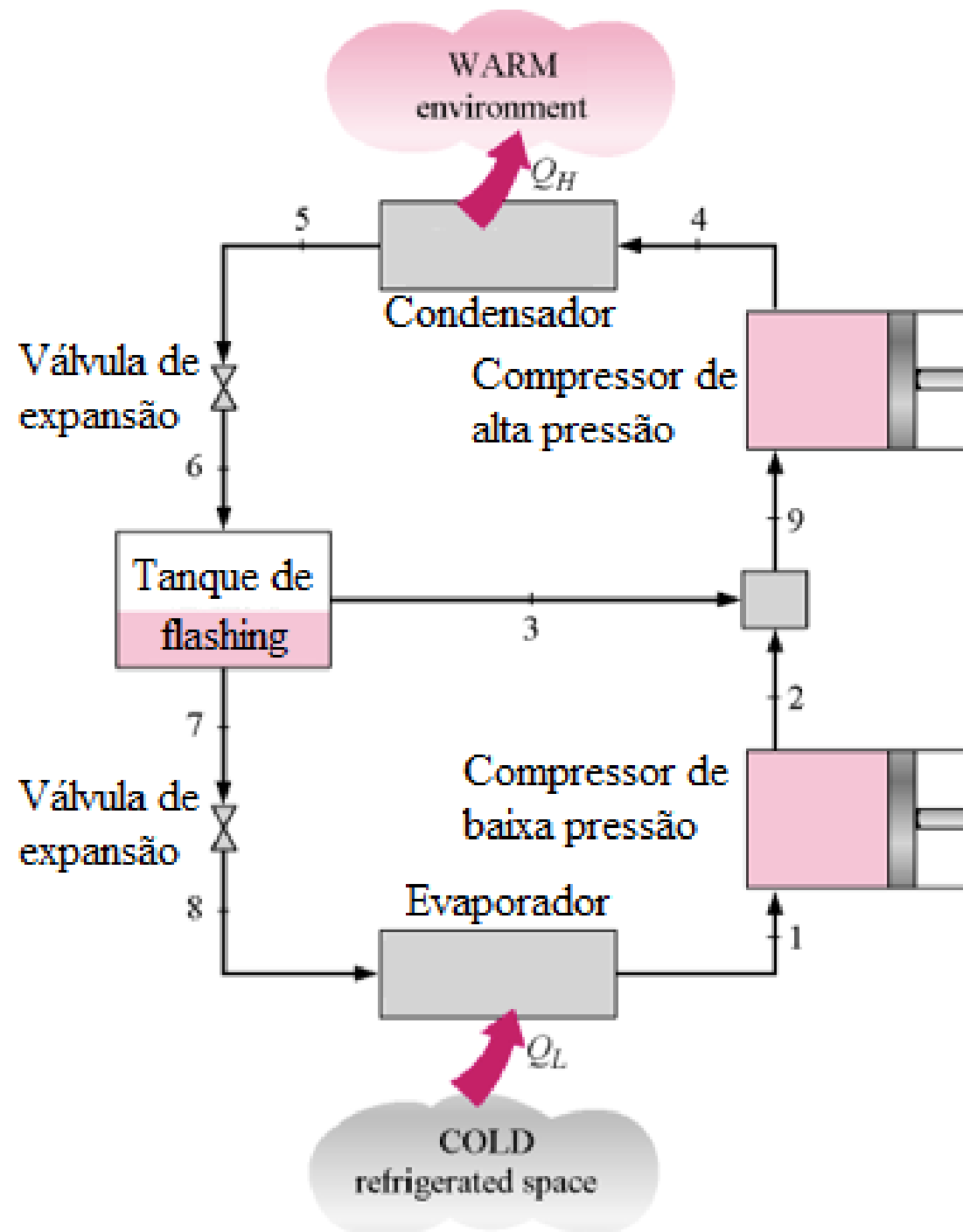




Estado	h / (kJ/kg)	s / (kJ/kgK)	x
1	239,16		
2	255,93		
3	251,88		
4	274,48		
5	95,47		
6	95,47		
7	55,16		
8	55,16		
9	255,1		

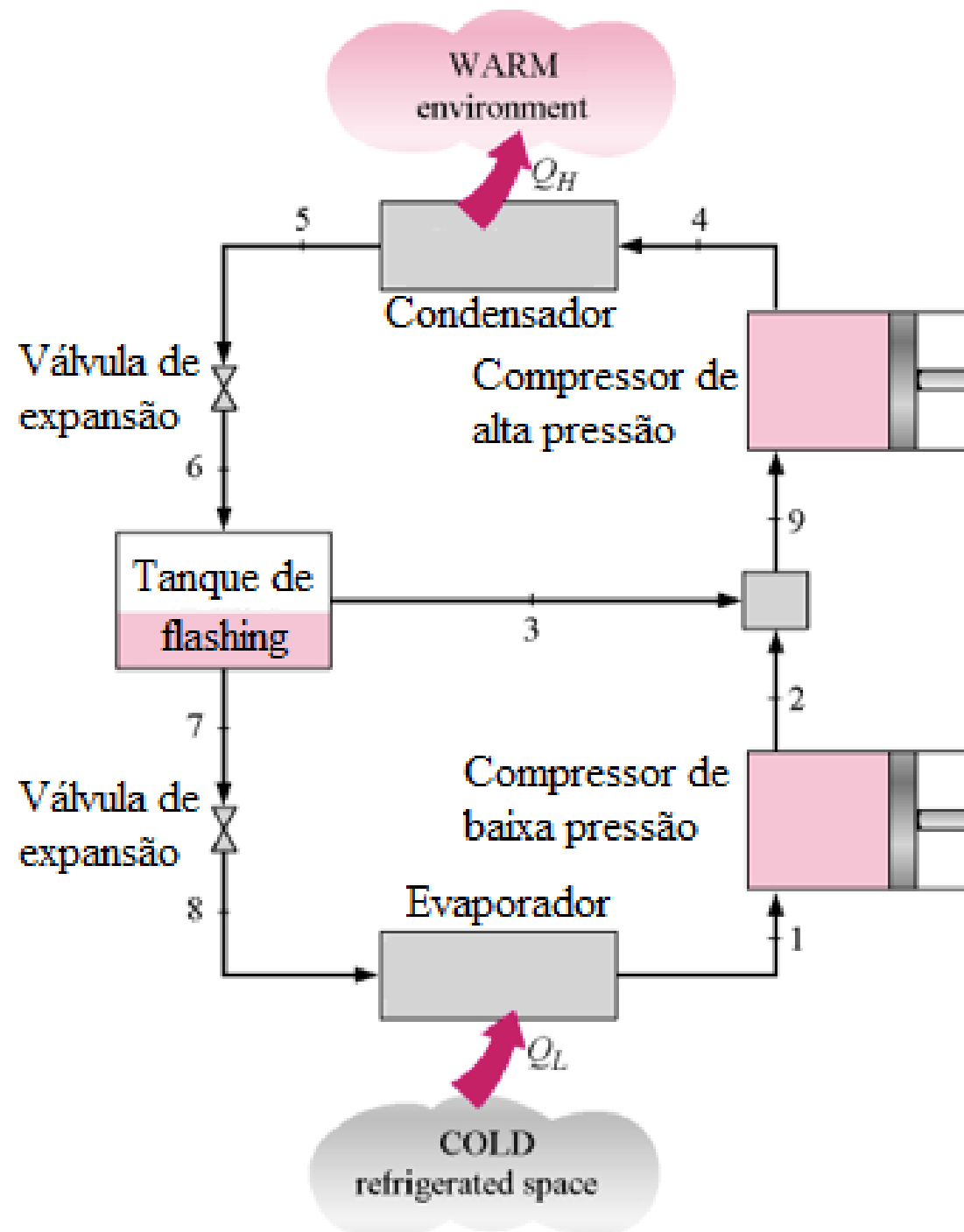
Preencha os demais campos a título de exercício!

(a) A fração é igual ao título na câmara, determinado a partir de h_6



$$x_6 = 0,2049$$

(b) Determinados pela aplicação da 1ª Lei



$$q_L = (1 - x_6) \cdot (h_1 - h_8)$$

$$q_L = 146,3 \text{ kJ/kg}$$

$$w_c = (1 - x_6) \cdot (h_1 - h_2) + (h_9 - h_4)$$

$$\text{com } h_9 = (1 - x_6) h_2 + x_6 h_3$$

$$w_c = -32,7 \text{ kJ/kg}$$



(c) Coeficiente de desempenho

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{|\dot{W}_c|} = 4,47$$

Como no exercício anterior, um ciclo sem a remoção do gás de “flashing” teria um coeficiente de desempenho de 3,97.

Compare também com o valor do ciclo em cascata do exercício anterior: 4,46!