

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

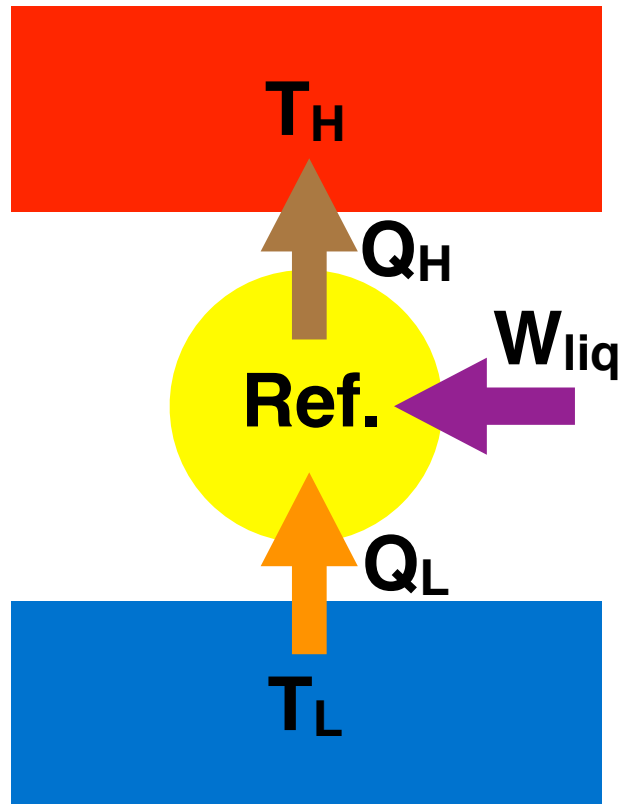
Ciclos de Refrigeração



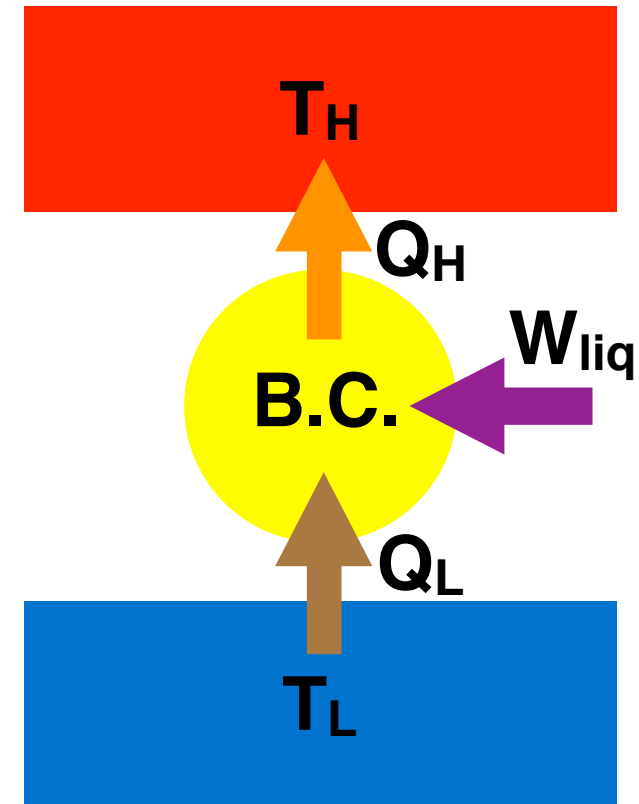
- *A transferência de calor de compartimentos de baixa temperatura para outros a temperaturas maiores é chamada de refrigeração;
- *Equipamentos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores, que operam segundo um ciclo frigorífico;
- *O fluido de trabalho dos refrigeradores são os refrigerantes;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

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

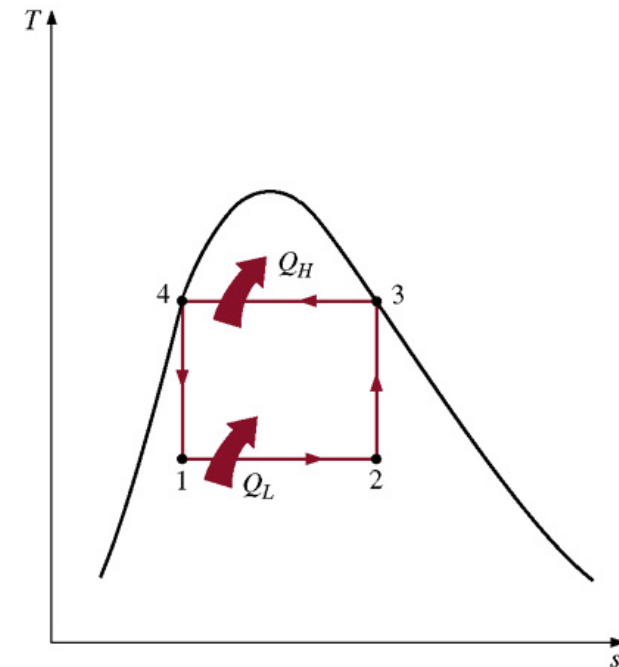
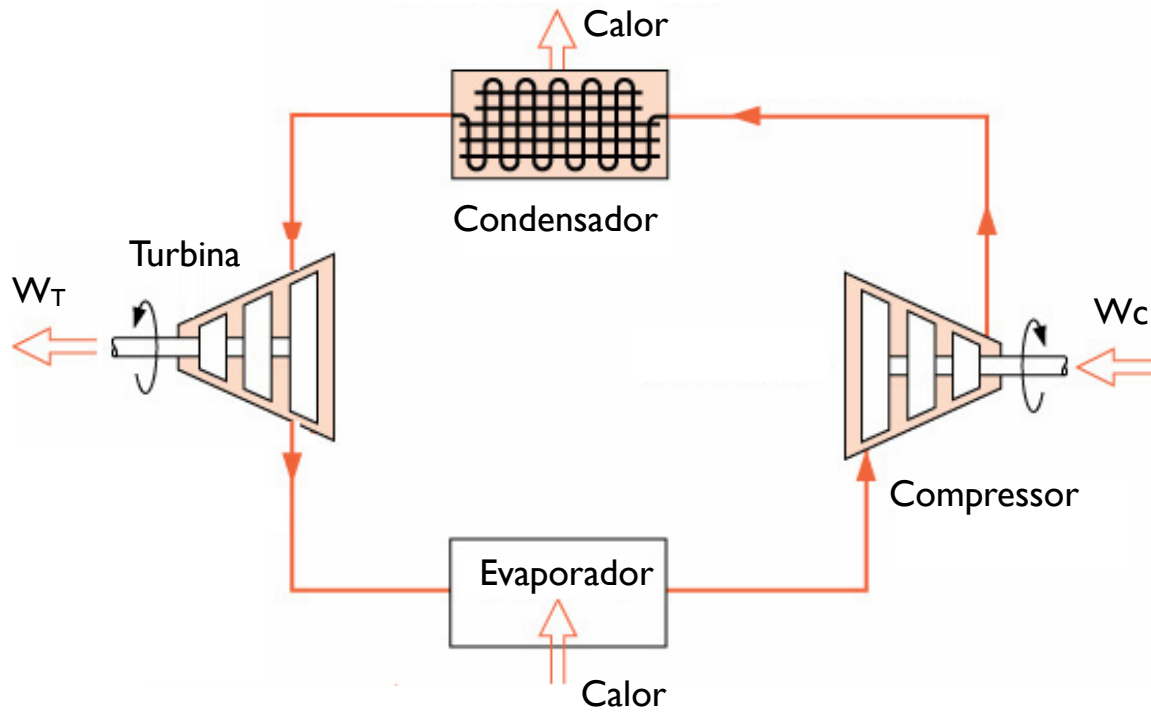
Ciclo de refrigeração (Carnot):

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

Bomba de calor (Carnot):

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

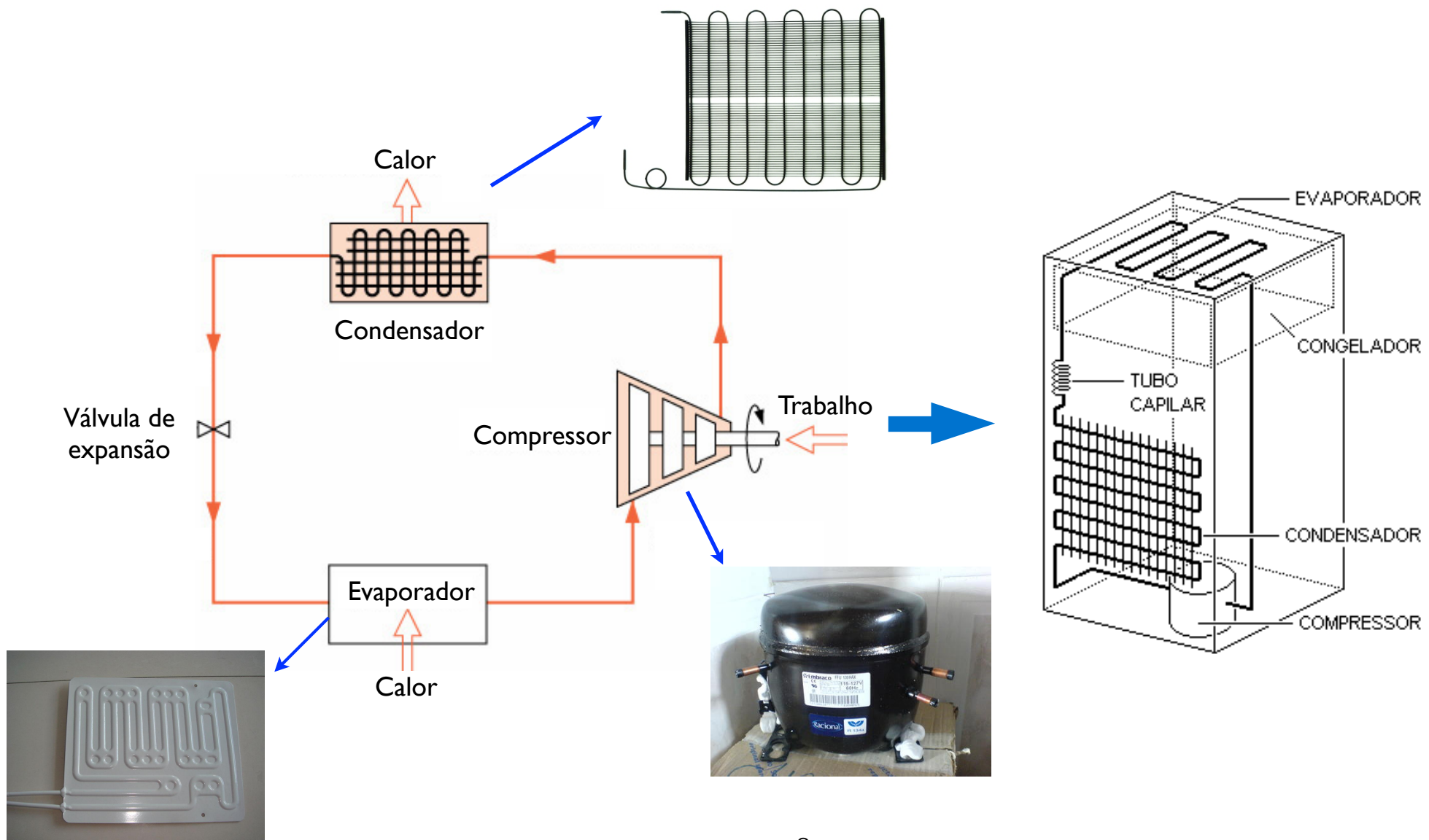
Ciclo de refrigeração por compressão: Carnot



Ciclo de refrigeração por compressão



Fluido de trabalho: fluido refrigerante





**CFC: clorofluorcarbonos, R11 e R12
(diclorodifluormetano CCl_2F_2).**

HCFC: hidrocloreofluorcarbonos, R22.

HFC: Hidrofluorcarbonos (efeito estufa), R134a.



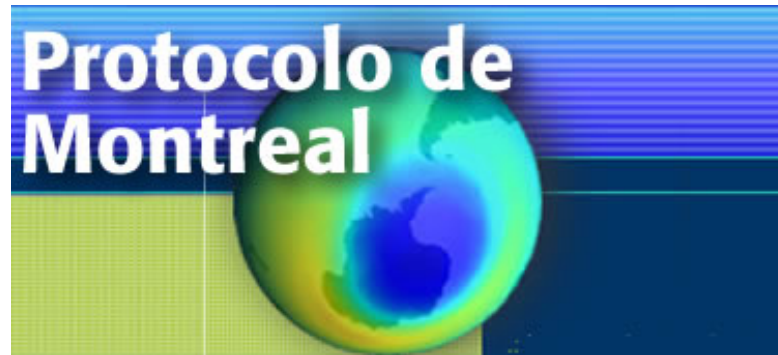
Vida
média

Blends de HCFCs e HFCs: R401a.

Blends de HFCs: R404A e R410A.

Alguns fluidos: R410A, R290(propano), R610a(isobutano),
R744(CO_2), R117(amônia) e R729(ar).

Protocolo de Montreal



O **Protocolo de Montreal sobre substâncias que empobrecem a camada de ozônio** é um tratado internacional em que os países signatários comprometem-se a substituir as substâncias que demonstrarem estar reagindo com o ozônio (O_3) na parte superior da **estratosfera**. O tratado esteve aberto para adesões a partir de **16 de Setembro de 1987** e entrou em vigor em 1 de Janeiro de 1989. Ele teve adesão de 150 países e foi revisado em 1990, 1992, 1995, 1997 e 1999. Devido à essa grande adesão mundial, **Kofi Annan** disse sobre ele: "Talvez seja o mais bem sucedido acordo internacional de todos os tempos..." Em comemoração, a **ONU** declarou a data de 16 de Setembro como o **Dia Internacional para a Preservação da Camada de Ozônio**.

Fluidos refrigerantes



Fluido	ODP	GWP
R-12 Dichlorodifluoromethane	1.0	2400
R-22 Chlorodifluoromethane	0.05	1700
R-134a Tetrafluoroethane	0	1300
R-404A (44% R-125, 52% R-143a, R-134a)	0	3300
R-717 Ammonia - NH ₃	0	0
R-744 Carbon Dioxide - CO ₂		1*

ODP = Ozone Depletion Potential

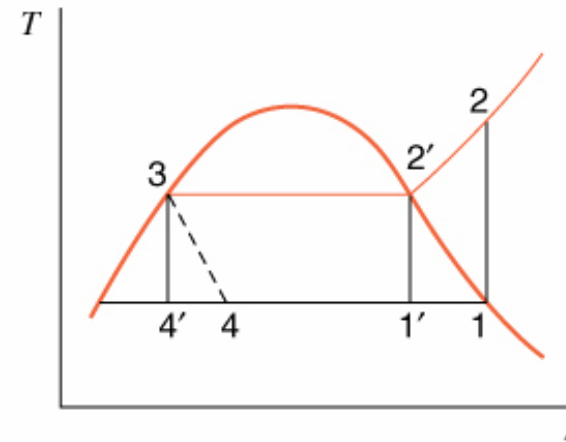
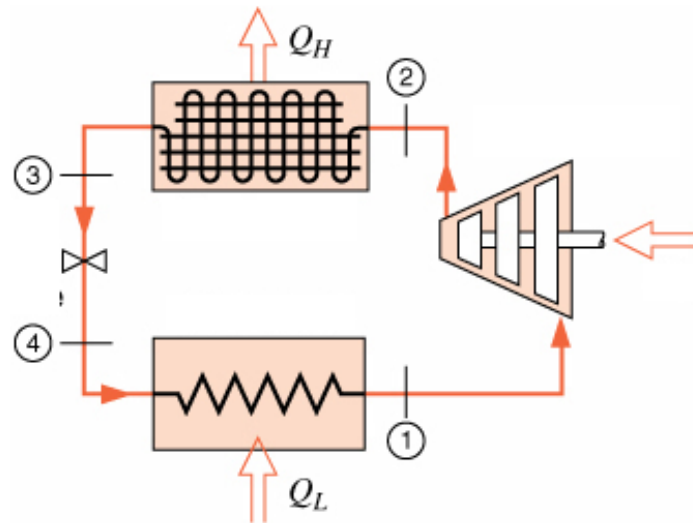
GWP = Global Warming Potential

* padrão para GWP



http://www.equipecas.com.br/s_produto.asp?id=11

Ciclo de refrigeração por compressão



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)

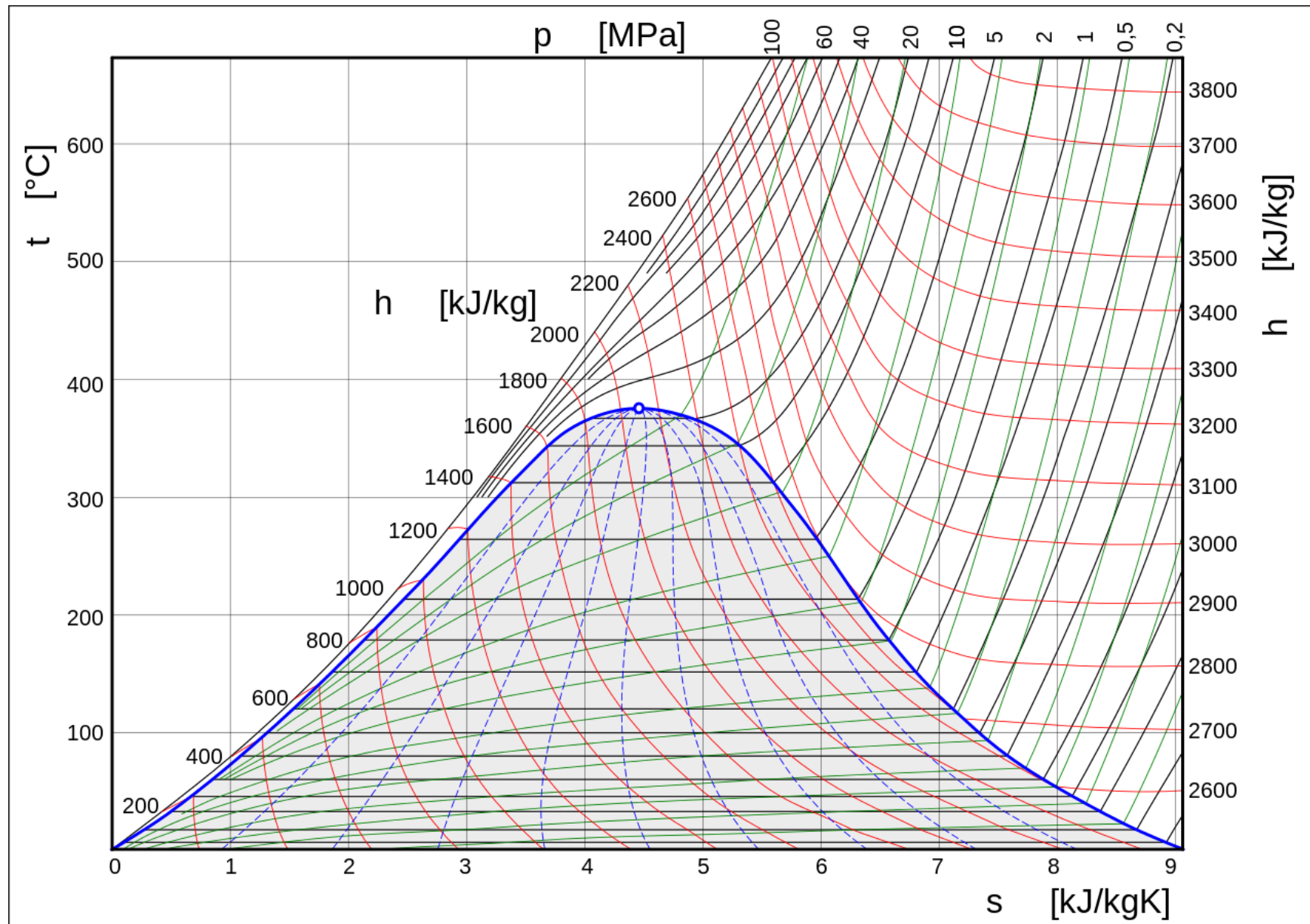
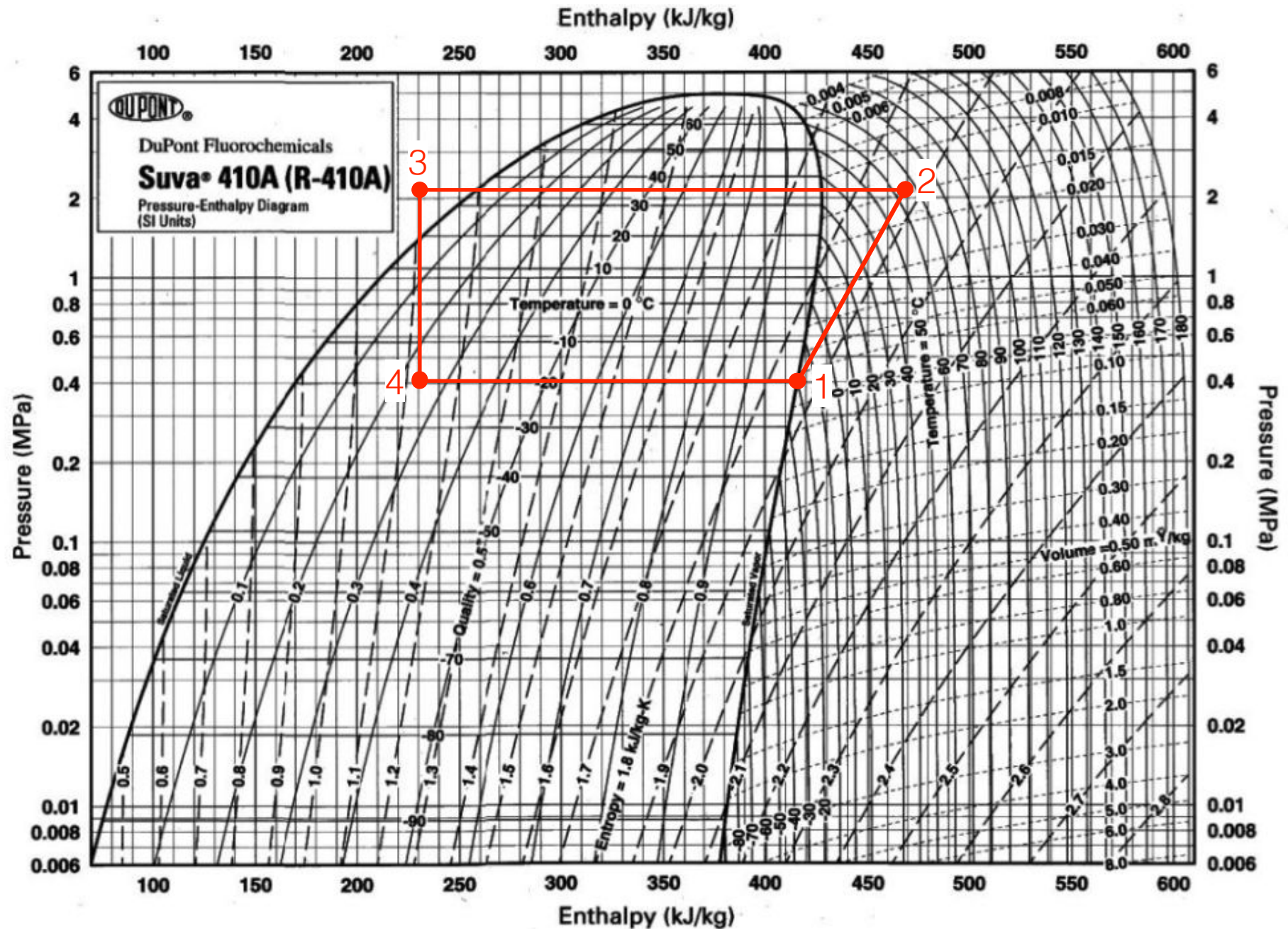
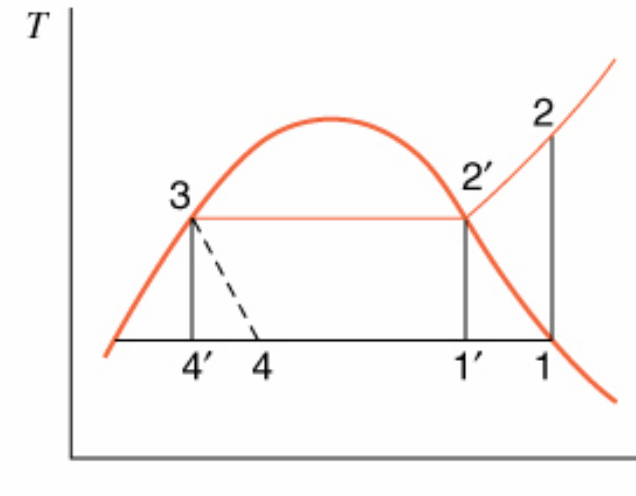
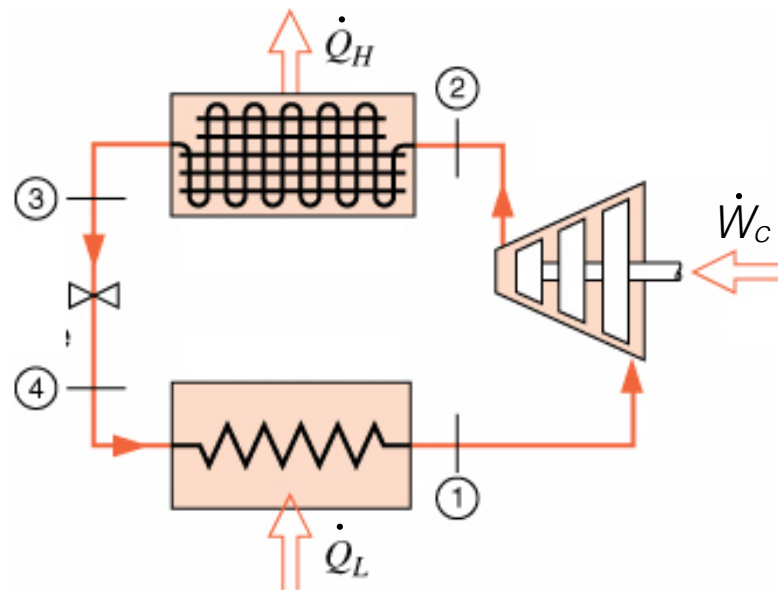


Diagrama P-h: Mollier





1ª Lei

Compressor:

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

Condensador:

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

Válvula de expansão:

$$h_3 = h_4$$

Trocador de calor:

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

Processo

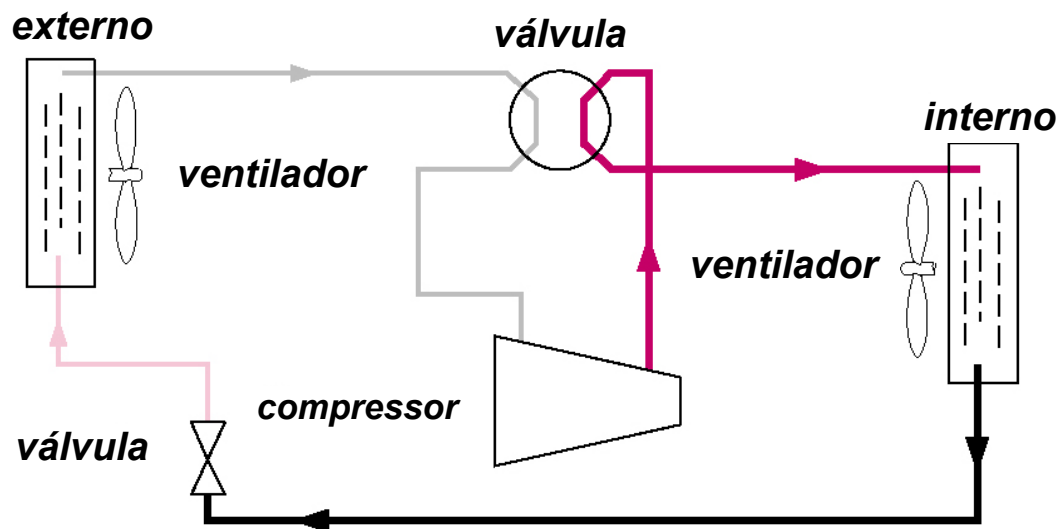
s constante

P constante

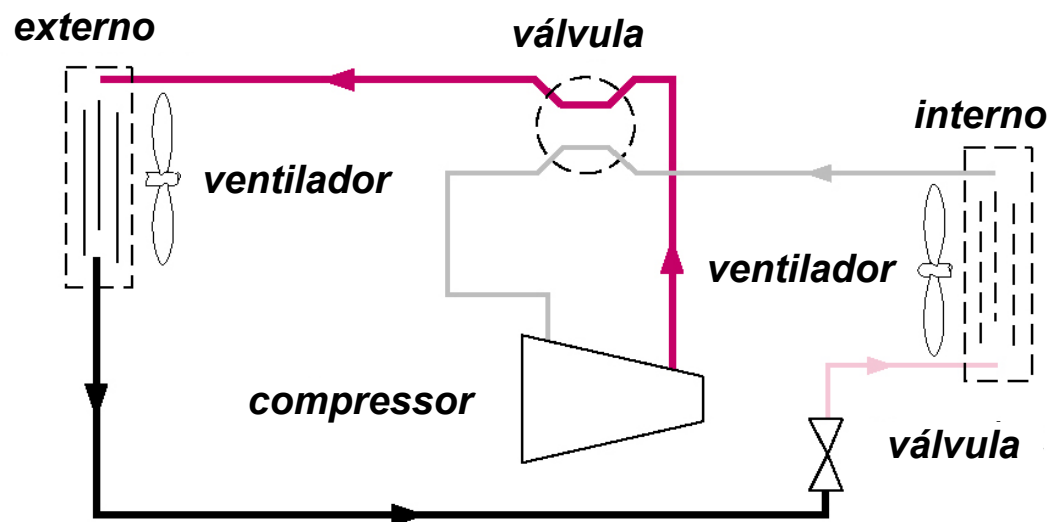
$\Delta s > 0$

P constante

Aquecimento



Resfriamento

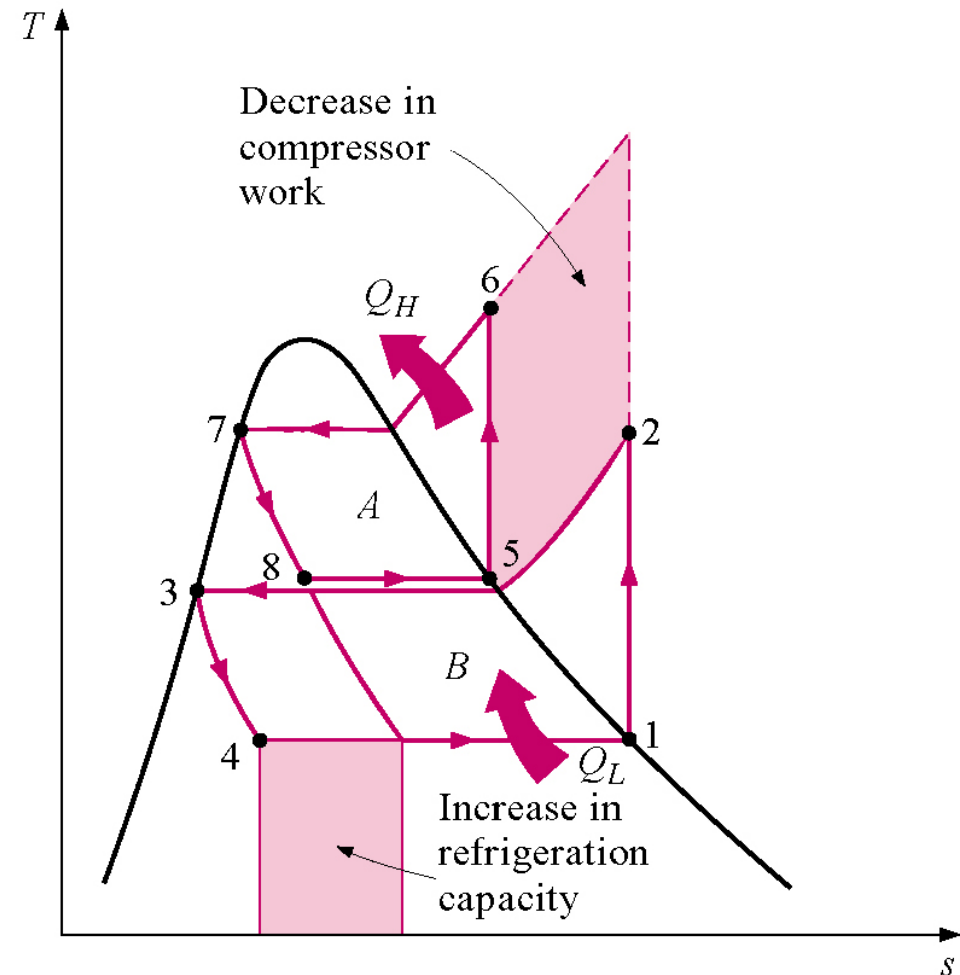
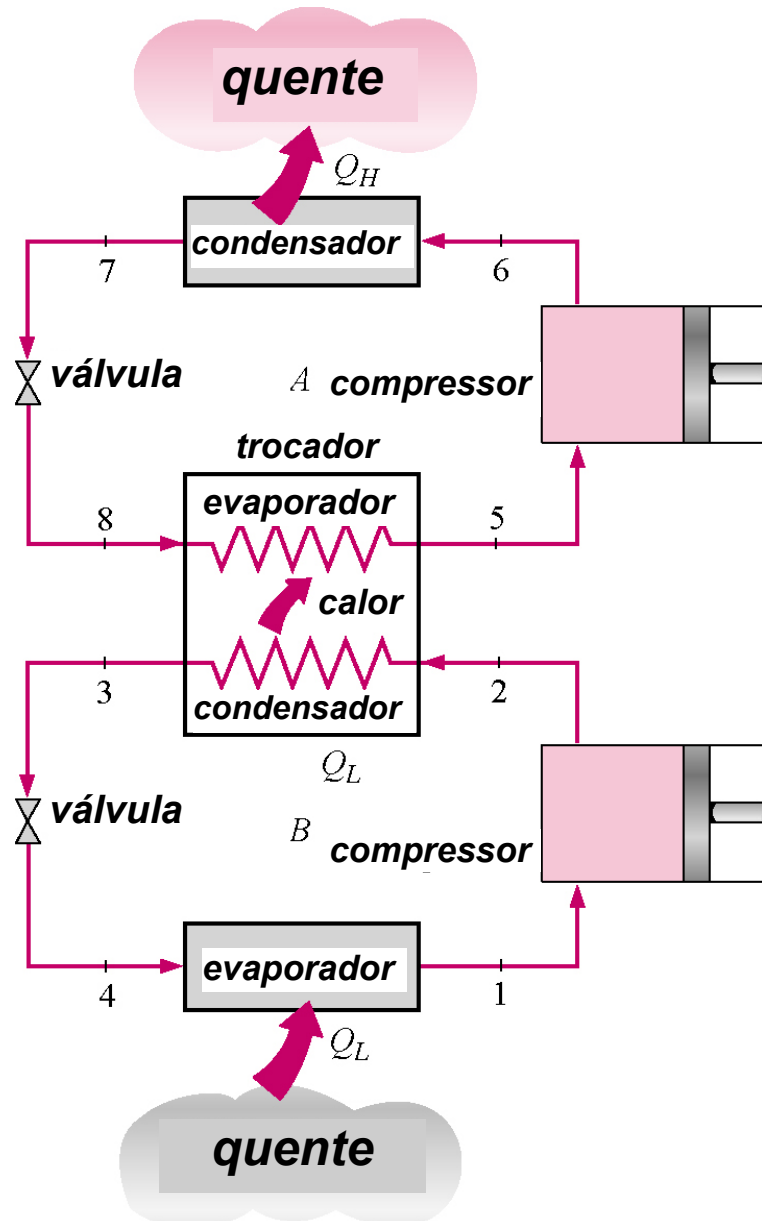


- líquido a alta pressão
- líq.+vapor a baixa pressão
- vapor a baixa pressão
- vapor a alta pressão

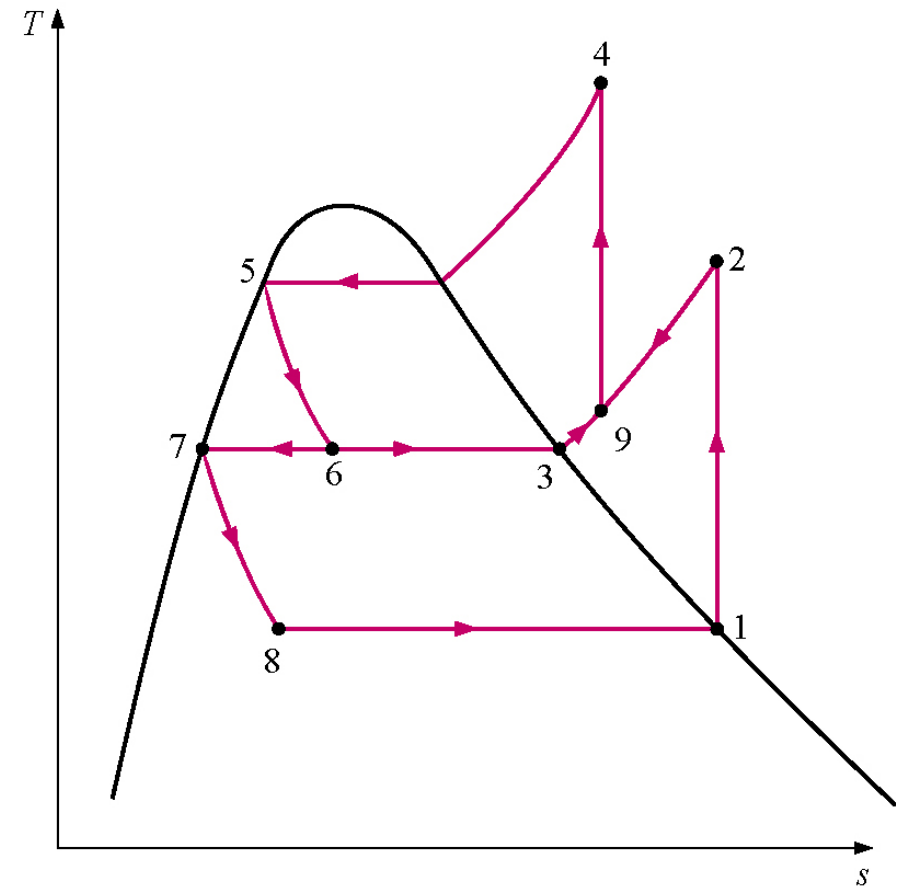
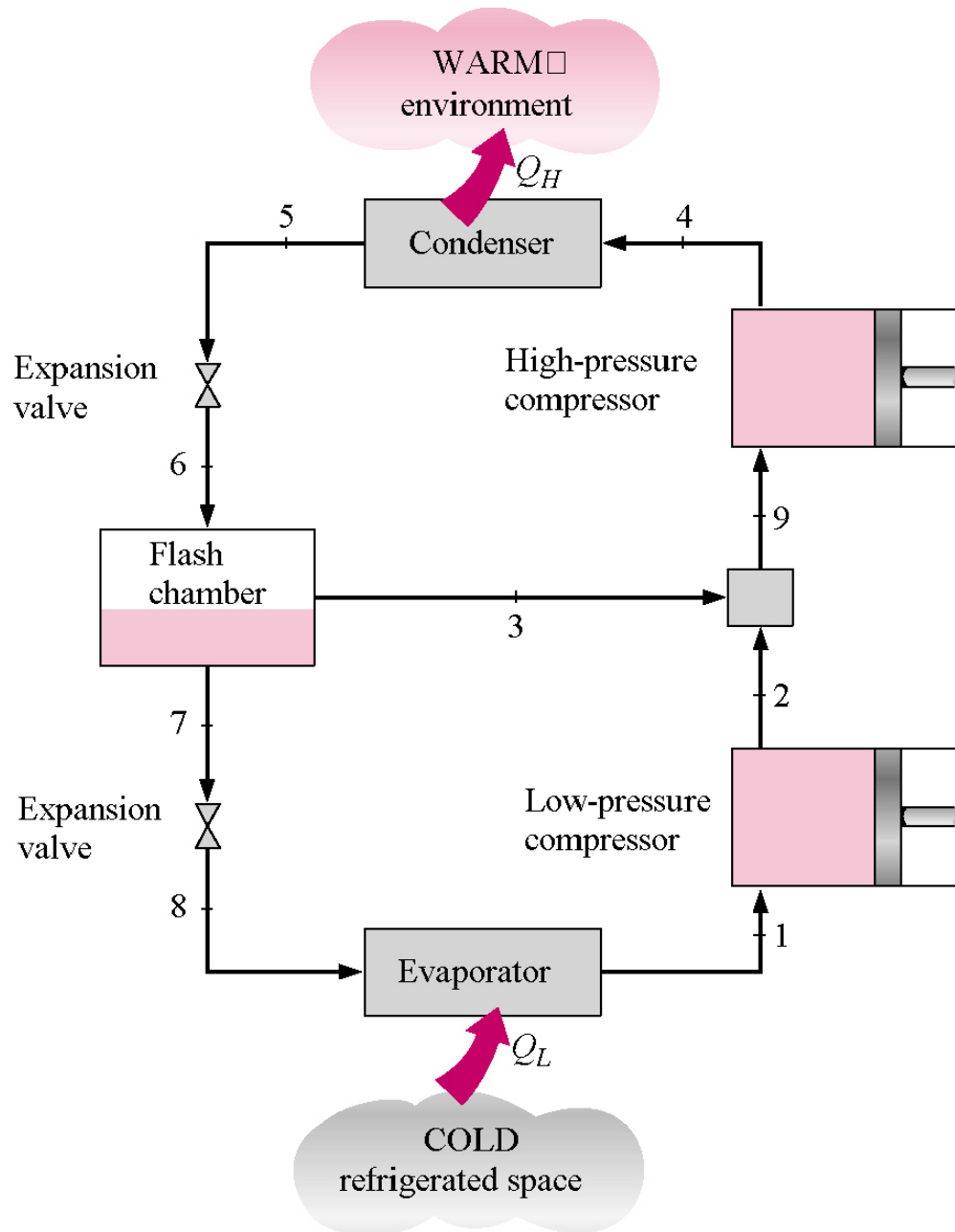
Sistemas de refrigeração em cascata



Menores temperaturas, maiores coeficientes de desempenho.



Sistema de refrigeração com multi-compressão





1) Considere um ciclo de refrigeração 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.

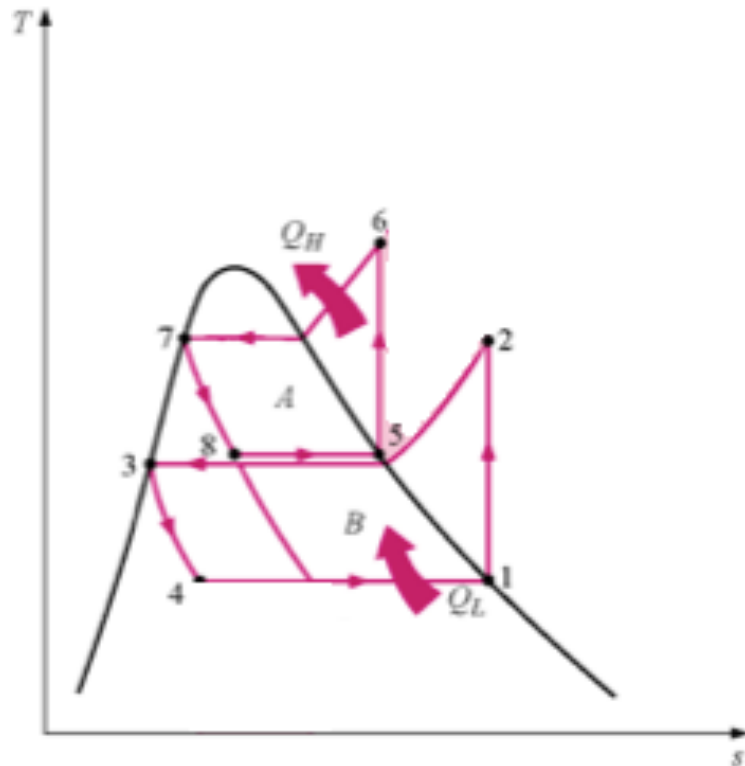


Solução

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).

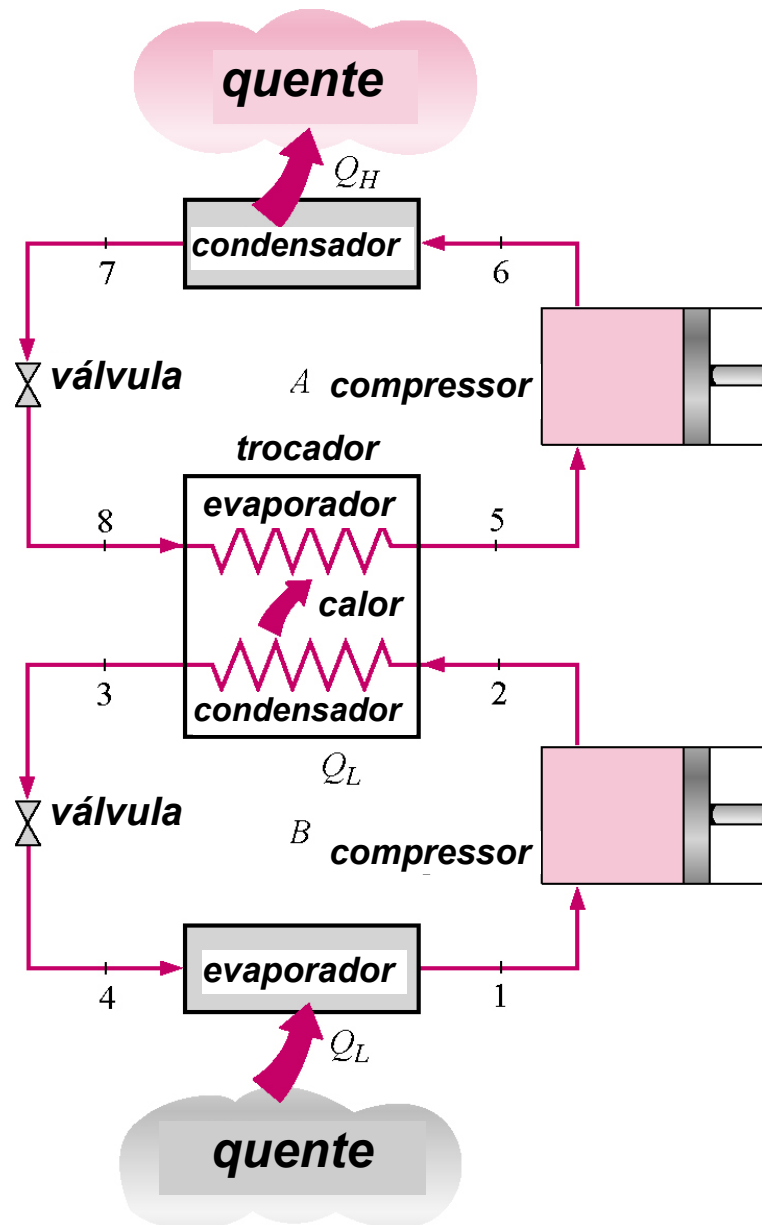
Exercícios



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!

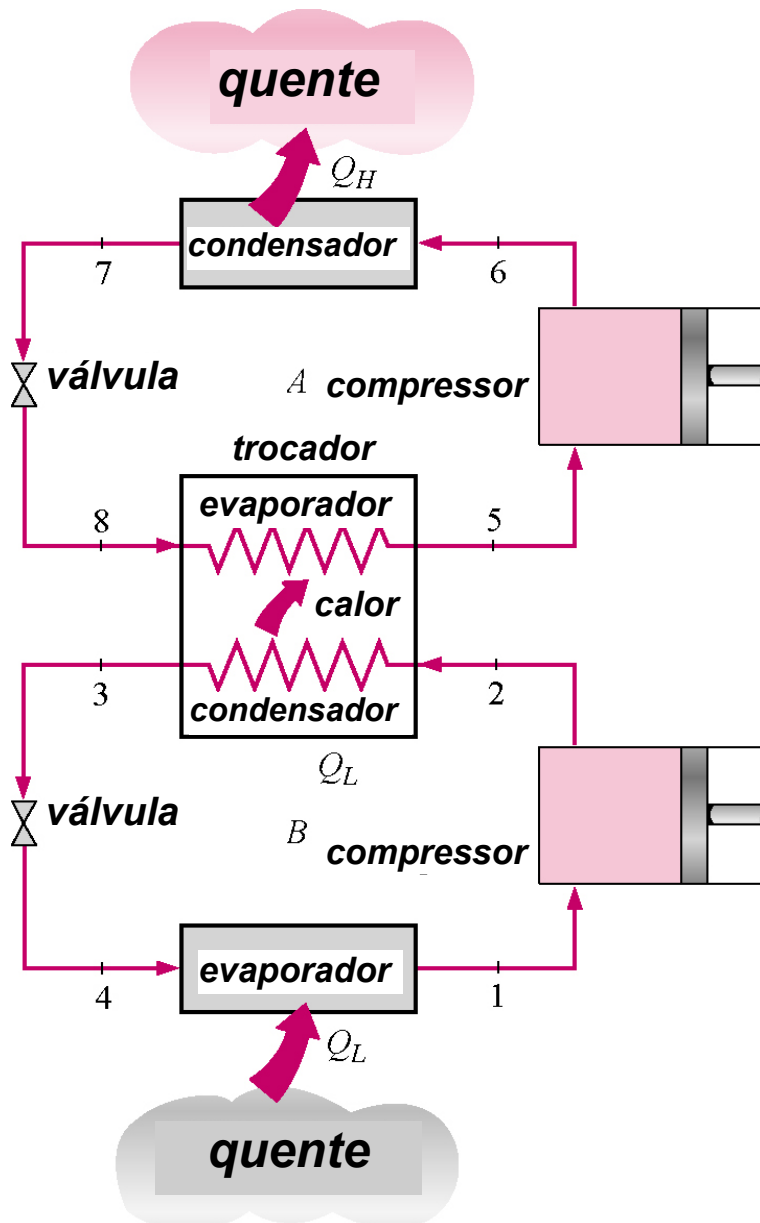
(a) 1ª Lei para o trocador de calor:



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

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

(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 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.

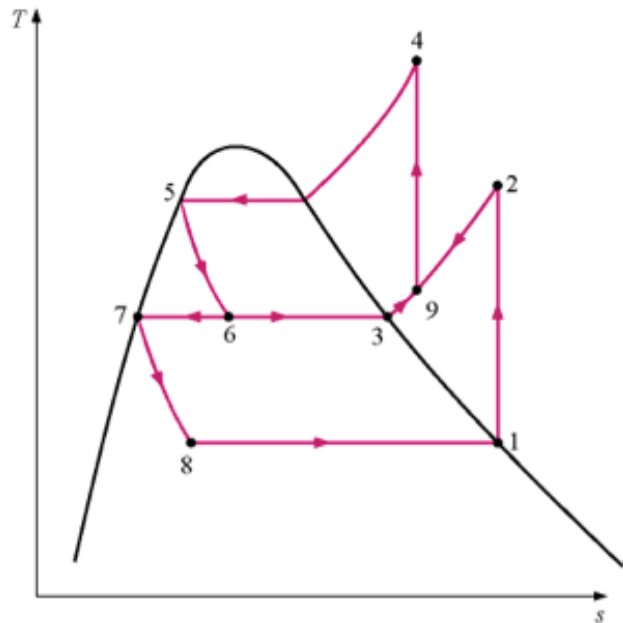


Solução

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).

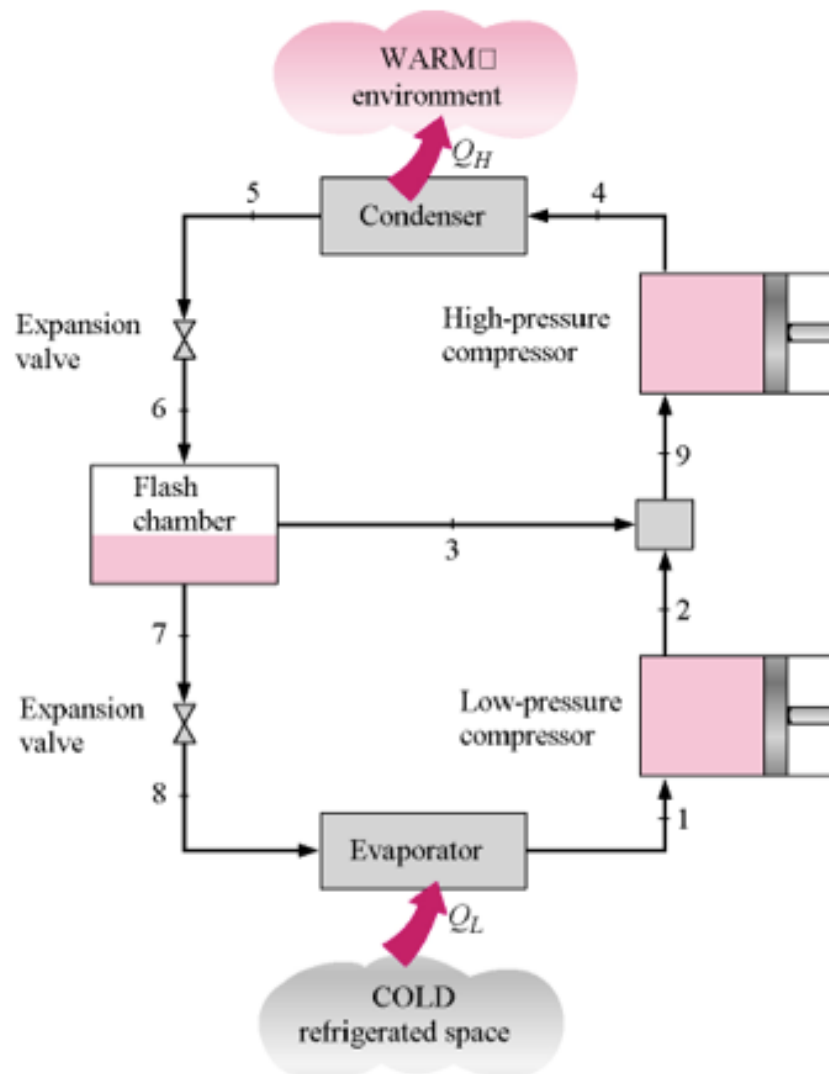
Exercícios



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		

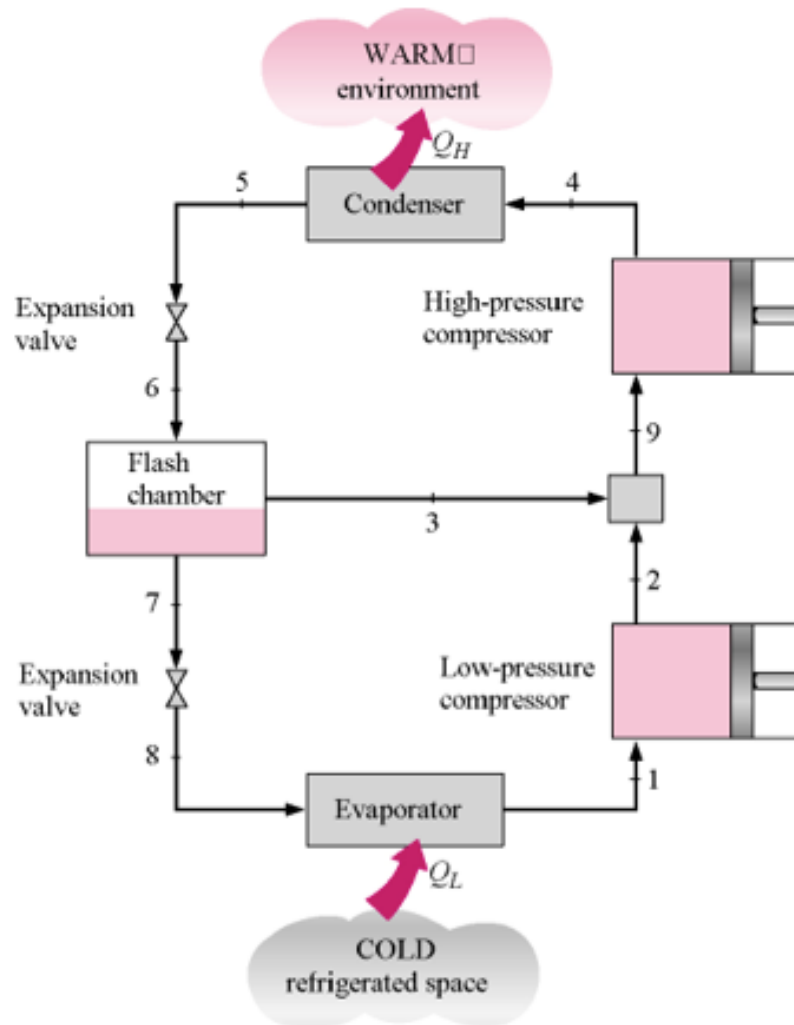
Preencha os demais campos a título de exercício!

(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!