

# **Ciclos de Potência a vapor**

**Ciclo Rankine**

# HOW A COAL FIRED GENERATING PLANT PRODUCES ELECTRICITY...

Coal is delivered by road, rail or water to the generating station where it is stored in piles. **1**

Before use, the coal is crushed into small pieces and conveyed to bins **2**, where a 1 to 2 day supply is held.

The crushed coal goes through a pulverizer **3** which reduces it to a fine powder. Mixed with hot air, the powder is blown through coal burners **4** into the boiler furnace **5** where the mixture is ignited and burned at high intensity.

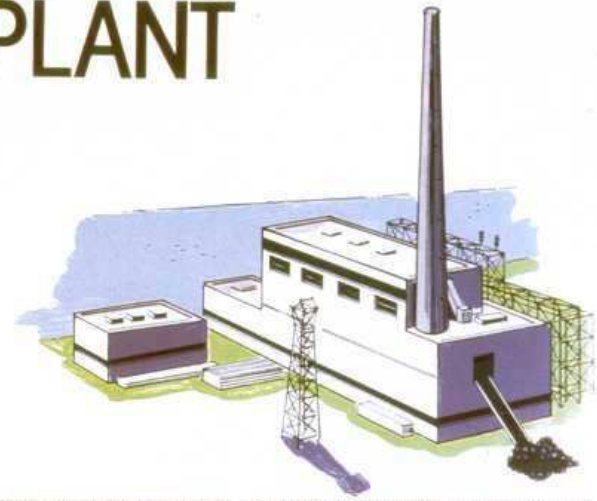
The heavy ash produced by burning, drops into an ash hopper **6** for disposal while the light fly ash in the flue gases is removed by electric precipitators and mechanical dust collectors **7** before the gases are discharged through the chimney.

Water flowing through thousands of tubes in the boiler furnace **5** is converted into steam which collects in a "steam drum" **9** at the top of the boiler. The steam then travels at high pressure through a steam line **10** into the turbines.

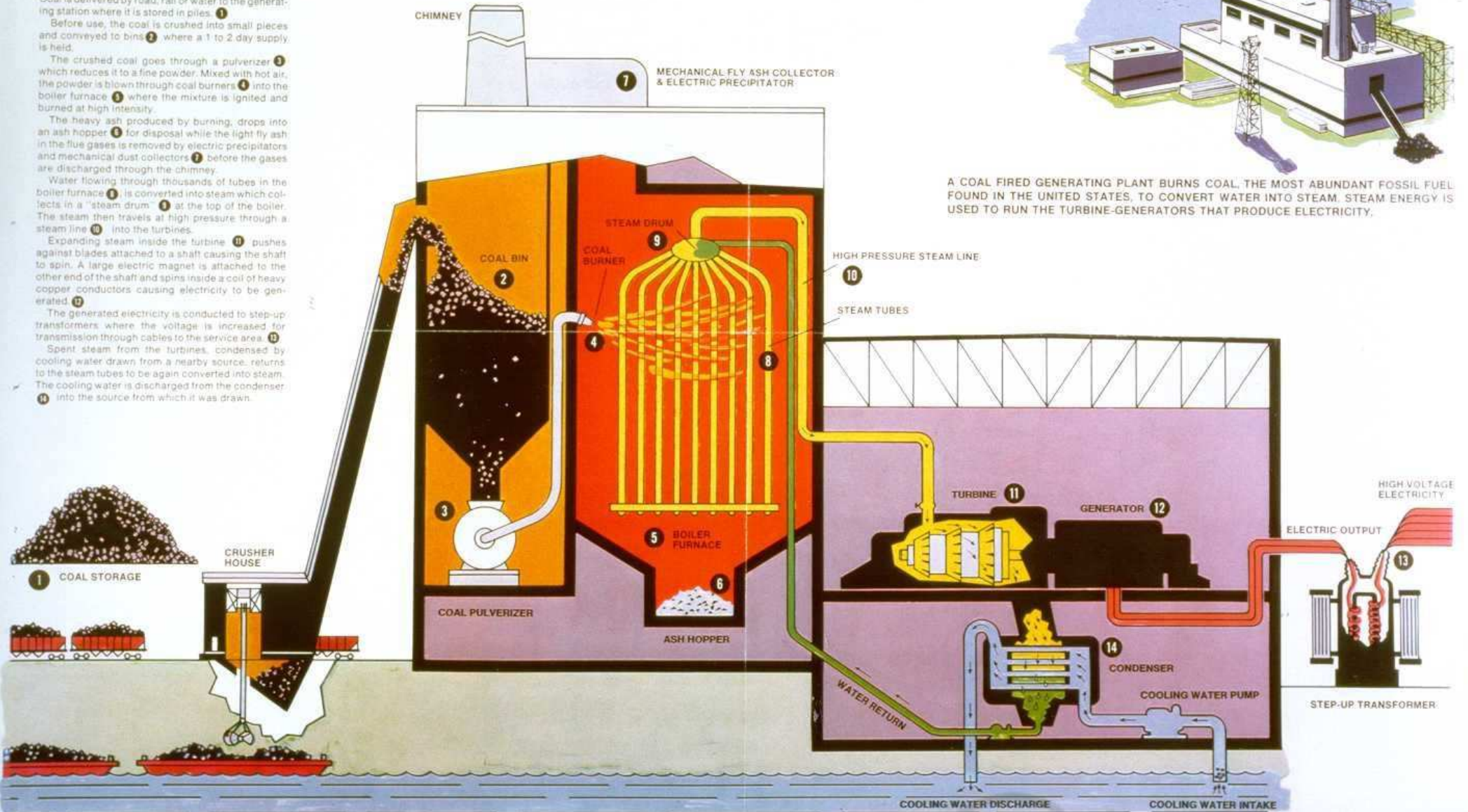
Expanding steam inside the turbine **11** pushes against blades attached to a shaft causing the shaft to spin. A large electric magnet is attached to the other end of the shaft and spins inside a coil of heavy copper conductors causing electricity to be generated **12**.

The generated electricity is conducted to step-up transformers where the voltage is increased for transmission through cables to the service area. **13**

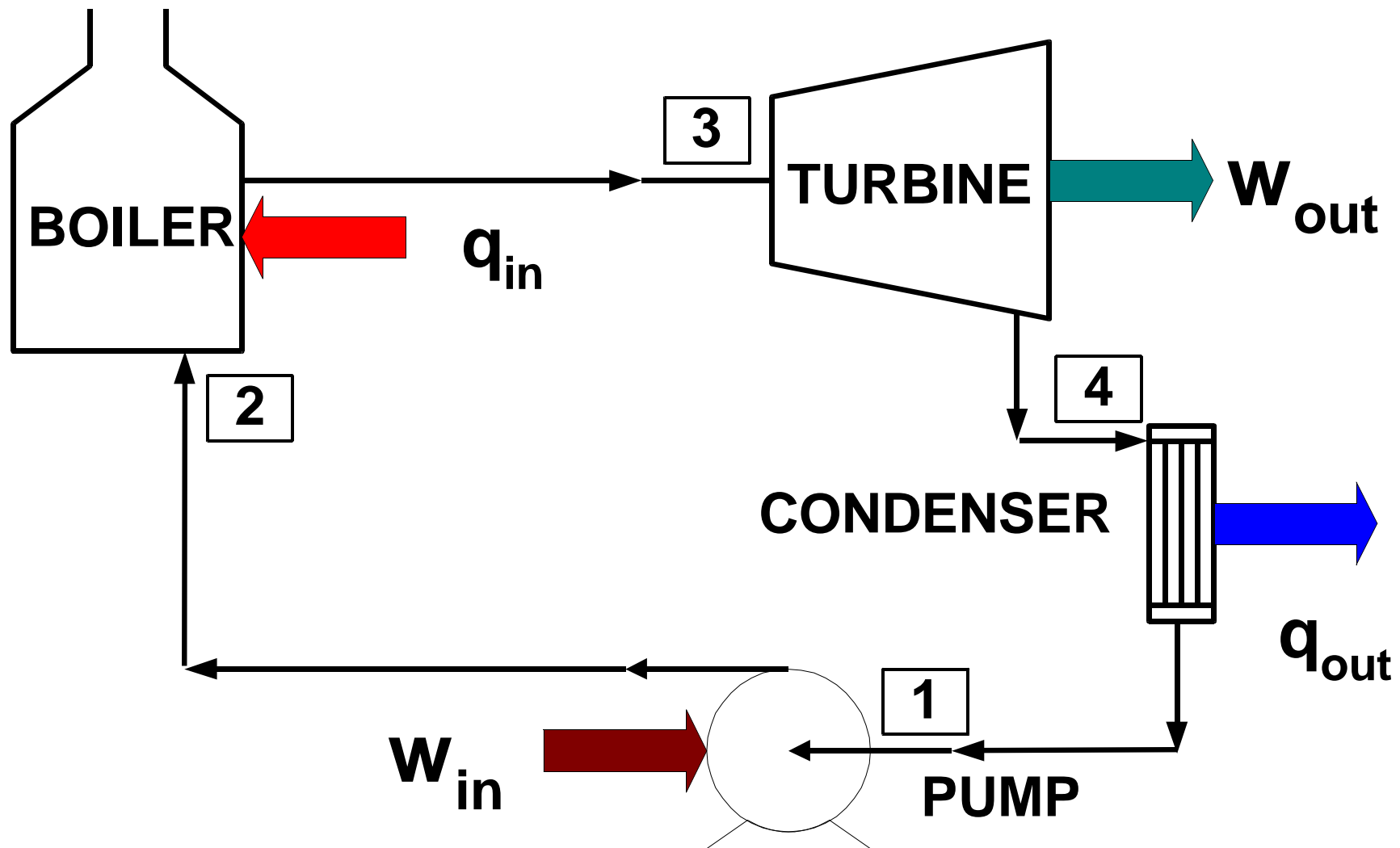
Spent steam from the turbines, condensed by cooling water drawn from a nearby source, returns to the steam tubes to be again converted into steam. The cooling water is discharged from the condenser **14** into the source from which it was drawn.



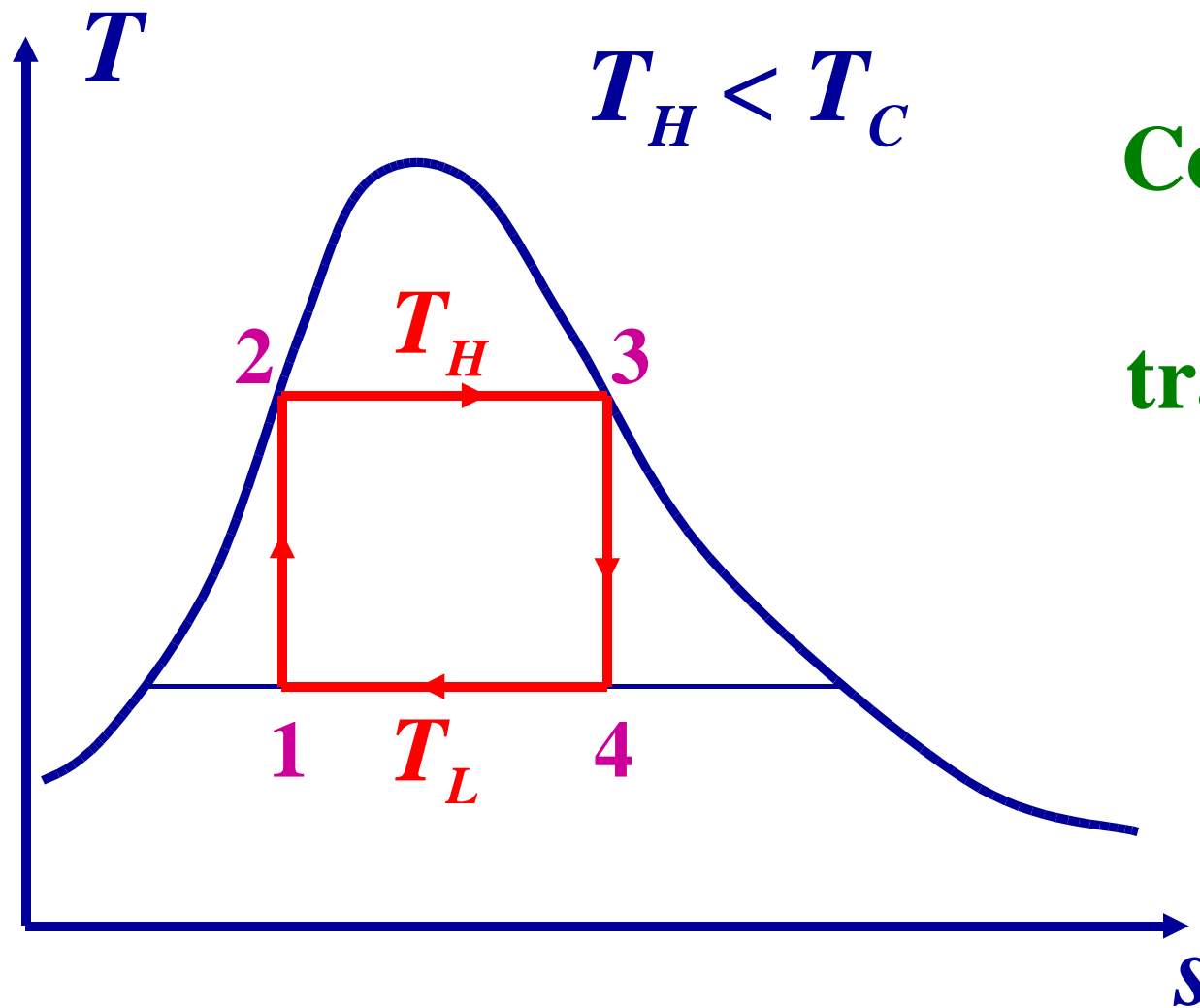
A COAL FIRED GENERATING PLANT BURNS COAL, THE MOST ABUNDANT FOSSIL FUEL FOUND IN THE UNITED STATES, TO CONVERT WATER INTO STEAM. STEAM ENERGY IS USED TO RUN THE TURBINE-GENERATORS THAT PRODUCE ELECTRICITY.



(Courtesy of Carolina Power and Light Company)



# Ciclo de Carnot



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

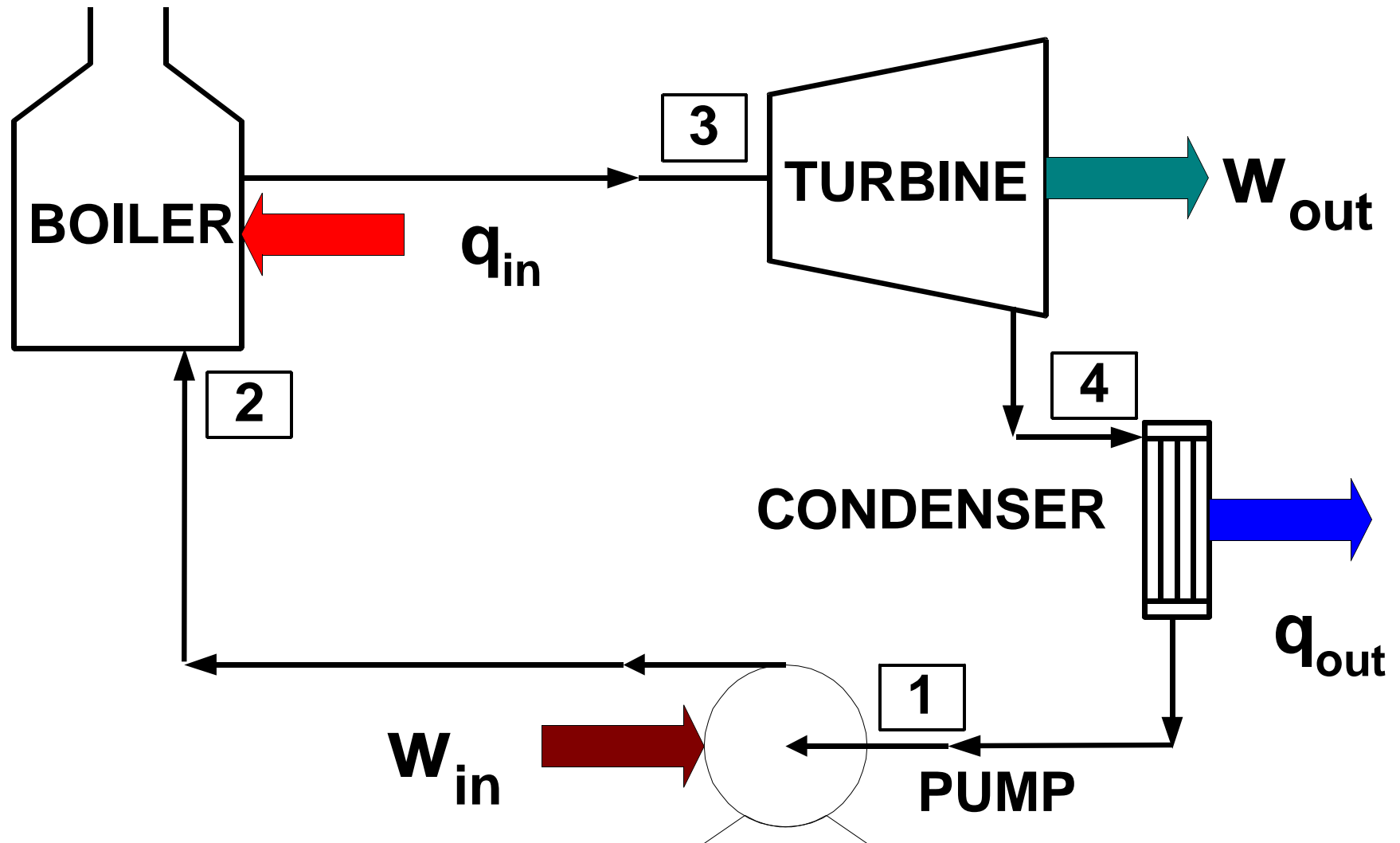
# Ciclo de Carnot

**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 Ideal

- ▶ **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,  $s=cte$ )**
  - **Caldeira (2 a 3,  $P=cte$ )**
  - **Turbina (3 a 4,  $s=cte$ )**
  - **Condensador (4 a 1,  $P=cte$ )**



# 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 isentrópicas

# 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

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

Com as hipóteses citadas:

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

# Condensador

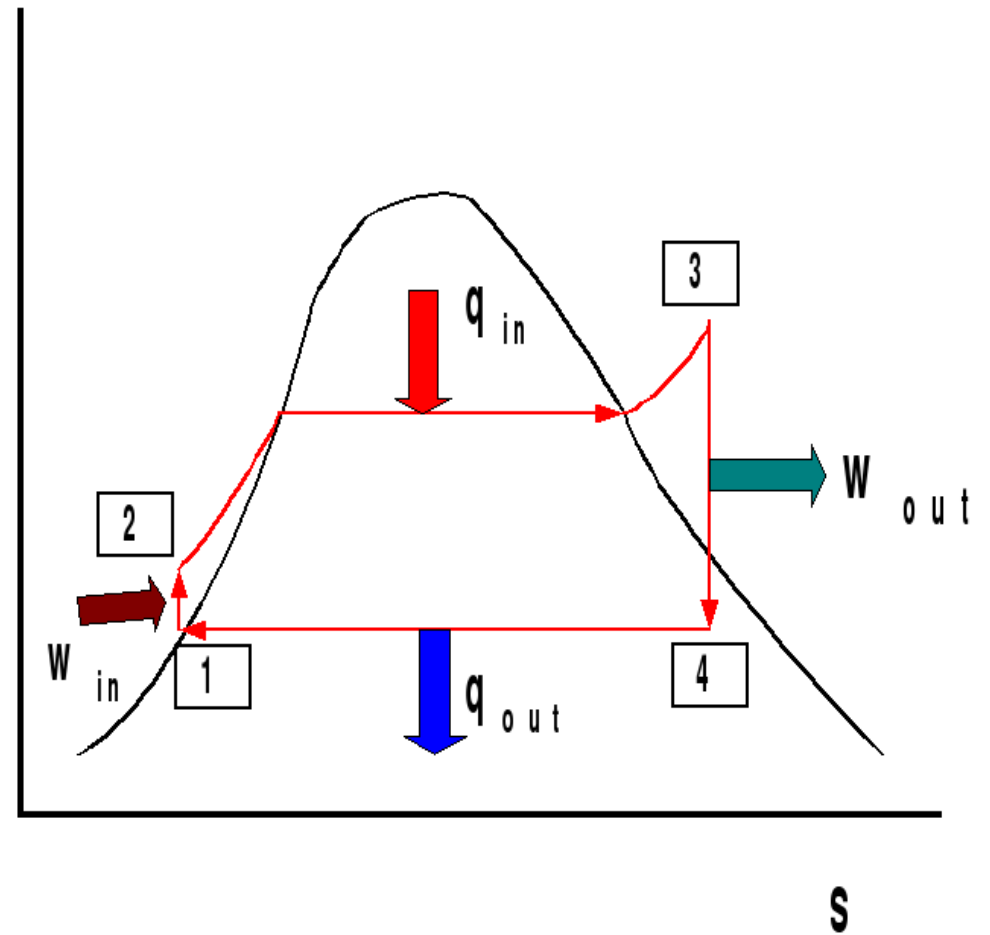
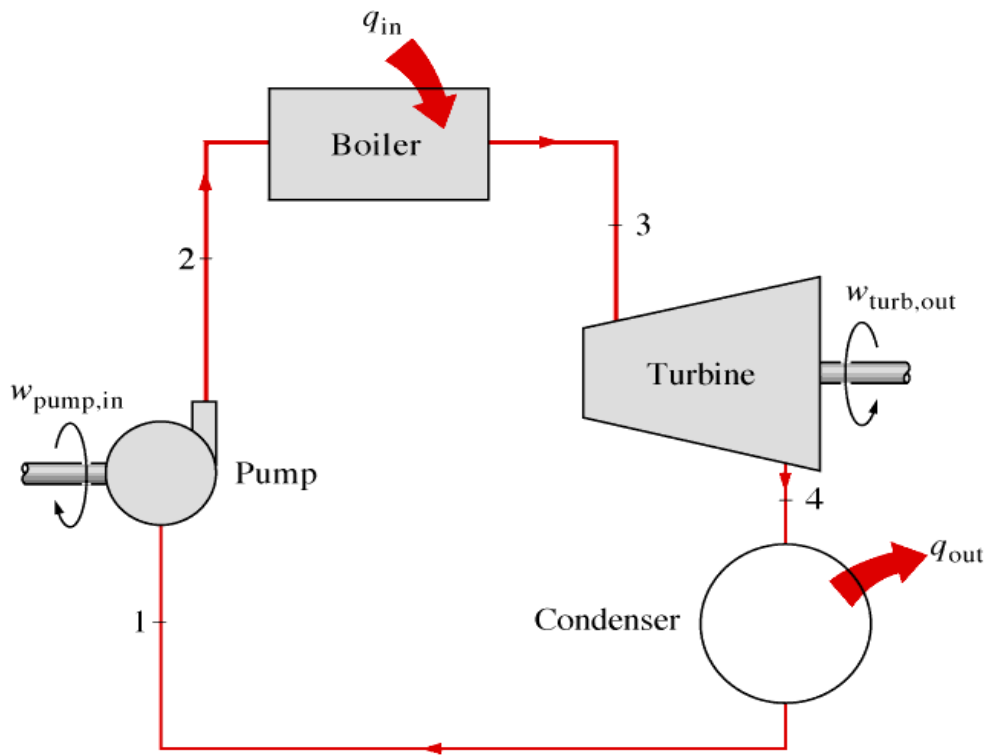
$$\dot{Q}_{\text{cond}} - \dot{W}_{\text{cond}} = \dot{m} \left[ h_1 - h_4 + \Delta \text{KE} + \Delta \text{PE} \right]$$

**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



# 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

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

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

**Alternativamente, como  $w_{\text{net}} = q_{\text{net}}$**

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

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

# Exemplo

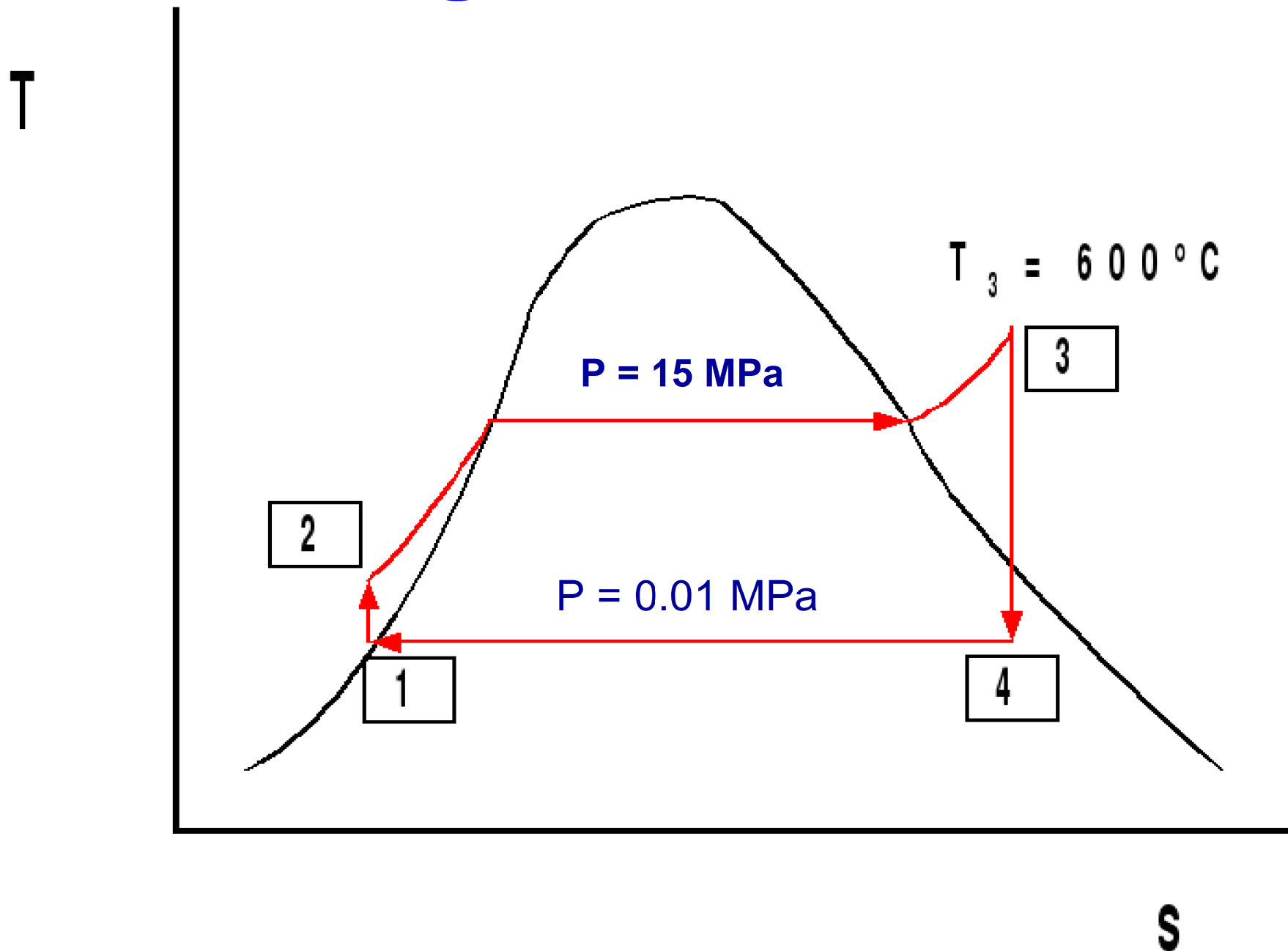
**Um ciclo Rankine tem uma pressão de exaustão na turbina de 0,1 bars. Determine o título do vapor deixando a turbina e a eficiência térmica do ciclo se a pressão de entrada na turbina for de 150 bars e a temperatura de 600°C.**

# 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				n.a.
4		0.01				

Bomba (1 a 2) -> **isoentrópico (e volume cte)**

Caldeira (2 a 3) -> **pressão cte**

Turbina (3 a 4) -> **isoentrópico**

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

# 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

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

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

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



# 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

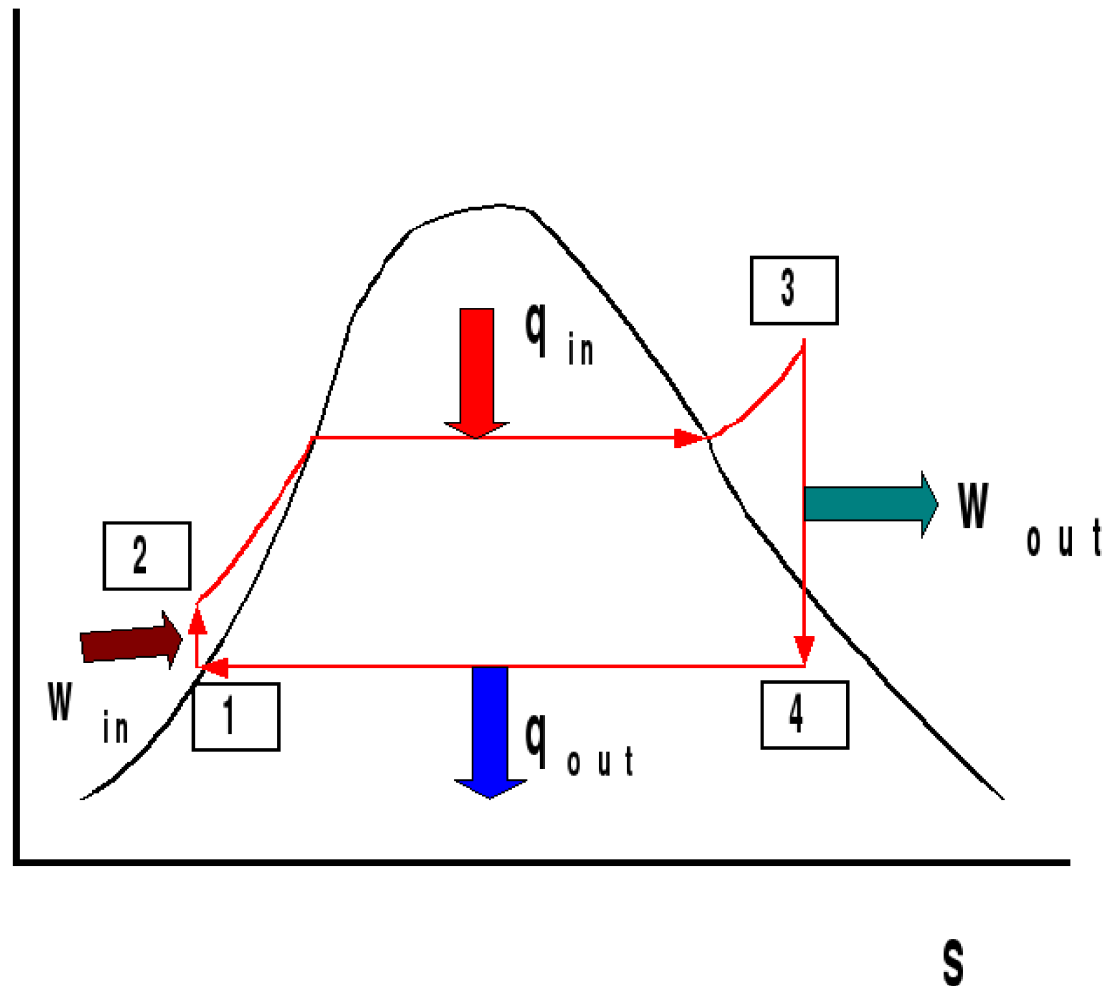
- ▶ **Baixa pressão de condensação (abaixo da pressão atmosférica)**
- ▶ **Altas temperaturas de vapor entrando na turbina (600 a 1000°C)**
- ▶ **Pequena razão de trabalhos (“backwork ratio” - bwr)**

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

# 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

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

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

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

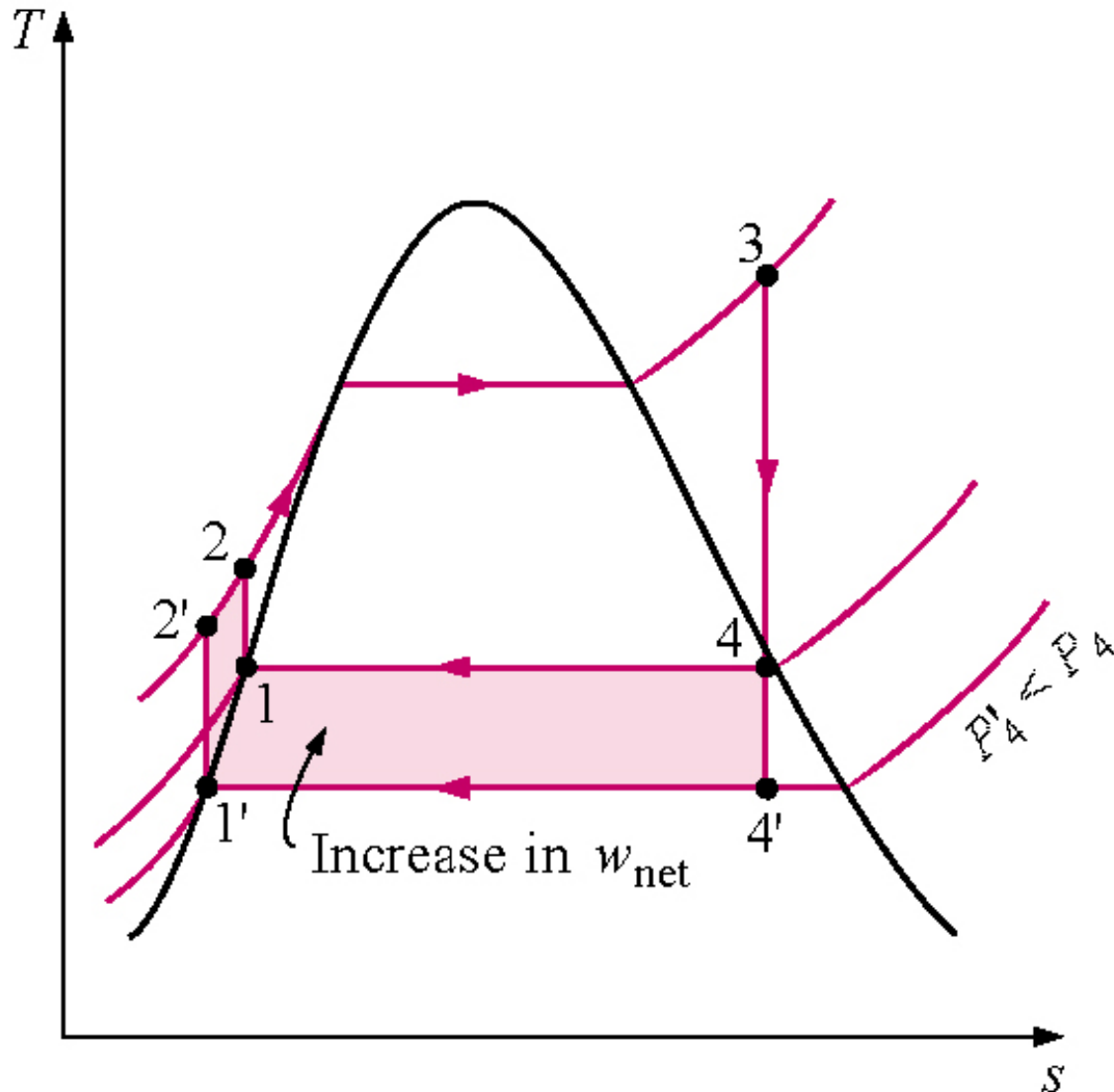
$$\uparrow \bar{T}_{\text{in}} \text{ ou } \downarrow T_{\text{out}} \Rightarrow \uparrow \eta$$



# 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.**

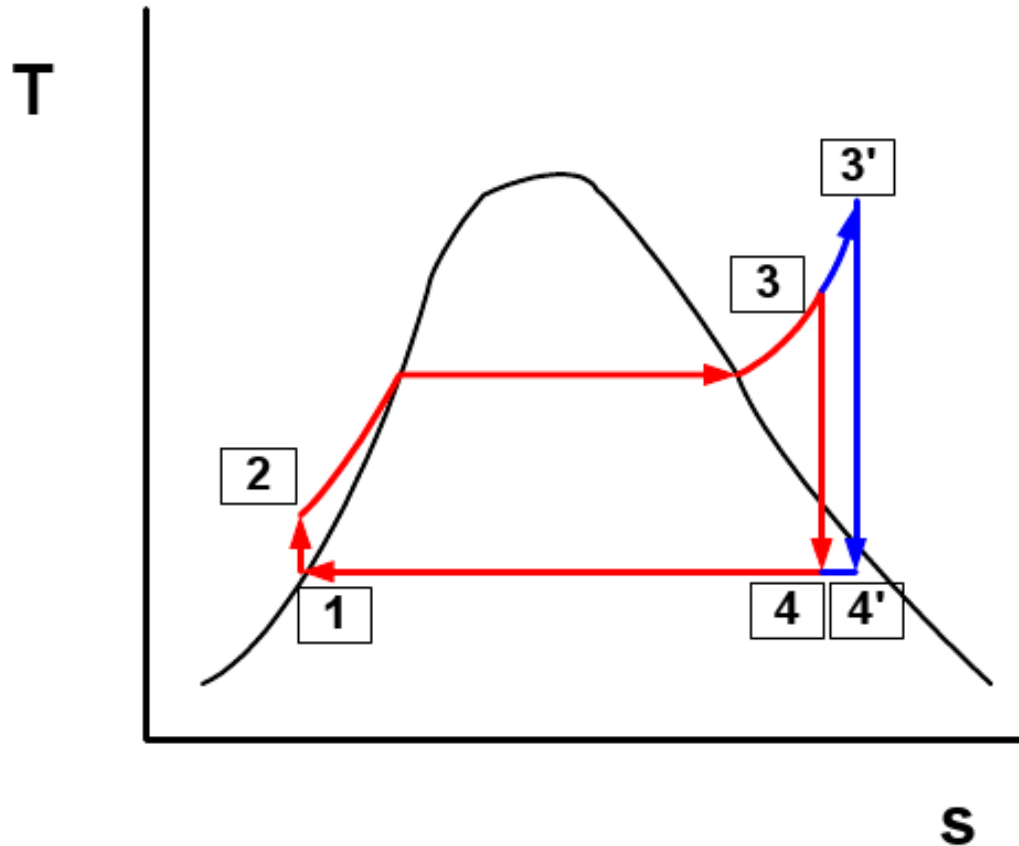
# Diminuição da pressão de exaustão da turbina

- ▶ 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

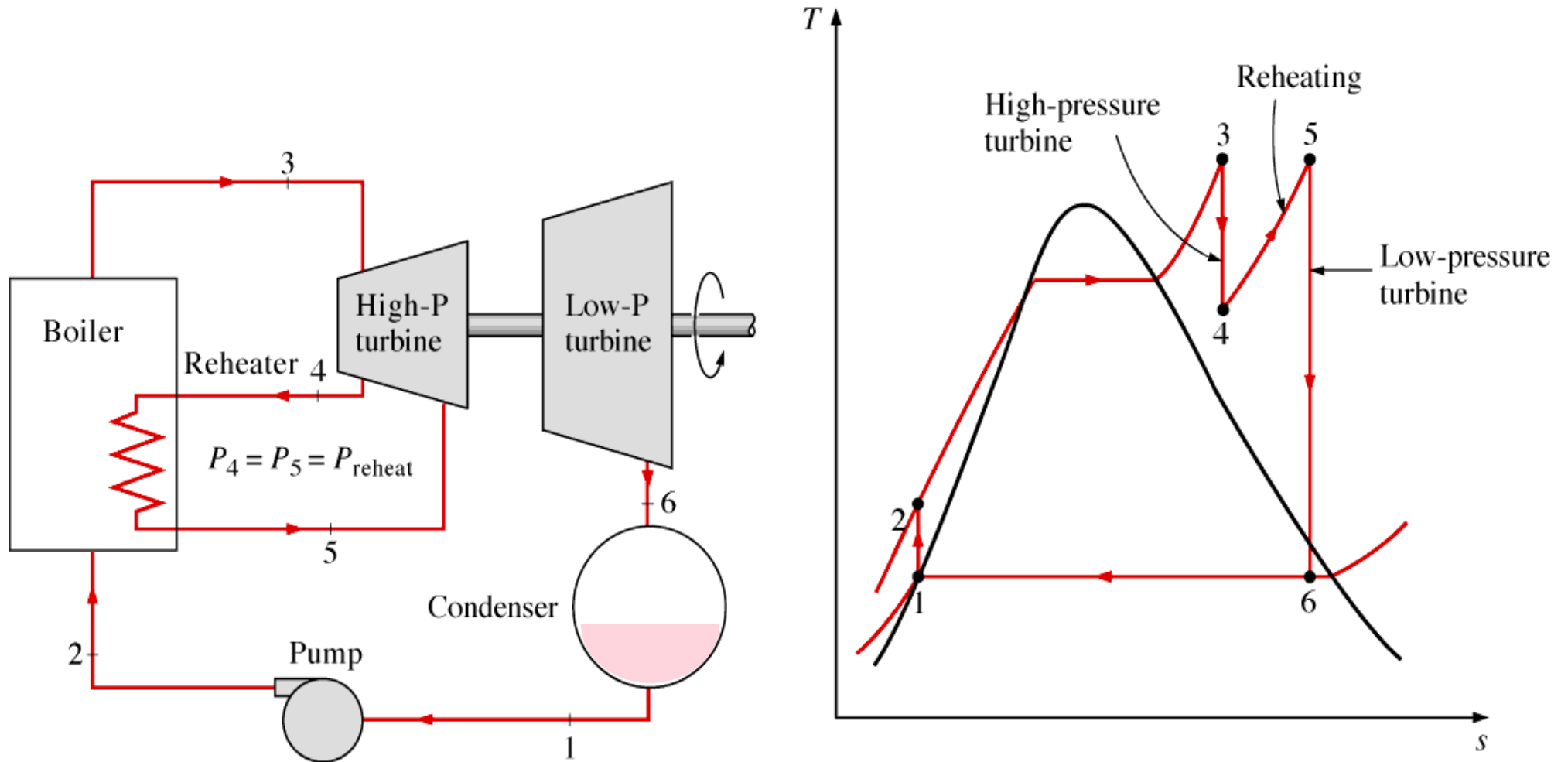
**Aumento do título na saída da turbina**

# 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

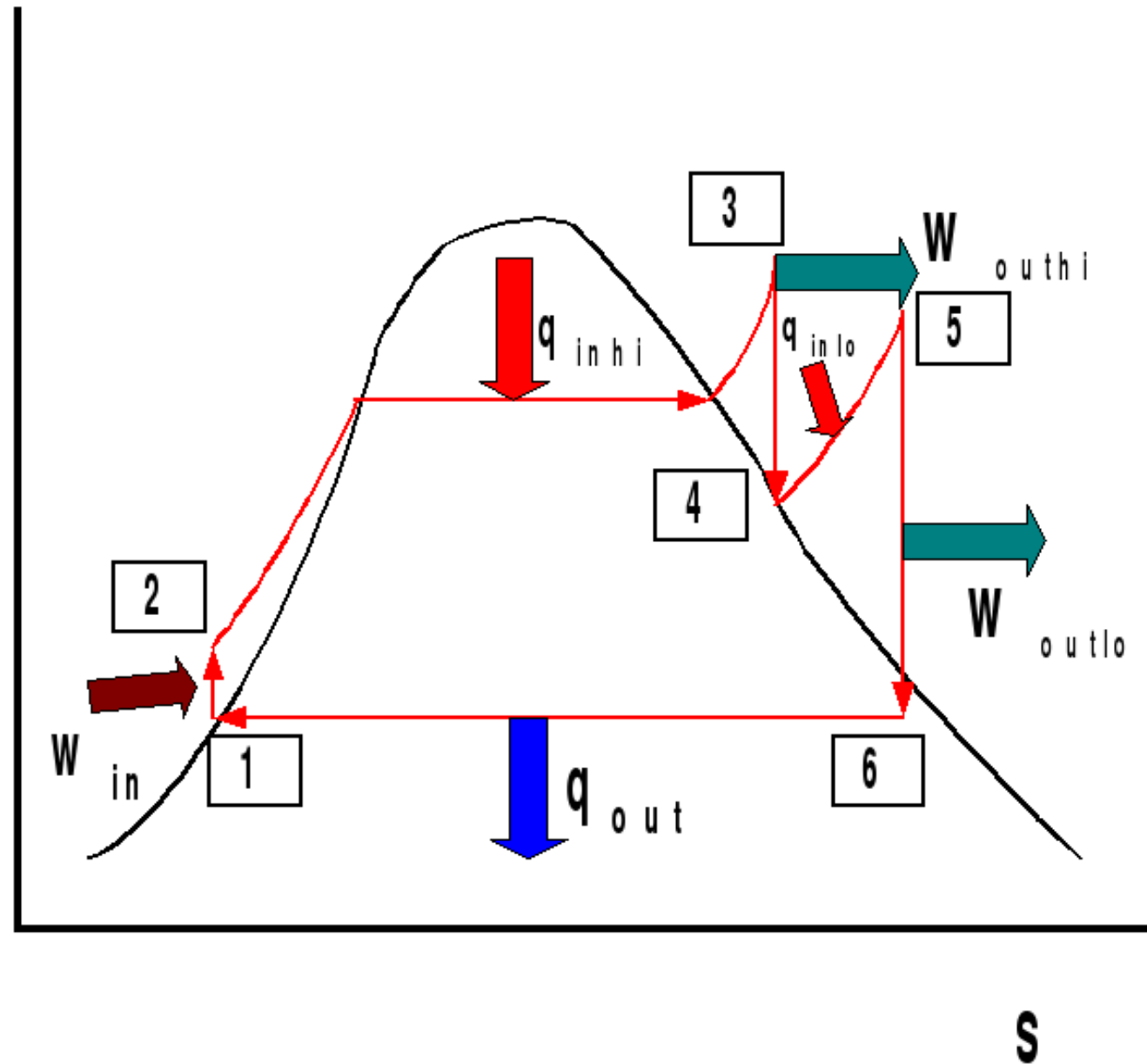
# Reaquecimento de um ciclo Rankine ideal





# Reaquecimento de um ciclo Rankine ideal

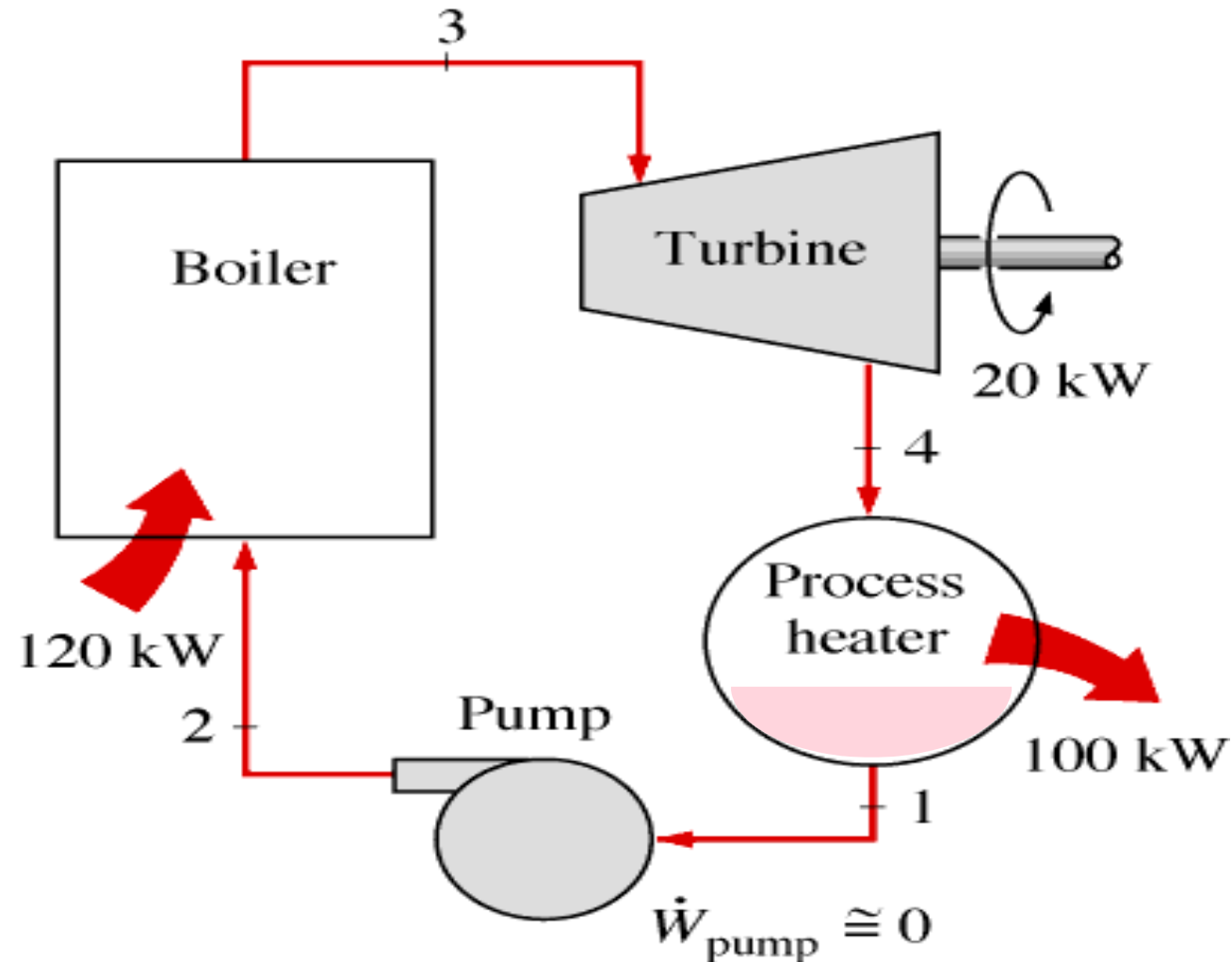
Note que  $T_5 < T_3$ .  
Muitos sistemas  
reaquecem à  
mesma  
temperatura  
( $T_5 = T_3$ ).



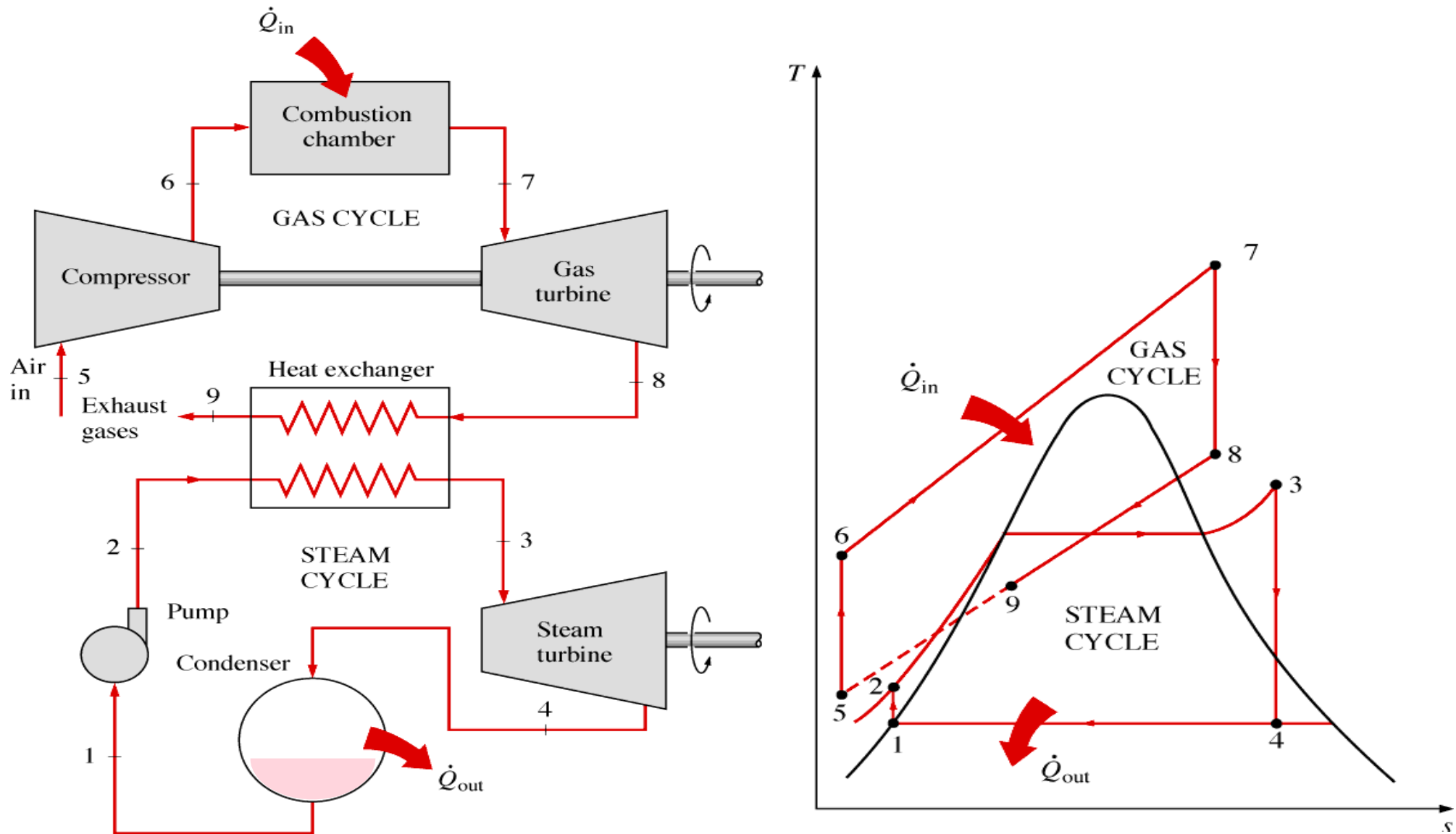
# Cogeração

- ▶ 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



# Usina combinando ciclos a gás e a vapor

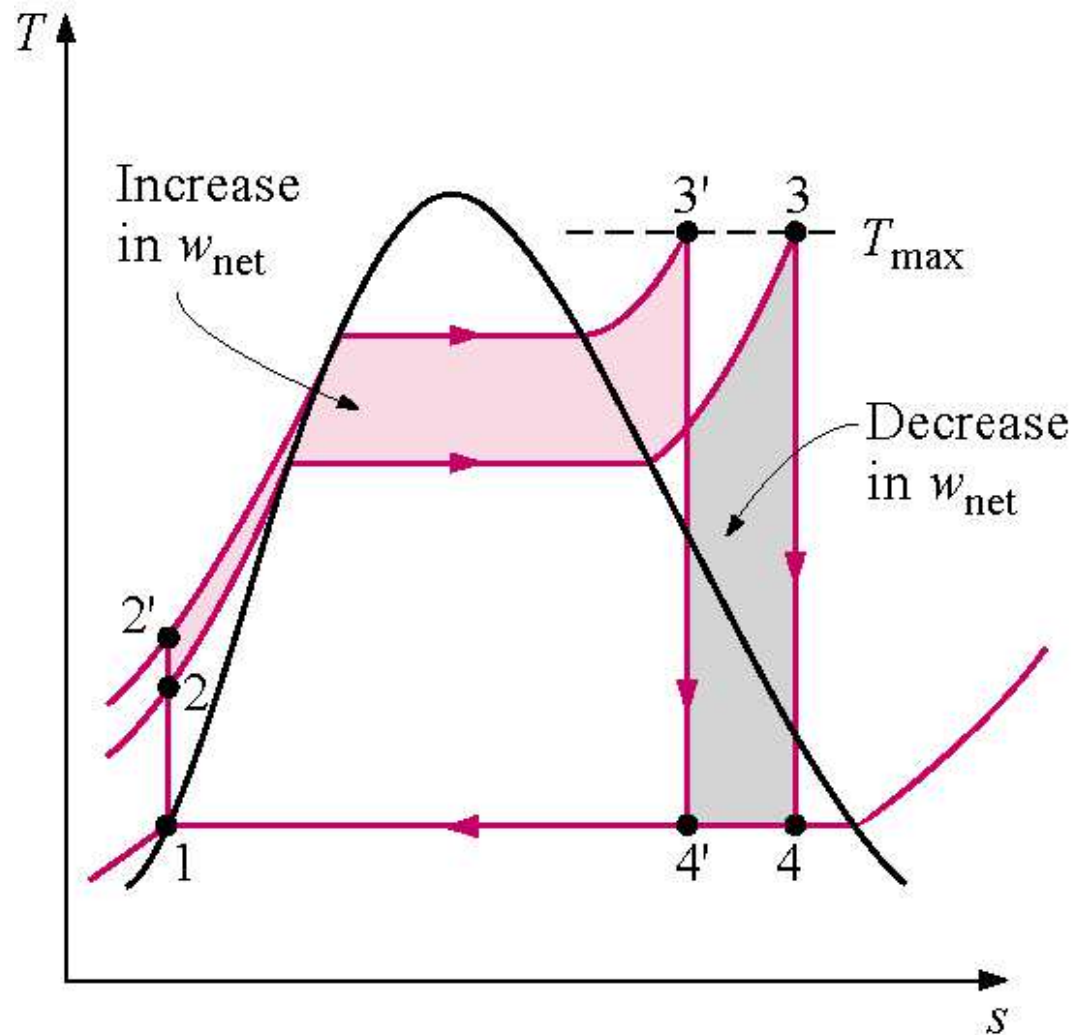


# Questão

► 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 $T_{\max}$



# Ciclo Rankine com perdas e irreversibilidades

- ▶ Aproxima-se mais de ciclos reais
- ▶ Termos mais importantes são:
  - Irreversibilidades na turbina
  - Irreversibilidades na bomba
- ▶ Os outros termos são, em geral, menores
- ▶ Define-se então as eficiências isentrópicas da turbina  $\eta_t$  e da bomba  $\eta_b$

# Eficiências isentrópicas

$$\eta_t = \frac{w_t}{(w_t)_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

$$\eta_b = \frac{(w_b)_s}{w_b} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

- Estas eficiências medem o desvio em relação ao processo real