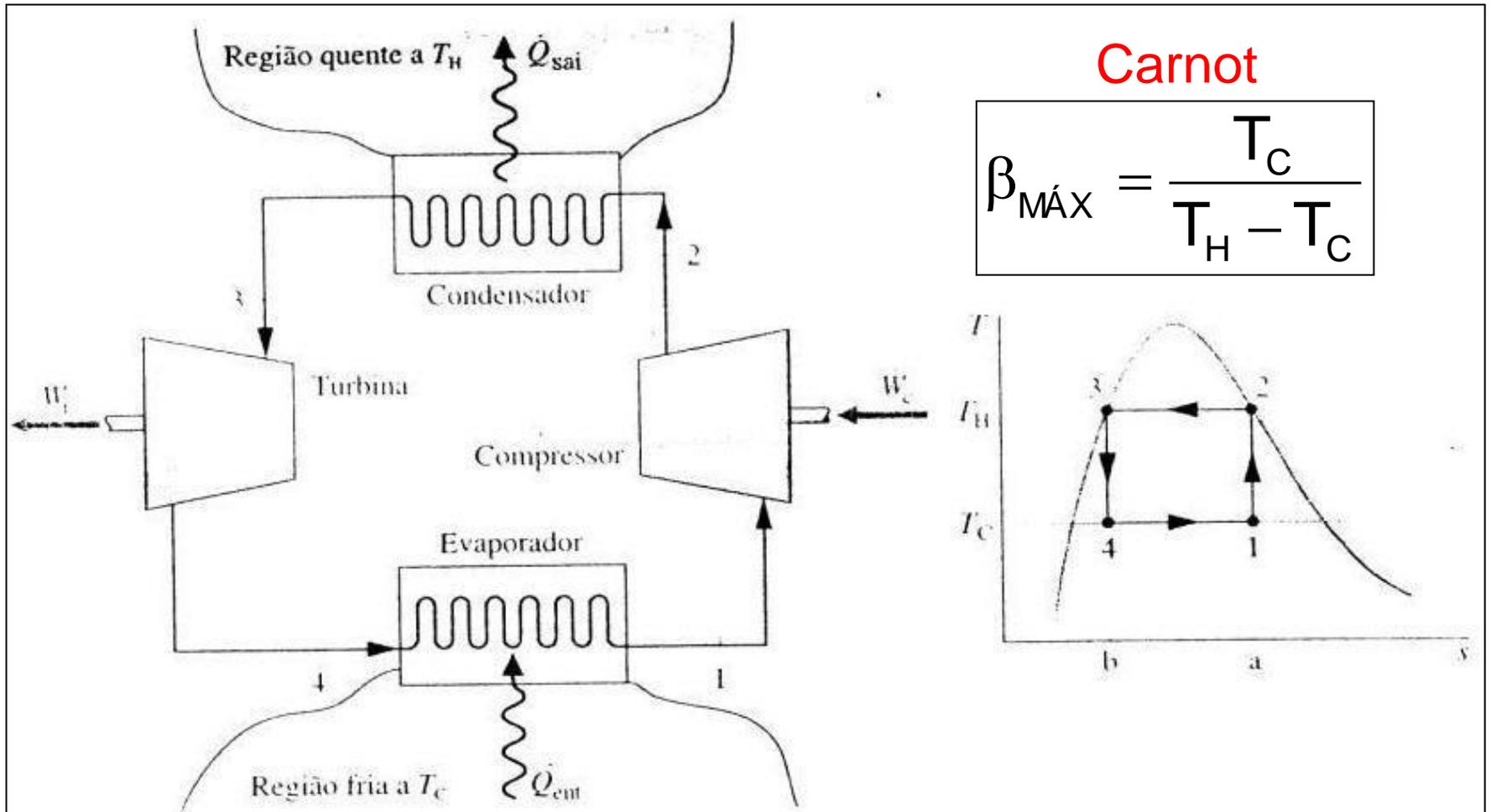
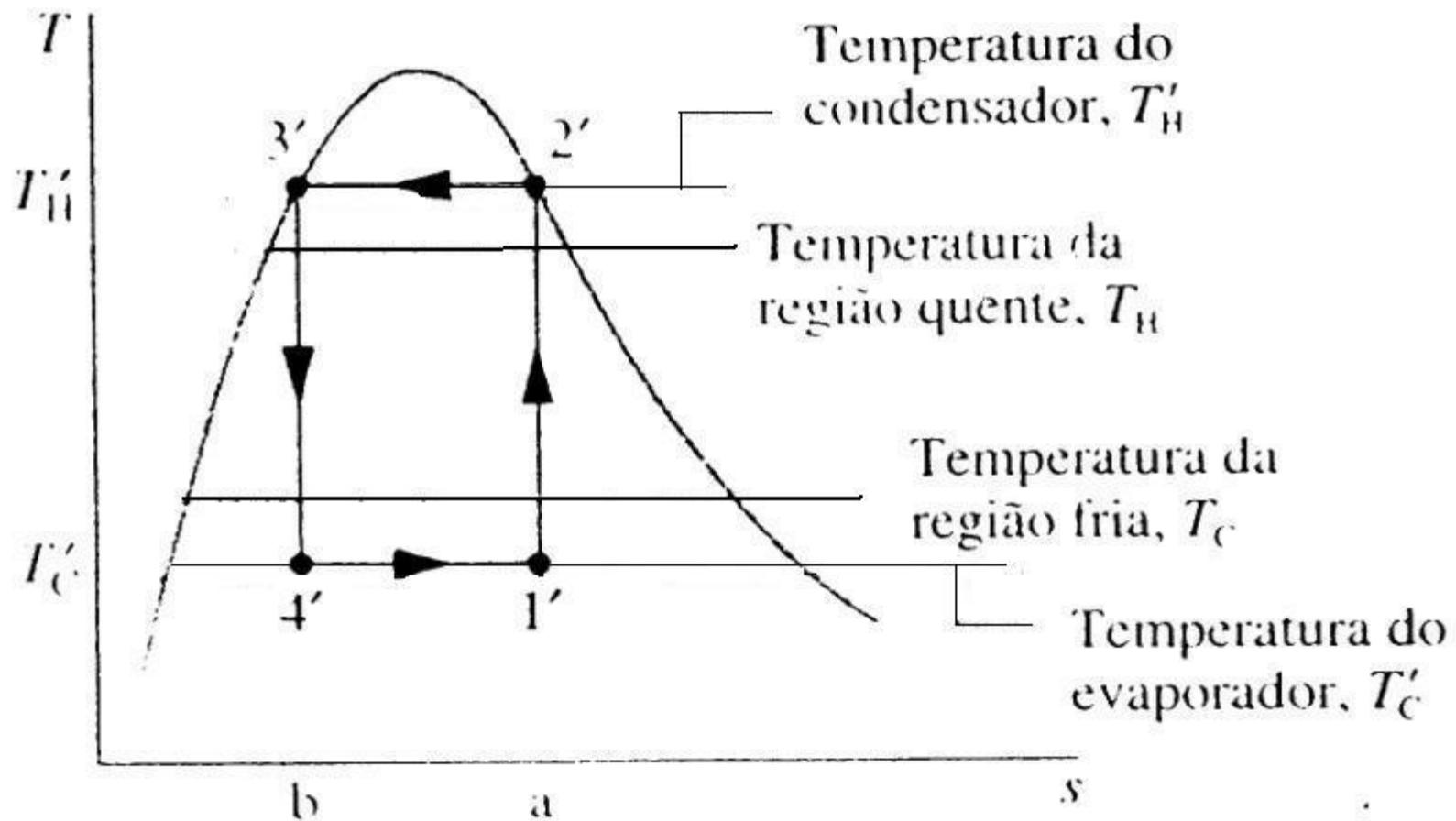


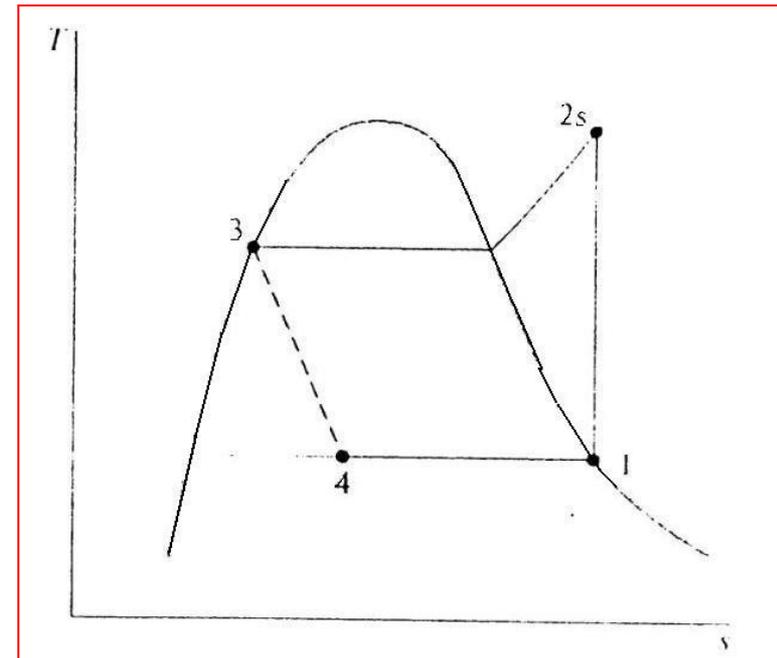
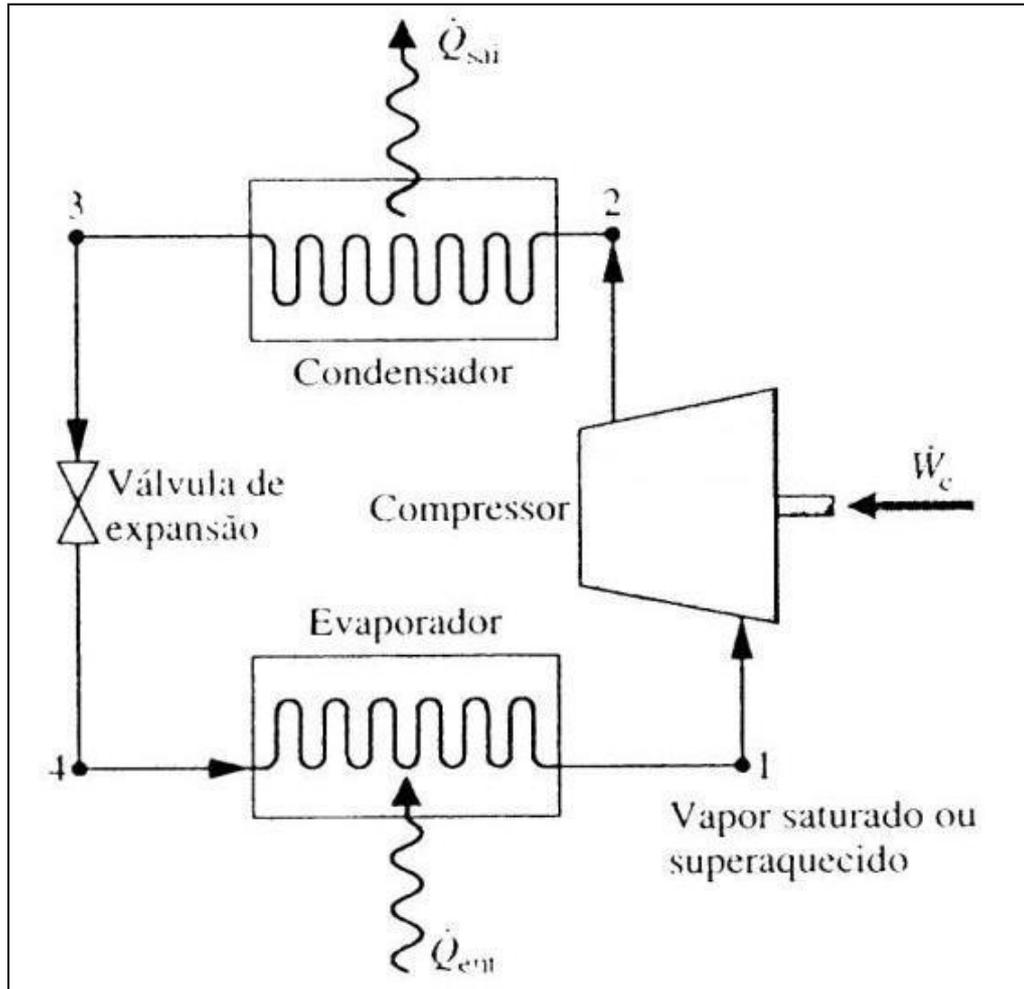
# Sistemas de refrigeração e bombas de calor

## 10.1 – Sistemas de refrigeração a vapor

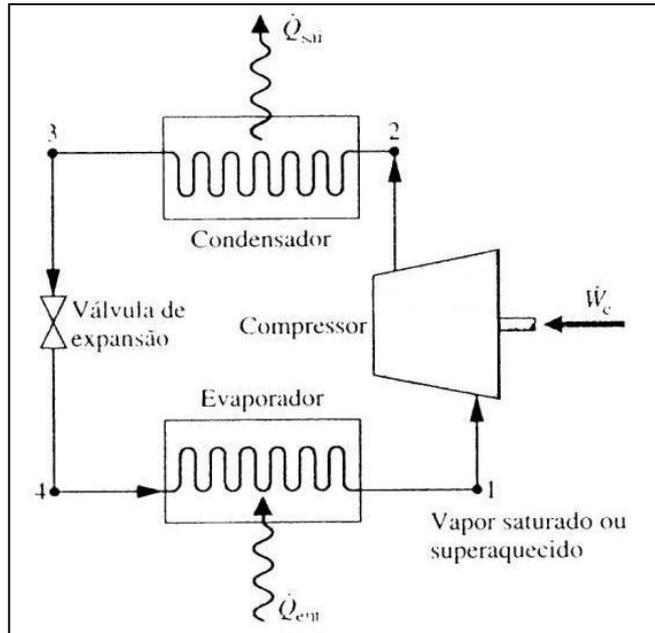




## 10.2 – Analisando sistemas de refrigeração por compressão de vapor



## 10.2.1 – Avaliando trabalho e transferência de calor



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

$\dot{Q}_{\text{entra}} =$   
Capacidade frigorífica  
[kcal/h] [kW] ....

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

$\dot{W}_c =$   
Potência de compressão  
[kW] ....

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

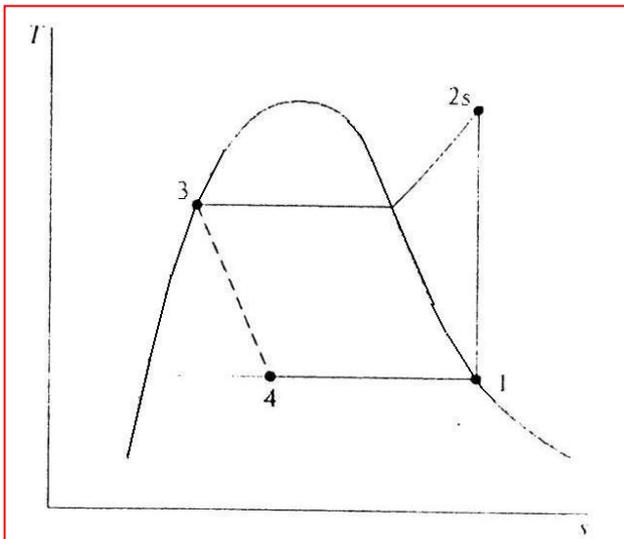
$\dot{Q}_{\text{sai}} =$   
Calor rejeitado  
[kcal/h] [kW] ....

$$h_3 = h_4$$

Expansão isoentálpica  
(estrangulamento)

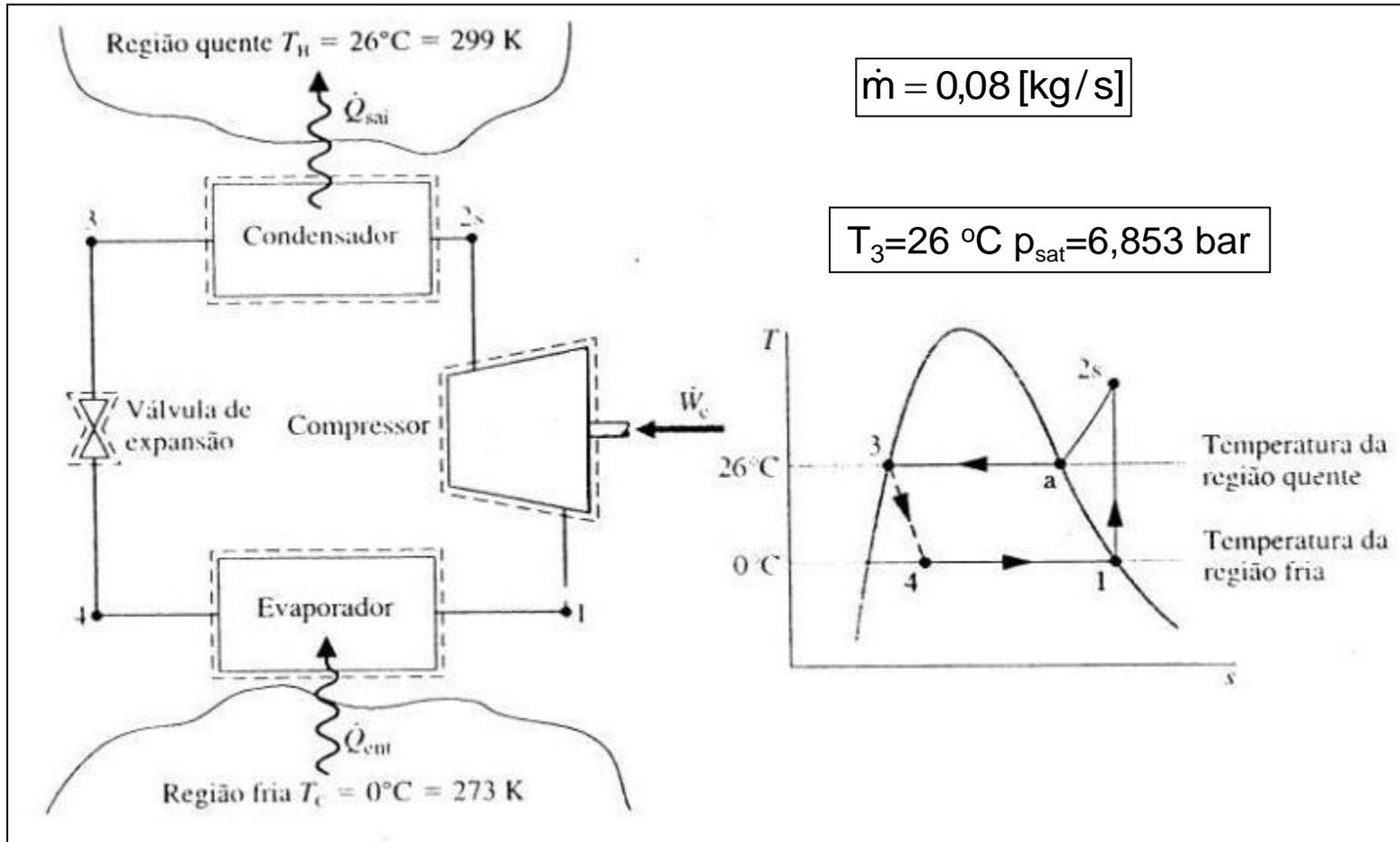
$$\beta = \frac{\dot{Q}_{\text{entra}}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2s} - h_1}$$

Desempenho



## Exemplo 10.1

Refrigerante 134a

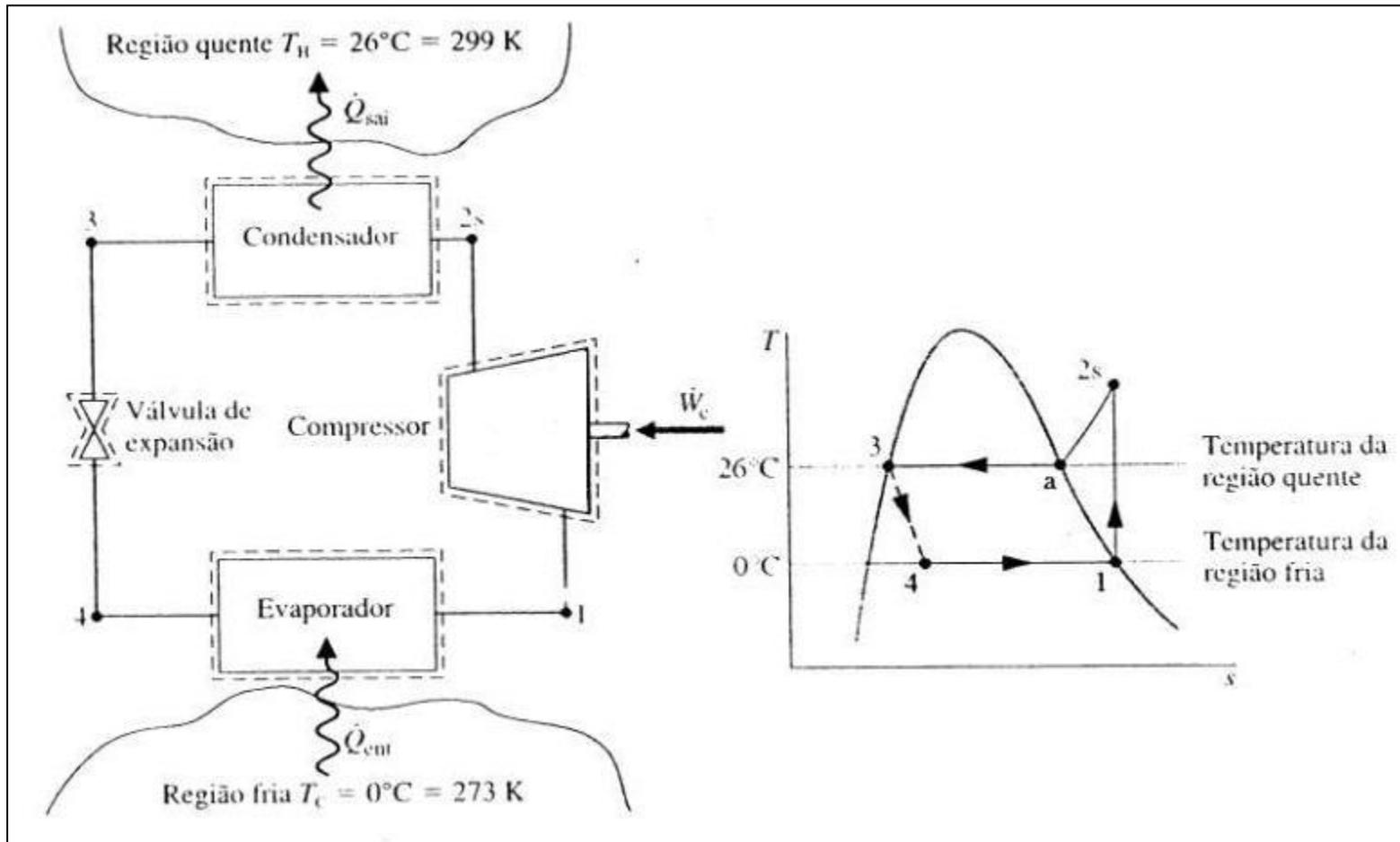


Ponto 1  $\Rightarrow$  vapor saturado  $T=0^\circ\text{C} \Rightarrow h_1=247,23\text{ [kJ/kg]} / s_1=0,9190\text{ [kJ/kg.K]}$

Ponto 2  $\Rightarrow$  vapor super-aquecido /  $s_{2s}=s_1=0,9190\text{ [kJ/kg.K]} \Rightarrow T_{2s}\cong 30^\circ\text{C} \Rightarrow h_{2s}=264,7\text{ [kJ/kg]}$

Ponto 3  $\Rightarrow$  líquido saturado  $\Rightarrow T_3=26^\circ\text{C} \Rightarrow h_3=85,75\text{ [kJ/kg]}$

Ponto 4  $\Rightarrow$  mistura líquido/vapor  $\Rightarrow T_4=0^\circ\text{C} \Rightarrow h_4=85,75\text{ [kJ/kg]} \Rightarrow x=0,24$



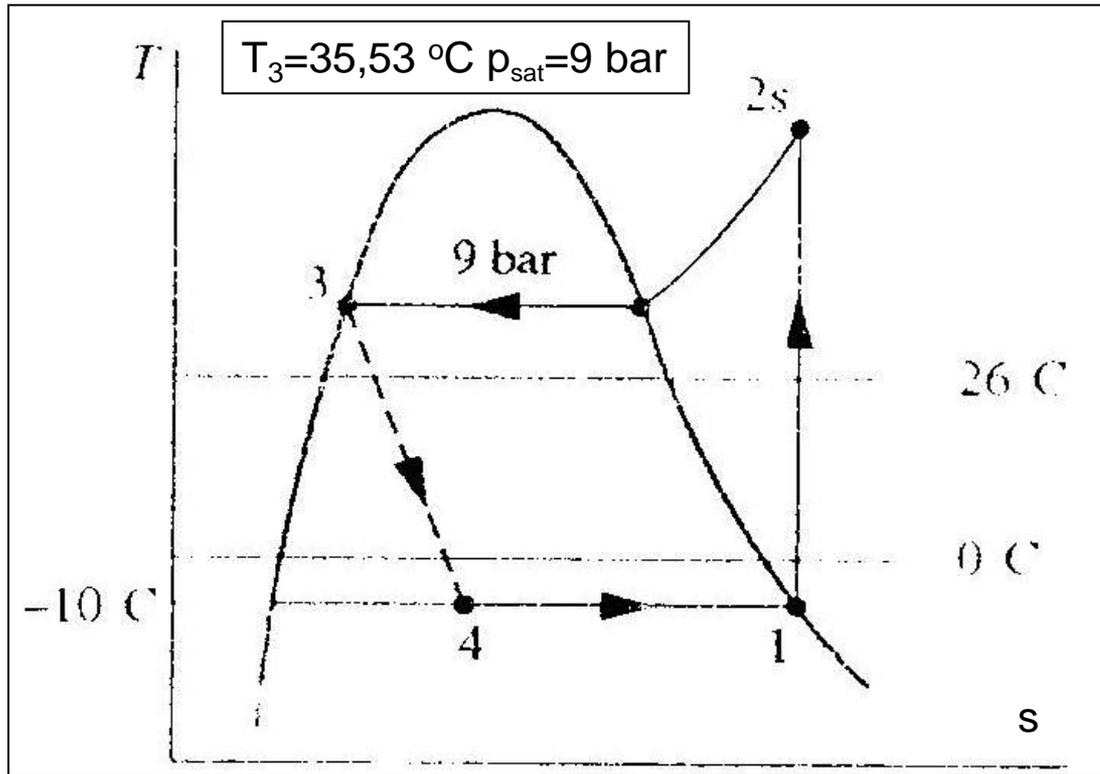
$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0,08(264,7 - 247,23) = 0,08 \times 17,47 = 1,39 \text{ [kW]} = 1,9 \text{ CV}$$

$$\dot{Q}_{entra} = \dot{m}(h_1 - h_4) = 0,08(247,23 - 85,75) = 0,08 \times 161,48 = 12,91 \text{ [kW]}$$

$$\beta = 12,91 / 1,39 = 9,24$$

$$\beta_{M\acute{A}X} = 273 / (299 - 273) = 10,5$$

## Exemplo 10.2



$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_{2s} - h_1)$$

$$= 0,08 (272,39 - 241,53)$$

$$= 0,08 \times 30,86 = 2,48 \text{ [kW]} = 3,37 \text{ CV}$$

$$\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$= 0,08 (241,35 - 99,56)$$

$$= 0,08 \times 141,79 = 11,34 \text{ [kW]}$$

$$\beta = 11,34 / 2,48 = 4,57$$

$$\beta_{\text{MÁX}} = 10,5$$

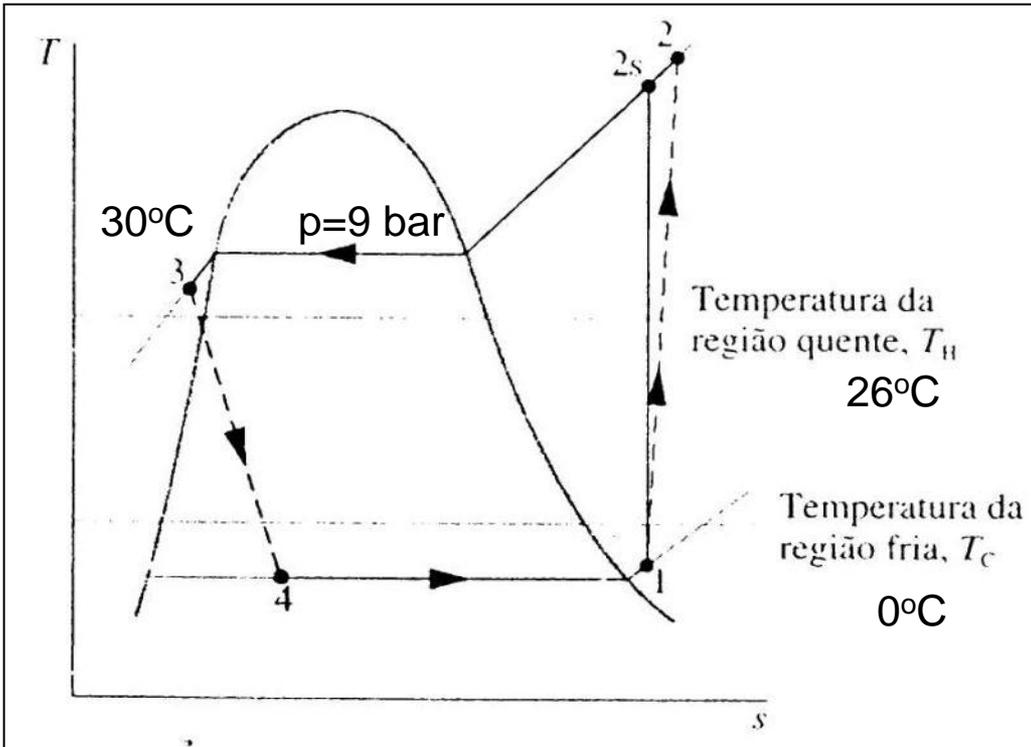
Ponto 1 => vapor saturado  $T = -10 \text{ °C}$  =>  $h_1 = 241,35 \text{ [kJ/kg]}$  /  $s_1 = 0,9253 \text{ [kJ/kg.K]}$

Ponto 2 => vapor super-aquecido /  $s_{2s} = s_1 = 0,9253 \text{ [kJ/kg.K]}$  =>  $T_{2s} \cong 42 \text{ °C}$  =>  $h_{2s} = 272,39 \text{ [kJ/kg]}$

Ponto 3 => líquido saturado =>  $T_3 = 35,53 \text{ °C}$  =>  $h_3 = 99,56 \text{ [kJ/kg]}$

Ponto 4 => mistura líquido/vapor =>  $T_4 = -10 \text{ °C}$  =>  $h_4 = 99,56 \text{ [kJ/kg]}$

### Exemplo 10.3



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

$$= 0,08 (280,15 - 241,53)$$

$$= 0,08 \times 38,62 = 3,09 \text{ [kW]} = 4,2 \text{ CV}$$

$$\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$= 0,08 (241,35 - 91,49)$$

$$= 0,08 \times 149,86 = 11,99 \text{ [kW]}$$

$$\beta = 11,99 / 3,09 = 3,87$$

$$\beta_{\text{MÁX}} = 10,5$$

Ponto 1 => vapor saturado  $T = -10 \text{ °C} \Rightarrow h_1 = 241,35 \text{ [kJ/kg]} / s_1 = 0,9253 \text{ [kJ/kg.K]}$

Ponto 2s => vapor super-aquecido /  $s_{2s} = s_1 = 0,9253 \text{ [kJ/kg.K]} \Rightarrow T_{2s} \cong 42 \text{ °C} \Rightarrow h_{2s} = 272,39 \text{ [kJ/kg]}$

$$\eta_c = \frac{(\dot{W}_c / \dot{m})_s}{\dot{W}_c / \dot{m}} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \quad 0,8 = \frac{272,39 - 241,35}{h_2 - 241,35} \Rightarrow h_2 = 280,15 \text{ [kJ/kg]}$$

Ponto 3 => líquido comprimido  $\Rightarrow T_3 = 30 \text{ °C} \Rightarrow h_3 = 91,49 \text{ [kJ/kg]}$

Ponto 4 => mistura líquido/vapor  $\Rightarrow T_4 = -10 \text{ °C} \Rightarrow h_4 = 91,49 \text{ [kJ/kg]}$

## 10.3 – Propriedade dos fluidos refrigerantes

1940 a 1990 - Fluidos refrigerantes --- CFCs => Afetam a camada de ozônio

Refrigerante 12 –  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  é um exemplo

Atualmente - Fluidos refrigerantes --- HFCs e **HCFcs**  
=> Afetam menos a camada de ozônio

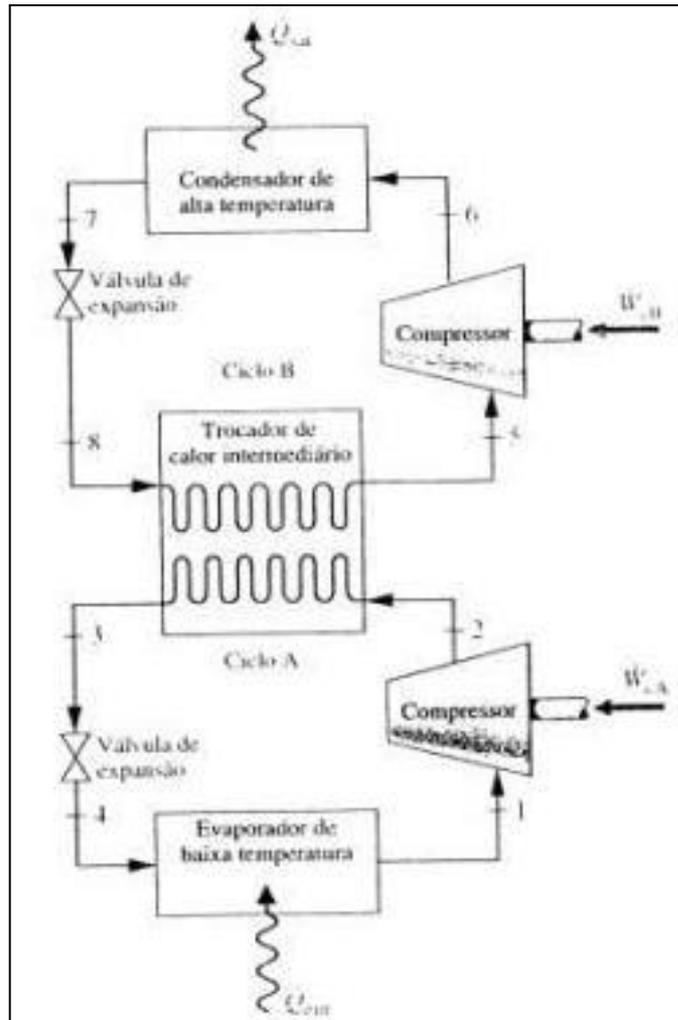
Refrigerante 134a –  $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$  é um exemplo de HFCs

Refrigerante 22 –  $\text{CHClF}_2$  é um exemplo de HCFCs

Amônia –  $\text{NH}_3$

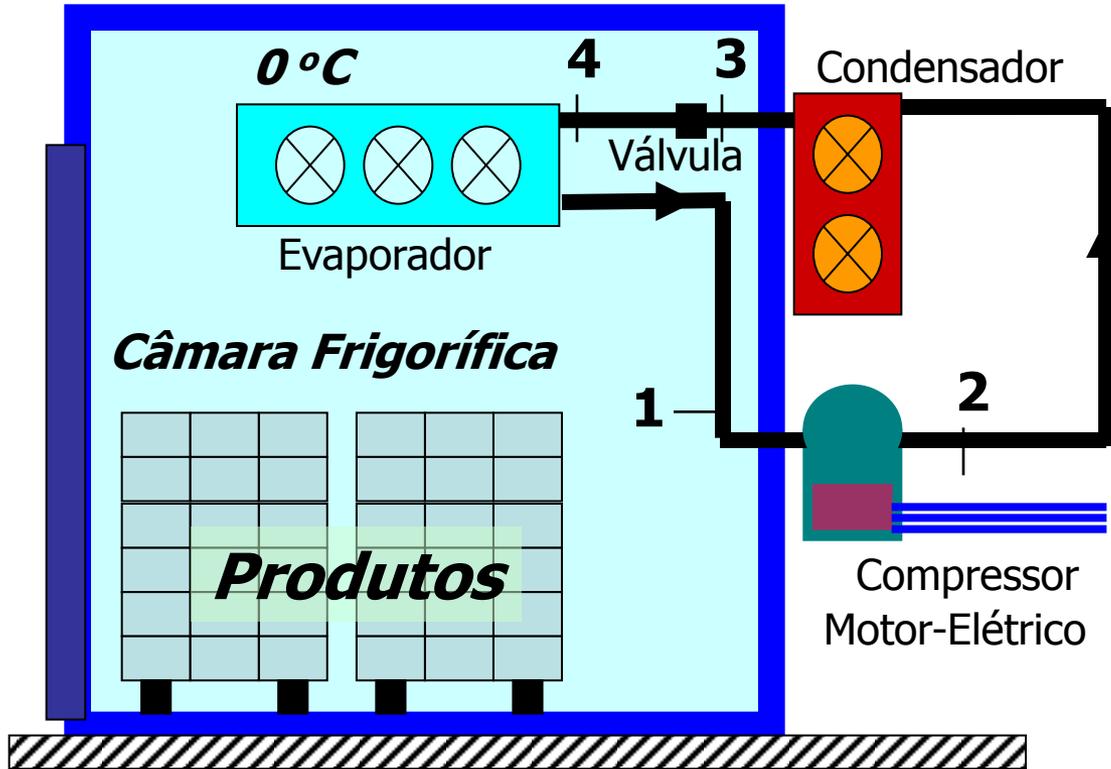
# 10.4 – Sistema de compressão em cascata e multiestágios

## 10.4.1 – Sistema de compressão em cascata

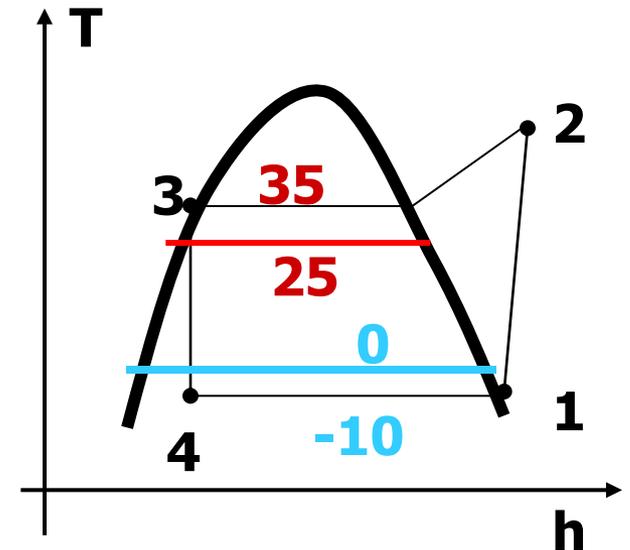


# Circuito de refrigeração simples

*Temperatura ambiente a 25 °C*



## Diagrama T-h





# Circuito de refrigeração de dupla expansão

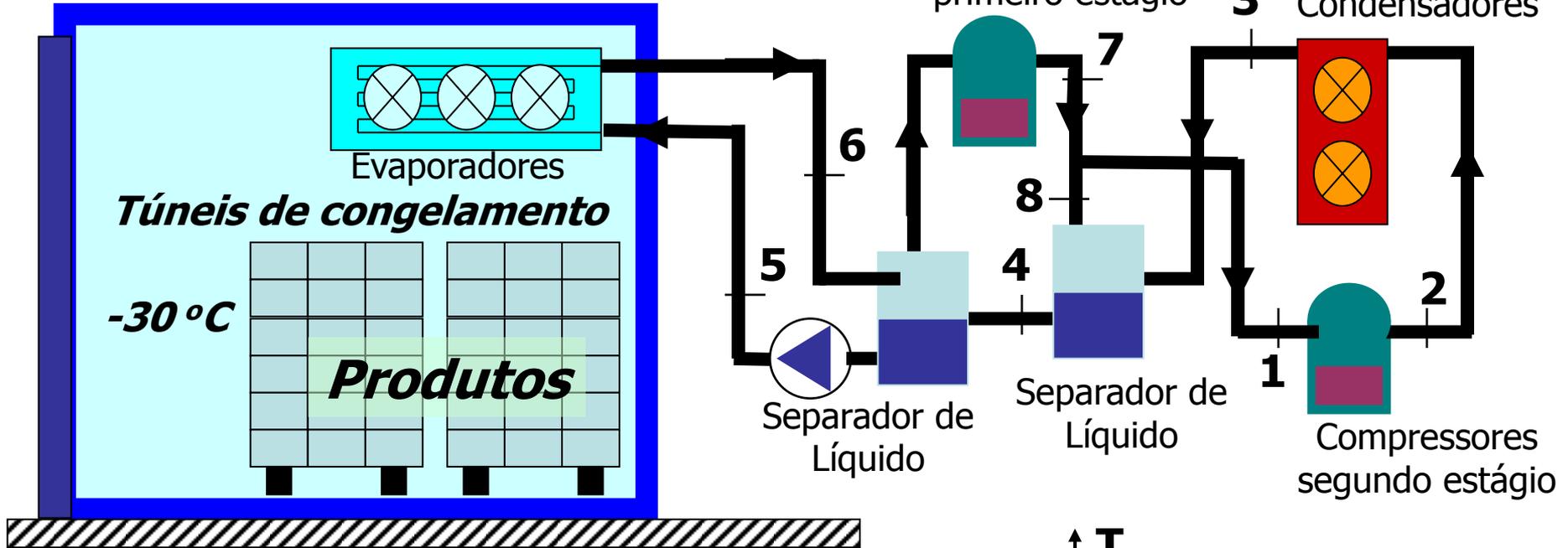
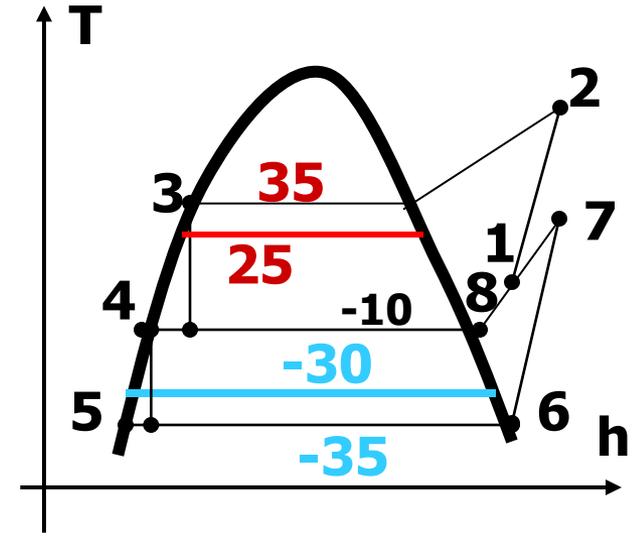
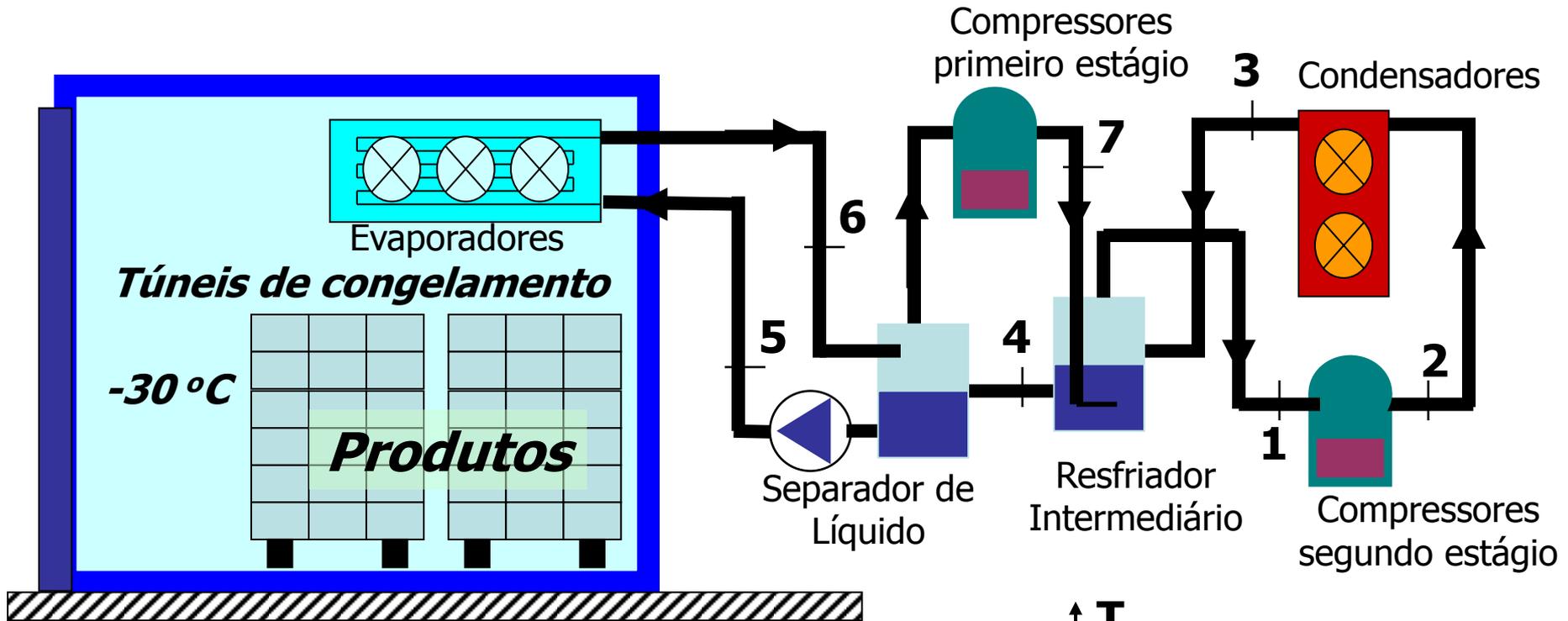


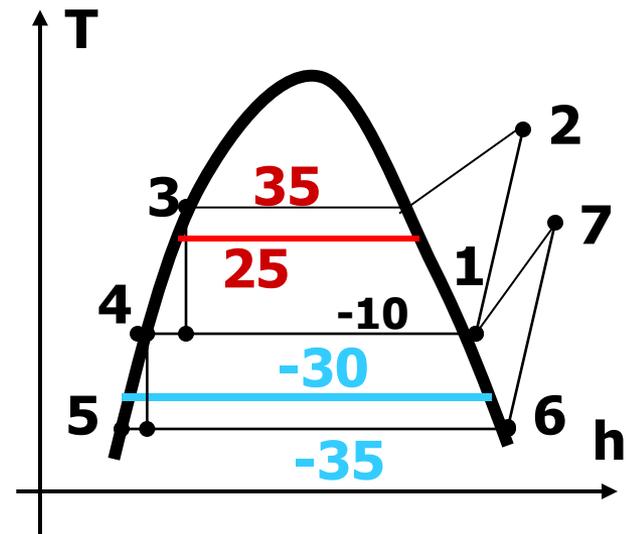
Diagrama T-h



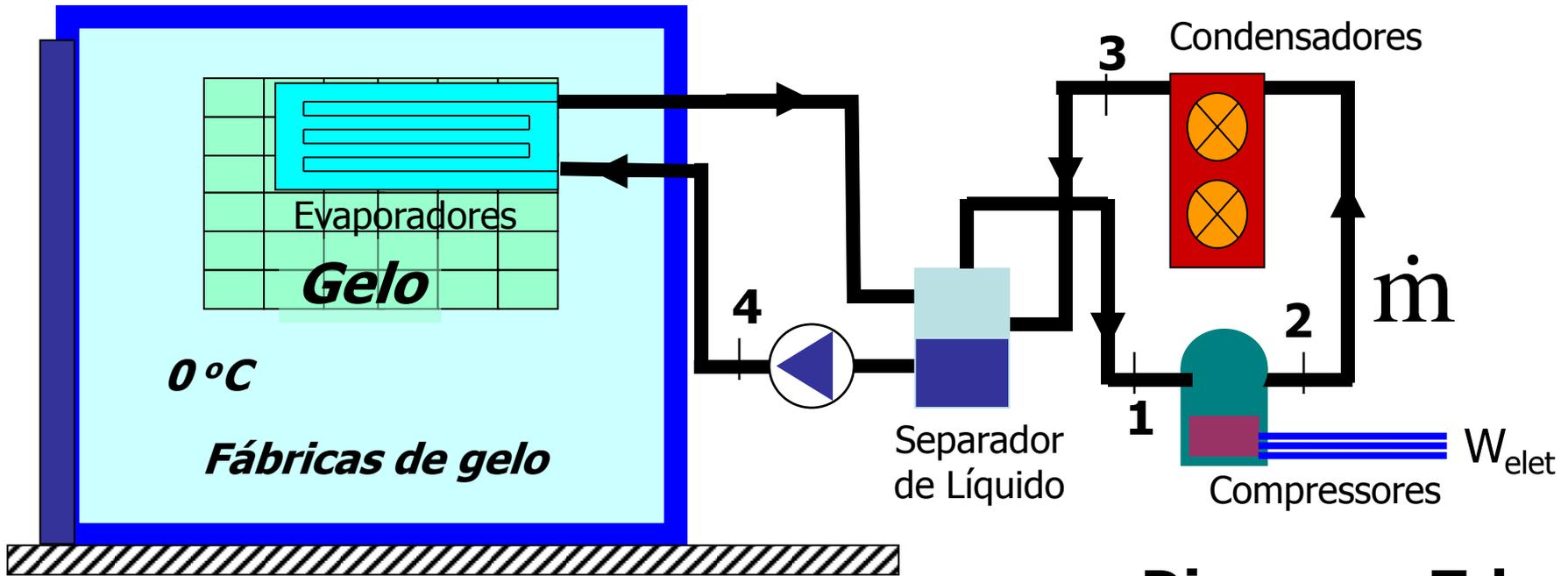
# *Circuito de refrigeração de dupla expansão com resfriador intermediário*



**Diagrama T-h**



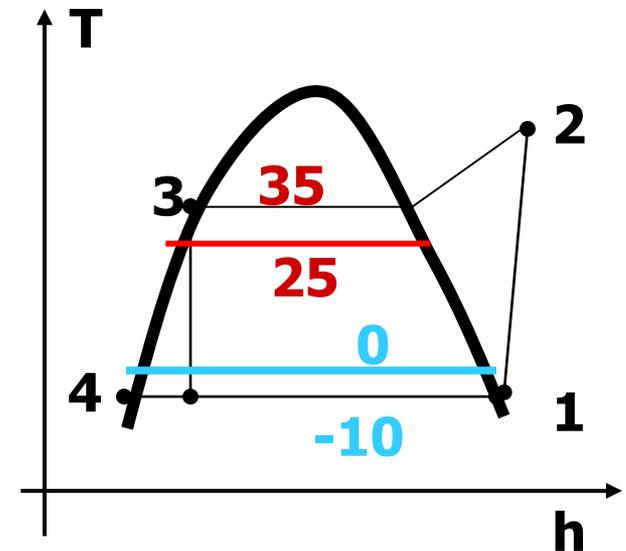
## ***Coeficiente de performance:***



***Coeficiente de performance é a relação entre o efeito frigorífico e a potência elétrica fornecida aos compressores em regime de temperatura específico:***

$$\text{COP} = Q_{\text{evap}} / W_{\text{elet}}$$

## **Diagrama T-h**



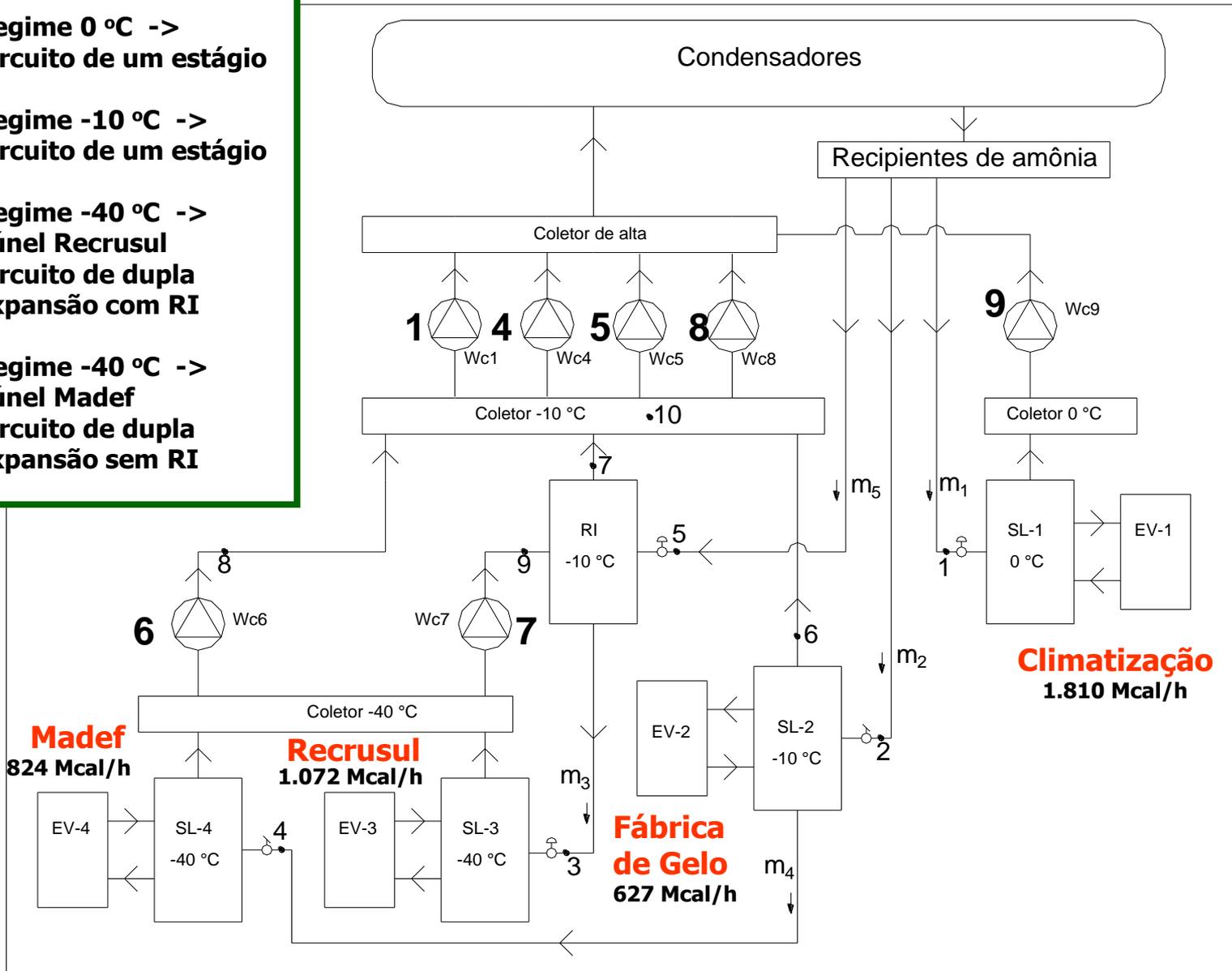
# Circuito de Refrigeração

**Regime 0 °C ->  
Circuito de um estágio**

**Regime -10 °C ->  
Circuito de um estágio**

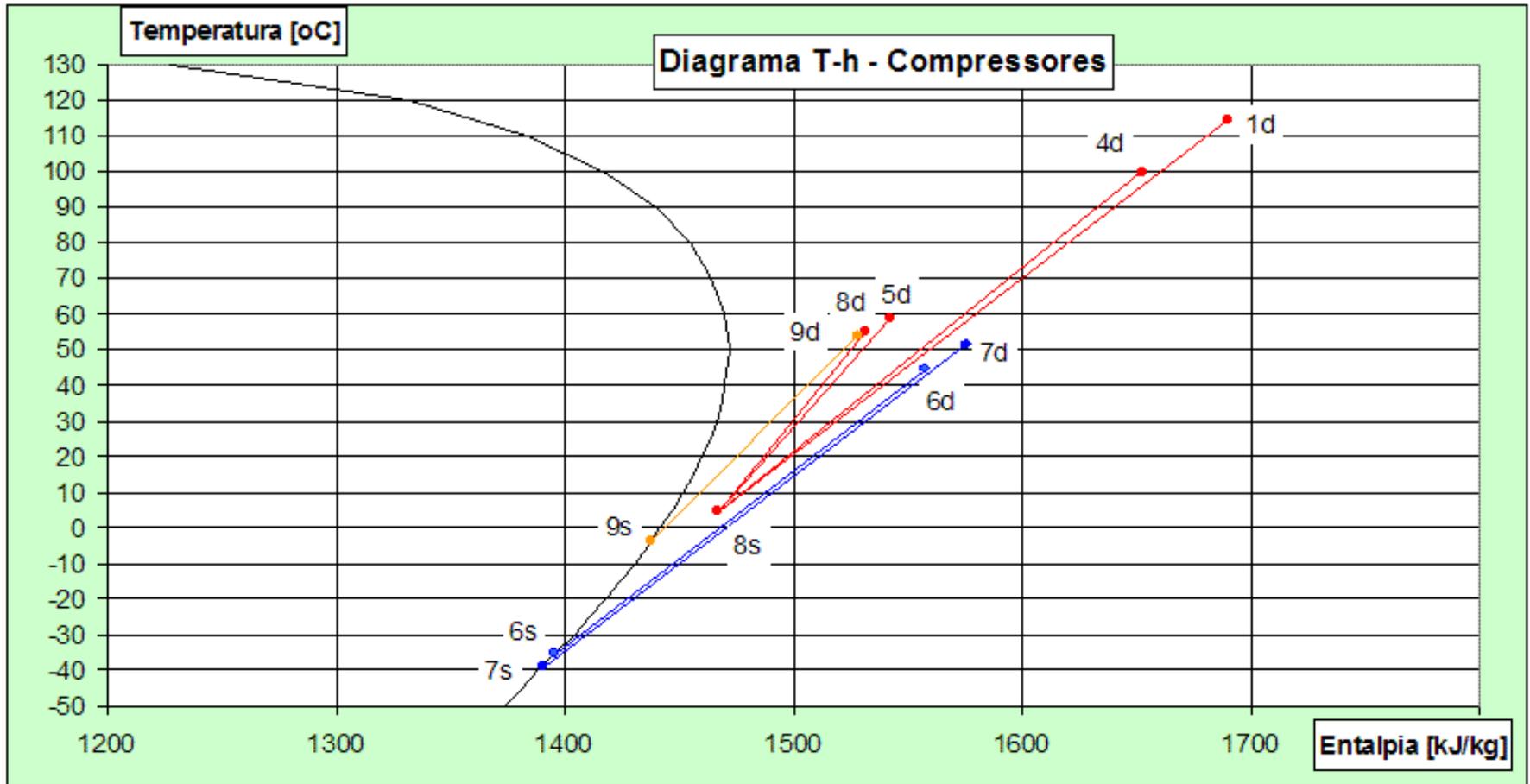
**Regime -40 °C ->  
Túnel Recrusul  
Circuito de dupla  
expansão com RI**

**Regime -40 °C ->  
Túnel Madef  
Circuito de dupla  
expansão sem RI**



# Medições: Características termodinâmicas do Circuito

## Compressores



# **Medições realizadas: Pontos de medição de vazão**

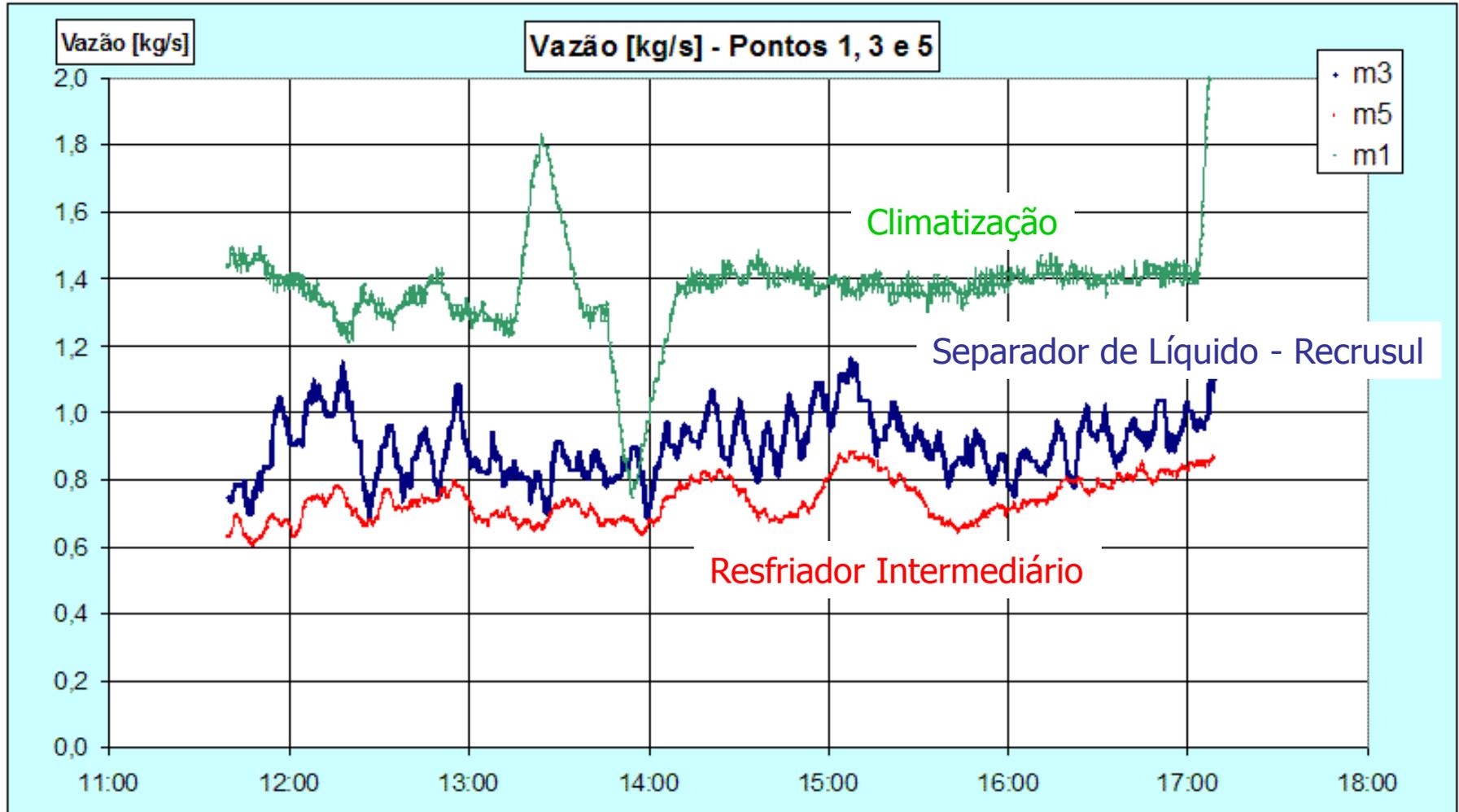
Ponto	(pol.)	Tipo de controle	Localização
1	3"	Válvula solenóide	Separador de líquido S1
2	3"	Bóia mecânica	Separador de líquido S2
3	3"	Válvula solenóide	Separador de líquido S3
5	3"	Válvula solenóide	Resfriador intermediário



# Medições realizadas:

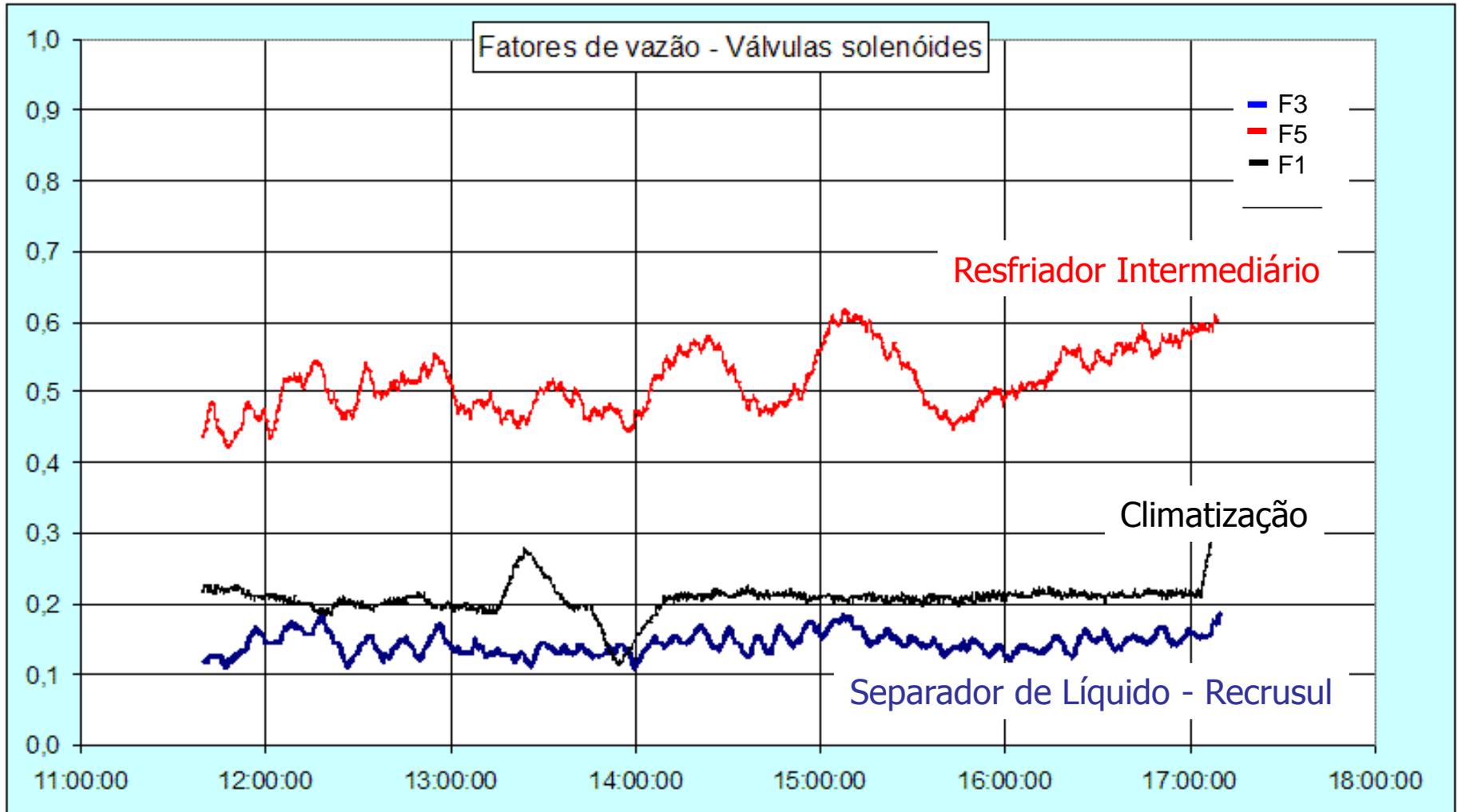
# Vazão

$$m = F \cdot \rho \cdot V \cdot A$$



# Medições realizadas:

# Fator de vazão das válvulas



# 10.5 – Sistema de refrigeração por absorção

