

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



**PME 3344**

# **Termodinâmica Aplicada**

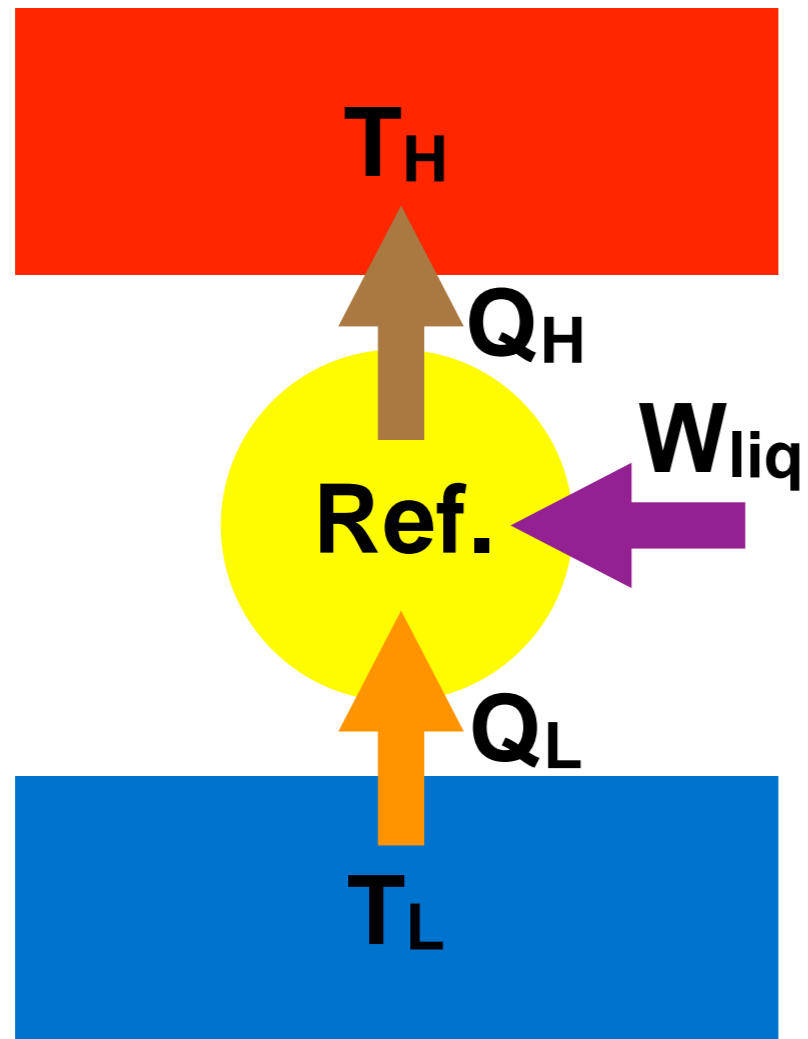
## **12) Ciclos de Refrigeração**



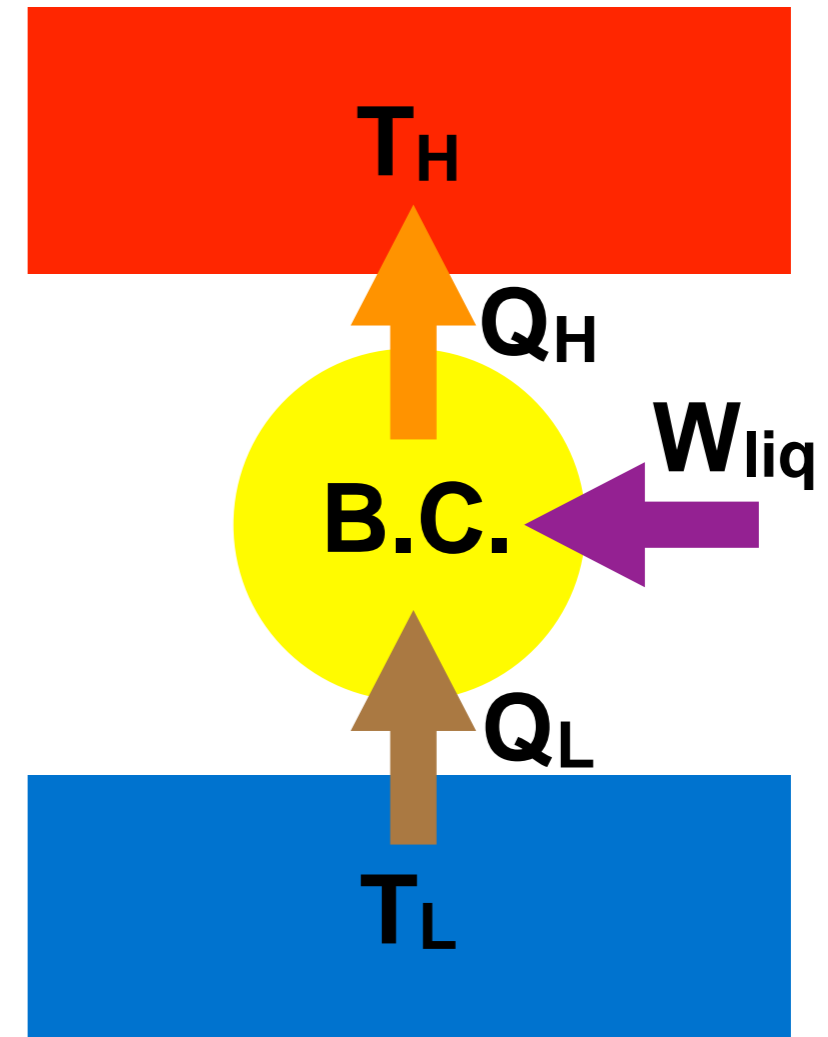
- ✱ A transferência de calor de compartimentos de baixa temperatura para outros a temperaturas maiores é chamada de refrigeração;
- ✱ Equipamentos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores, e operam segundo um ciclo frigorífico;
- ✱ O fluido de trabalho dos refrigeradores são os refrigerantes;
- ✱ 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:



## Bomba de calor:





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 (Carnot):

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

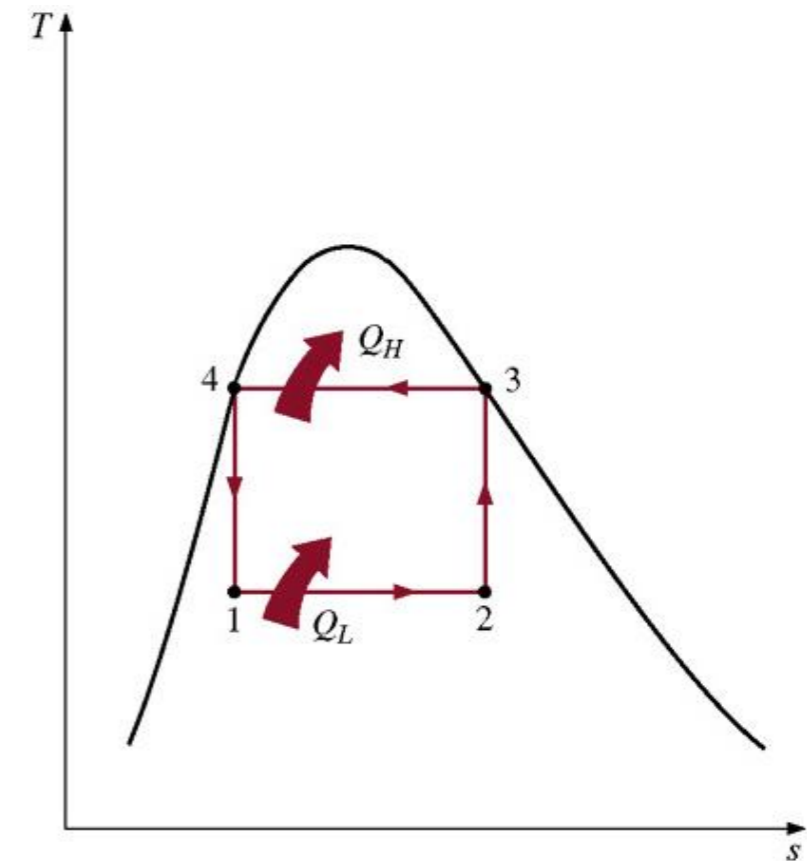
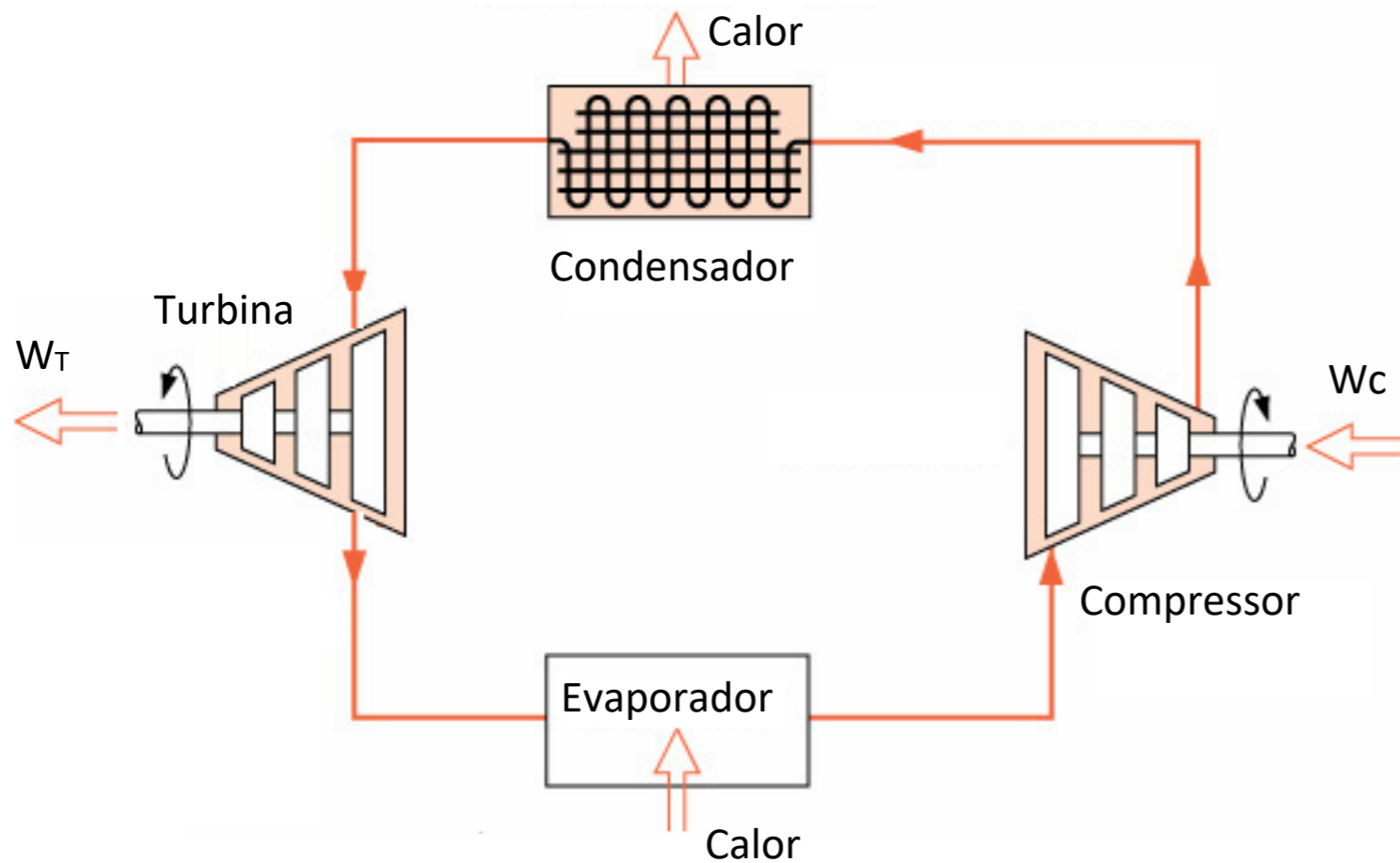
Bomba de calor (Carnot):

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

# Ciclo de refrigeração por compressão: Carnot



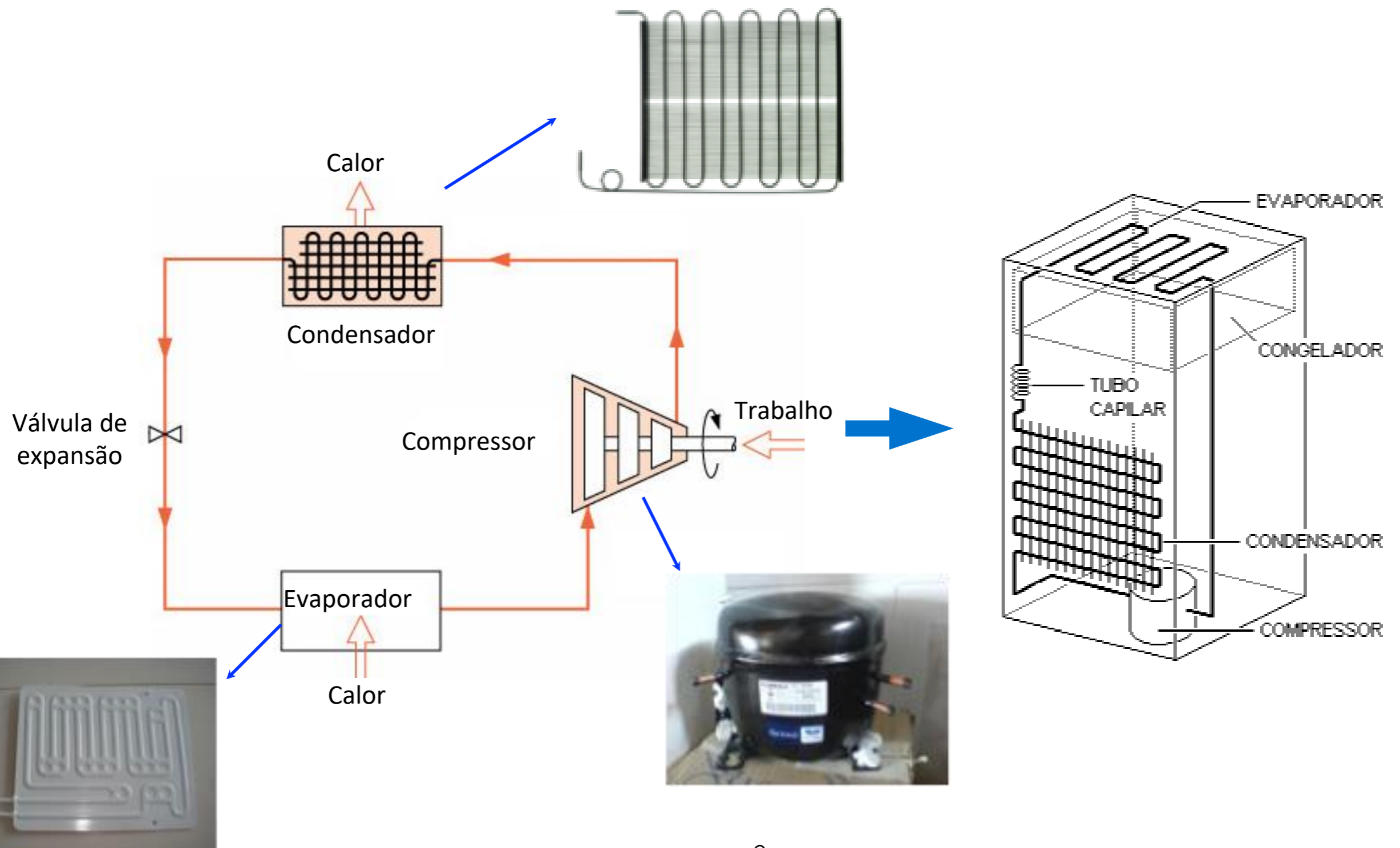
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



# Ciclo de refrigeração por compressão



## Fluido de trabalho: fluido refrigerante





**CFC: clorofluorcarbonos, R11 e R12  
(diclorodifluormetano  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ).**

**HCFC: hidrocloreofluorcarbonos, R22.**

**HFC: Hidrofluorcarbonos (efeito estufa), R134a.**



Vida  
média

Blends de HCFCs e HFCs: R401A.

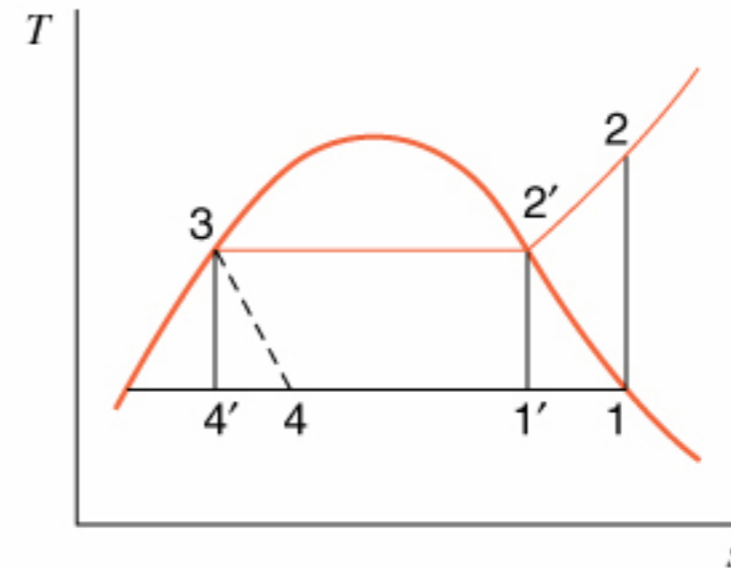
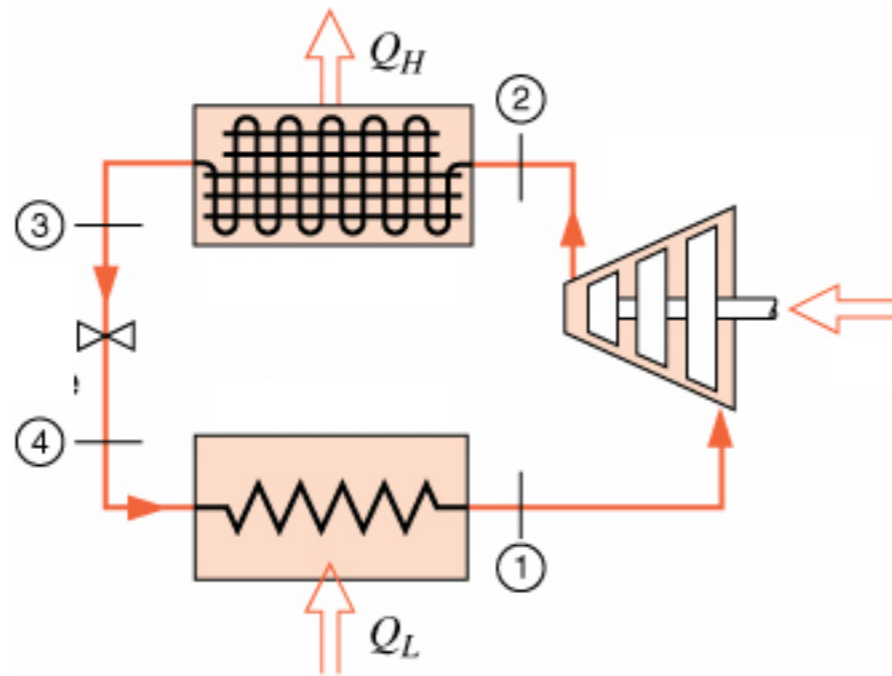
Blends de HFCs: R404A e R410A.

Alguns fluidos: R22, R410A, R290 (propano), R610a (isobutano), R744 ( $\text{CO}_2$ ), R117 (amônia) e R729 (ar).

# Ciclo de refrigeração por compressão



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



*Processo 1-2:* compressão isentrópica do fluido refrigerante.

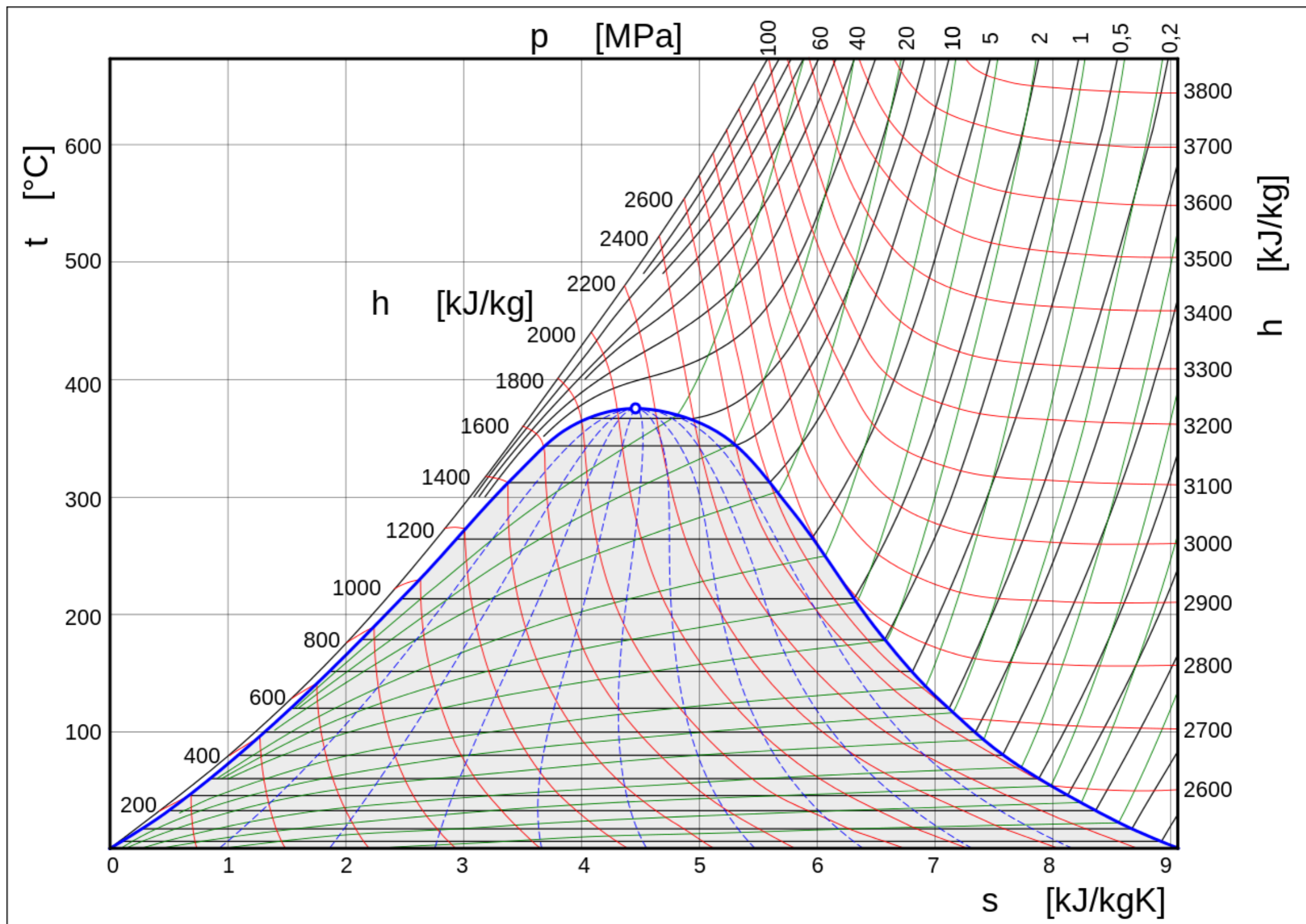
*Processo 2-3:* transferência de calor a pressão constante para o reservatório H.

*Processo 3-4:* expansão isentálpica.

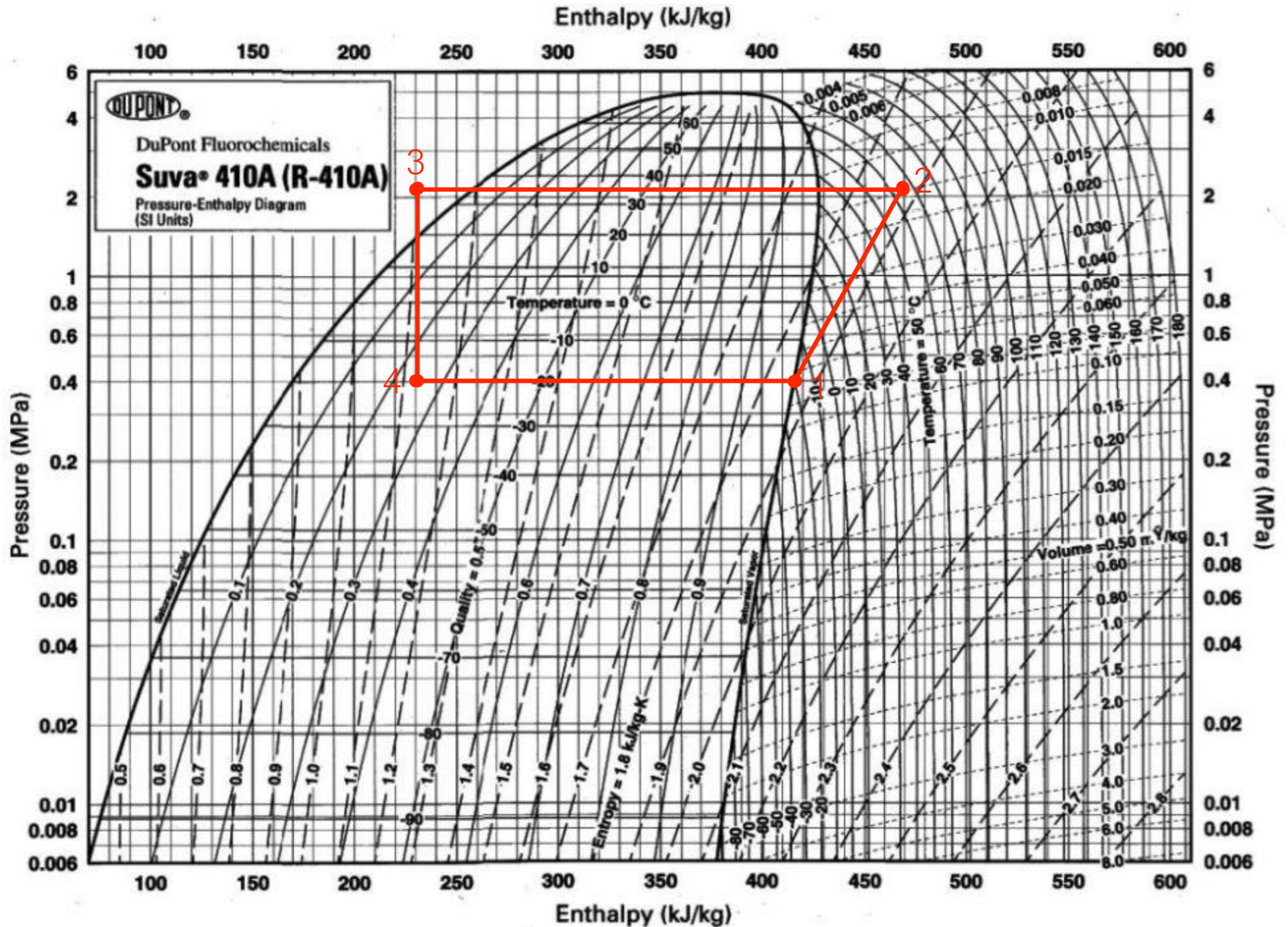
*Processo 4-1:* transferência de calor a pressão constante do reservatório L.

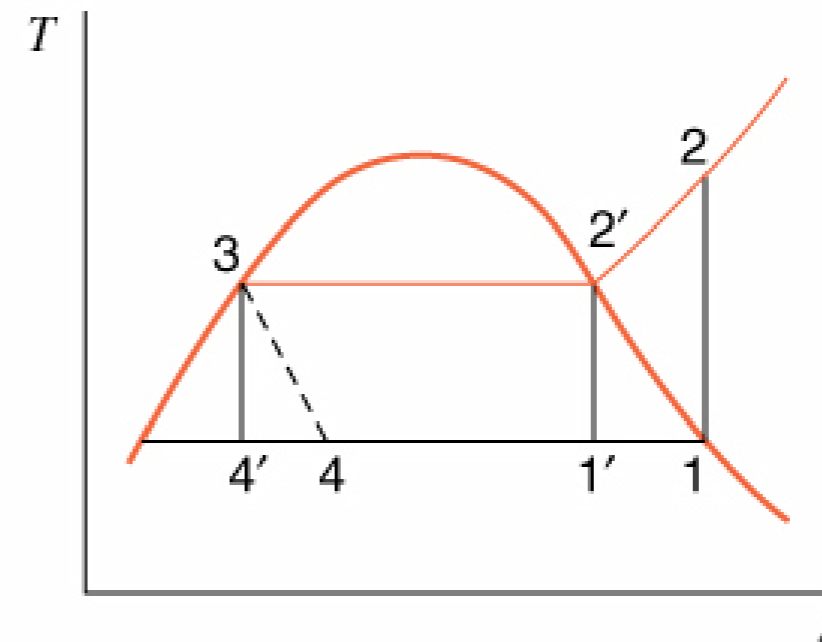
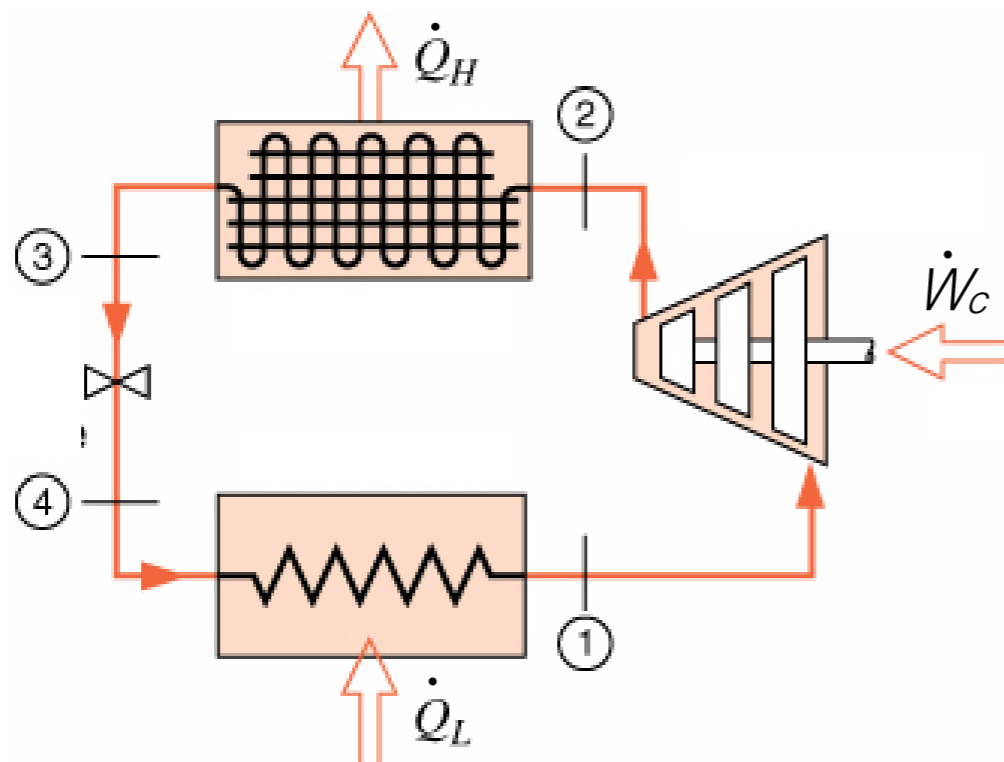


# Diagrama T-s: isentálpicas (H<sub>2</sub>O)



# Diagrama P-h: Mollier





## 1ª Lei

**Compressor:**

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

## Processo

s constante

**Condensador:**

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

P constante

**Válvula de expansão:**

$$h_3 = h_4$$

$\Delta s > 0$

**Trocador de calor:**

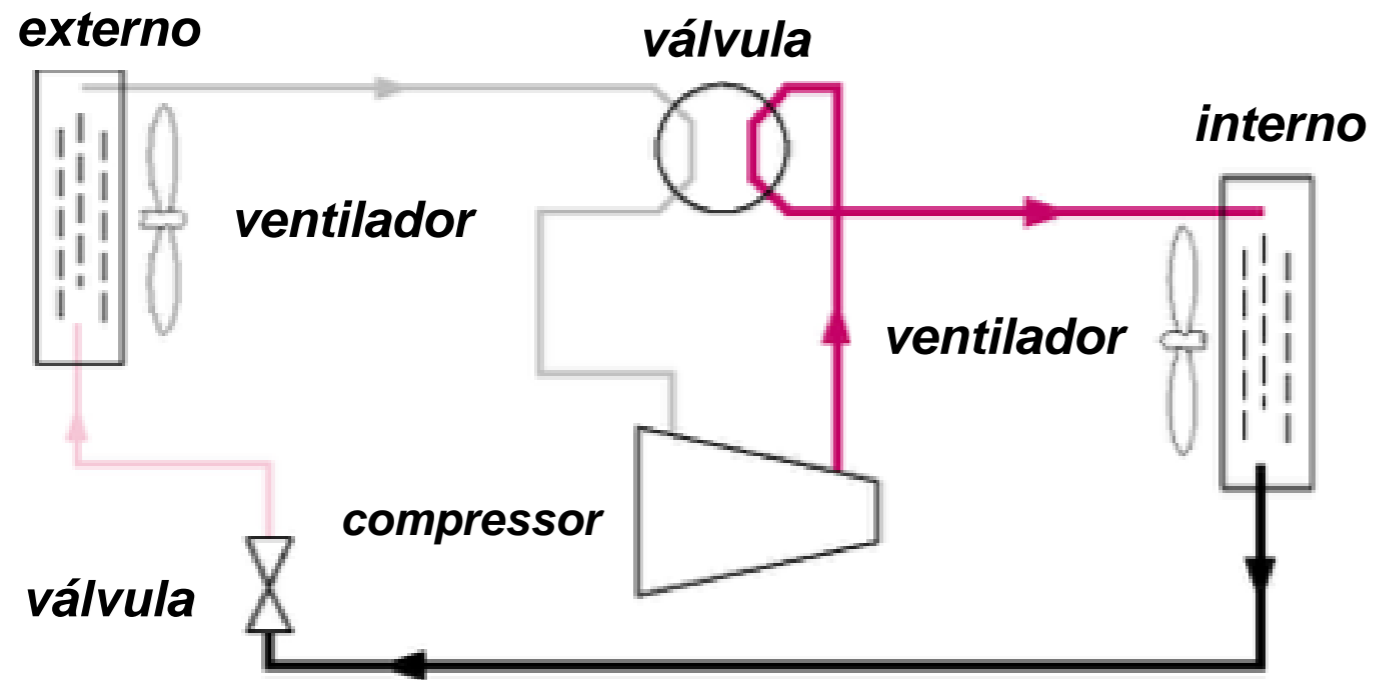
$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

P constante

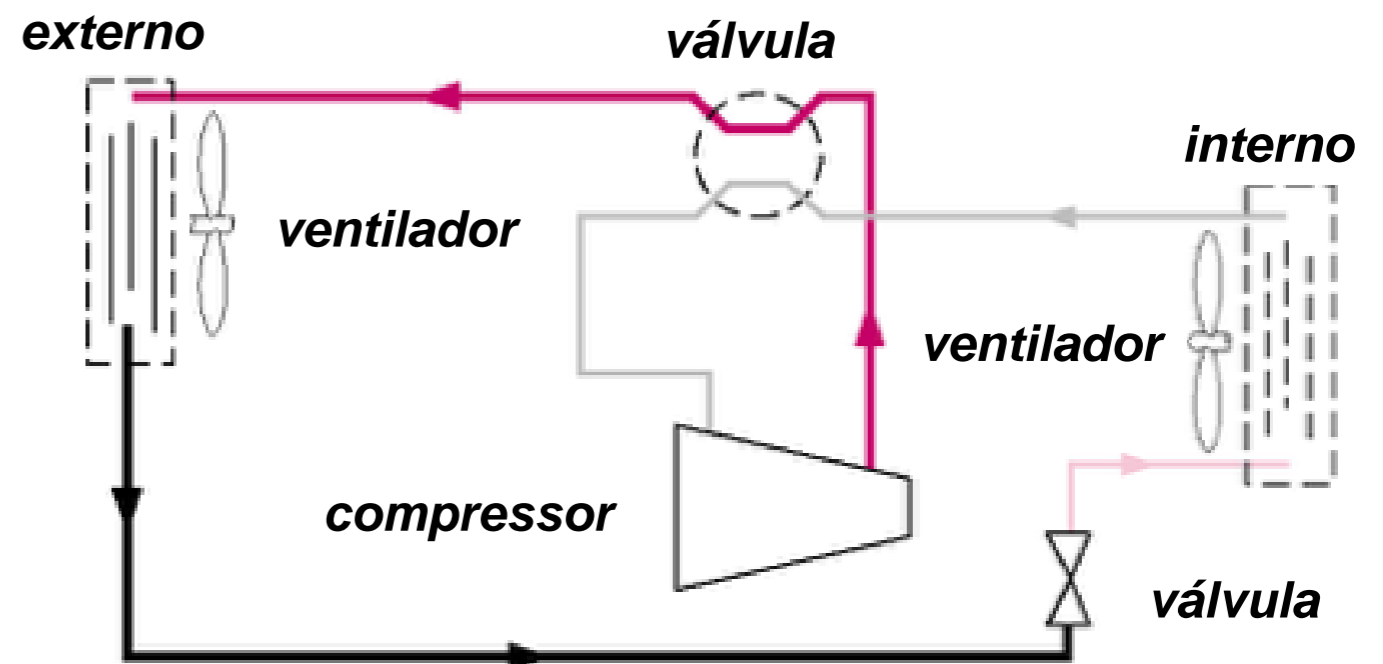


# Bomba de calor

## Aquecimento



## Resfriamento



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



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.



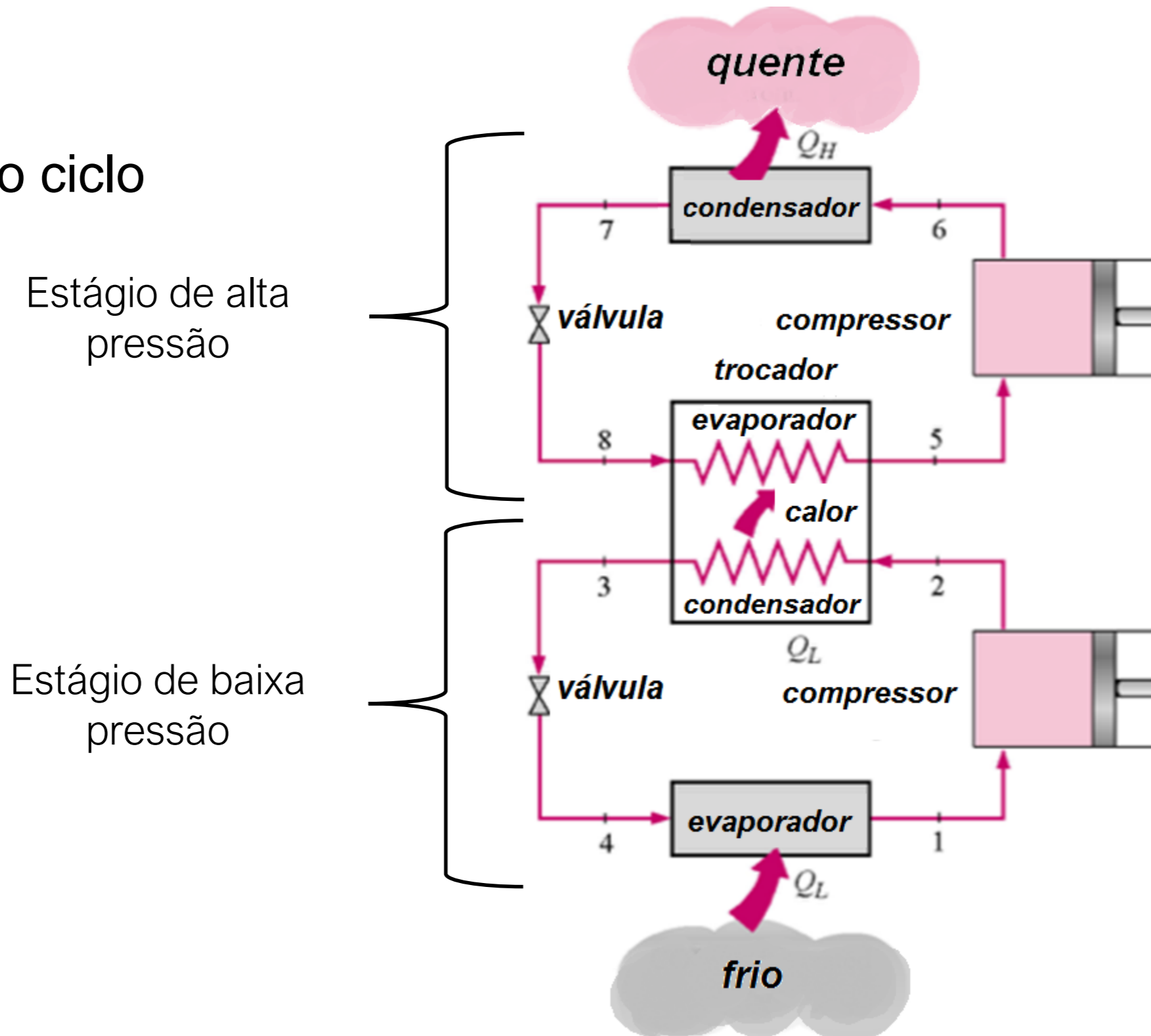
## Solução

### Hipóteses:

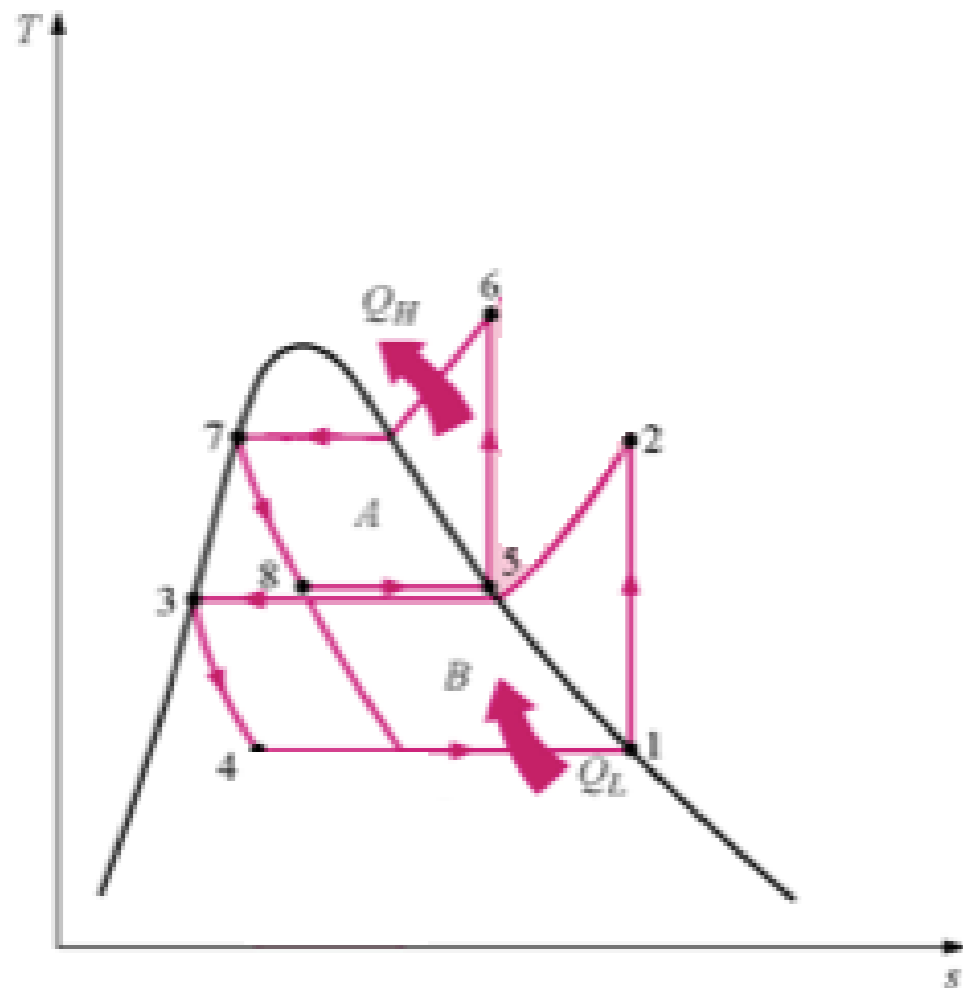
1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Trocador de calor adiabático (ambiente);
5. Válvulas de expansão isentálpica;
5. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

## Solução

### Esquema do ciclo



# Exercícios

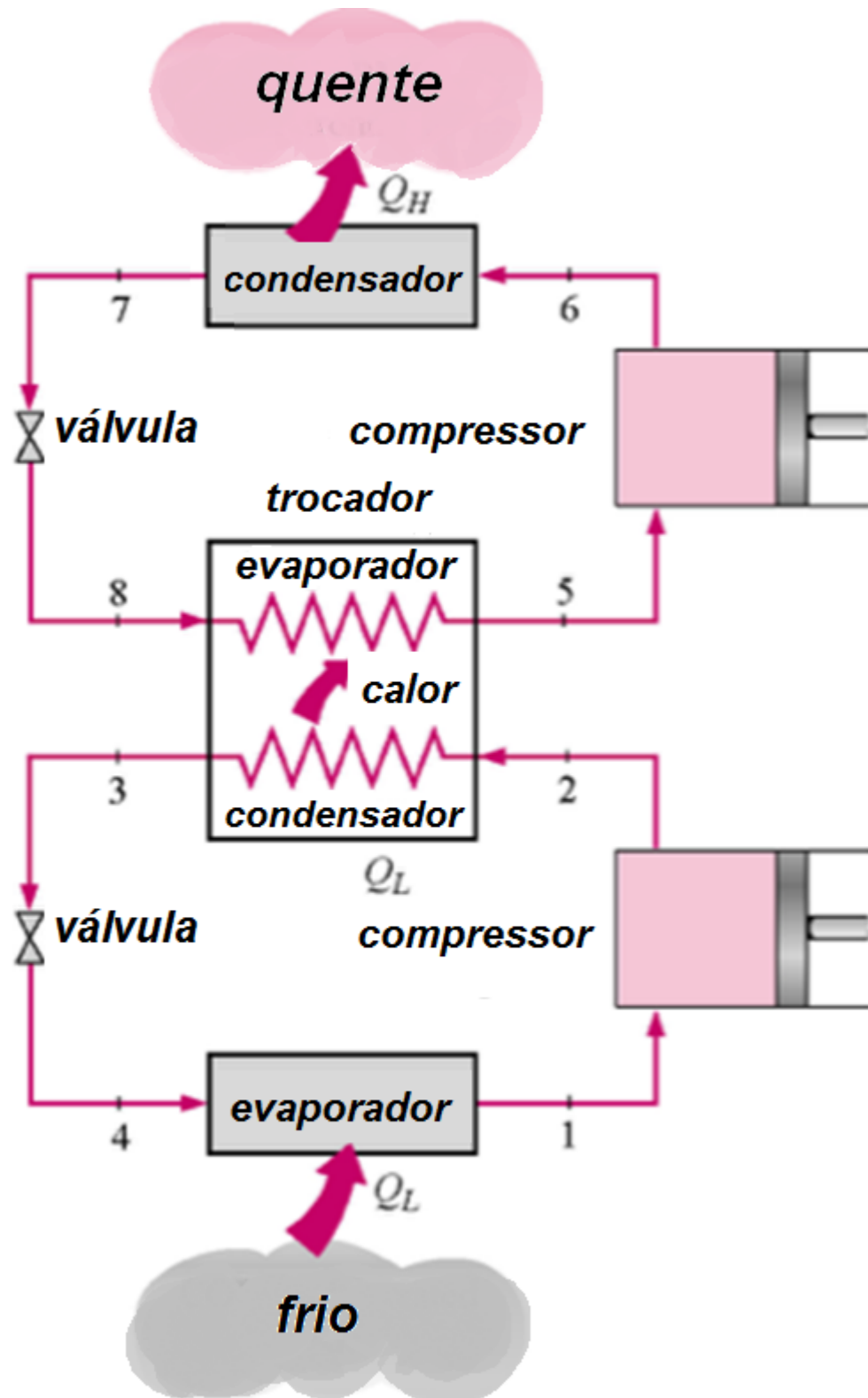


Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	$x$
1	239,16		
2	255,93		
3	55,16		
4	55,16		
5	251,88		
6	270,92		
7	95,47		
8	95,47		

Preencha os demais campos a título de exercício!



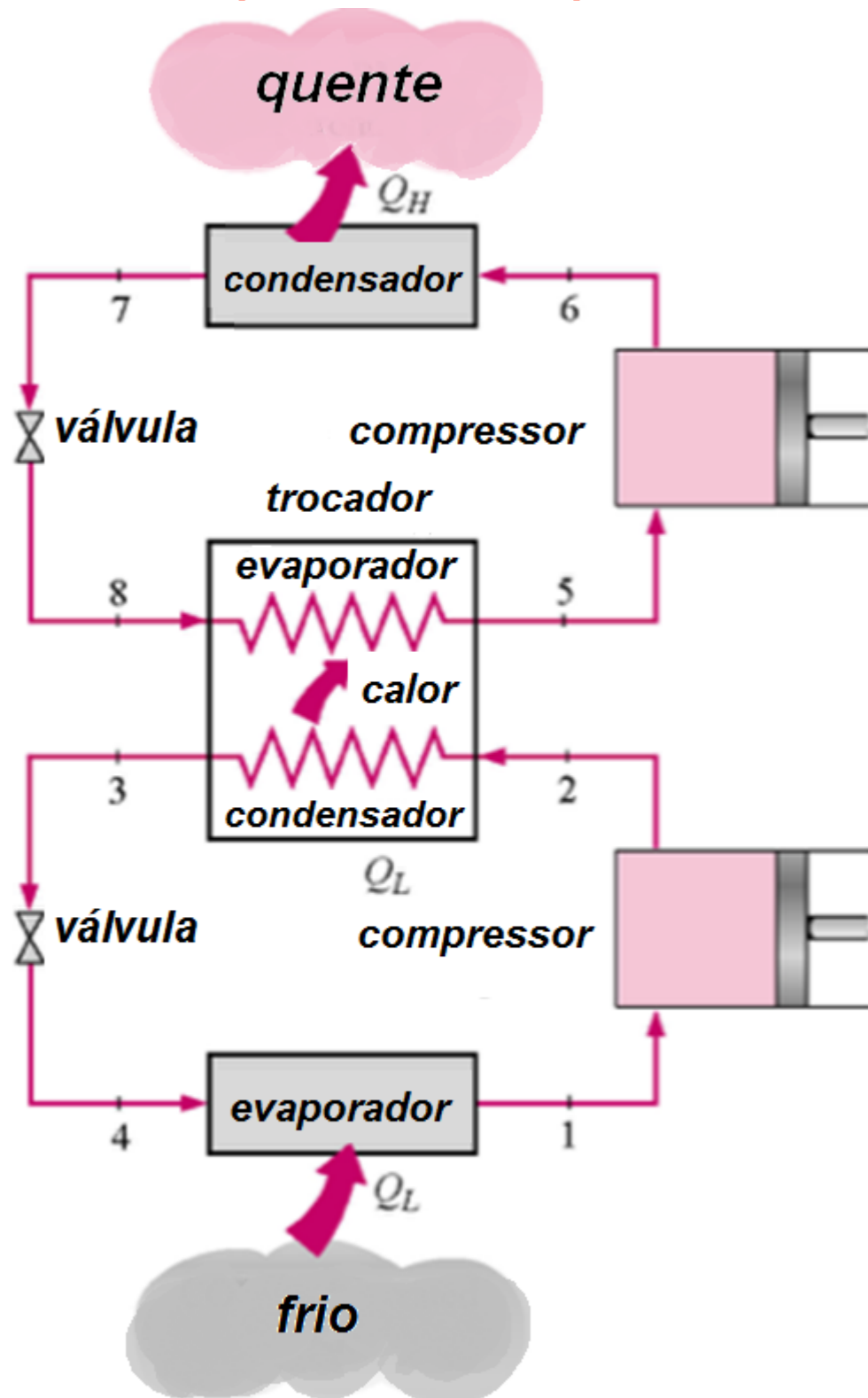
(a) 1ª Lei para o trocador de calor:



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

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

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



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

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

$$\dot{W}_c = \dot{W}_{c,A} + \dot{W}_{c,B} = \dot{m}_A(h_5 - h_6) + \dot{m}_B(h_1 - h_2)$$

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



## (c) Coeficiente de desempenho

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

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 na câmara 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.



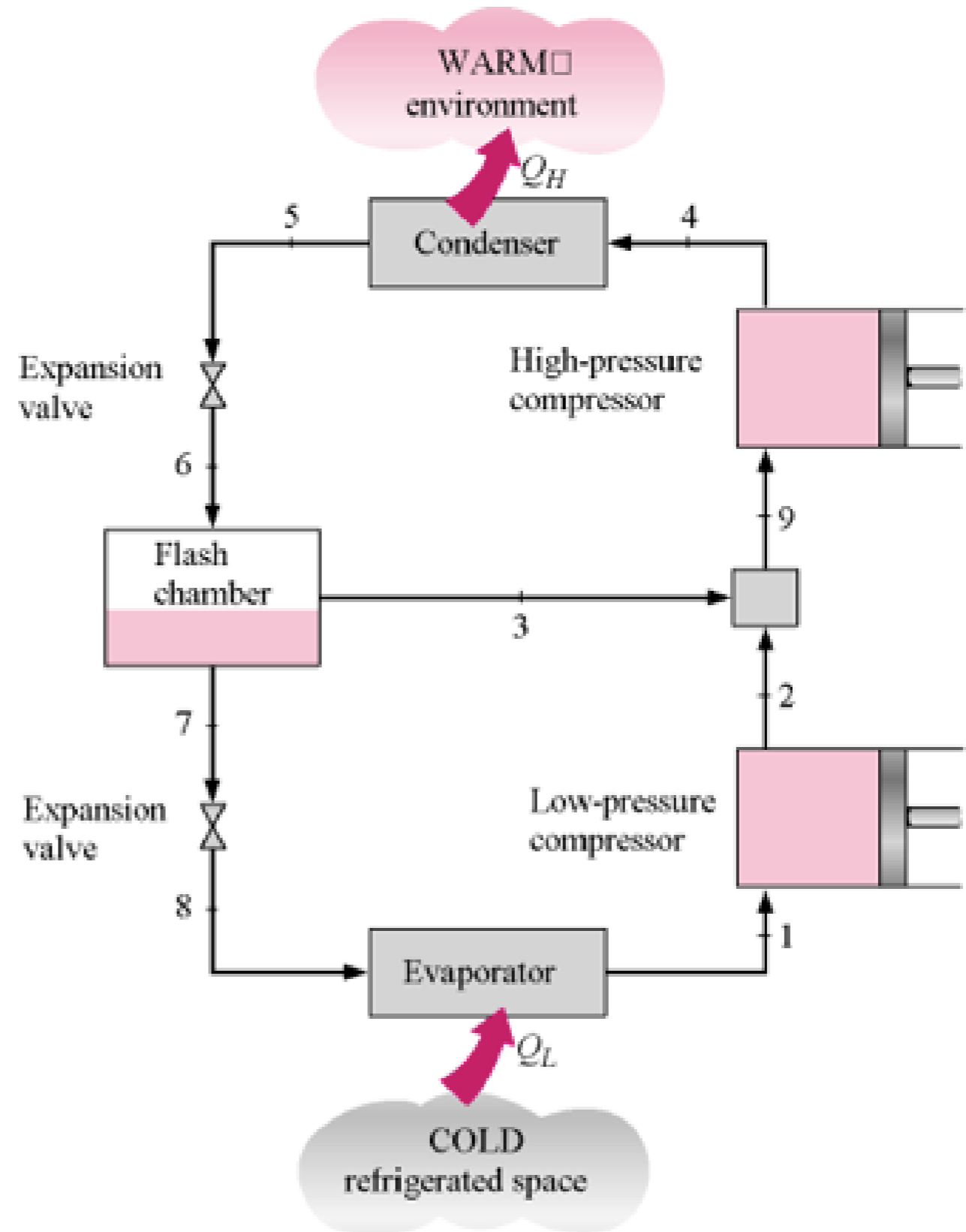
## Solução

### Hipóteses:

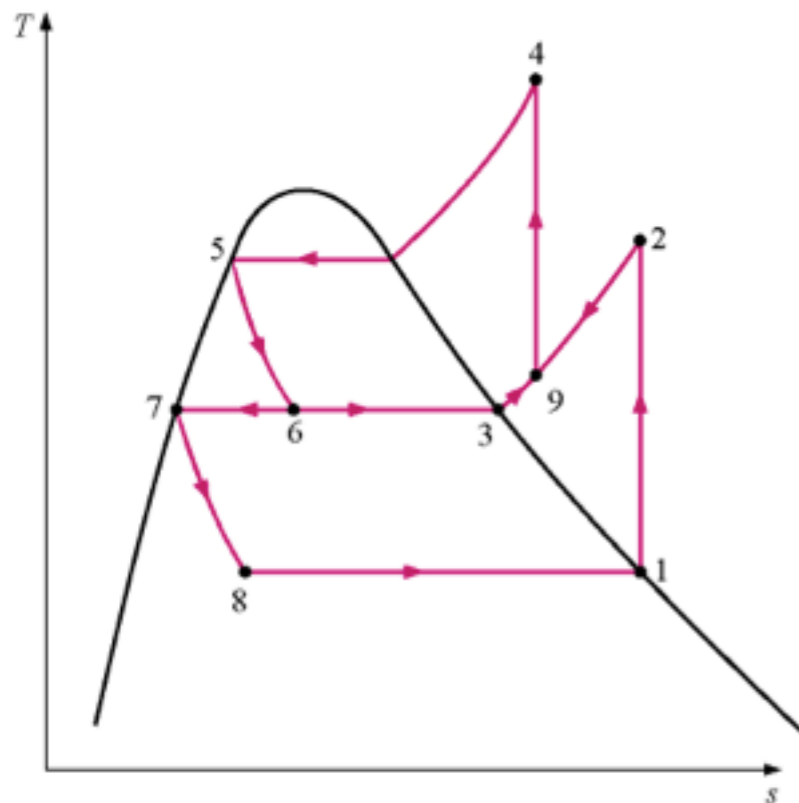
1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
3. Compressores adiabáticos reversíveis;
4. Câmara adiabática;
5. Válvulas de expansão isentálpica;
5. Perdas de carga desprezíveis (menos nas válvulas).

## Solução

### Esquema do ciclo



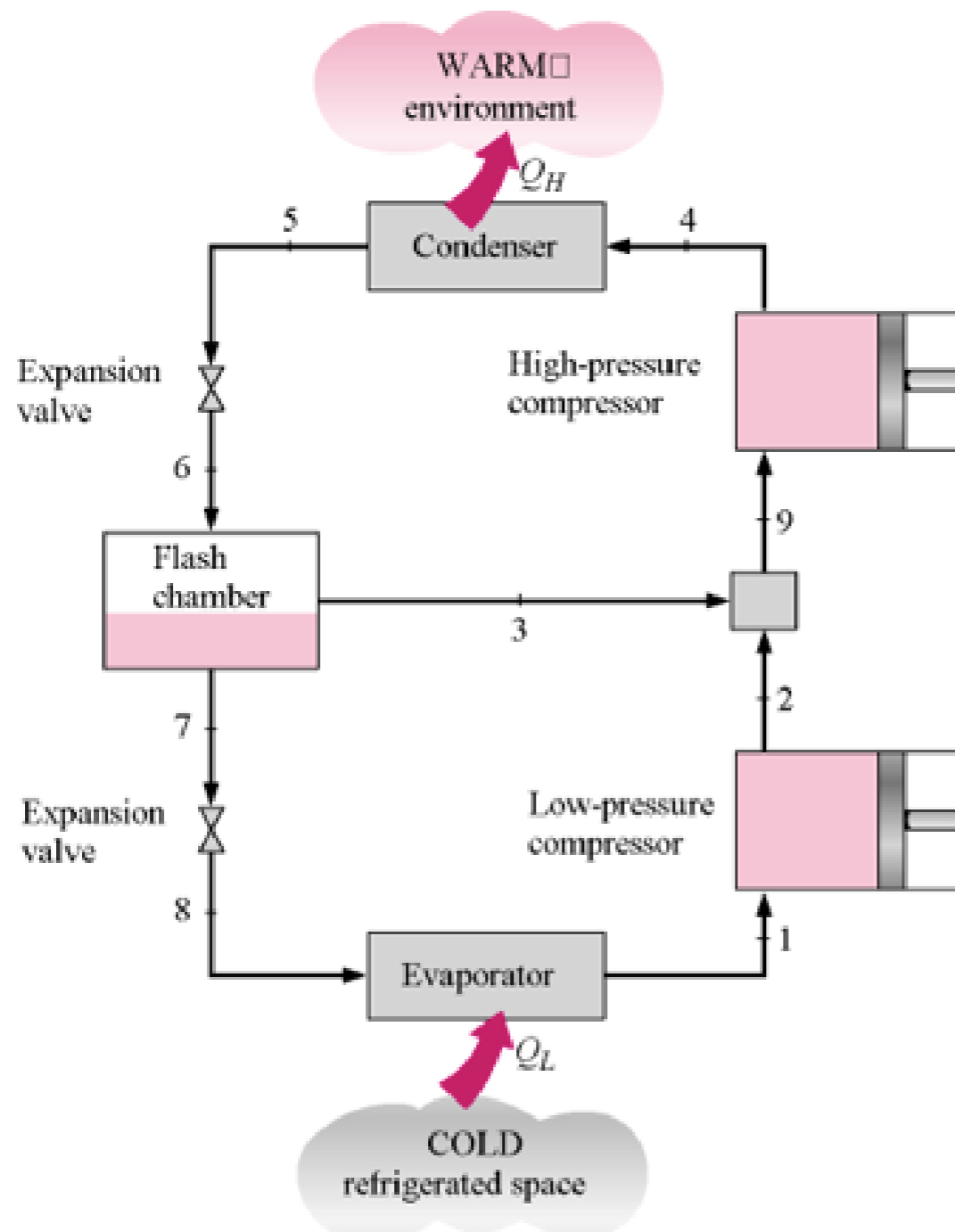
# Exercícios



Estado	$h / (\text{kJ/kg})$	$s / (\text{kJ/kgK})$	$x$
1	239,16		
2	255,93		
3	255,88		
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!

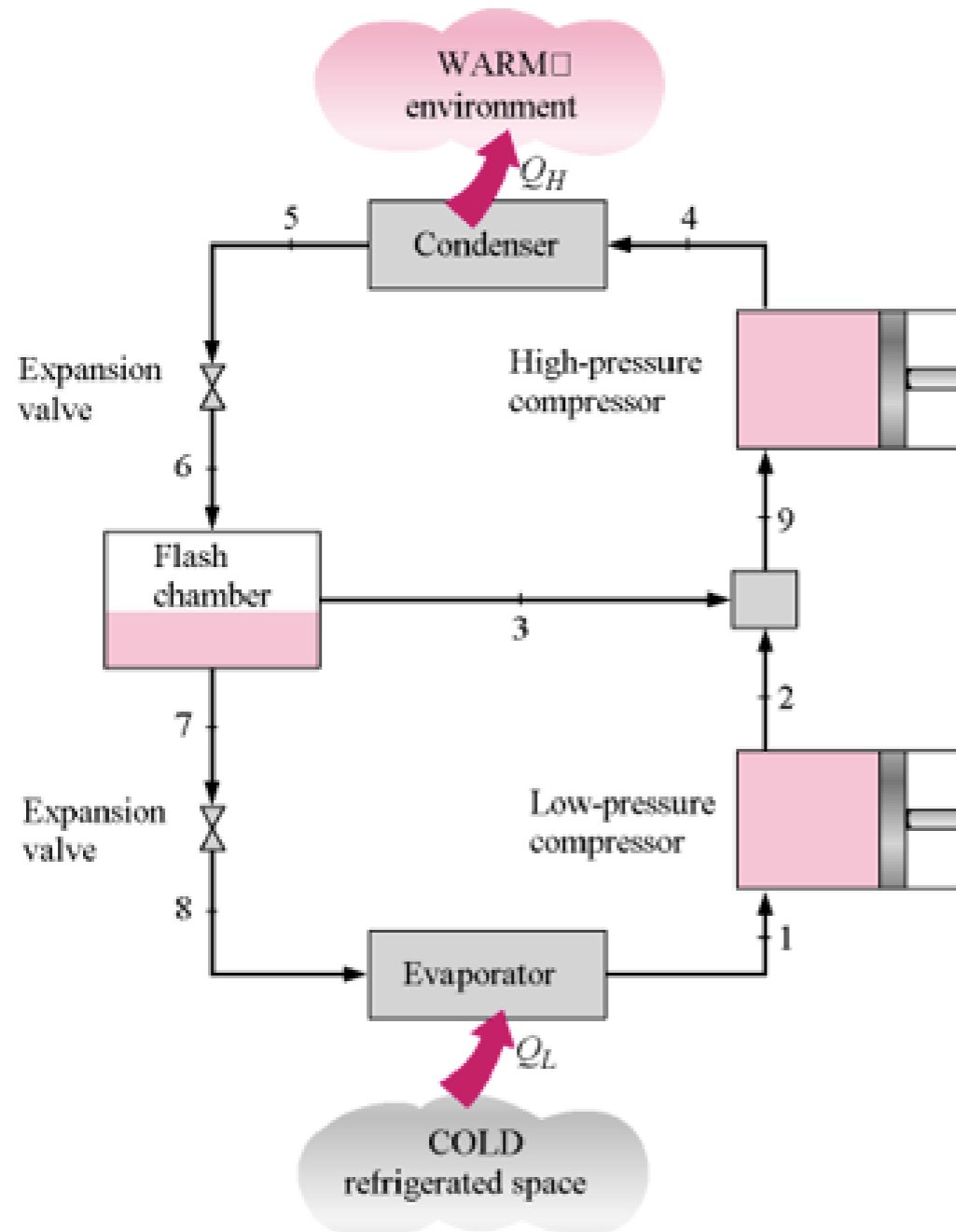
(a) A fração é igual ao título na câmara, determinado a partir de  $h_6$



$$x_6 = 0,2049$$



(b) Determinados pela aplicação da 1ª Lei



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

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

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

$$c / h_9 = (1 - x_6) h_2 + x_6 h_3$$

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



## (c) Coeficiente de desempenho

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

Compare com o valor do ciclo anterior, 4,46!