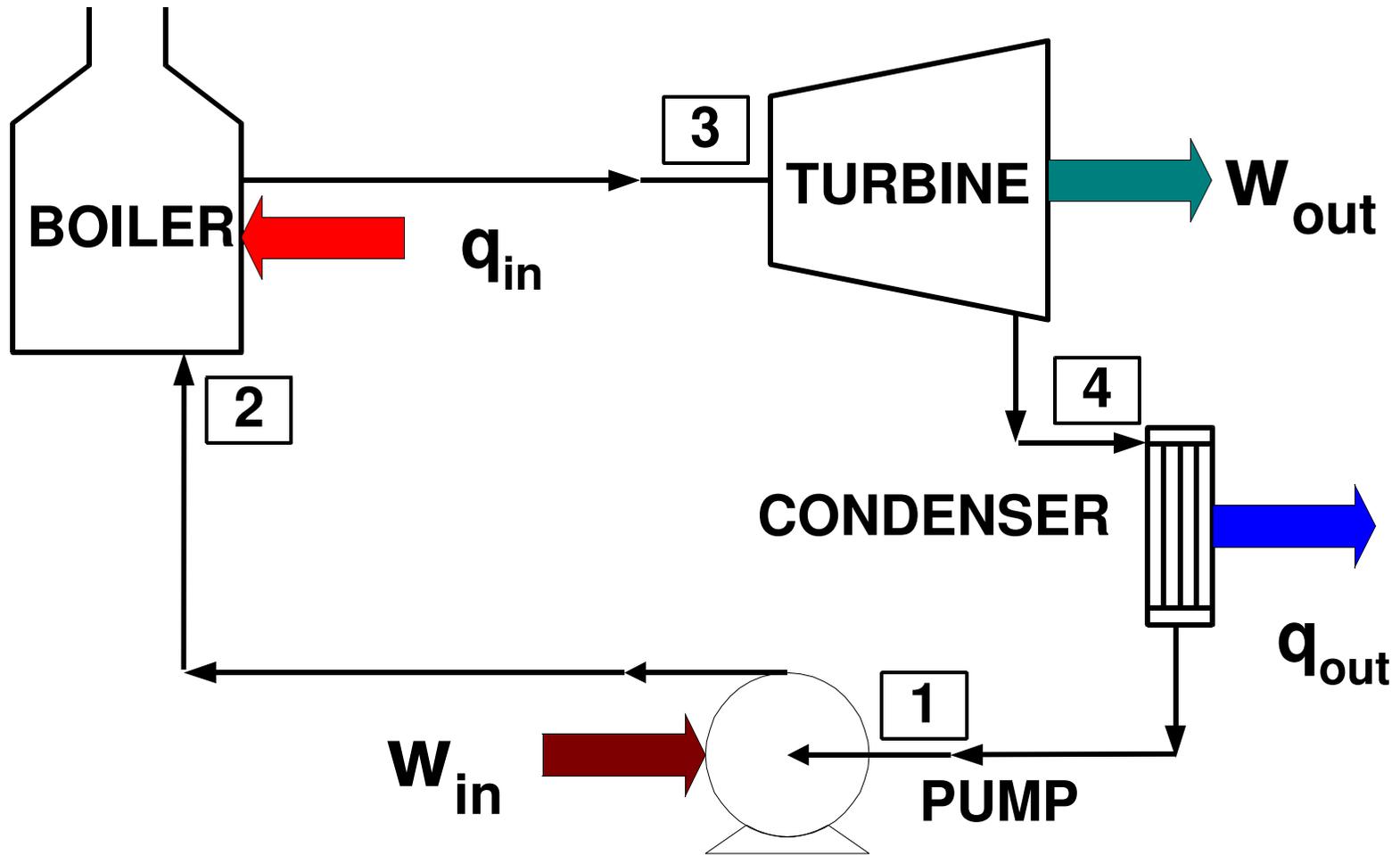
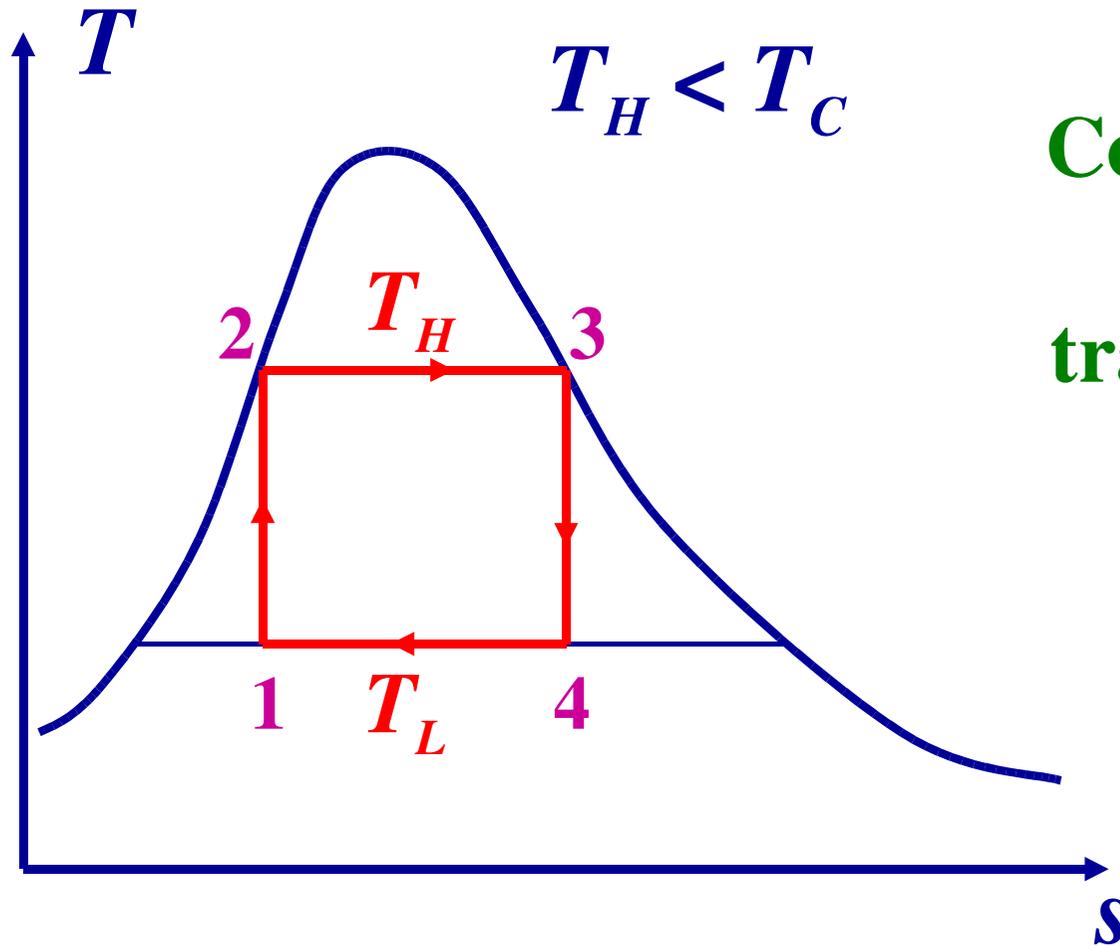


# **Ciclos de Potência a vapor**

## **Ciclo Rankine**



# Ciclo de Carnot



**Compressor e  
turbina  
trabalham na  
região  
bifásica!**

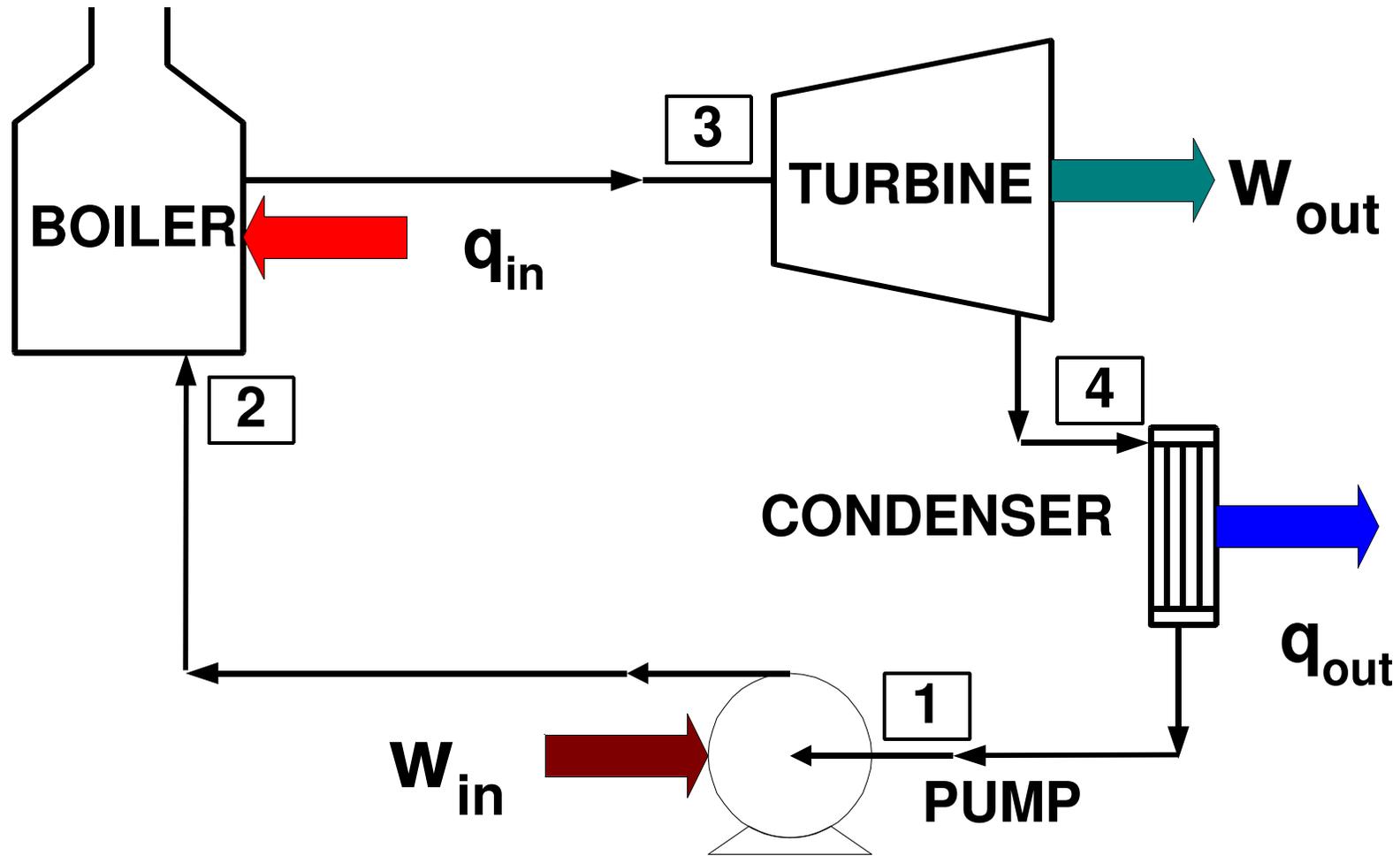
# Ciclo de Carnot

**O ciclo de Carnot não é um modelo adequado para os ciclos de potência a vapor reais, pois ele não pode ser aproximado na prática**

# Ciclo Rankine

- ▶ **Modelo ideal de ciclo para ciclos de potência a vapor reais. Ele é composto de 4 processos internamente reversíveis:**
- ▶ **1-2 compressão adiabática reversível (isentrópica) na bomba**
- ▶ **2-3 aquecimento a pressão constante na caldeira.**
- ▶ **3-4 expansão adiabática reversível (isentrópica) na turbina**
- ▶ **4-1 rejeição de calor a pressão constante no condensador**

# Componentes básicos



# Componentes básicos do ciclo Rankine

- ▶ **A primeira lei em R.P. é aplicada aos 4 principais dispositivos do ciclo:**
  - **Bomba (1 a 2)**
  - **Caldeira [trocador de calor] (2 a 3)**
  - **Turbina (3 a 4)**
  - **Condensador [trocador de calor] (4 a 1)**

# Considerações da análise

## ► Hipóteses freqüentes

- R. P. em todos os componentes
- Energia potencial desprezível
- Em geral, energia cinética desprezível
- Perdas de pressão na caldeira e no condensador desprezíveis
- Bombas e turbinas são considerados isentrópicos

# Bomba

$$\dot{Q}_{\text{pump}} - \dot{W}_{\text{Pump}} = \dot{m} [h_2 - h_1 + \Delta \text{ KE} + \Delta \text{ PE}]$$

**Com as hipóteses citadas:**

$$w_{\text{pump}} = h_1 - h_2 = v (P_1 - P_2)$$

**OBS:** Esta expressão fornece um valor negativo para  $w_p$ . Em ciclos, é prática comum expressar todos os trabalhos e calores em módulo, e então adicioná-los ou subtraí-los dependendo de seu sentido.

# Caldeira

$$\dot{Q}_{\text{boiler}} - \dot{W}_{\text{boiler}} = \dot{m} [h_3 - h_2 + \Delta \text{KE} + \Delta \text{PE}]$$

**Com as hipóteses citadas:**

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

# Turbina

$$\dot{Q}_{\text{turbine}} - \dot{W}_{\text{turbine}} = \dot{m} [h_4 - h_3 + \Delta \text{KE} + \Delta \text{PE}]$$

**Com as hipóteses citadas:**

$$\frac{\dot{W}_{\text{turbine}}}{\dot{m}} = w_{\text{turb}} = h_3 - h_4$$

# Condensador

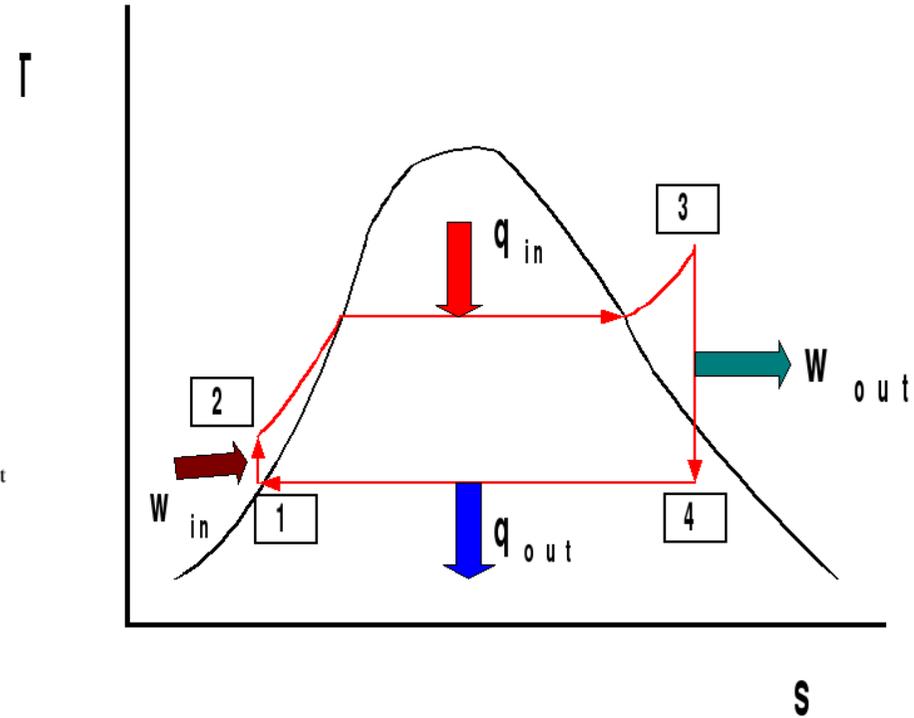
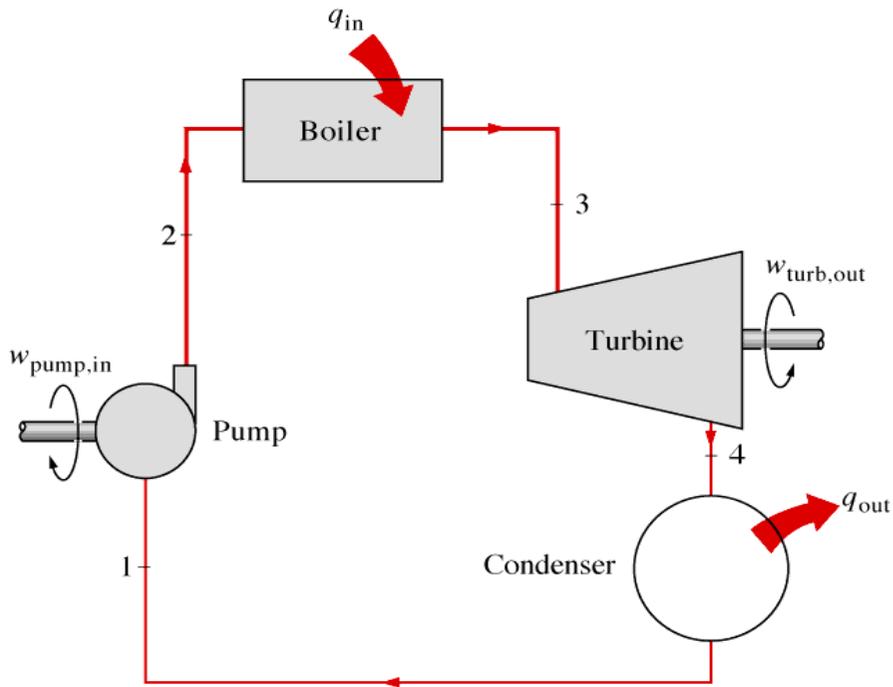
$$\dot{Q}_{\text{cond}} - \dot{W}_{\text{cond}} = \dot{m} \left[ h_1 - h_4 + \Delta \text{KE} + \Delta \text{PE} \right]$$

**Com as hipóteses citadas:**

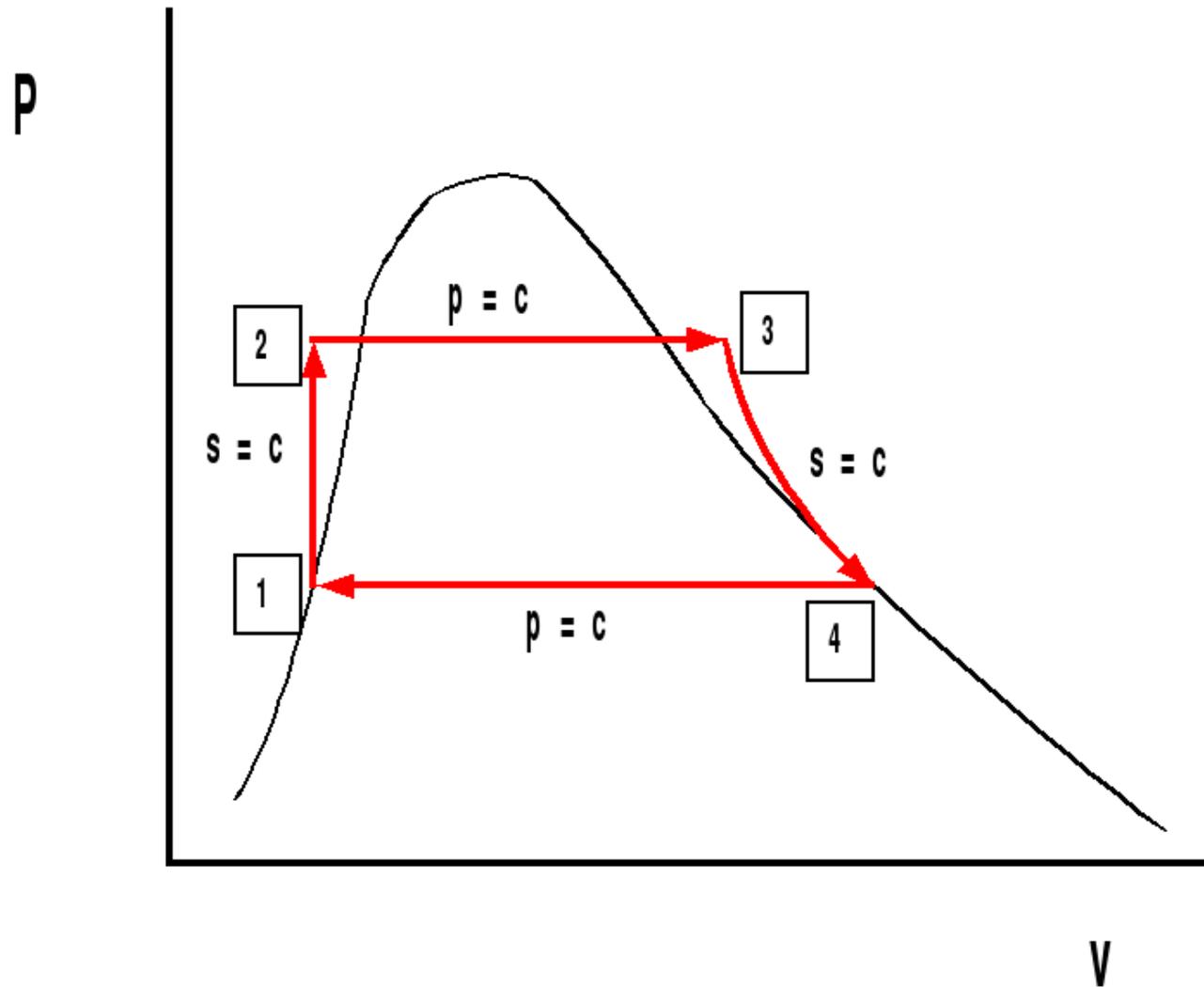
$$\frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{\dot{m}} = q_{\text{cond}} = h_1 - h_4$$

**OBS:** Esta expressão fornece um valor negativo para  $Q_{\text{cond}}$ . Em ciclos, é prática comum expressar todos os trabalhos e calores em módulo, e então adicioná-los ou subtraí-los dependendo de seu sentido.

# Ciclo Rankine: diagrama T-s



# Ciclo Rankine: diagrama P-v



# Com quais parâmetros queremos trabalhar?

=> **Potência líquida ou potência de saída**

## Potência

$$\dot{W}_{\text{out}} = \dot{W}_{\text{tur}} - \dot{W}_{\text{pump}}$$

## Trabalho específico

$$w_{\text{out}} = w_{\text{tur}} - w_{\text{pump}}$$

# Com quais parâmetros queremos trabalhar?

## Eficiência

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

ou

$$\eta = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}}$$

# Eficiência

$$\eta = \frac{w_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$$

$$\eta = \frac{h_3 - h_4 - v(P_2 - P_1)}{h_3 - h_2}$$

# Exemplo

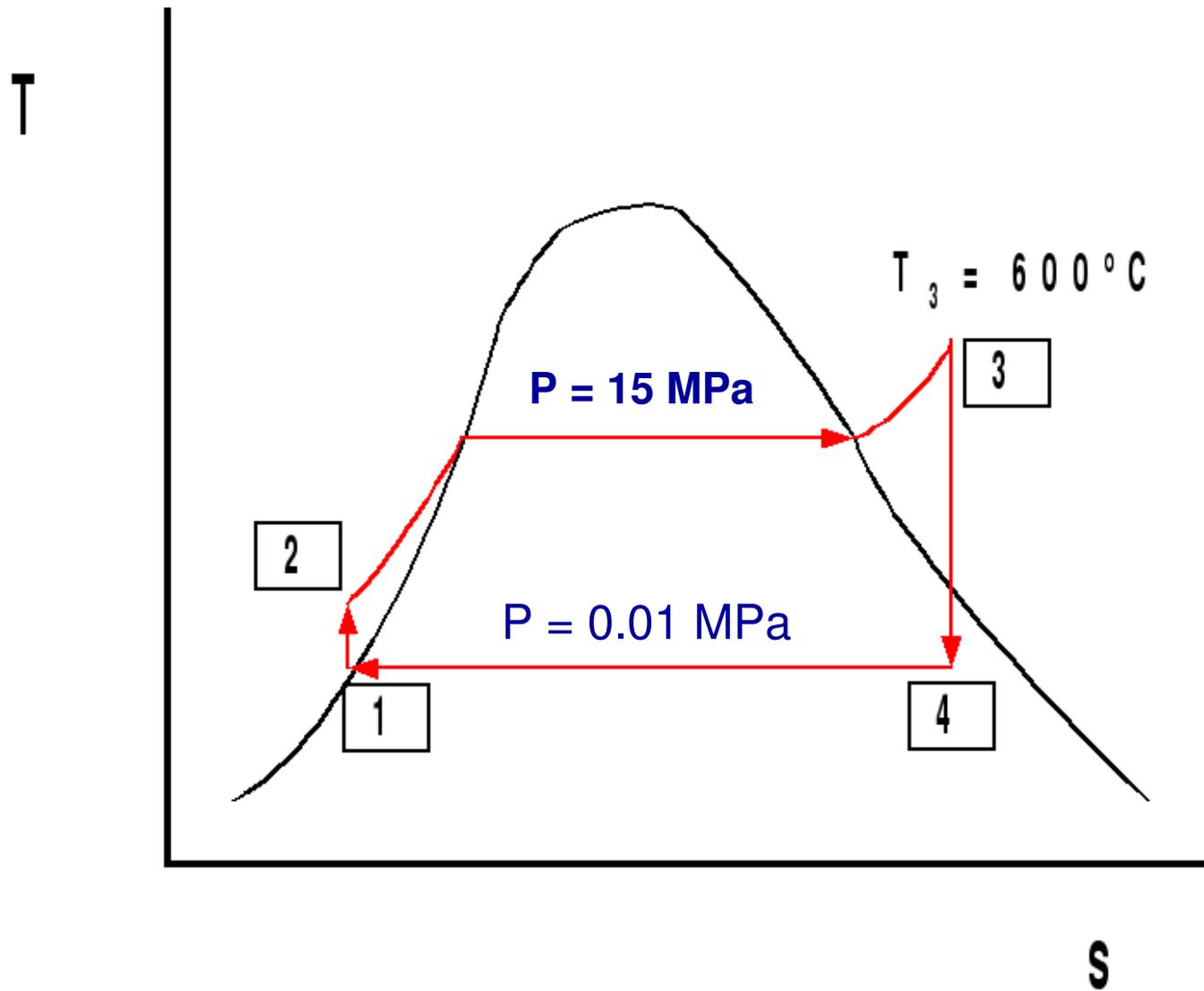
**Um ciclo Rankine tem uma pressão de exaustão na turbina de 0,1 bars. Determine o título do vapor deixando a turbina e a eficiência térmica do ciclo se a pressão de entrada na turbina for de 150 bars e a temperatura de 600°C.**

# Solução

## Considerações:

- Bomba e turbina isentrópicas
- $P_2 = P_3 = 150 \text{ bars} = 15 \text{ MPa}$
- $T_3 = 600^\circ\text{C}$
- $P_4 = P_1 = 0.1 \text{ bars} = 0.01 \text{ MPa}$
- Variações de energia cinética e potencial são desprezíveis

# Diagrama do ciclo



# Propriedades da substância

| State | T (°C) | P(MPa) | v(m <sup>3</sup> /kg) | h(kJ/kg) | s(kJ/kgK) | x    |
|-------|--------|--------|-----------------------|----------|-----------|------|
| 1     |        | 0.01   |                       |          |           | 0    |
| 2     |        | 15     |                       |          |           | n.a. |
| 3     | 600    | 15     | ----                  |          |           |      |
| 4     |        | 0.01   | ----                  |          |           |      |

Bomba (1 a 2) -> **isentrópico (volume cte)**

Caldeira (2 a 3) -> **pressão cte**

Turbina (3 a 4) -> **isentrópico**

Condensador (4 a 1) -> **pressão cte**

# Propriedades da substância

| State | T (°C) | P(MPa) | v(m <sup>3</sup> /kg) | h(kJ/kg) | s(kJ/kgK) | x              |
|-------|--------|--------|-----------------------|----------|-----------|----------------|
| 1     | 45.81  | 0.01   | 0.00101               | 191.83   |           | 0              |
| 2     | 49.42  | 15     | 0.00101               | 206.93   |           | Liq.<br>comp   |
| 3     | 600    | 15     | 0.02491               | 3582.3   | 6.6776    | Super<br>aquec |
| 4     | 45.81  | 0.01   | 12.266                | 2114.9   | 6.6776    | 0.8037         |

# Eficiência

**Eficiência do ciclo:**

$$\eta = \frac{w_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}$$

**logo:**

$$\eta = \frac{w_{\text{turbine}} - w_{\text{pump}}}{q_{\text{in}}}$$

# Trabalho da bomba

$$w_{\text{pump}} = |v (P_1 - P_2)| = |h_1 - h_2|$$

$$w_{\text{pump}} = |(0.00101) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (0.01 - 15) \text{MPa}|$$

$$w_{\text{pump}} = 15.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

# Saída da bomba

**Entalpia na saída:**

$$h_2 = h_1 + w_{\text{pump}}$$

$$h_2 = (191.83 + 15.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 206.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

# Temperatura na saída da bomba

Se a entalpia na saída da bomba é 206.93 KJ/kg, então considere *líquido comprimido* na mesma temperatura do *líquido saturado* com  $h = 206.93$  KJ/kg

Interpolando, temos: 49°C

# Calor na caldeira

$$q_{\text{boiler}} = h_3 - h_2 = (3582.3 - 206.93) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{\text{boiler}} = 3375.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

# Trabalho na turbina

**Isentrópico:**  $s_4 = s_3 = 6.6776 \text{ kJ/kg} \cdot K$

$$\Rightarrow x_4 = 0.8037; \quad h_4 = 2114.9 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{turbine}} = h_3 - h_4 = (3582.3 - 2114.9) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{\text{turbine}} = 1467.4 \text{ kJ/kg}$$

# Eficiência térmica

$$\eta = \frac{w_{\text{turbine}} - w_{\text{pump}}}{q_{\text{in}}}$$

$$\eta = \frac{(1467.4 - 15.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3375.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.430$$

# Características gerais do ciclo Rankine

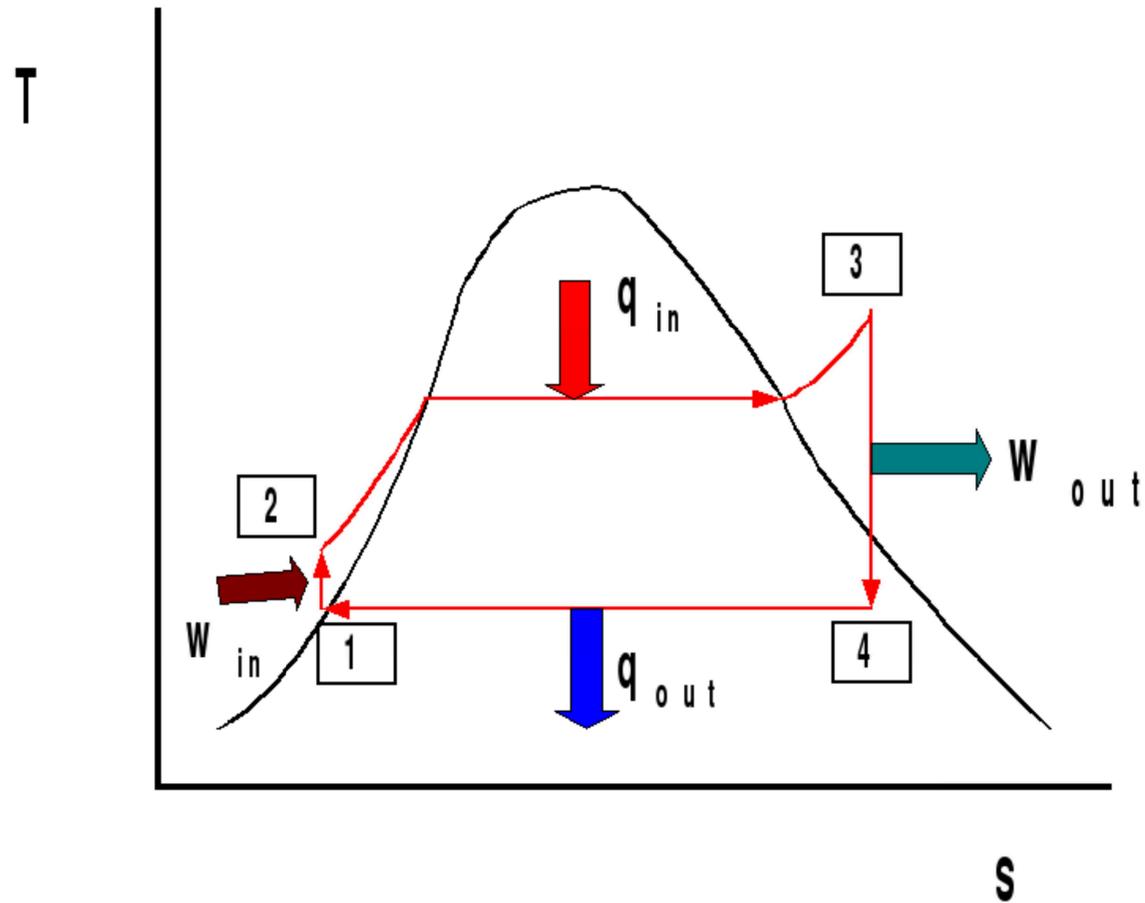
- ▶ **Baixa pressão de condensação (abaixo da pressão atmosférica)**
- ▶ **Altas temperaturas de vapor entrando na turbina (600 a 1000°C)**
- ▶ **Pequena razão de trabalhos (“backwork ratio” - bwr)**

$$BWR \equiv \frac{w_{\text{pump}}}{w_{\text{turbine}}} = \frac{|h_1 - h_2|}{h_3 - h_4} \approx 0.01$$

# Questão

► Considere o ciclo Rankine ideal 1-2-3-4:

- Como aumentar a eficiência térmica  $\eta$ ?
- O que determina os limites de T?



# Ef. térmica ciclo ideal

$$(q_{\text{in}})_{\text{rev}} = \int T ds = \bar{T}_{\text{in}} (s_3 - s_2)$$

$$-(q_{\text{out}})_{\text{rev}} = - \int T ds = -T_{\text{out}} (s_1 - s_4) = T_{\text{out}} (s_3 - s_2)$$

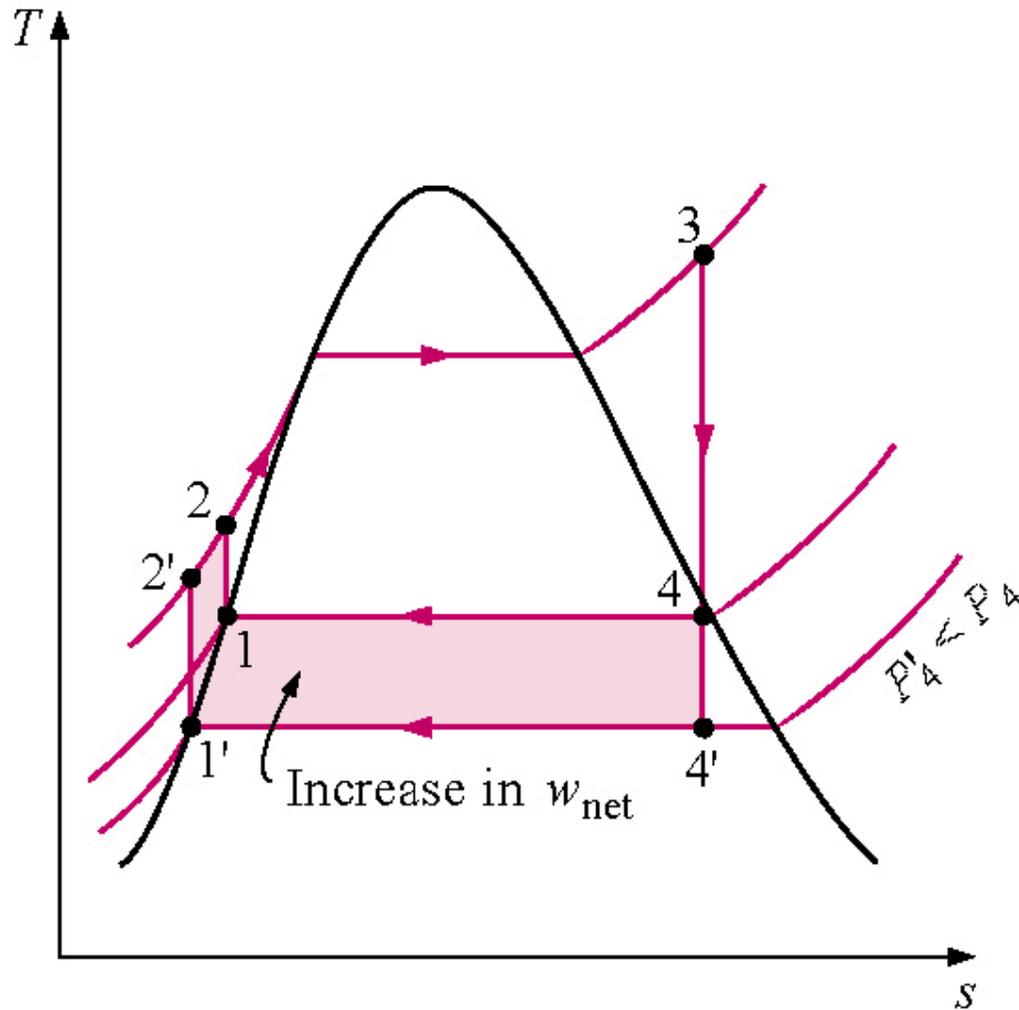
$$\eta = \frac{w_{\text{liq}}}{q_{\text{in}}} = \frac{q_{\text{in}} - q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$

$$\uparrow \bar{T}_{\text{in}} \text{ ou } \downarrow T_{\text{out}} \Rightarrow \uparrow \eta$$

# Aumento de eficiência

- ▶ **Diminuição da pressão de exaustão da turbina**
  - **Diminui a pressão de condensação**
  - **Aumenta a saída de trabalho**
  - **Aumenta a injeção de calor**
  - **Diminui o título na saída da turbina**

# Diminuição da pressão de exaustão da turbina



A saída de trabalho aumenta de forma mais rápida que a injeção de calor, logo a eficiência aumenta

# Diminuição da pressão de exaustão da turbina

- ▶ **A temperatura durante a rejeição de calor pode ser diminuída pela diminuição da pressão de saída da turbina.**
- ▶ **Assim, a pressão de condensação da maioria das usinas é abaixo da pressão atmosférica.**

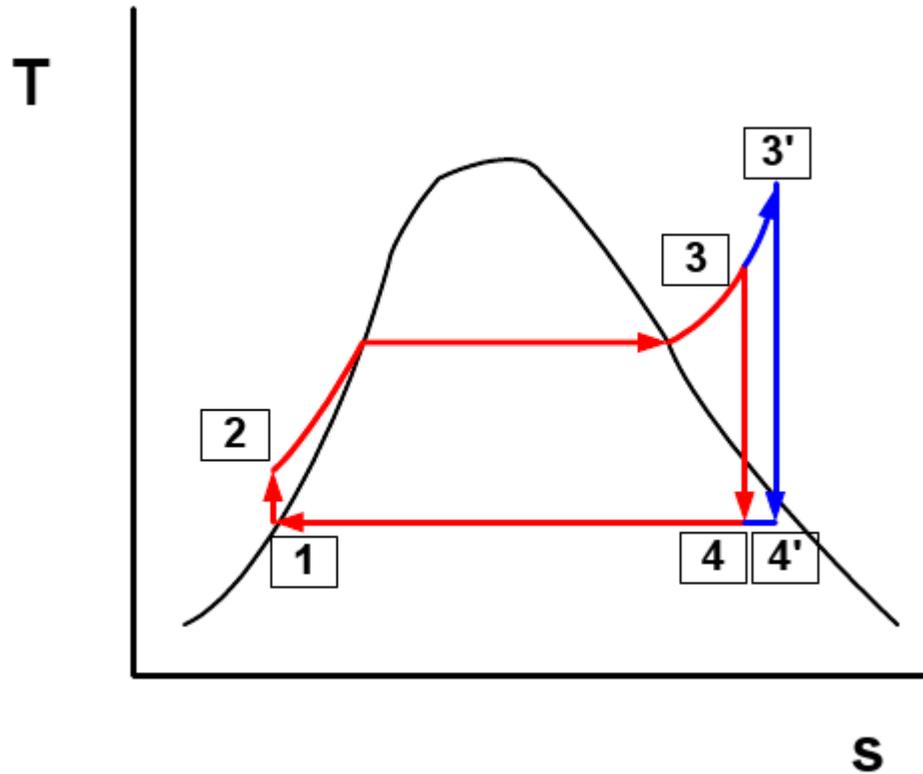
# Diminuição da pressão de exaustão da turbina

- ▶ A redução da pressão do condensador (e da temperatura) também reduz o título do vapor deixando a turbina.
- ▶ **Não é bom para turbinas ter líquido na exaustão.**
- ▶ Baixos títulos significam formação de gotas na saída da turbina.
- ▶ Gotas de água => erosão.
- ▶ Em geral, tenta-se manter  $x > 90\%$ .

# **Aumento da pressão na caldeira ou superaquecimento do vapor**

- ▶ **A temperatura durante a injeção de calor pode ser aumentada aumentando-se a pressão da caldeira, e/ou superaquecendo o vapor na saída da caldeira.**
- ▶ **Existe um limite para o superaquecimento: as temperaturas do fluido não devem danificar metalurgicamente o equipamento.**

# Superaquecimento do vapor



A saída de trabalho aumenta de forma mais rápida que a injeção de calor, logo a eficiência aumenta

**Aumento do título na saída da turbina**

# Superaquecimento do vapor

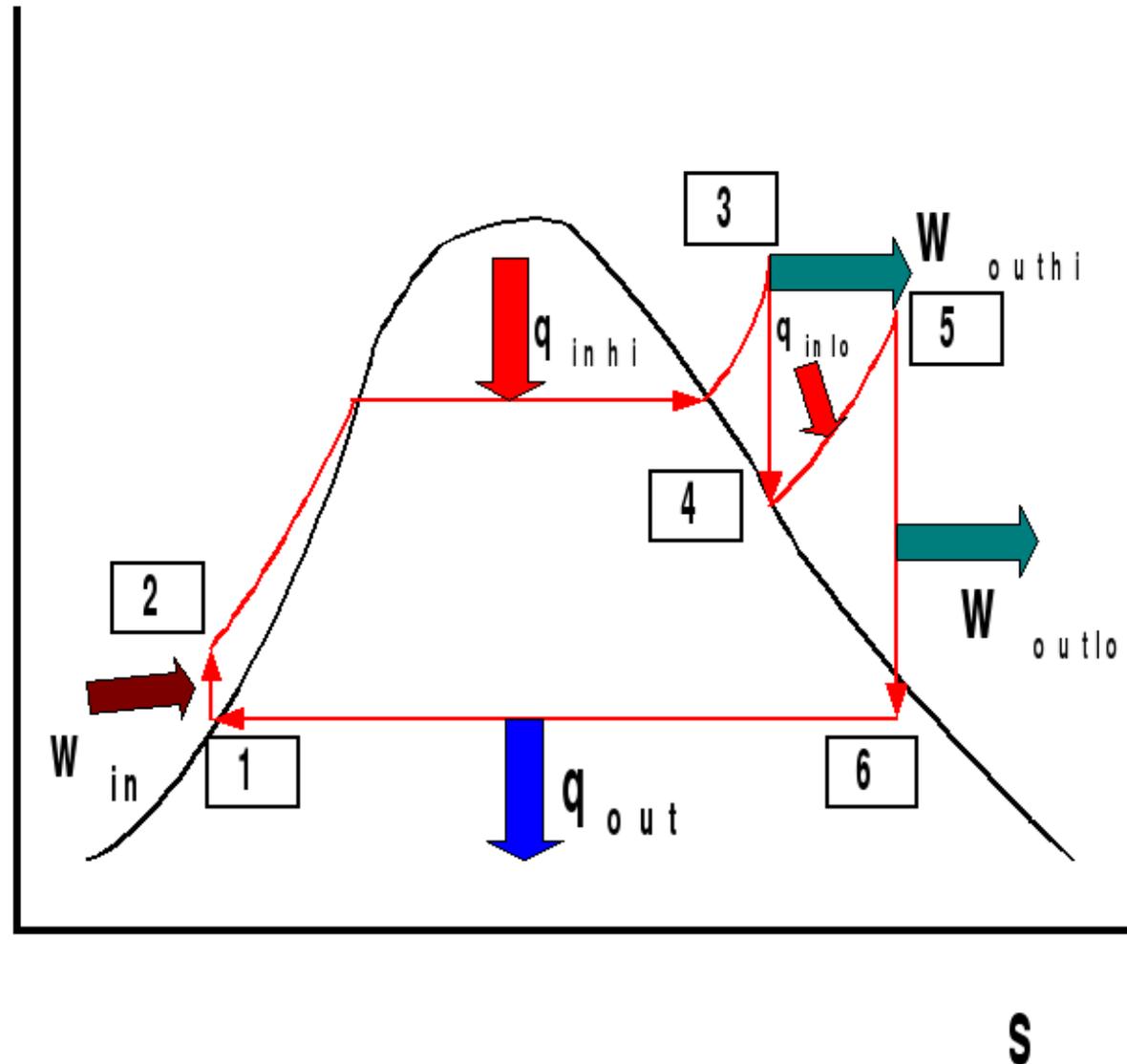
## Superaquecendo o vapor

- \* Aumento da injeção de calor
- \* Aumento da saída de trabalho
- \* Aumento do título na saída da turbina
- \* Pode ocasionar danos no equipamento



# Reaquecimento de um ciclo Rankine ideal

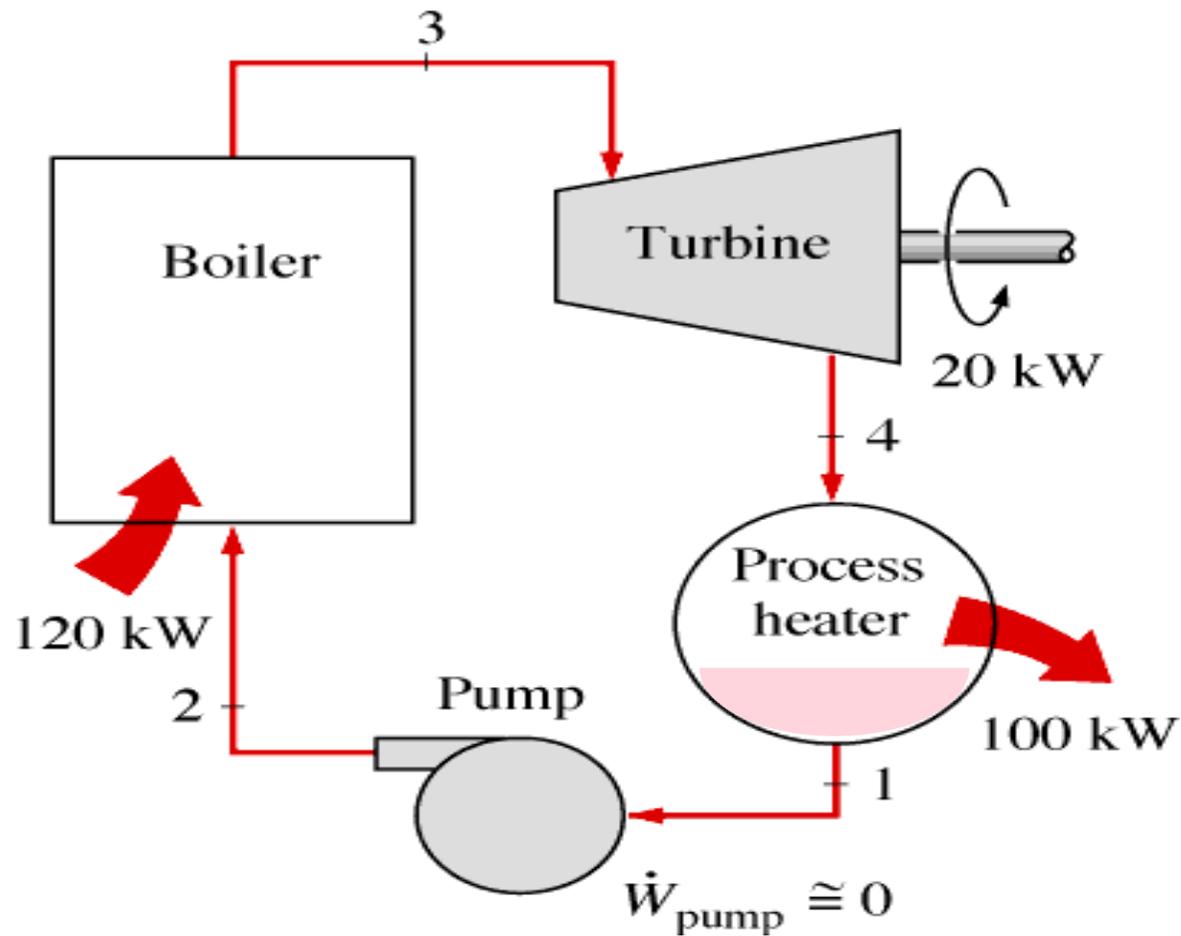
Note que  $T_5 < T_3$ .  
Muitos sistemas reaquecem à mesma temperatura ( $T_5 = T_3$ ).



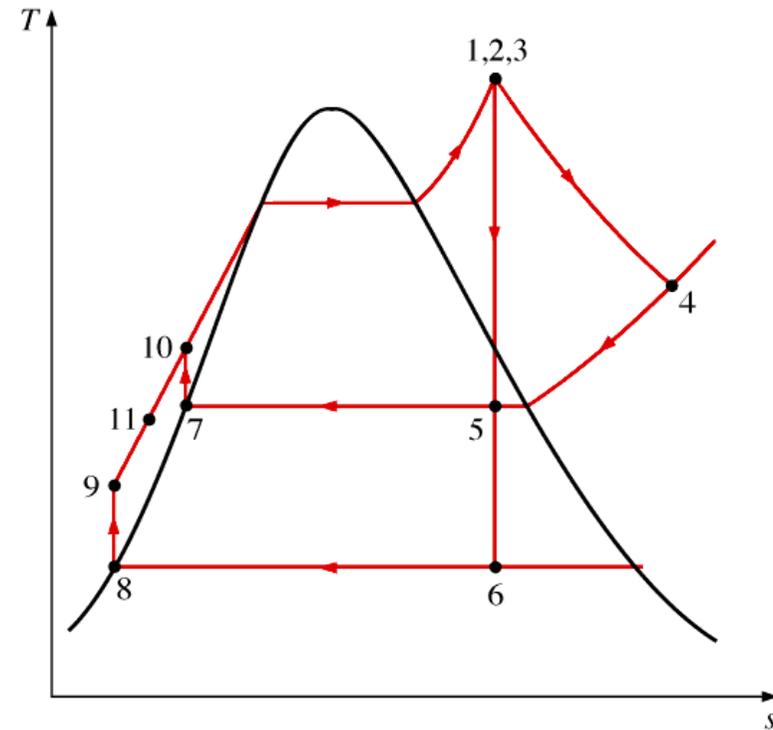
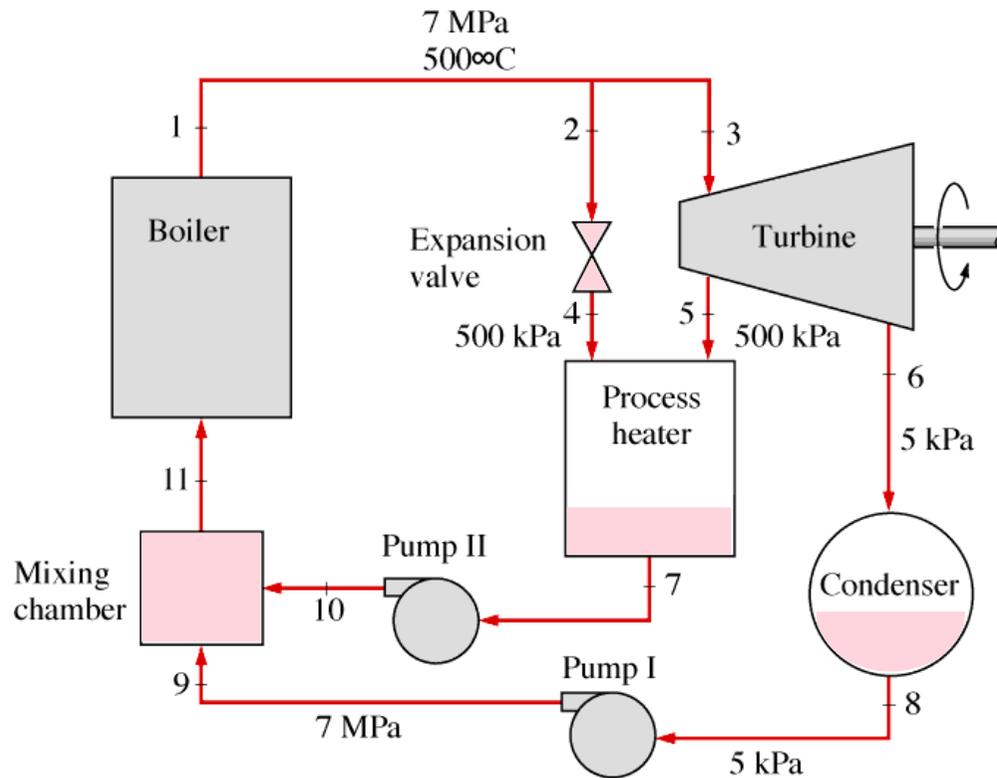
# Cogeração

- ▶ Produção de mais de uma forma útil de energia (por ex. **calor e energia elétrica**) a partir da mesma fonte de energia.
- ▶ Ex. usinas que produzem potência elétrica ao mesmo tempo que fornecem calor a certos processos industriais
- ▶ A fração de energia que é utilizada para cada processo de geração de calor ou de trabalho é chamada de ***fator de utilização (utilization factor)*** da instalação de cogeração.

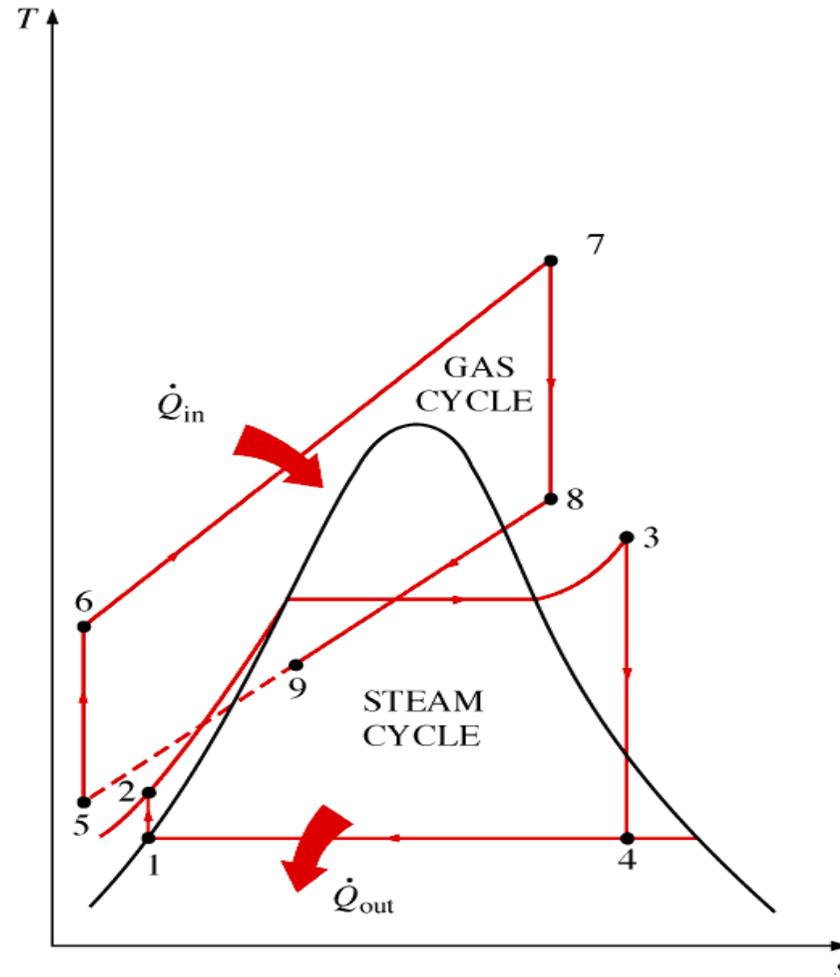
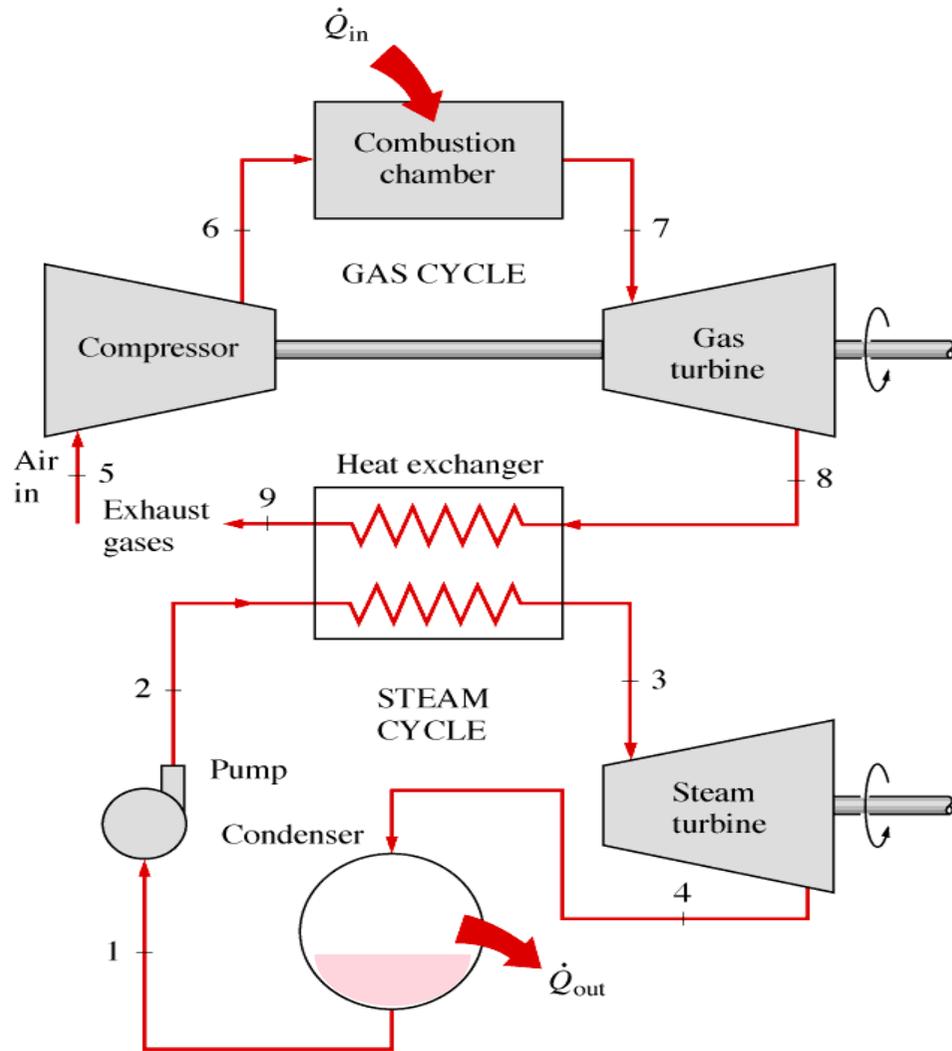
# Uma usina de cogeração ideal



# Esquema em um diagrama T-s de um ciclo com cogeração



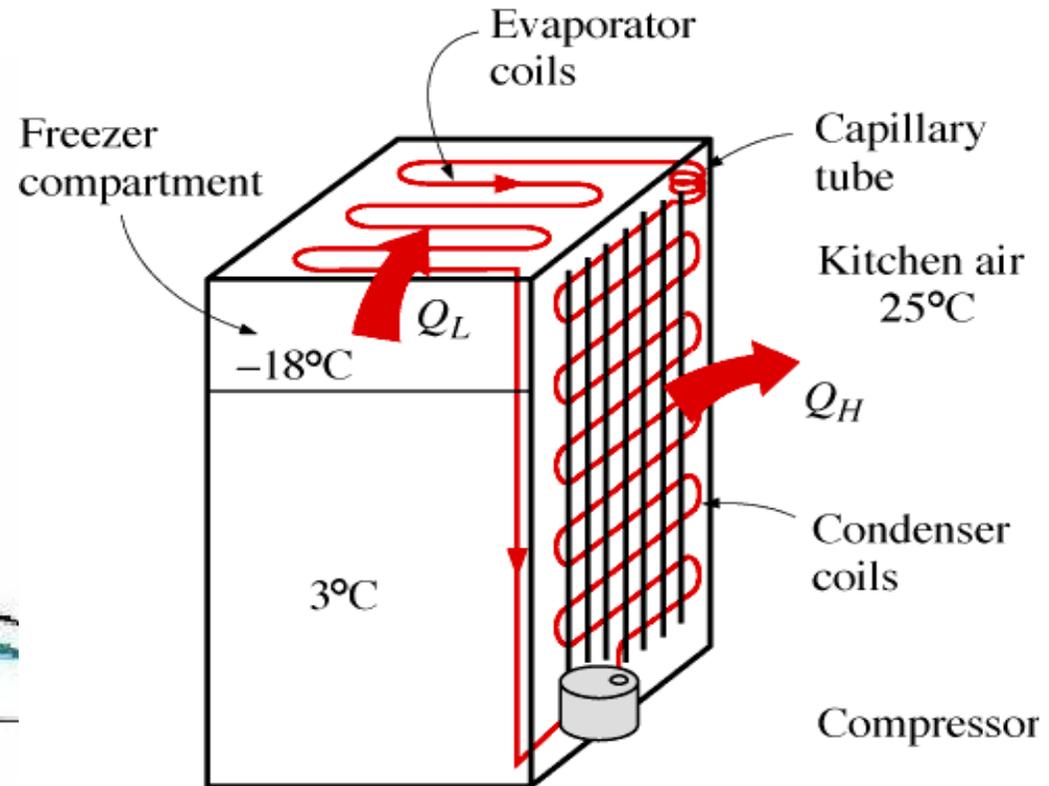
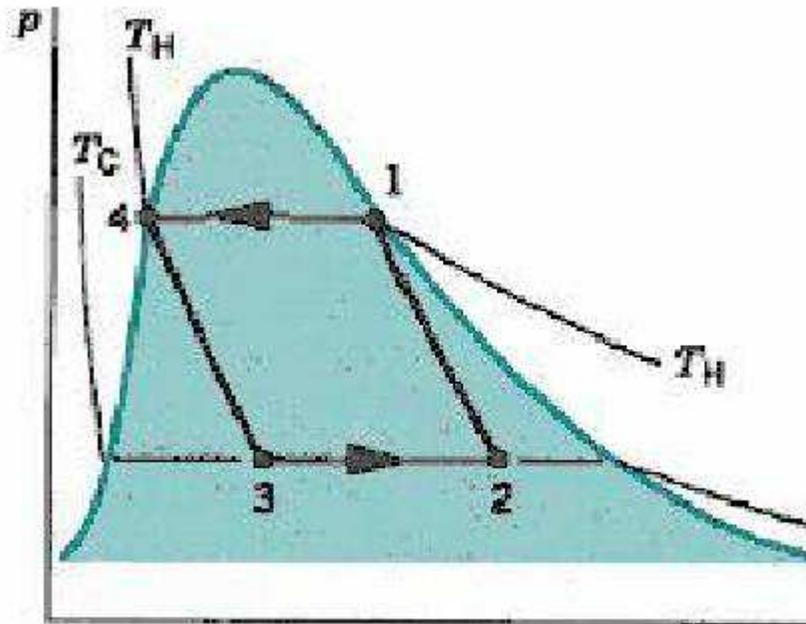
# Usina combinando ciclos a gás e a vapor



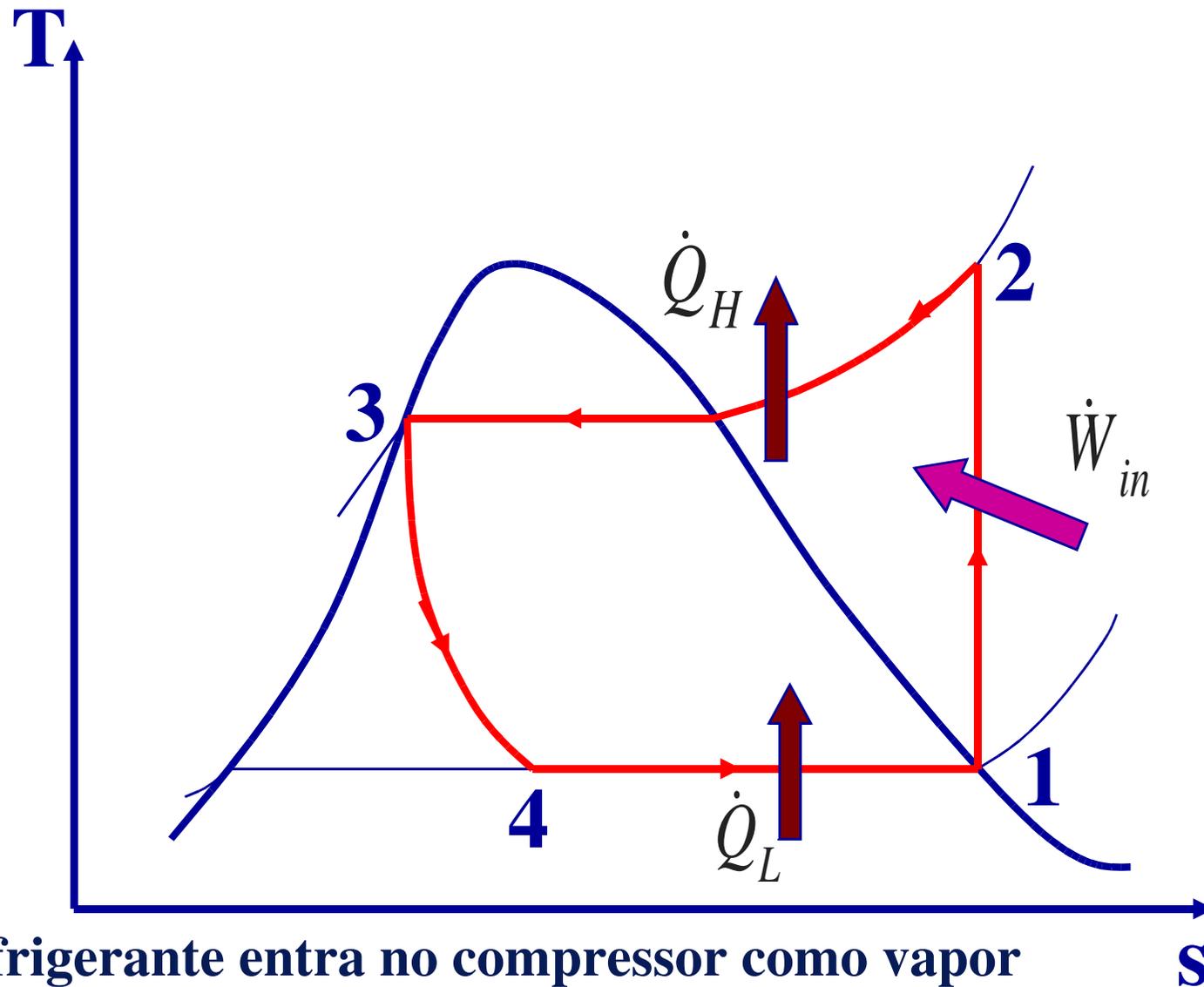
# Refrigeradores e bombas de calor

- ▶ **Refrigeração:** transferência de calor de regiões a baixa temperatura para regiões a alta temperatura (relativas).
- ▶ **Refrigerador:** dispositivo que opera em ciclo de refrigeração.
- ▶ **Refrigerantes:** fluidos utilizados em ciclos de refrigeração.
- ▶ **Bombas de calor:** refrigeradores cujo objetivo está focado no aumento de temperatura da região quente.

# Refrigerador doméstico



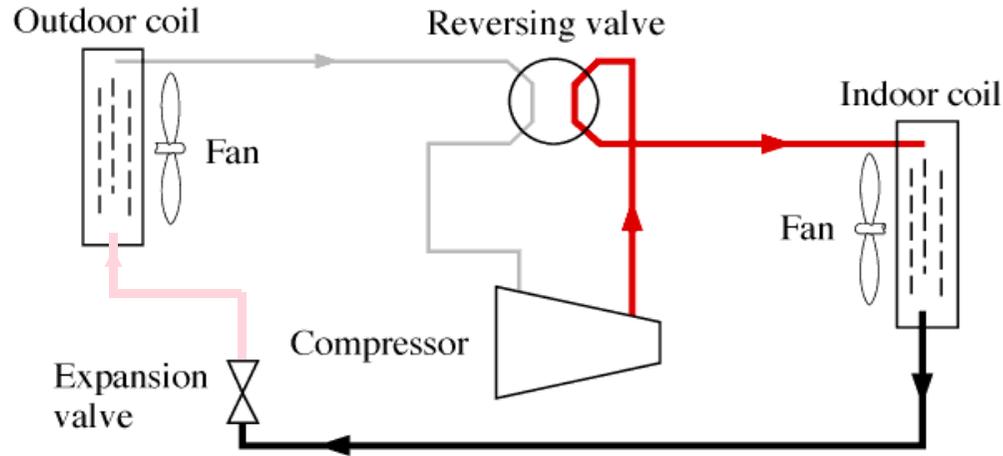
# Diagrama P-h para um ciclo de refrigeração ideal



O refrigerante entra no compressor como vapor saturado e é resfriado até o estado de líquido saturado no condensador. Ele é então expandido na válvula e vaporiza no evaporador, absorvendo calor da região fria

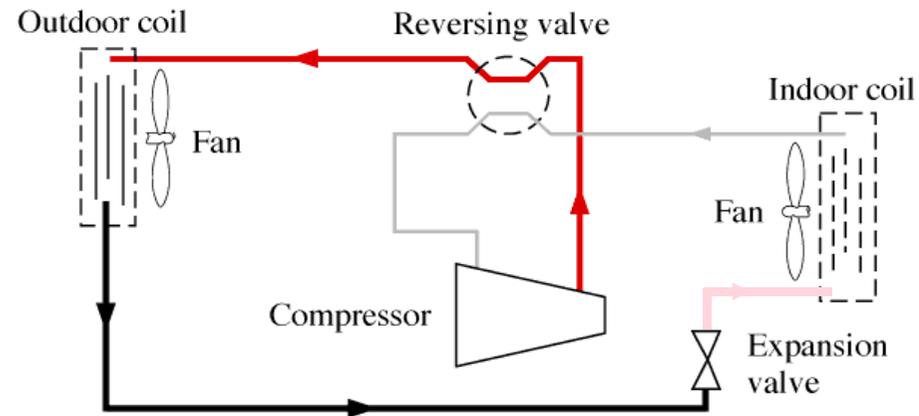
# Ar condicionado reversível

HEAT PUMP OPERATION – HEATING MODE



- High-pressure liquid
- Low-pressure liquid–vapor
- Low-pressure vapor
- High-pressure vapor

HEAT PUMP OPERATION – COOLING MODE



# 4 processos do ciclo

- ▶ **Compressão isentrópica (1 a 2)**
- ▶ **Condensação a pressão constante (2 a 3)**
- ▶ **Expansão isoentálpica (3 a 4)**
- ▶ **Evaporação a pressão constante (4 a 1)**

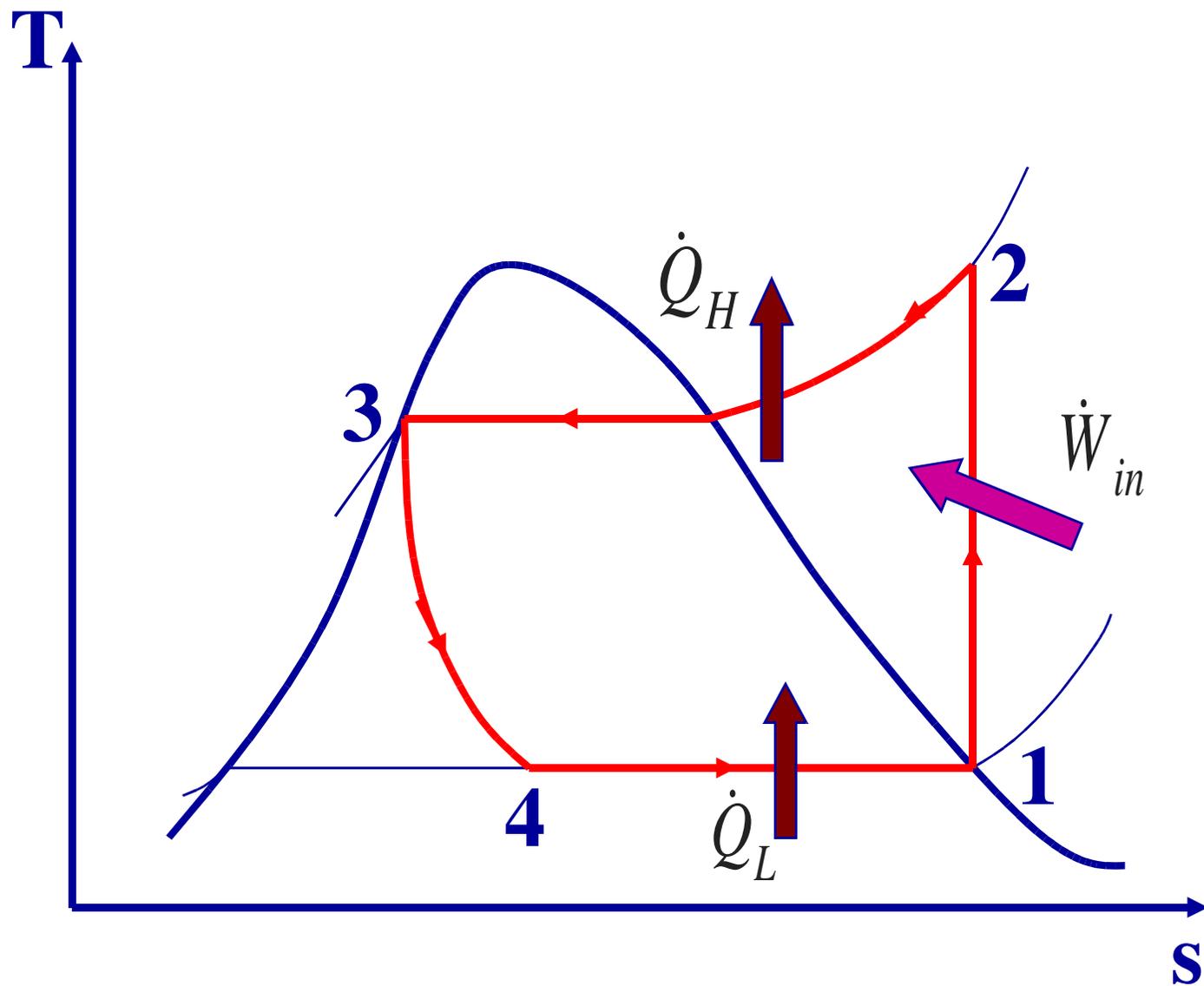
# Exemplo

**Considere um sistema de refrigeração resfriando a uma taxa de 300 kJ/min em um ciclo ideal de vaporização-compressão com refrigerante R-134a. O refrigerante entra no compressor como vapor saturado a 140 kPa e é comprimido a 800 kPa. Mostre o ciclo em um diagrama T-s (com as linhas de saturação). Determine: (a) o título do refrigerante na saída da válvula de expansão; (b) o coeficiente de performance; (c) a potência fornecida ao compressor.**

# Considerações

- Regime permanente
- Compressão isentrópica no compressor
- Variações de energia cinética e potencial desprezíveis
  
- $P_1 = 0.14 \text{ MPa}$ ,  $x_1 = 1.0$
- $P_2 = 0.8 \text{ MPa}$ ,  $s_2 = s_1$
- $P_3 = 0.8 \text{ MPa}$ ,  $x_3 = 0$
- $h_4 = h_3$  (válvula de expansão)

# Diagrama T-s



# Propriedades (R-134a)

| State    | T (C) | P(MPa)      | v(m <sup>3</sup> /kg) | h(kJ/kg) | s(kJ/kgK) | x          |
|----------|-------|-------------|-----------------------|----------|-----------|------------|
| <b>1</b> |       | <b>0.14</b> |                       |          |           | <b>1.0</b> |
| <b>2</b> |       | <b>0.8</b>  |                       |          |           |            |
| <b>3</b> |       | <b>0.8</b>  |                       |          |           | <b>0.0</b> |
| <b>4</b> |       |             |                       |          |           |            |

# Propriedades (R-134a)

| State | T (C)         | P(MPa)      | v(m <sup>3</sup> /kg) | h(kJ/kg)            | s(kJ/kgK)            | x          |
|-------|---------------|-------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------|
| 1     | <b>-18.80</b> | <b>0.14</b> |                       | <b>236.04</b>       | <b><u>0.9322</u></b> | <b>1.0</b> |
| 2     |               | <b>0.8</b>  |                       | <b>272.05</b>       | <b><u>0.9322</u></b> |            |
| 3     | <b>31.33</b>  | <b>0.8</b>  |                       | <b><u>93.42</u></b> |                      | <b>0.0</b> |
| 4     |               |             |                       | <b><u>93.42</u></b> |                      |            |

**Compressão isentrópica:  $s_2 = s_1$**

**Válvula de expansão:  $h_4 = h_3$**

## (a) título na saída da válvula de expansão

$$P_4 = P_1 = 140 \text{ kPa}$$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}}$$
$$= \frac{93.42 - 25.77}{210.27} = 0.322$$

## (b): COP refrigerador

Coeficiente de performance

$$\begin{aligned} COP_R &= \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{q_L}{w_{in}} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{236.04 - 93.42}{272.05 - 236.04} \end{aligned}$$

$$COP_R = 3.96$$

## (c): potência fornecida

$$COP_R = \frac{\text{cooling effect}}{\text{work input}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}}$$

$$\dot{Q}_L = 300 \text{ kJ/min} = 5 \text{ kJ/s} = 5 \text{ kW}$$

### Potência fornecida ao compressor

$$\dot{W}_{in} = \frac{\dot{Q}_L}{COP_R} = \frac{5 \text{ kW}}{3.96} = 1.26 \text{ kW}$$

# Questão

► Considere um ciclo de Rankine ideal com temperatura de entrada da turbina e pressão no condensador fixas. Qual é o efeito do aumento da pressão da caldeira no:

|  |   |
|--|---|
| Trabalho da bomba:                         | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |
| Trabalho da turbina:                       | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |
| Calor fornecido:                           | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |
| Calor rejeitado:                           | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |
| Eficiência do ciclo:                       | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |
| Quantidade de líquido na saída da turbina: | (a) aumenta, (b) diminui, (c) permanece constante |

# Aumento da pressão da caldeira mantendo a temperatura de saída do vapor constante em $T_{\max}$

