

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



PME 3344

Termodinâmica Aplicada

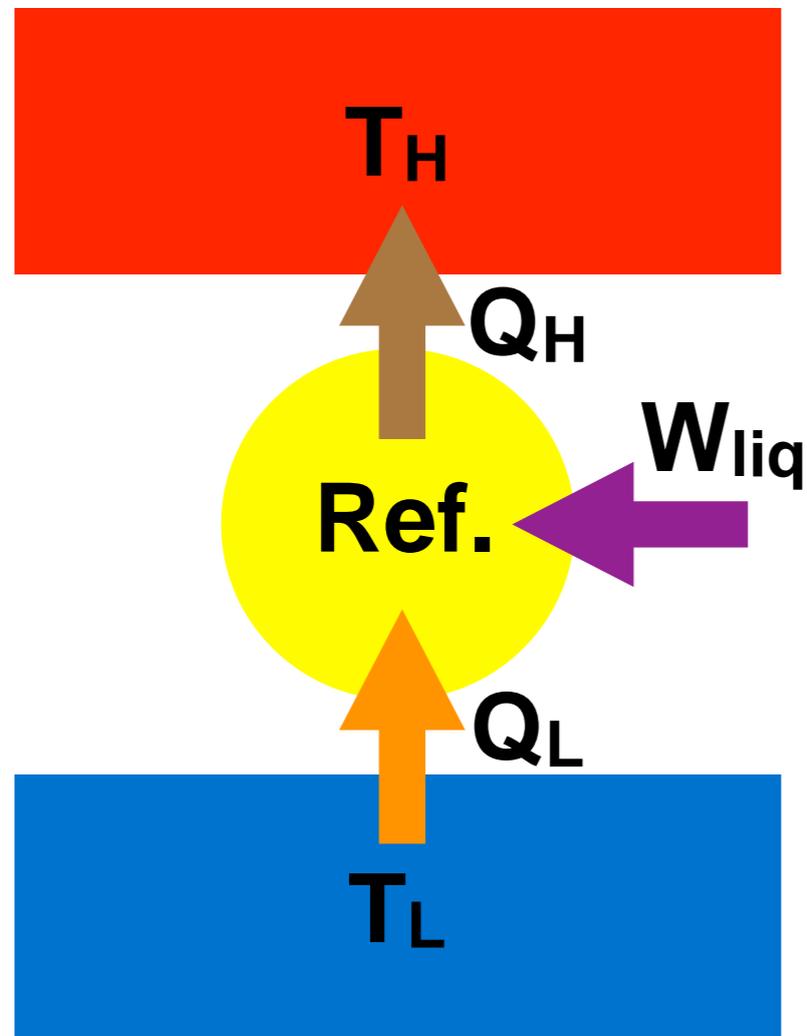
12) Ciclos de Refrigeração



- ✱ 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.

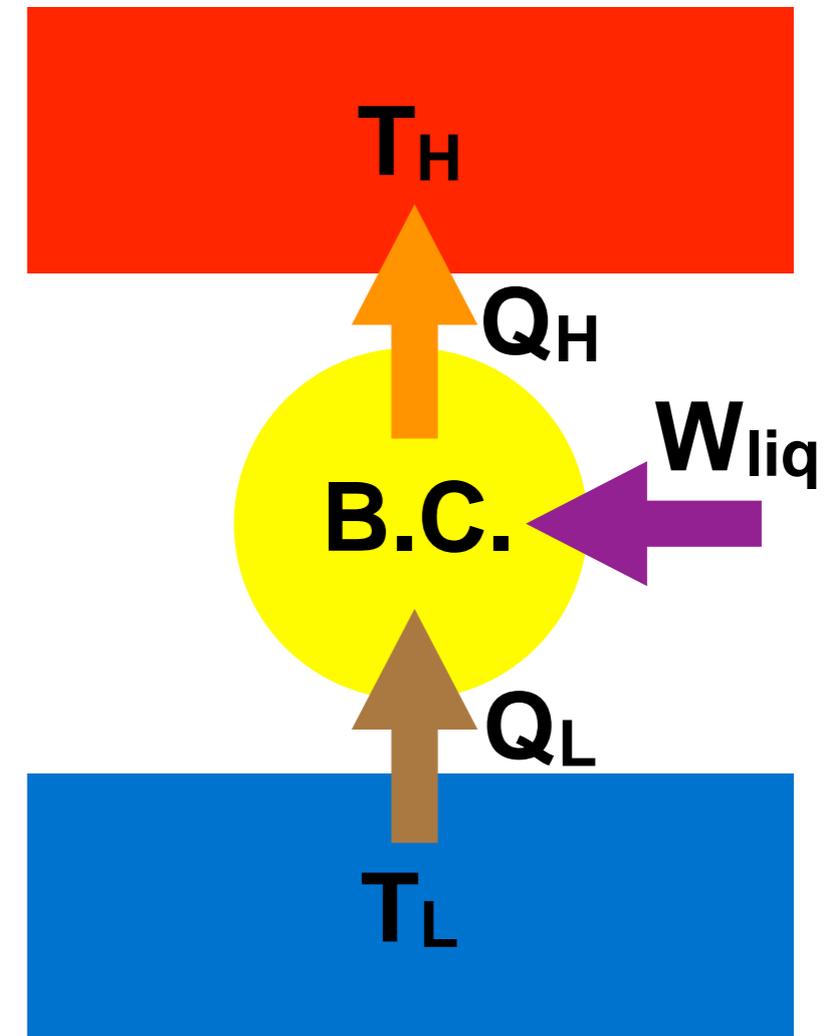


Refrigerador:



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):

$$\beta = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

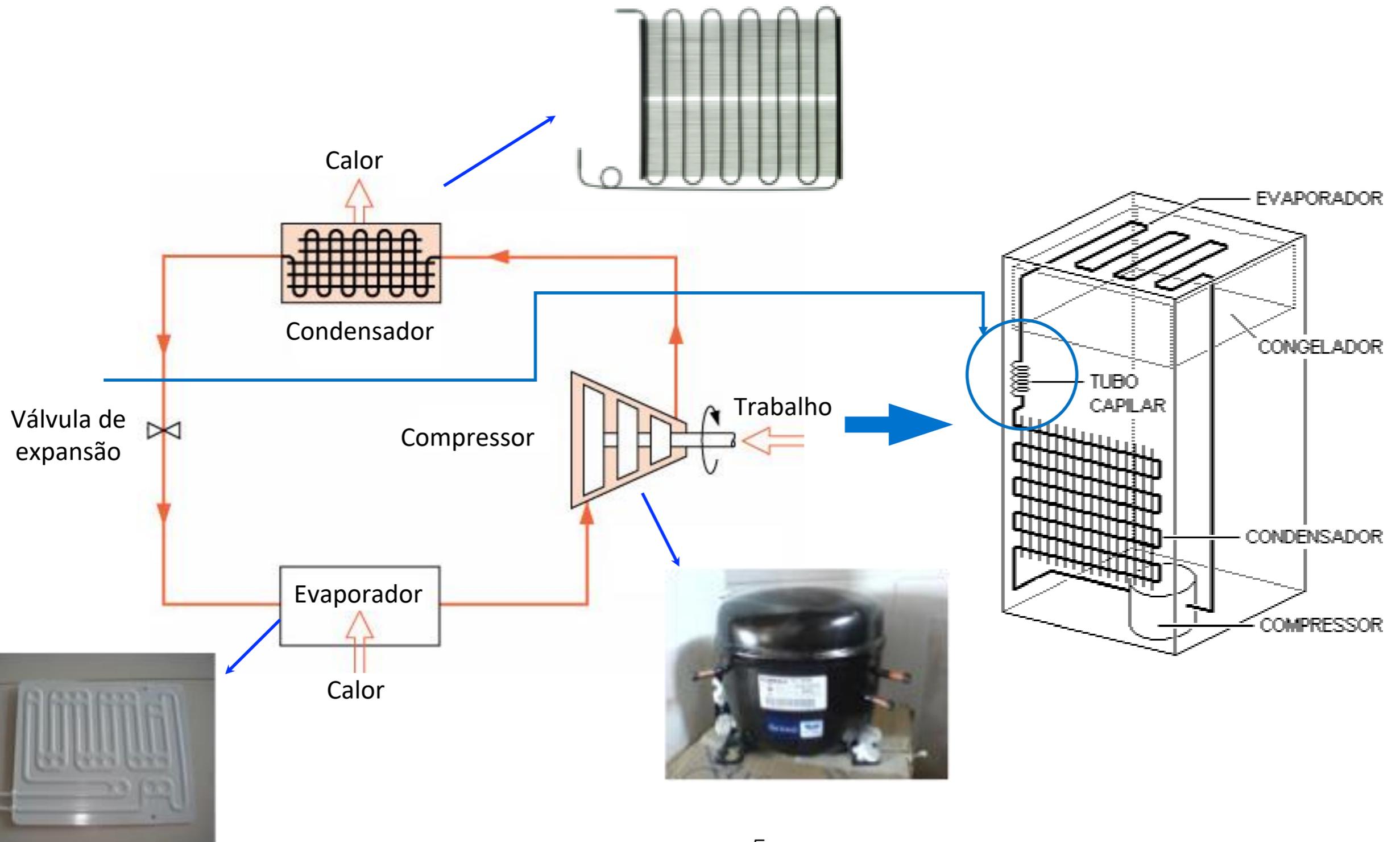
Bomba de calor ideal (Carnot):

$$\beta' = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Ciclo de refrigeração por compressão



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).

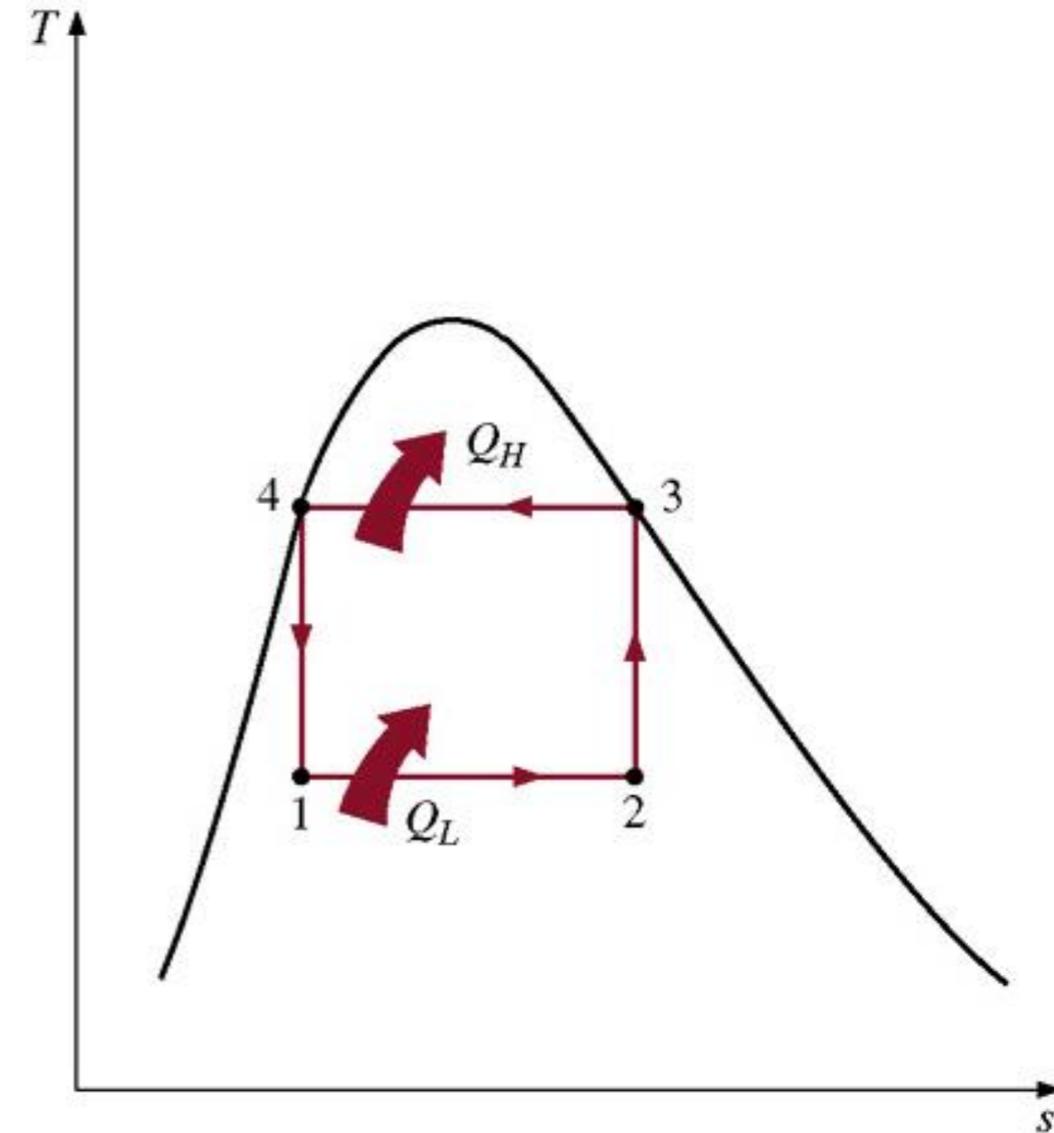
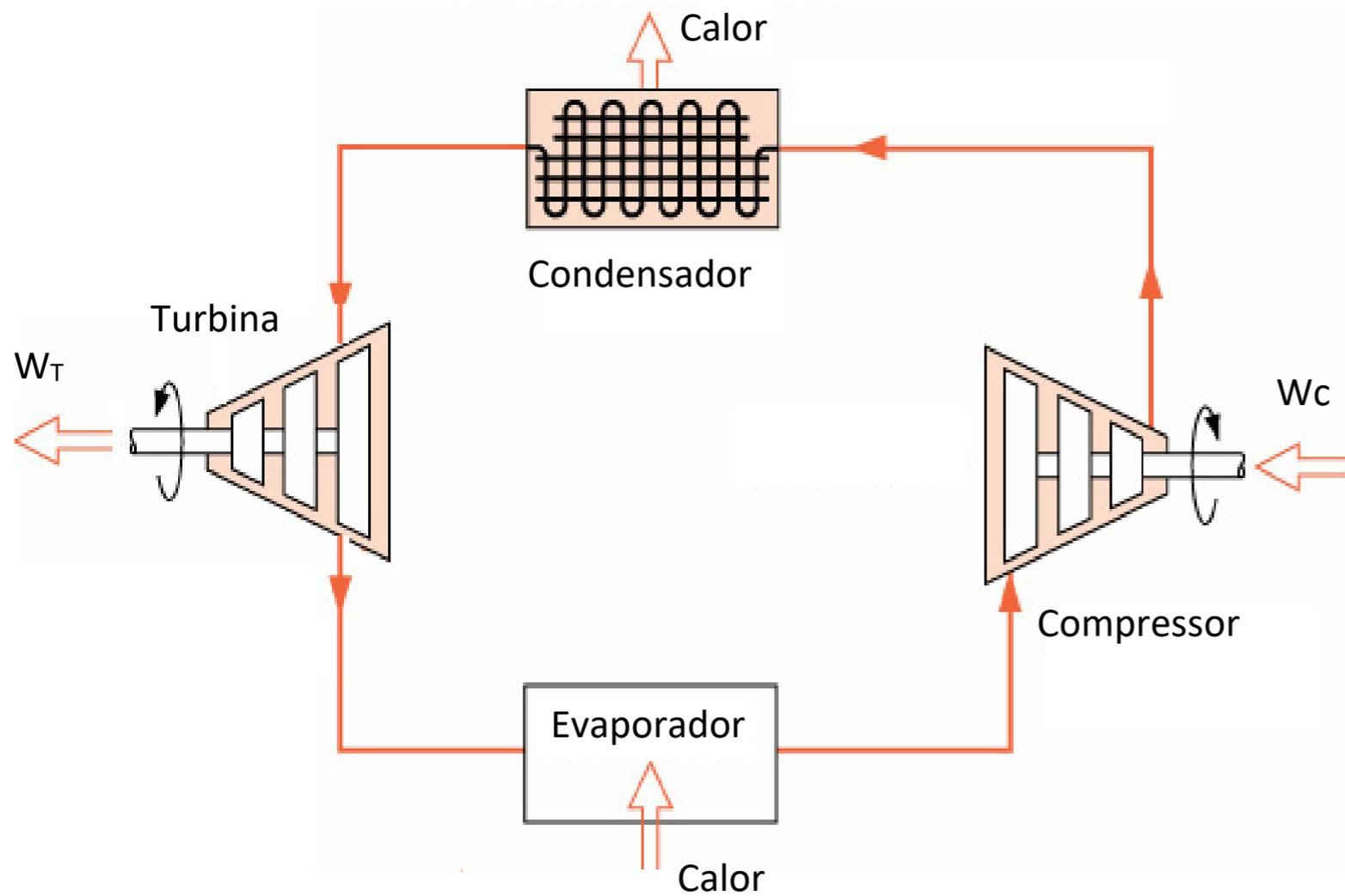


Vida
média

Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor: Carnot



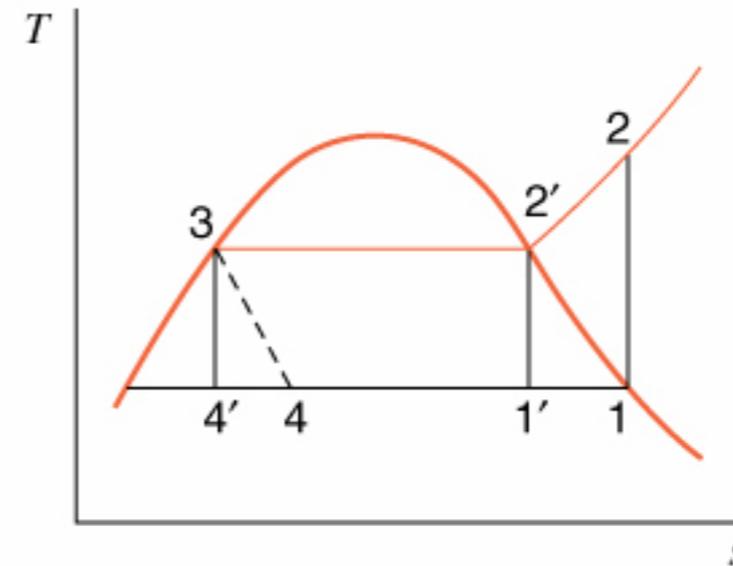
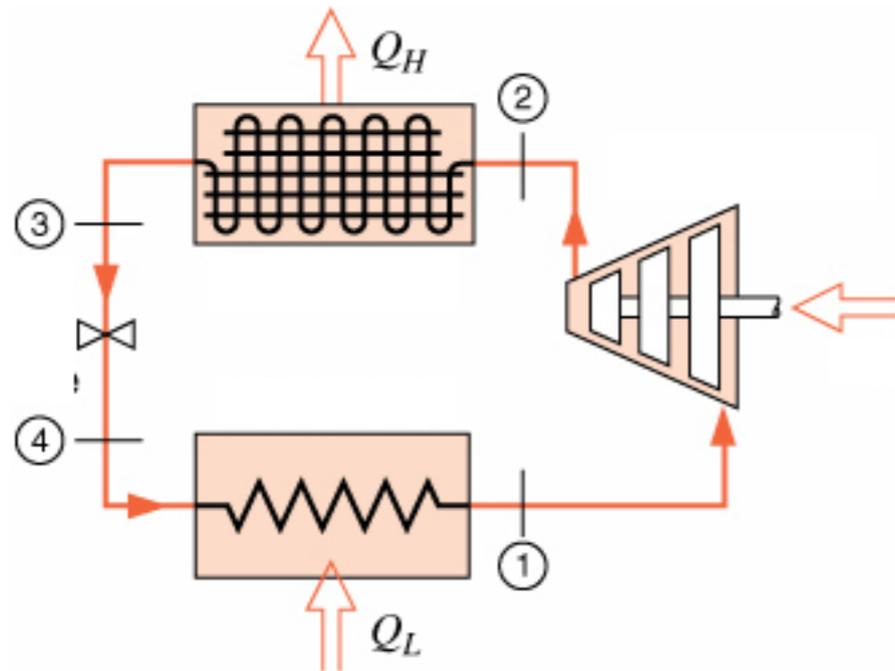
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



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 (H₂O)

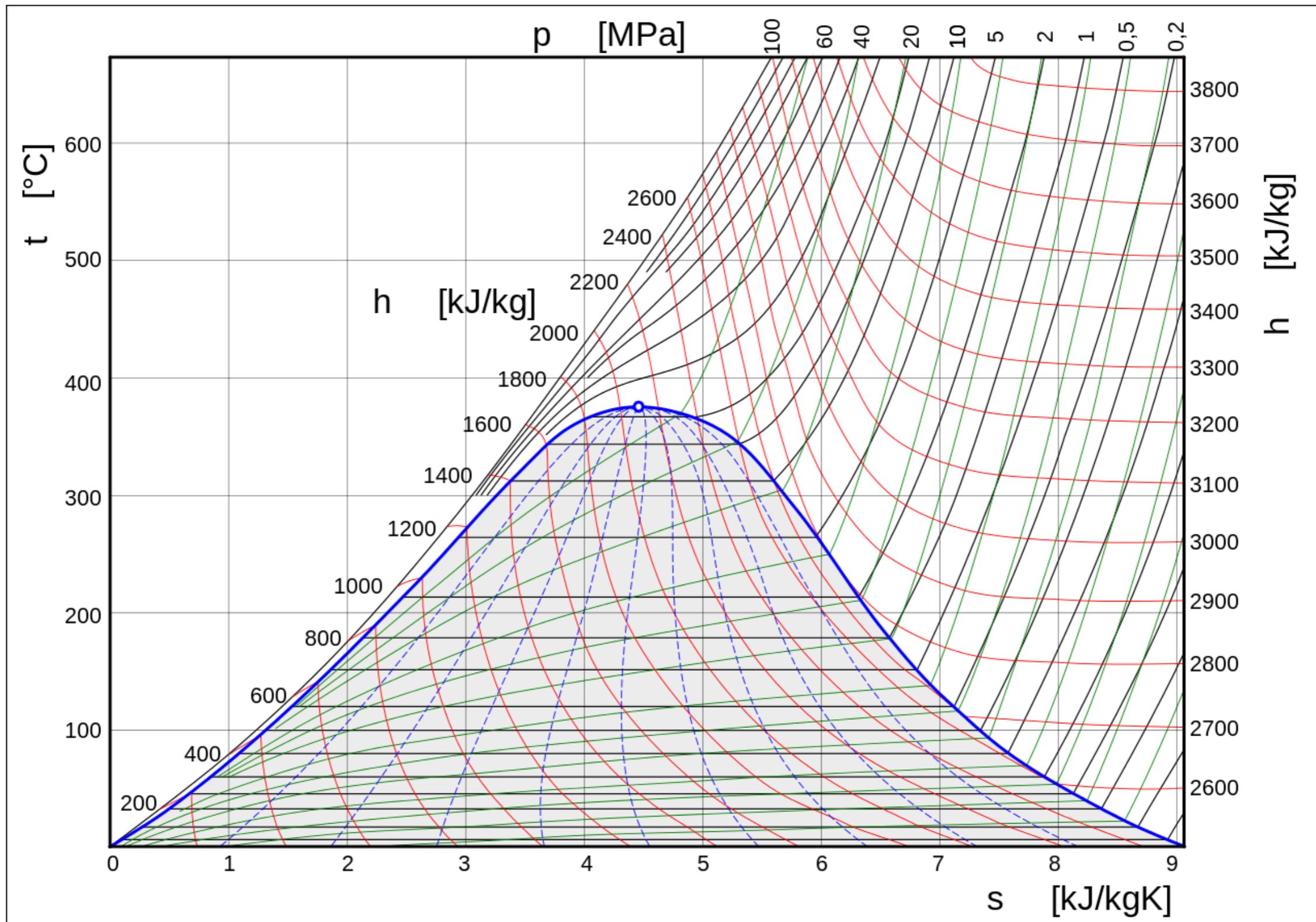
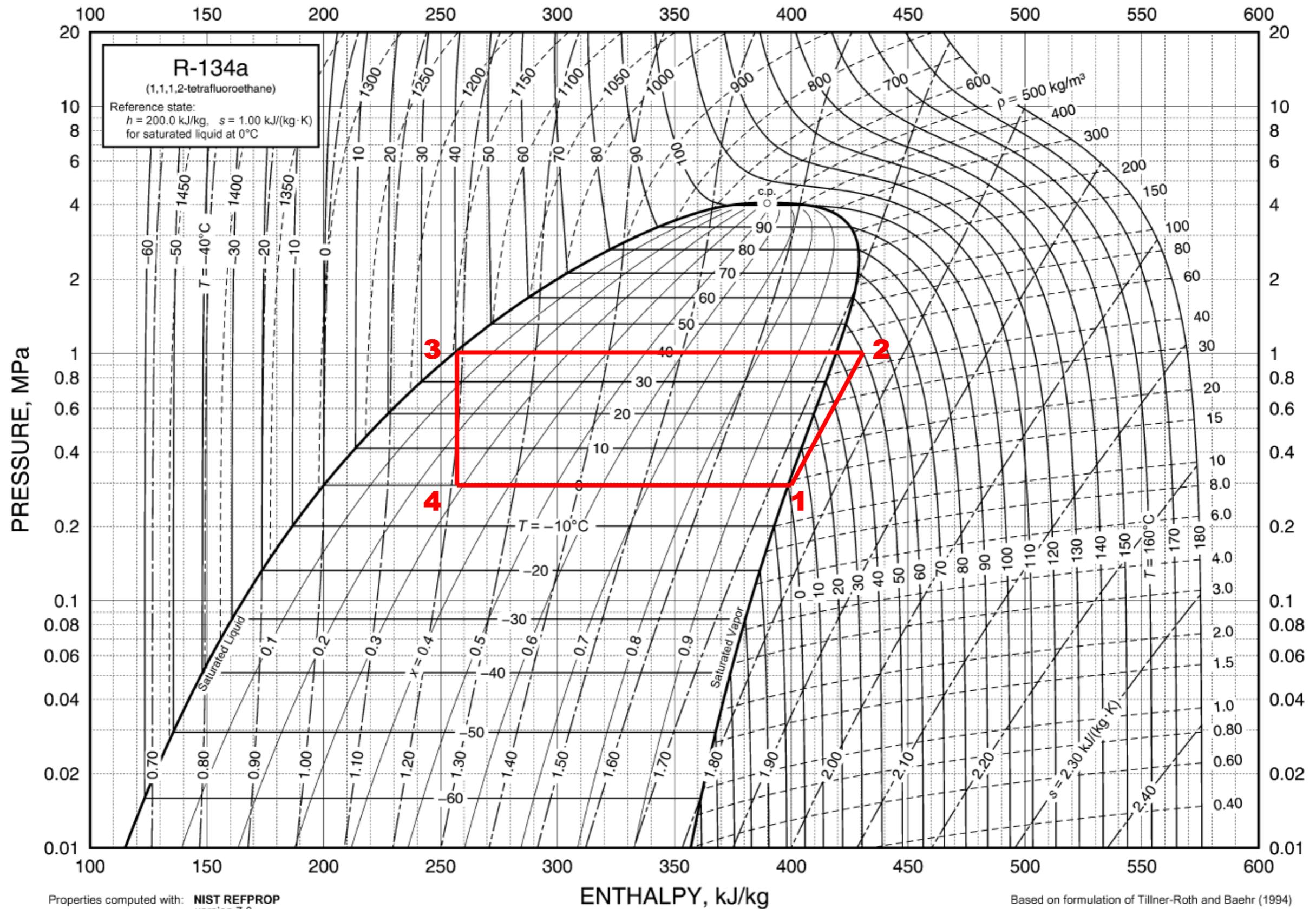
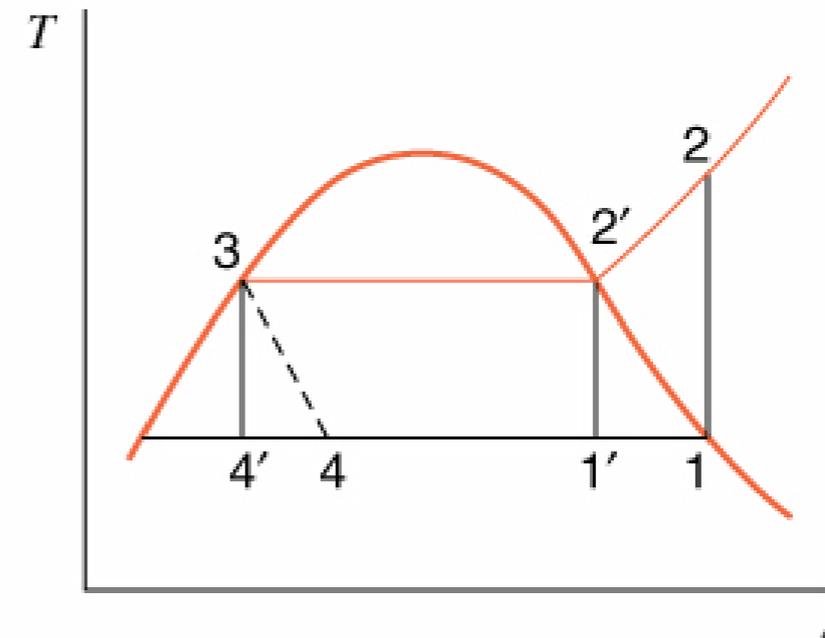
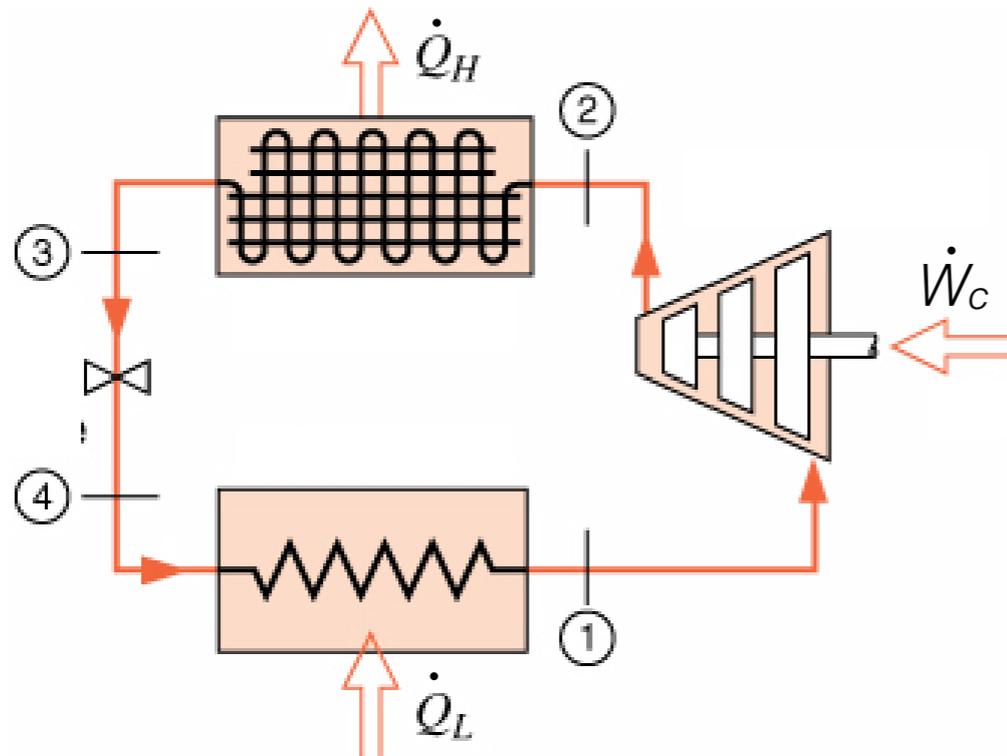


Diagrama P-h: Mollier





Análise do ciclo



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:

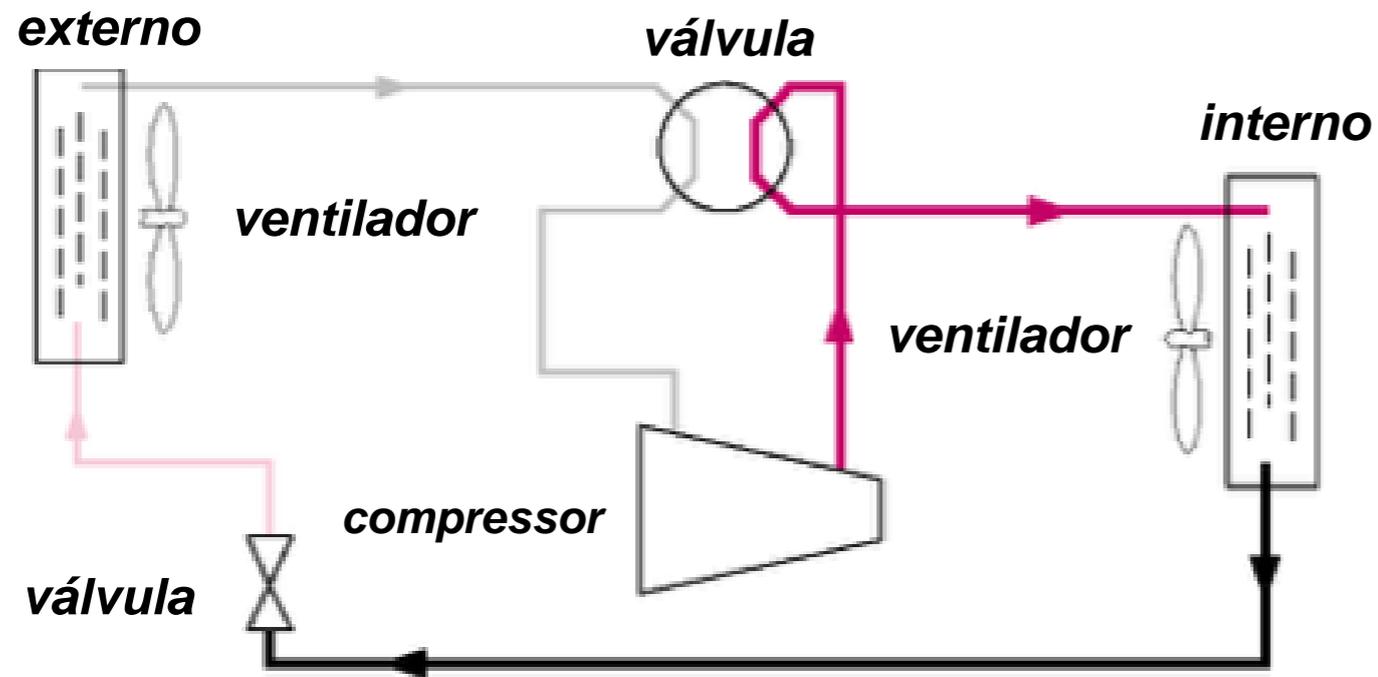
$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

P constante

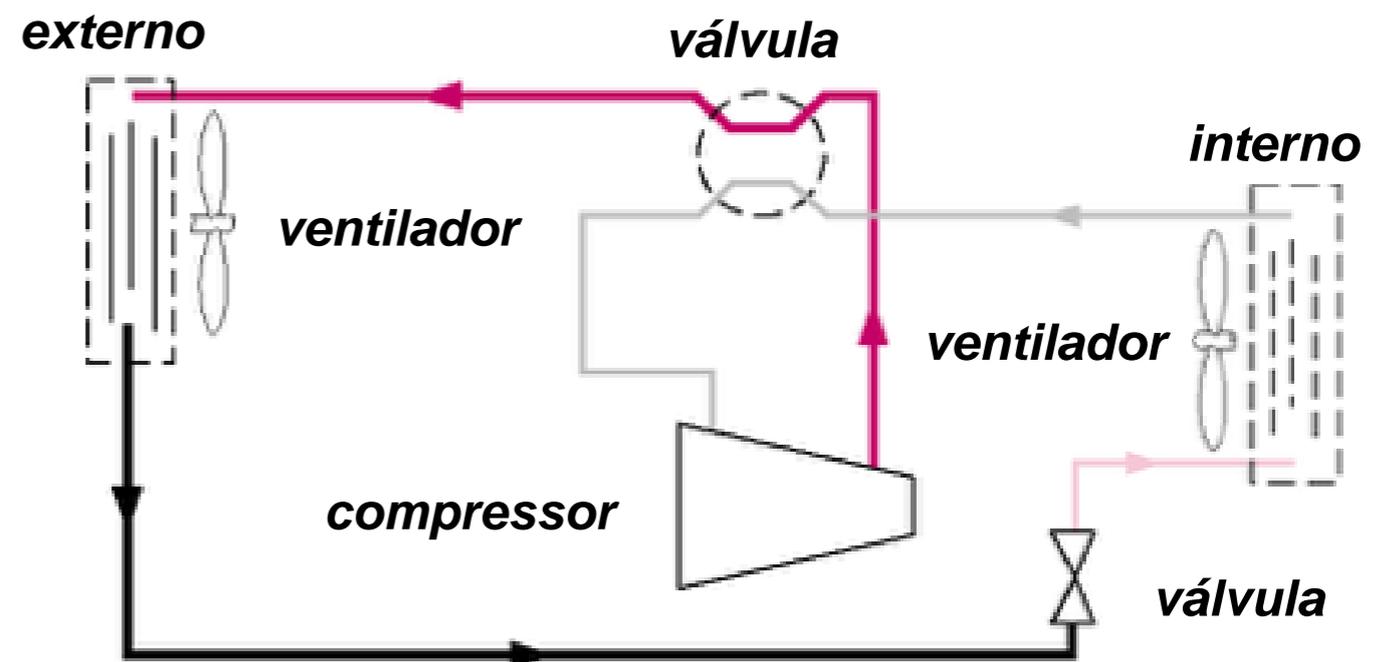


Bomba de calor

Aquecimento



Resfriamento



- líquido a alta pressão** (black line)
- líq.+vapor a baixa pressão** (gray line)
- vapor a baixa pressão** (pink line)
- vapor a alta pressão** (magenta line)



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.



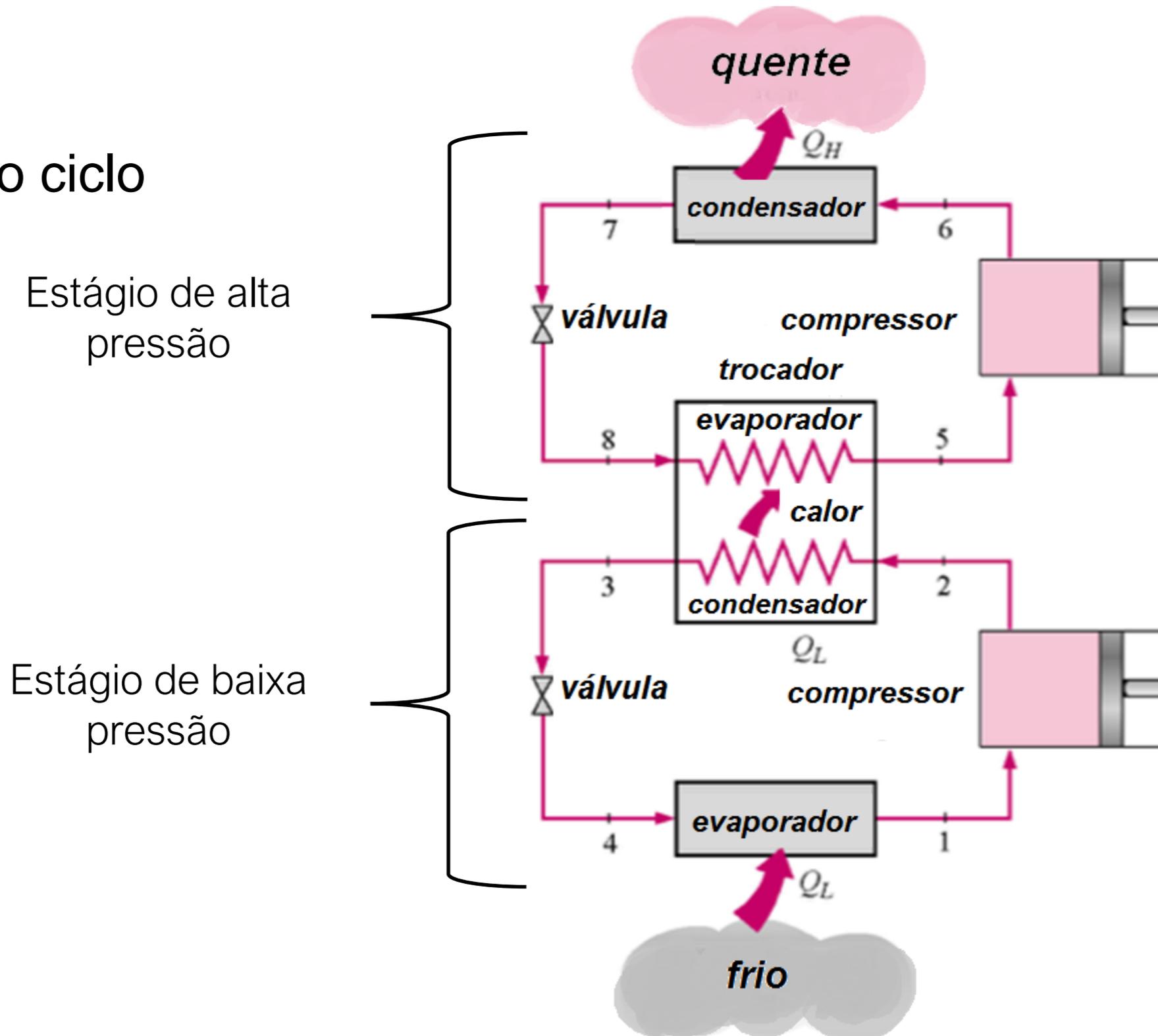
Solução

Hipóteses:

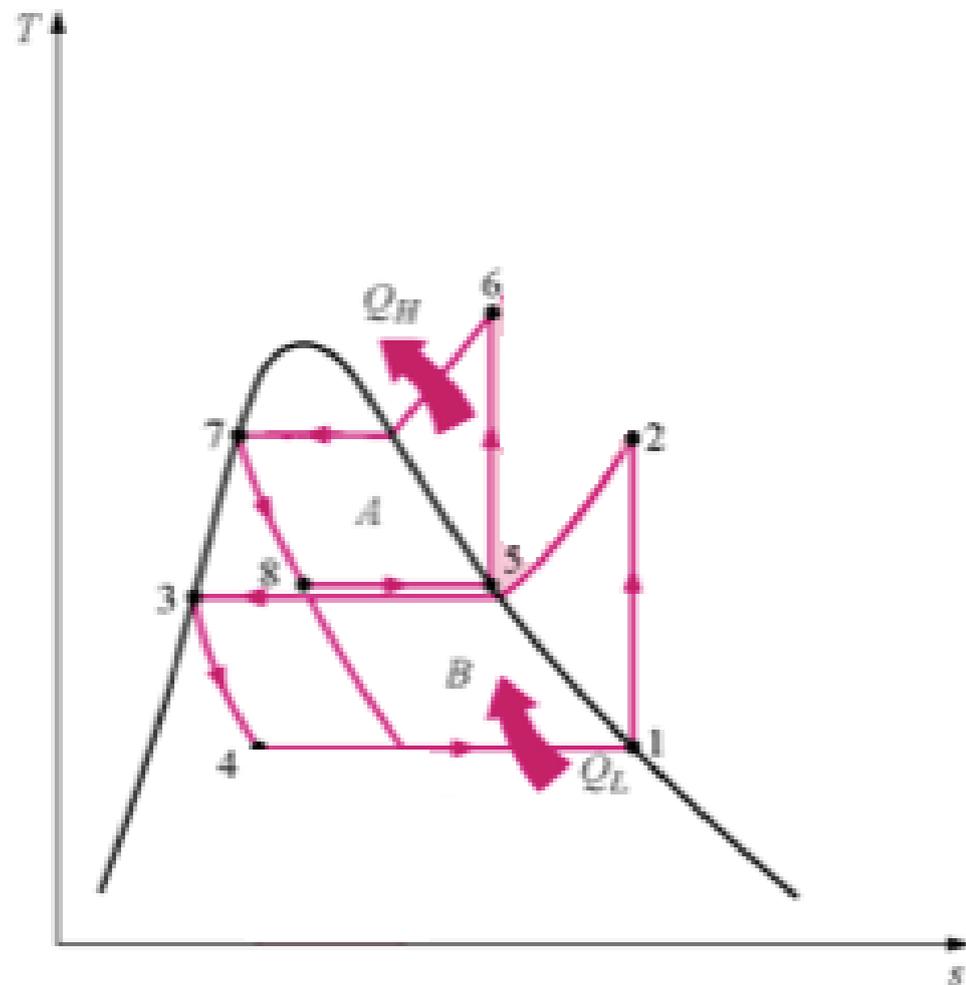
1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Trocador de calor adiabático (ambiente);
5. Válvulas de expansão isentálpica;
6. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

Solução

Esquema do ciclo



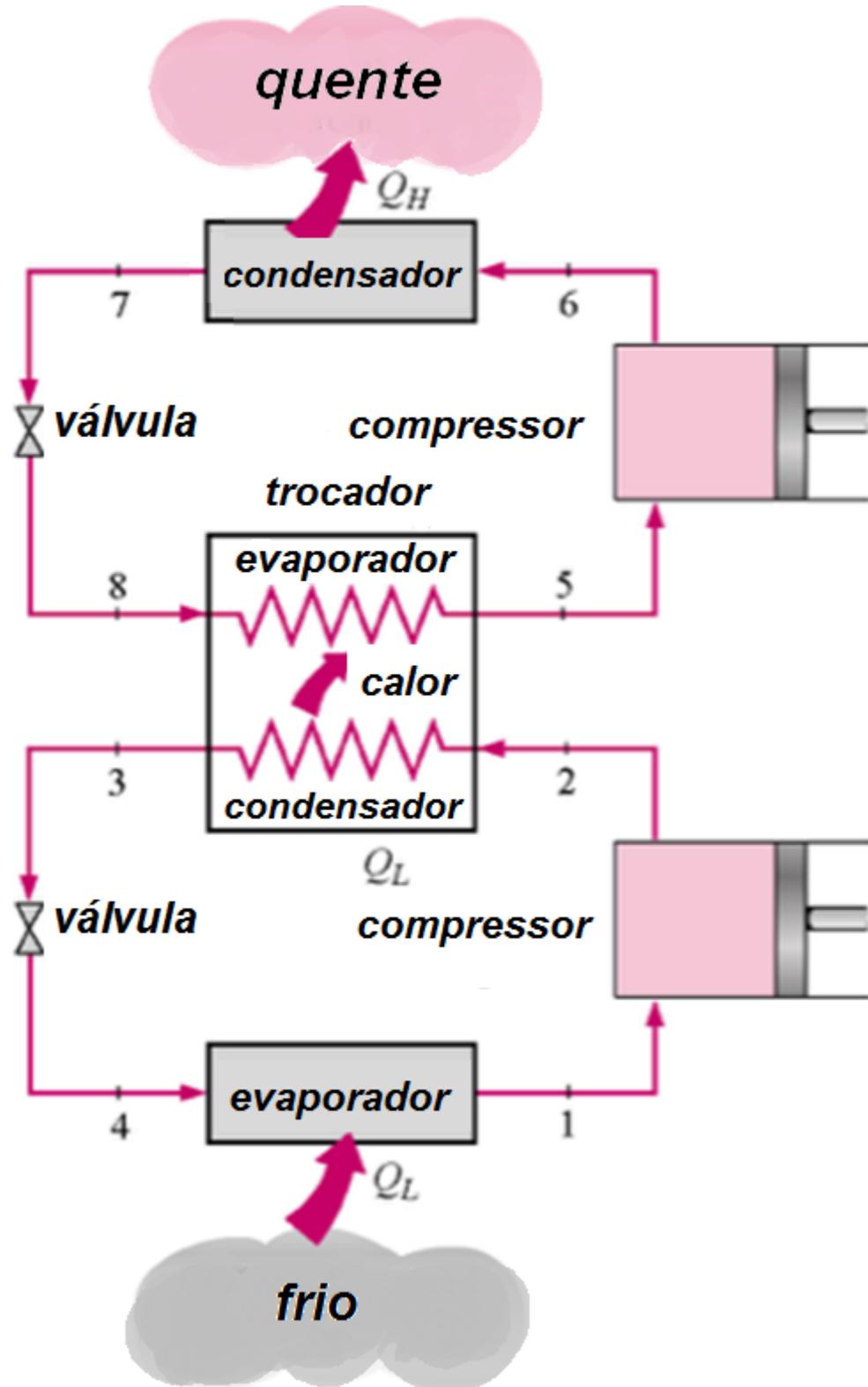
Exercícios



Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	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!

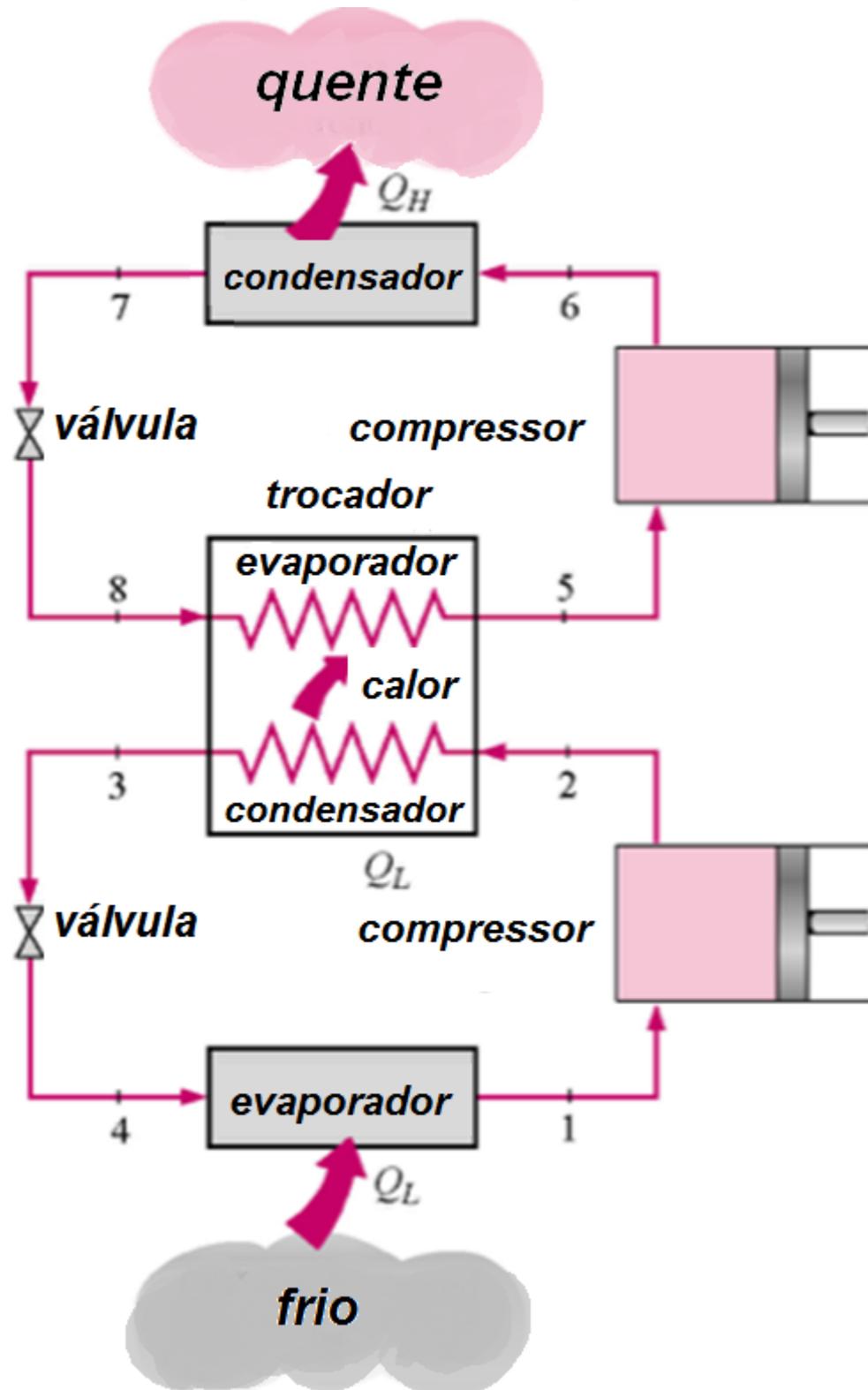
(a) 1ª Lei para o trocador de calor:



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

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

(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.



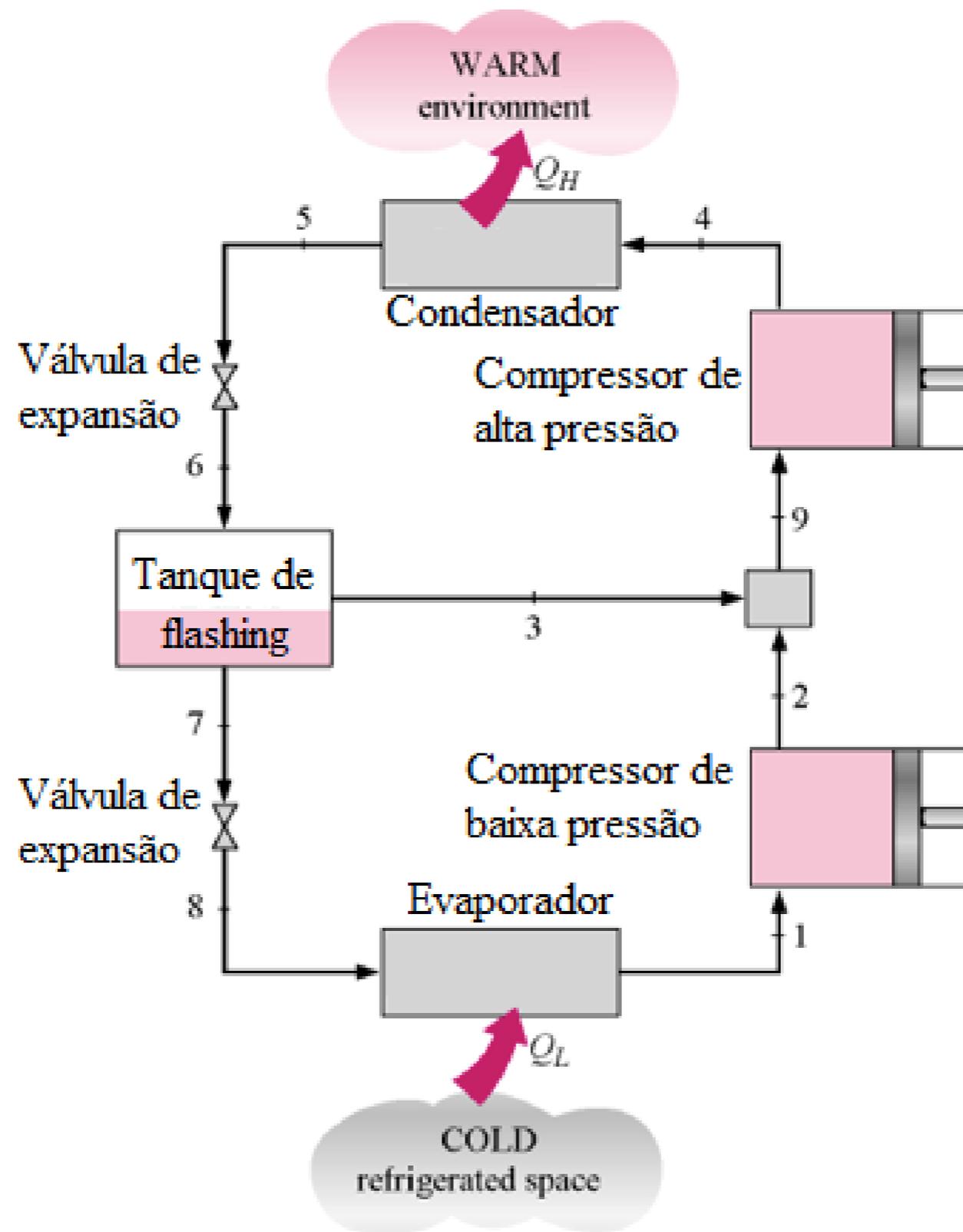
Solução

Hipóteses:

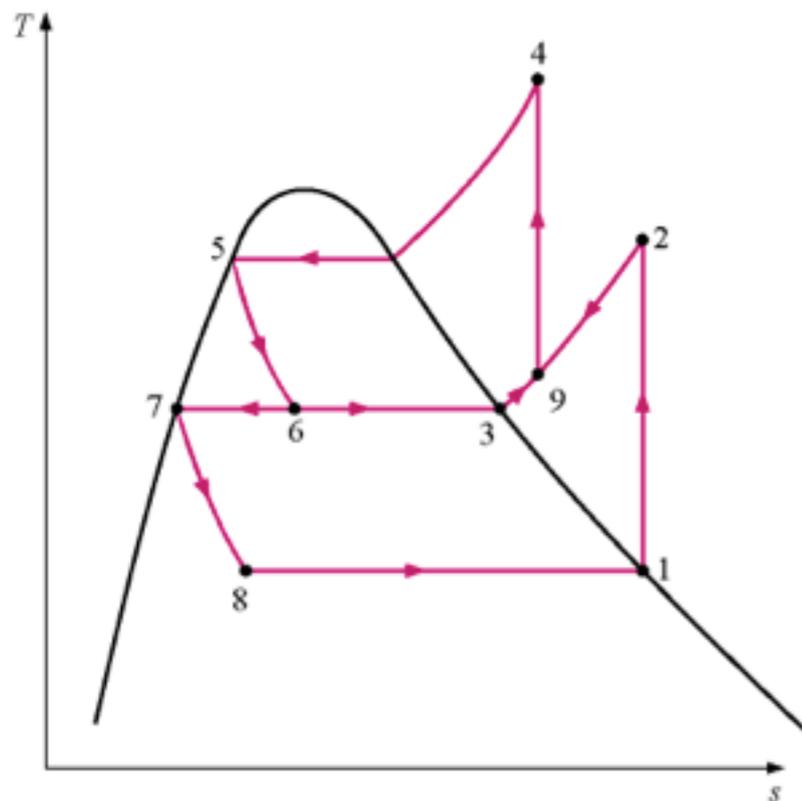
1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Câmara adiabática;
5. Válvulas de expansão isentálpica;
6. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

Solução

Esquema do ciclo



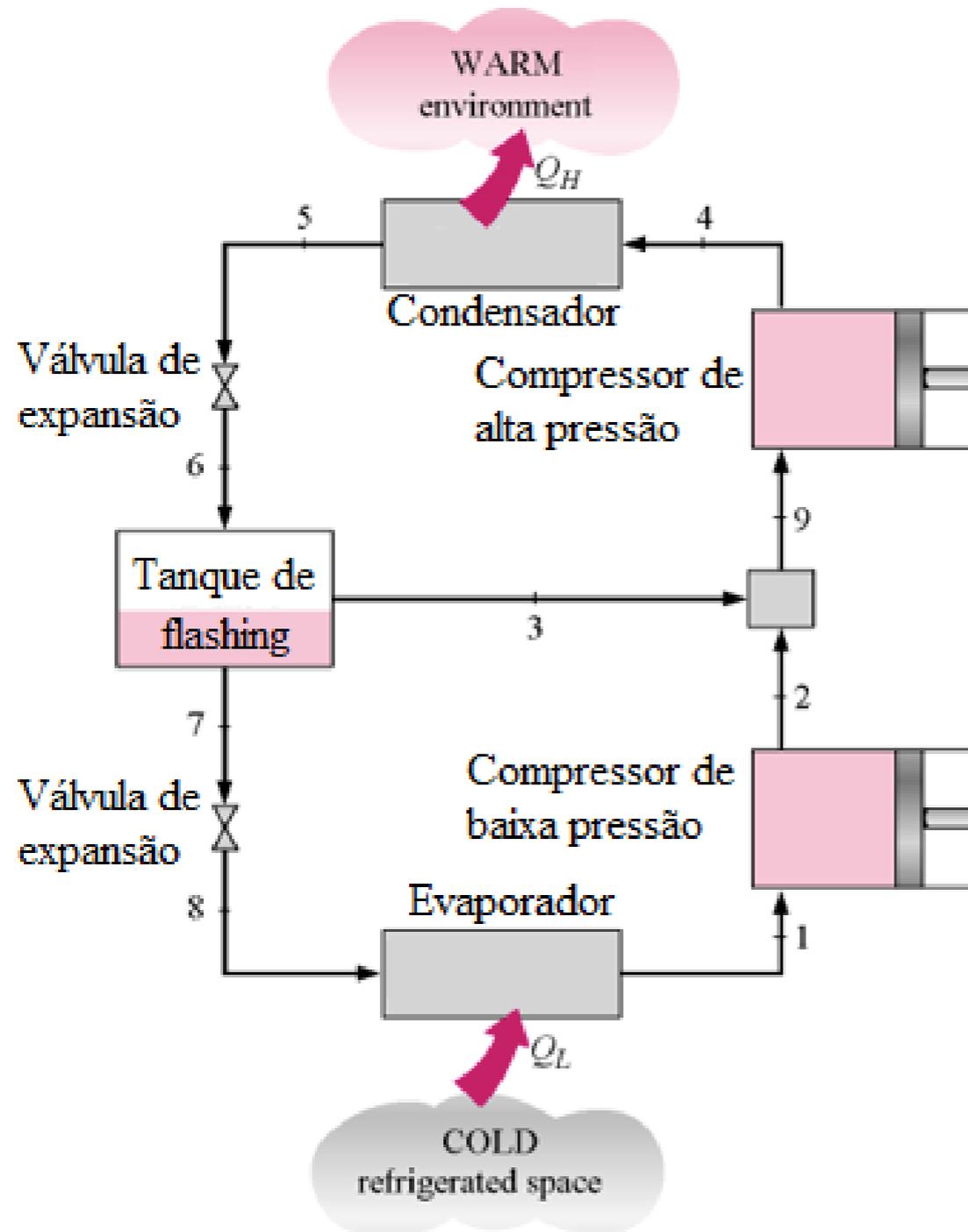
Exercícios



Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	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		

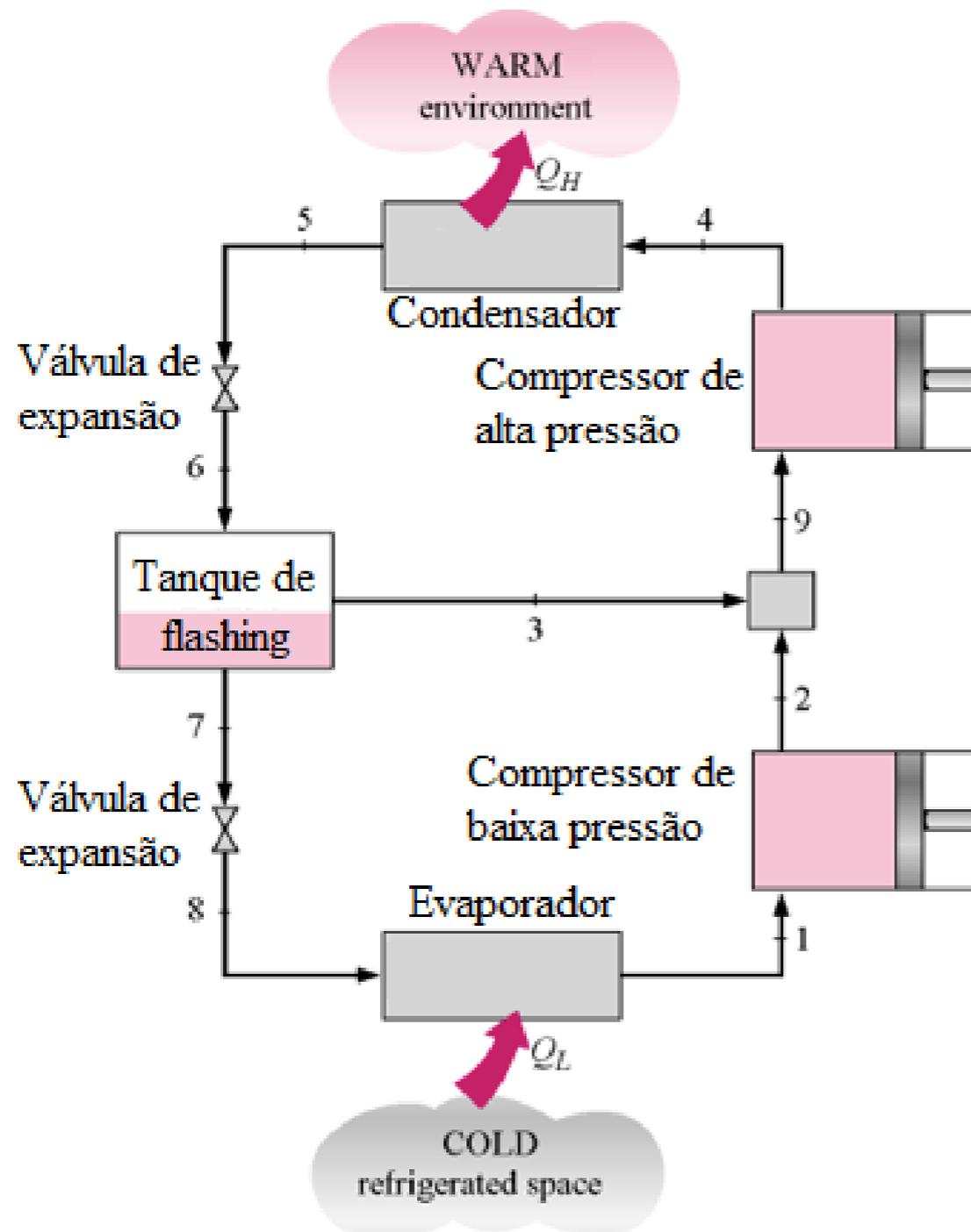
Preencha os demais campos a título de exercício!

(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



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

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

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

$$\text{com } h_9 = (1 - x_6)h_2 + x_6h_3$$

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



(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!