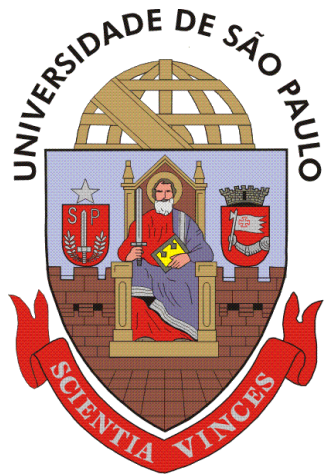




Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



# PME 3344

# Termodinâmica Aplicada

## 11) Ciclos motores a vapor



**Pergunta:** Quanto custa operar uma usina termelétrica de 1000 MW de potência elétrica, queimando combustível fóssil, operando segundo um Ciclo de Rankine com eficiência de 35%, funcionando 24 h / dia, 365 dias / ano, se o custo do combustível é de US\$ 2 por Milhão de BTU?

**Resposta:**

US\$ 468.000 / dia

US\$ 170.820.000 / ano

# Por que estudar mais?



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

**Pergunta:** Se você pudesse melhorar a eficiência desta usina termelétrica de 1000 MW de 35% para 36%, qual seria um preço razoável para este serviço de engenharia?

**Resposta:**

US\$ 13.000 / dia

US\$ 4.745.000 / ano



- \* Ciclo de Potência a Vapor = Ciclo de Rankine;
- \* O Ciclo de Rankine é o ciclo mais utilizado no mundo para produzir eletricidade;
- \* O Ciclo de Rankine pode funcionar com diversos tipos de combustíveis (óleo, gás, biomassa, carvão mineral, combustível nuclear, etc.).
- \* O fluido de trabalho convencional do Ciclo de Rankine é a água.

# Algumas imagens...



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

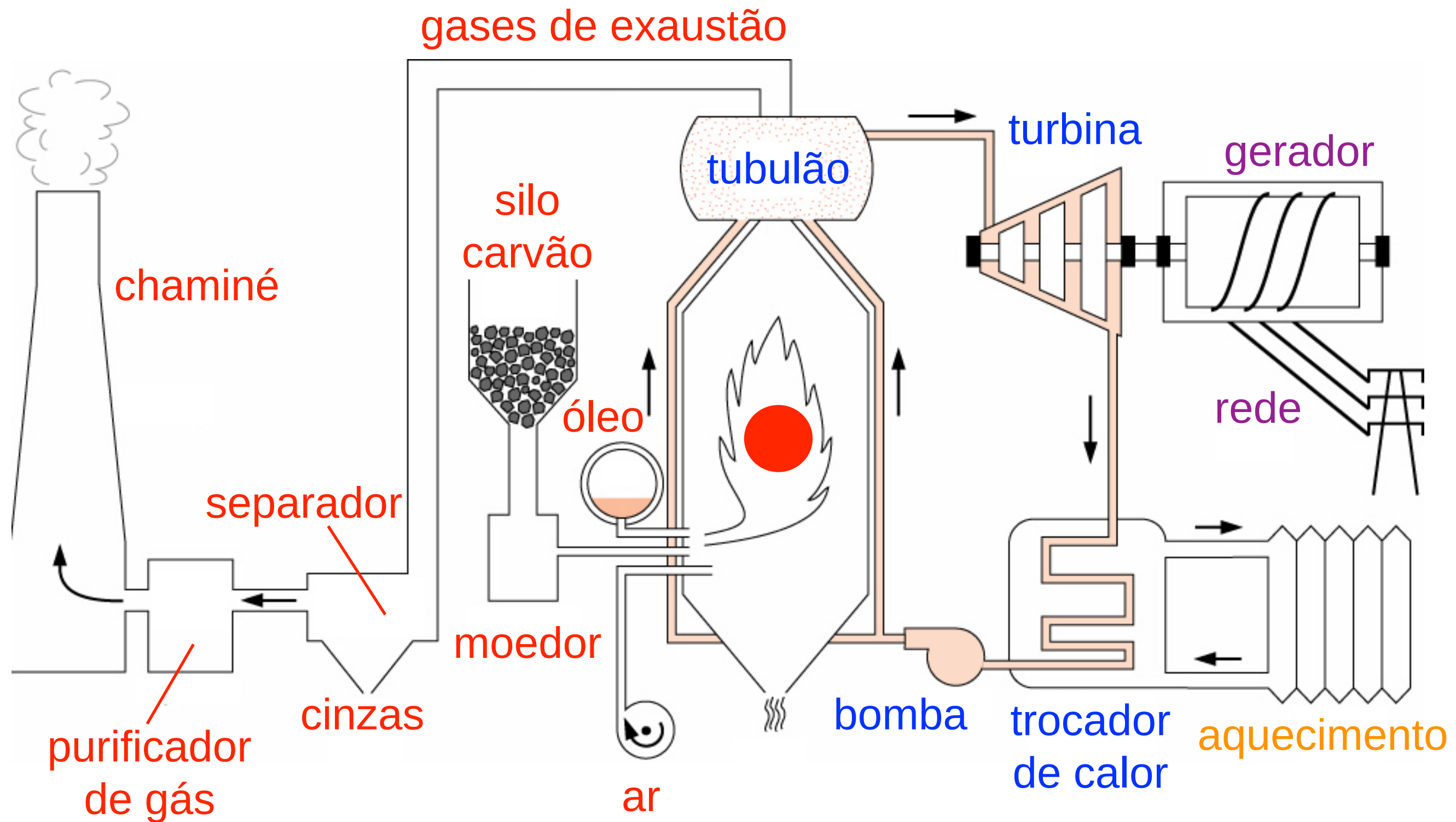


Central termoeleétrica a carvão

# Central termoeleétrica a carvão



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



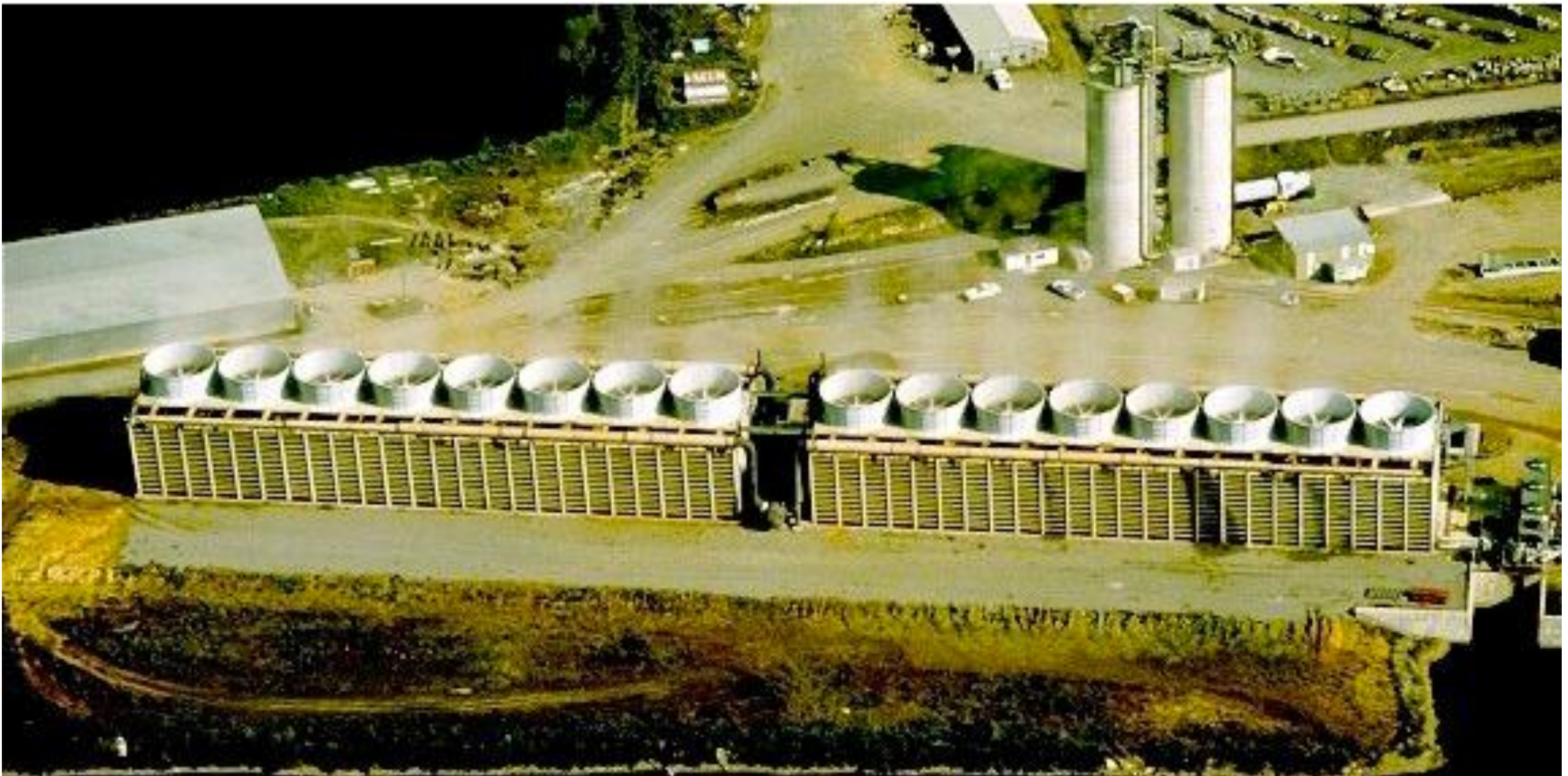
# Algumas imagens...



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



Tubulão de vapor



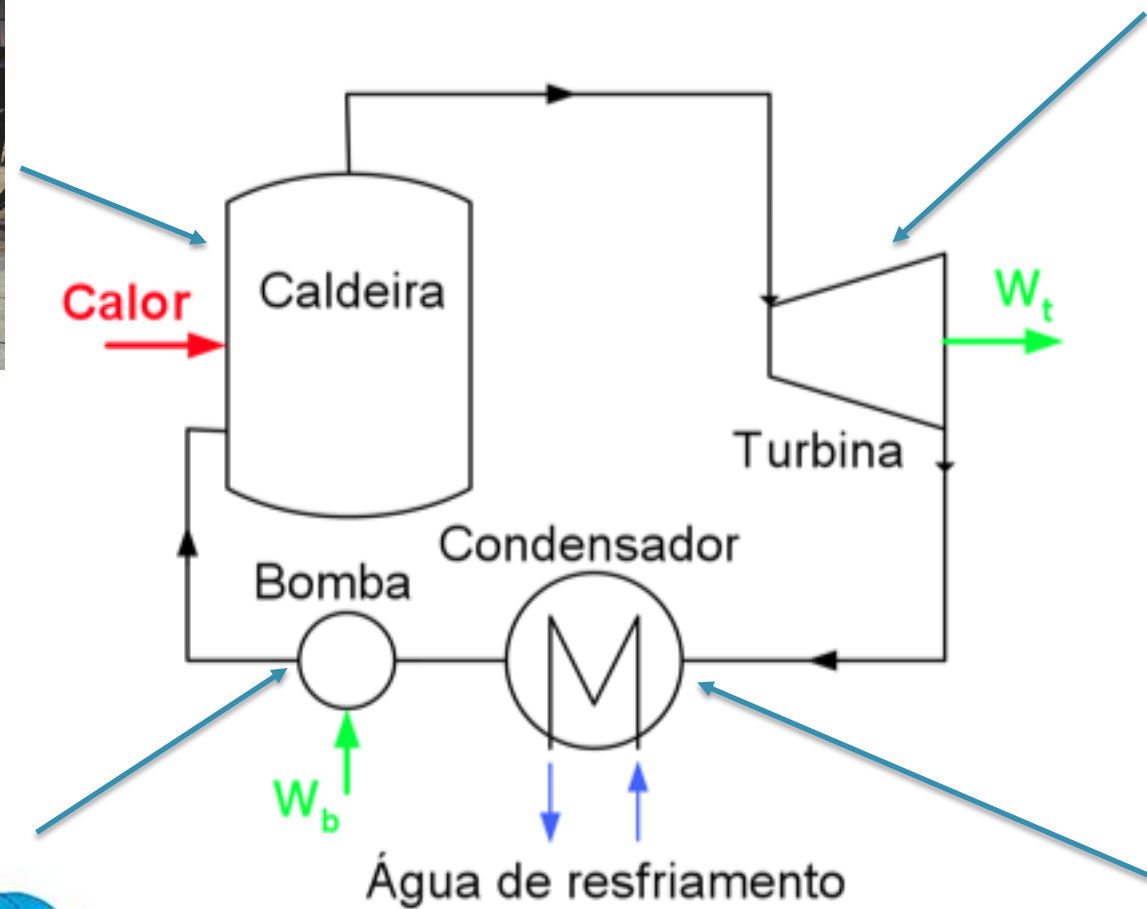
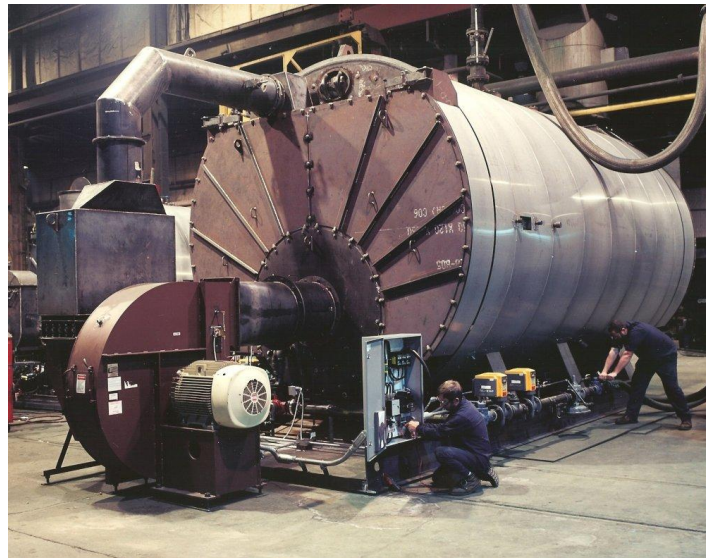
Torres de resfriamento

# Ciclo de potência a vapor



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

## Fluido de trabalho: água

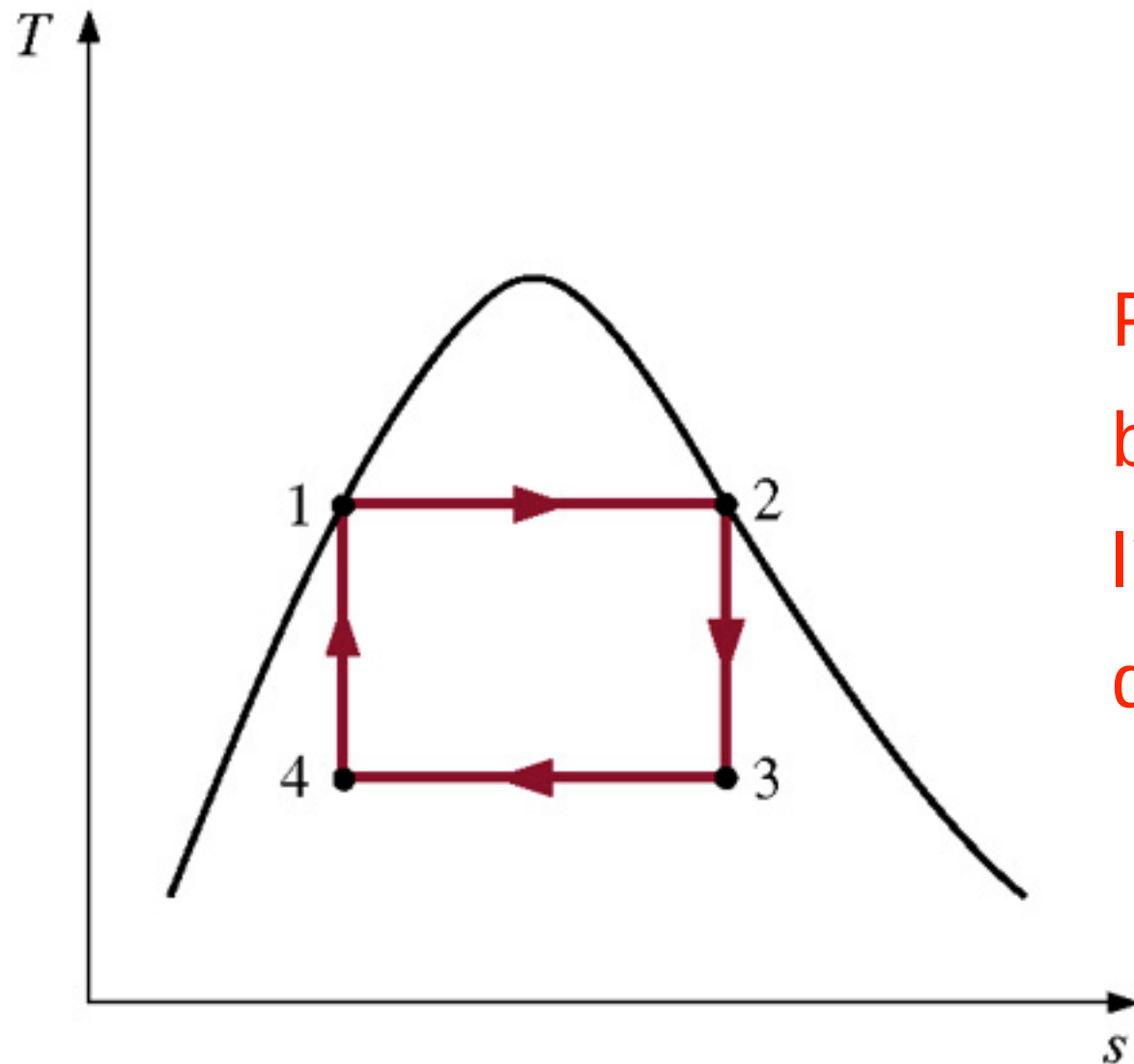


# Por que não usar Carnot?



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Observe:

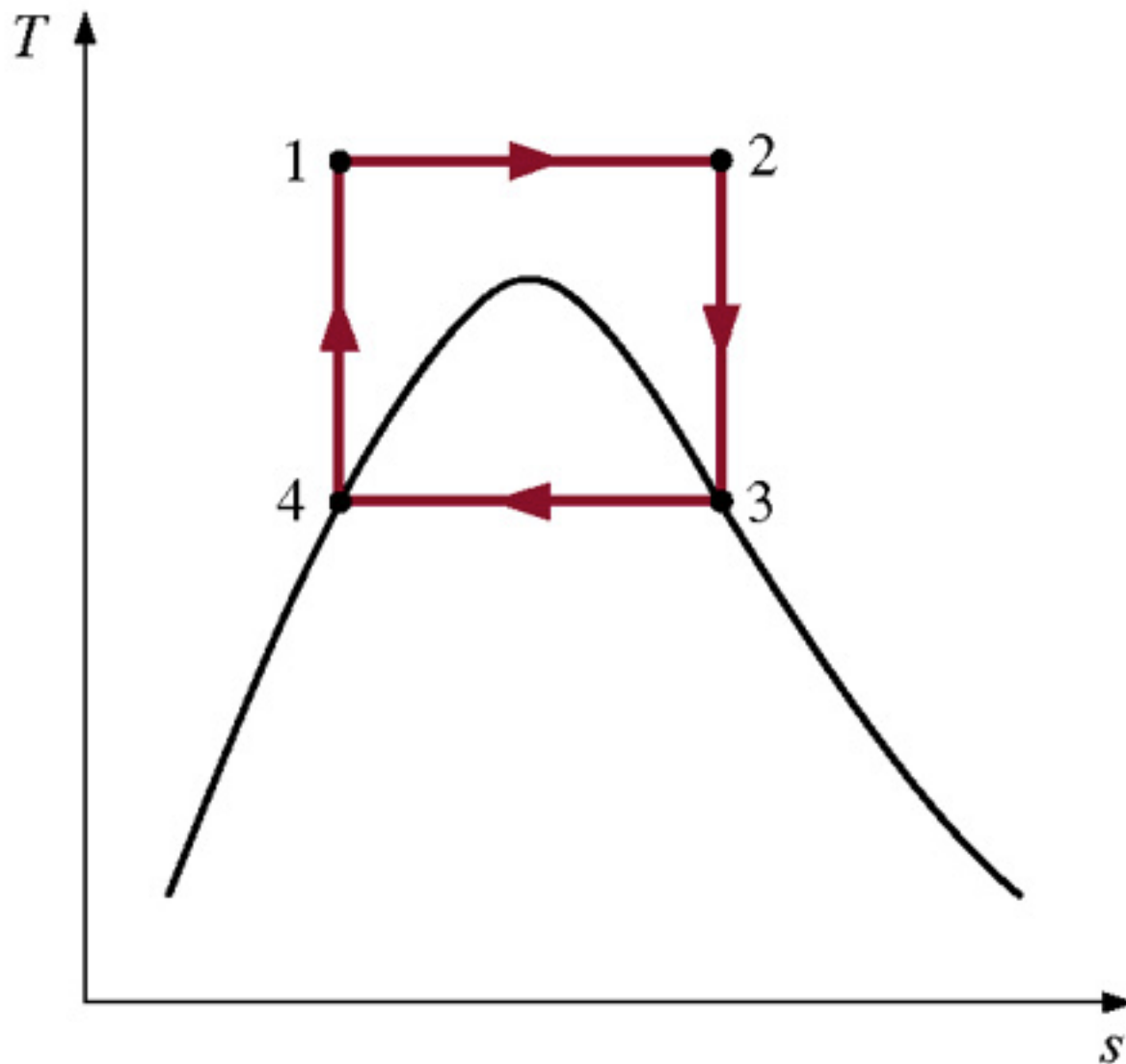


Para o ciclo, o processo 4-1 envolve o bombeamento de uma mistura de líquido e vapor saturados que deve sair da bomba como líquido saturado.



# Por que não usar Carnot?

Observe:



Para o ciclo, a temperatura  $T_{1-2}$  deve ser mantida constante durante o processo de aquecimento, o que exige um sistema de controle elaborado.

O Ciclo de Carnot não é um modelo adequado para ciclos a vapor pois não pode ser realizado na prática!

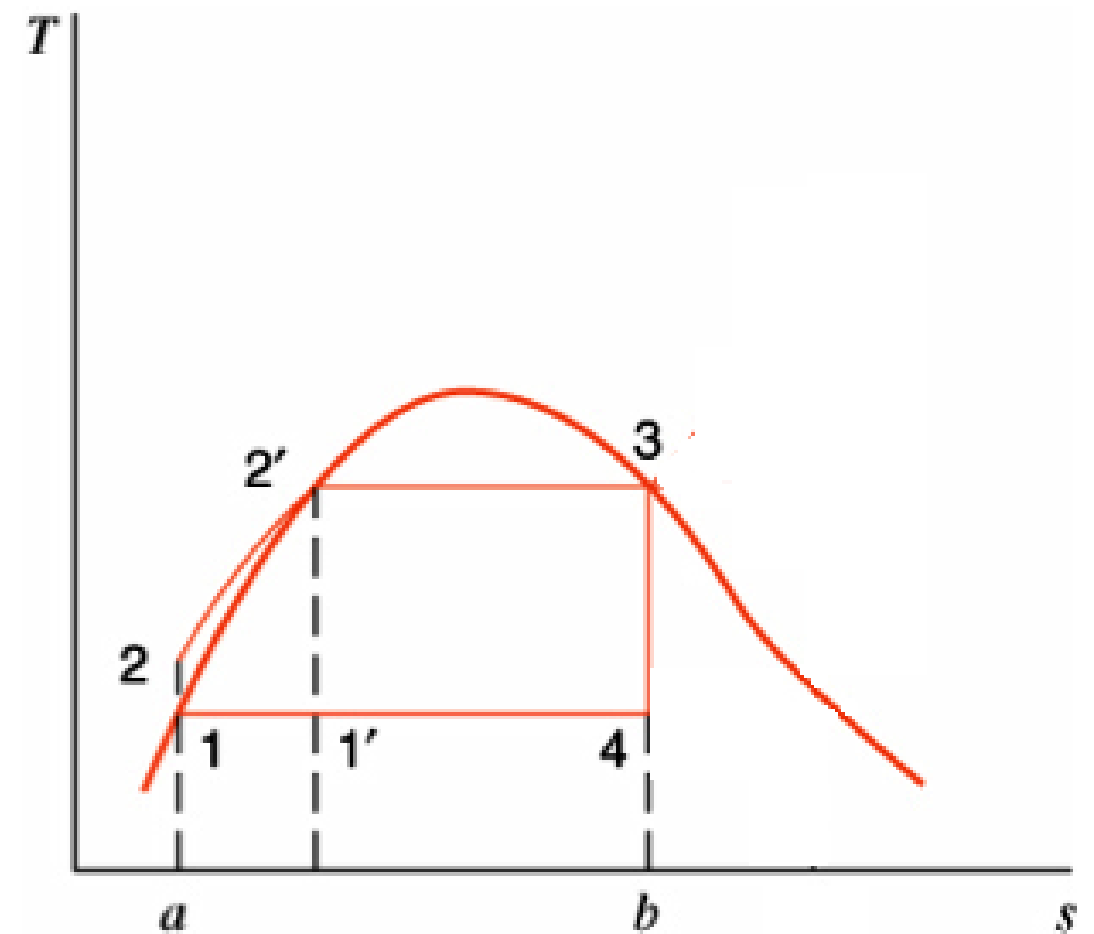


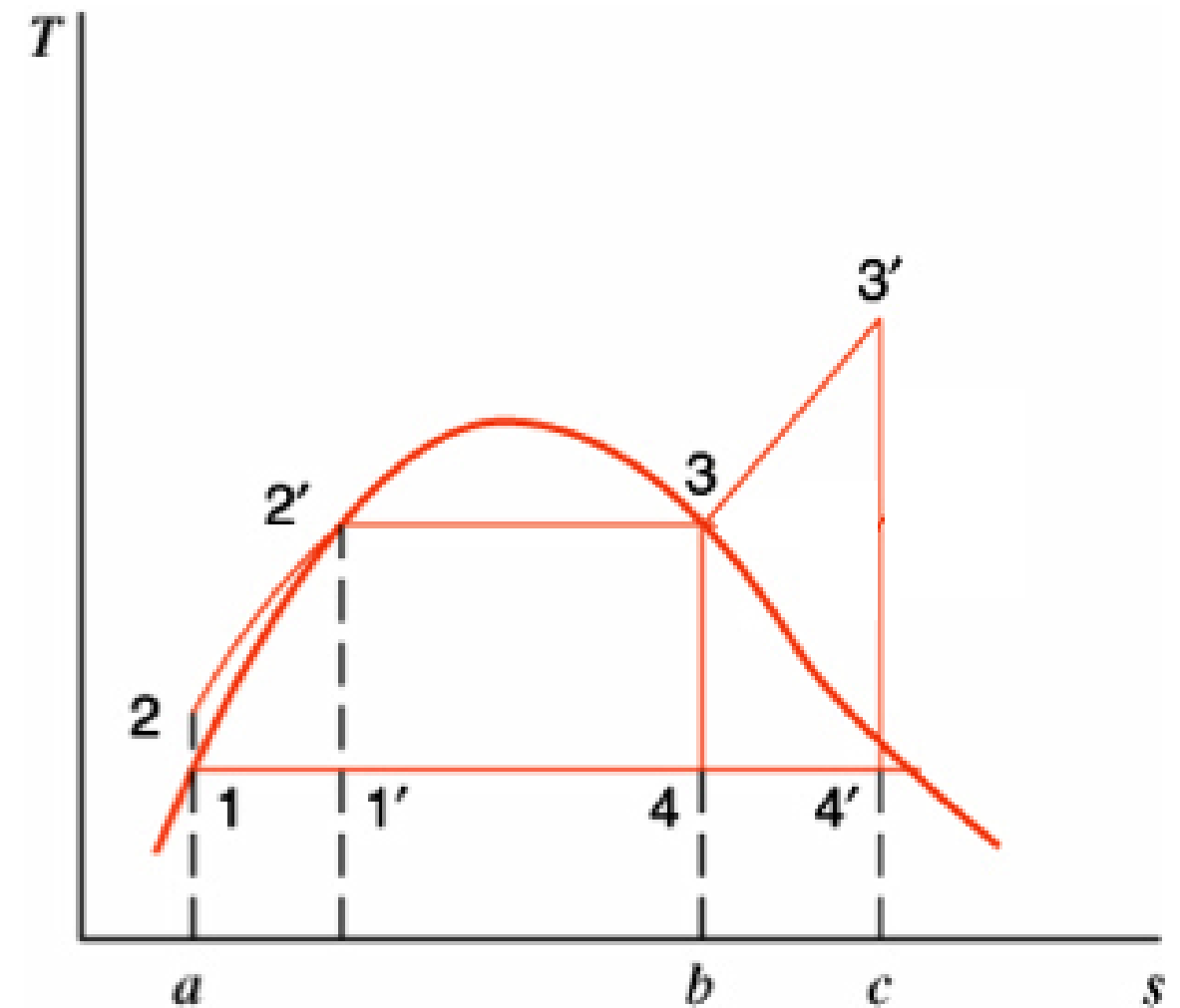
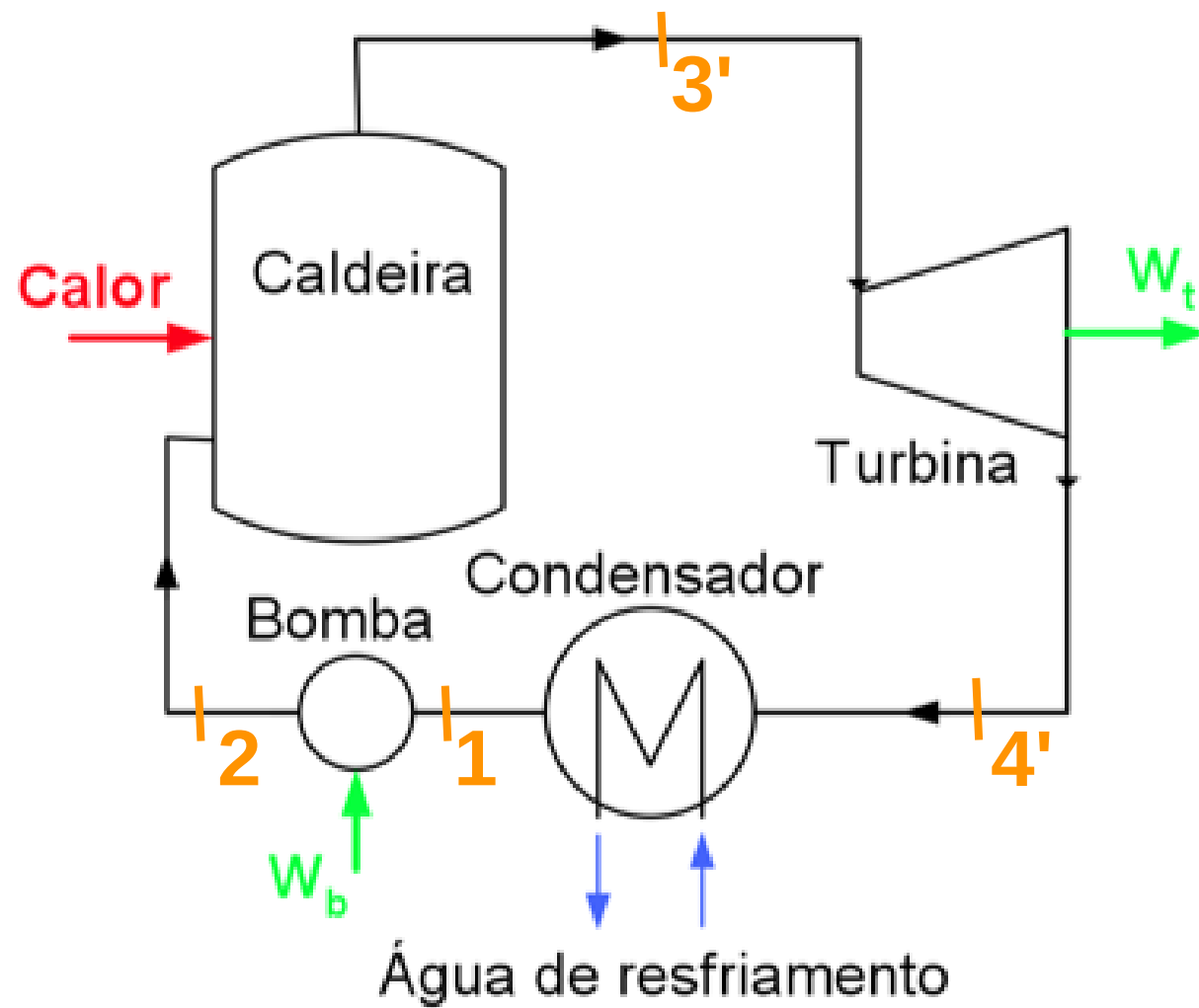
# Ciclo Rankine ideal

O ciclo de potência a vapor ideal é o Ciclo de Rankine, que é composto por quatro processos reversíveis:

- Compressão isentrópica (bomba);
- Fornecimento de calor a pressão constante (gerador de vapor);
- Expansão isentrópica (turbina);
- Rejeição de calor a pressão constante (condensador).

O diagrama ilustra um ciclo termodinâmico fechado. No topo à esquerda, um cilindro rotulado "Caldeira" recebe uma seta vermelha horizontal apontando para ele, rotulada "Calor". Uma linha horizontal superior conecta a caldeira a uma turbina à direita, com uma seta preta apontando para a direita e o número "3" em laranja. A turbina, rotulada "Turbina", tem uma seta verde horizontal apontando para a direita saindo dela, rotulada  $W_t$ . Uma linha vertical à direita conecta a turbina a um condensador na base, com uma seta preta apontando para cima e o número "4" em laranja. O condensador, rotulado "Condensador", é representado por um círculo com uma letra "M" no interior. Abaixo dele, duas setas azuis verticais apontam para cima, rotuladas "Água de resfriamento". Uma linha horizontal inferior conecta o condensador a uma bomba à esquerda, com uma seta preta apontando para a esquerda e o número "1" em laranja. A bomba, rotulada "Bomba", é representada por um círculo vazio. Abaixo dela, uma seta verde vertical aponta para cima, rotulada  $W_b$ . Uma linha vertical à esquerda conecta a bomba de volta à caldeira, com uma seta preta apontando para cima e o número "2" em laranja.

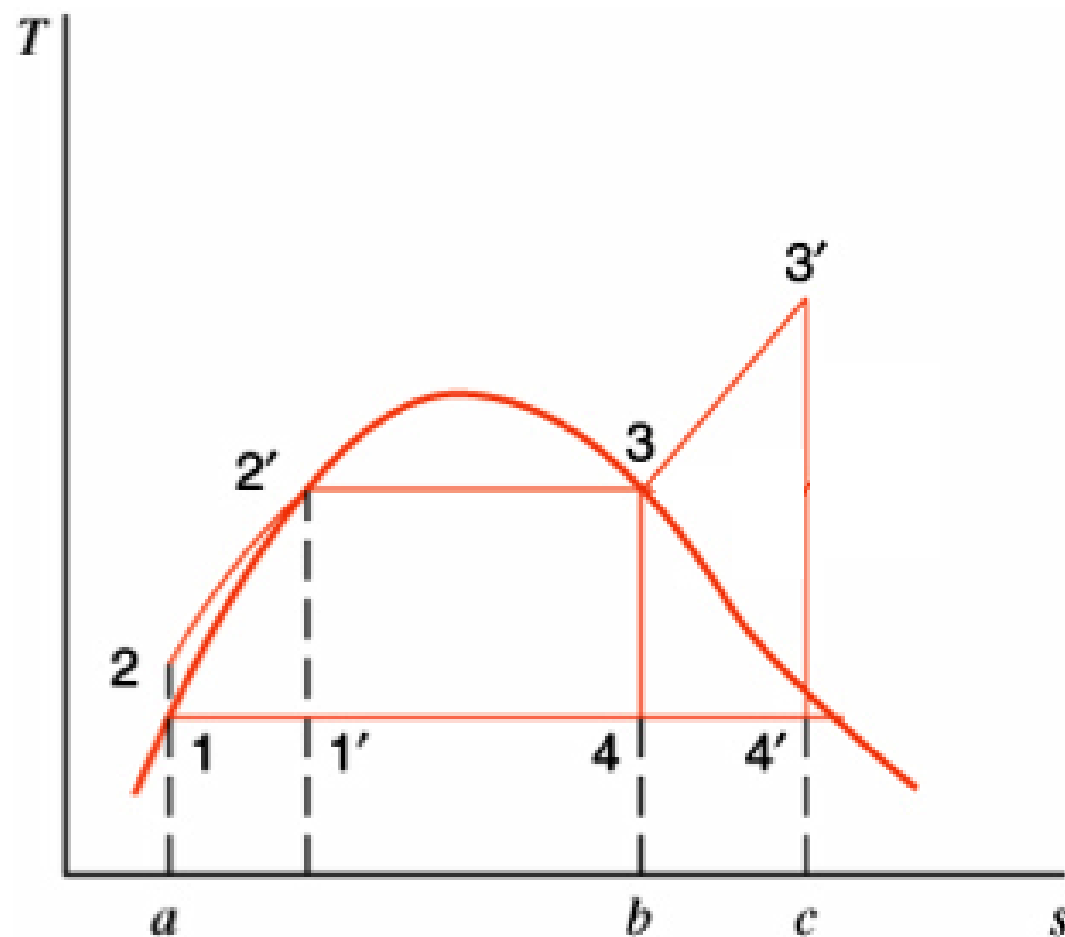






# Rankine - exemplos

1) Comparar os rendimentos térmicos e os títulos na saída de dois ciclos de Rankine, que operem entre 4 MPa e 7,5kPa, sendo um sem superaquecimento, e outro com 250°C de superaquecimento.



s/ superaquecimento:

1-2-2'-3-4-1

c/ superaquecimento:

1-2-2'-3-3'-4'-1

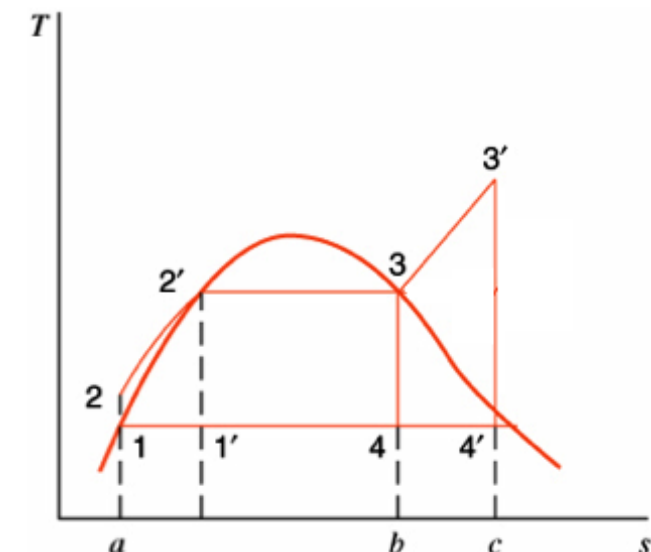
## Estado 1: líquido saturado

| Pressão | Temp. | Volume específico   |        | Energia interna |        | Entalpia |        | Entropia    |        |
|---------|-------|---------------------|--------|-----------------|--------|----------|--------|-------------|--------|
|         |       | m <sup>3</sup> / kg |        | kJ / kg         |        | kJ / kg  |        | kJ / (kg.K) |        |
| kPa     | °C    | Líquido             | Vapor  | Líquido         | Vapor  | Líquido  | Vapor  | Líquido     | Vapor  |
| 7,5     | 40,29 | 0,001008            | 19,238 | 168,76          | 2430,5 | 168,77   | 2574,8 | 0,5763      | 8,2514 |

## Estado 2: processo isentrópico

$${}_1w_2 = -v\Delta P = -0,001008 \cdot (4000 - 7,5) = -4,02 \text{ kJ / kg}$$

$${}_1w_2 = h_1 - h_2 = -4,02 \text{ kJ / kg} \Rightarrow h_2 = 172,8 \text{ kJ / kg}$$

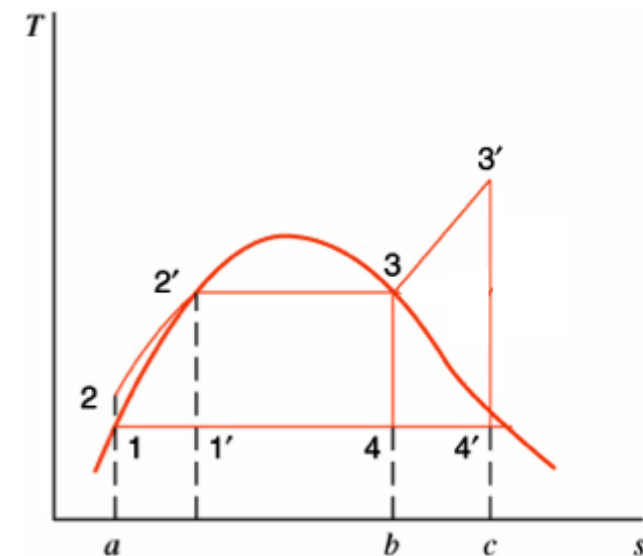


## Estado 3: vapor saturado

| Pressão<br>MPa | Temp.<br>°C | Volume específico<br>m <sup>3</sup> / kg |          | Energia interna<br>kJ / kg |        | Entalpia<br>kJ / kg |        | Entropia<br>kJ / (kg.K) |        |
|----------------|-------------|------------------------------------------|----------|----------------------------|--------|---------------------|--------|-------------------------|--------|
|                |             | Líquido                                  | Vapor    | Líquido                    | Vapor  | Líquido             | Vapor  | Líquido                 | Vapor  |
| 4,00           | 250,40      | 0,001252                                 | 0,049778 | 1082,28                    | 2602,3 | 1087,29             | 2801,4 | 2,7963                  | 6,0700 |

## Estado 4: mistura - processo isentrópico

$$s_3 = s_4 = 6,0700 \text{ kJ / kgK}$$



| Pressão<br>kPa | Temp.<br>°C | Volume específico<br>m <sup>3</sup> / kg |        | Energia interna<br>kJ / kg |        | Entalpia<br>kJ / kg |        | Entropia<br>kJ / (kg.K) |        |
|----------------|-------------|------------------------------------------|--------|----------------------------|--------|---------------------|--------|-------------------------|--------|
|                |             | Líquido                                  | Vapor  | Líquido                    | Vapor  | Líquido             | Vapor  | Líquido                 | Vapor  |
| 7,5            | 40,29       | 0,001008                                 | 19,238 | 168,76                     | 2430,5 | 168,77              | 2574,8 | 0,5763                  | 8,2514 |

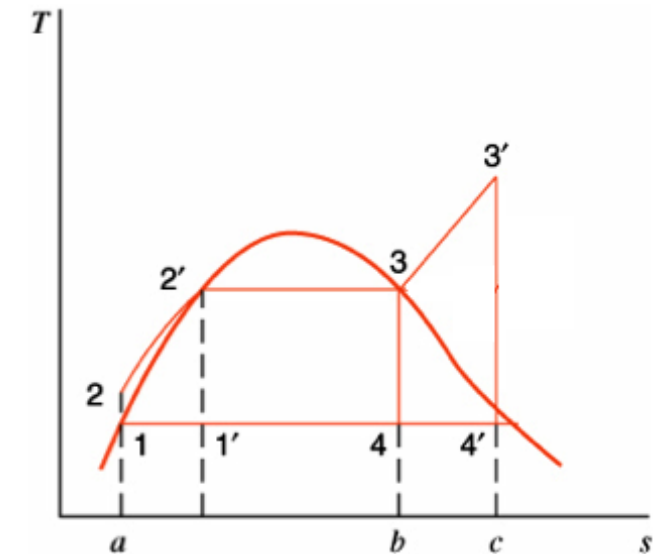
$$s_4 = (1 - x_4)s_l + x_4s_v \Rightarrow x_4 = 0,716 \Rightarrow h_4 = 1891 \text{ kJ / kg}$$



# Rankine - exemplos

**Estado 3': vapor superaquecido**

$$T_{3'} = T_3 + 250^{\circ}\text{C} = 500,4^{\circ}\text{C}$$



**Estado 4': mistura - processo isentrópico**

$$s_{3'} = s_{4'} = 7,0900 \text{ kJ} / \text{kgK}$$

|         |                    | Volume específico        |        | Energia interna         |        | Entalpia                |        | Entropia                    |        |
|---------|--------------------|--------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| Pressão | Temp.              | $\text{m}^3 / \text{kg}$ |        | $\text{kJ} / \text{kg}$ |        | $\text{kJ} / \text{kg}$ |        | $\text{kJ} / (\text{kg.K})$ |        |
| kPa     | $^{\circ}\text{C}$ | Líquido                  | Vapor  | Líquido                 | Vapor  | Líquido                 | Vapor  | Líquido                     | Vapor  |
| 7,5     | 40,29              | 0,001008                 | 19,238 | 168,76                  | 2430,5 | 168,77                  | 2574,8 | 0,5763                      | 8,2514 |

$$s_{4'} = (1 - x_{4'})s_l + x_{4'}s_v \Rightarrow x_{4'} = 0,849 \Rightarrow h_{4'} = 2211 \text{ kJ} / \text{kg}$$

Vale a pena agrupar os dados em uma tabela...

| Estado | P / kPa | T / °C | v / (m³/kg) | h / (kJ/kg) | s / (kJ/kg K) | x     |
|--------|---------|--------|-------------|-------------|---------------|-------|
| 1      | 7,5     | 40,29  | 0,001008    | 168,77      | -----         | 0     |
| 2      | 4000    | -----  | -----       | 172,8       | -----         | ----- |
| 3      | 4000    | 250,4  | -----       | 2801,4      | 6,0700        | 1     |
| 3'     | 4000    | 500,4  | -----       | 3445,21     | 7,0900        | ----- |
| 4      | 7,5     | 40,29  | -----       | 1891        | 6,0700        | 0,716 |
| 4'     | 7,5     | 40,29  | -----       | 2211        | 7,0900        | 0,848 |

$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = 0,344$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 910 \text{ kJ / kg}$$

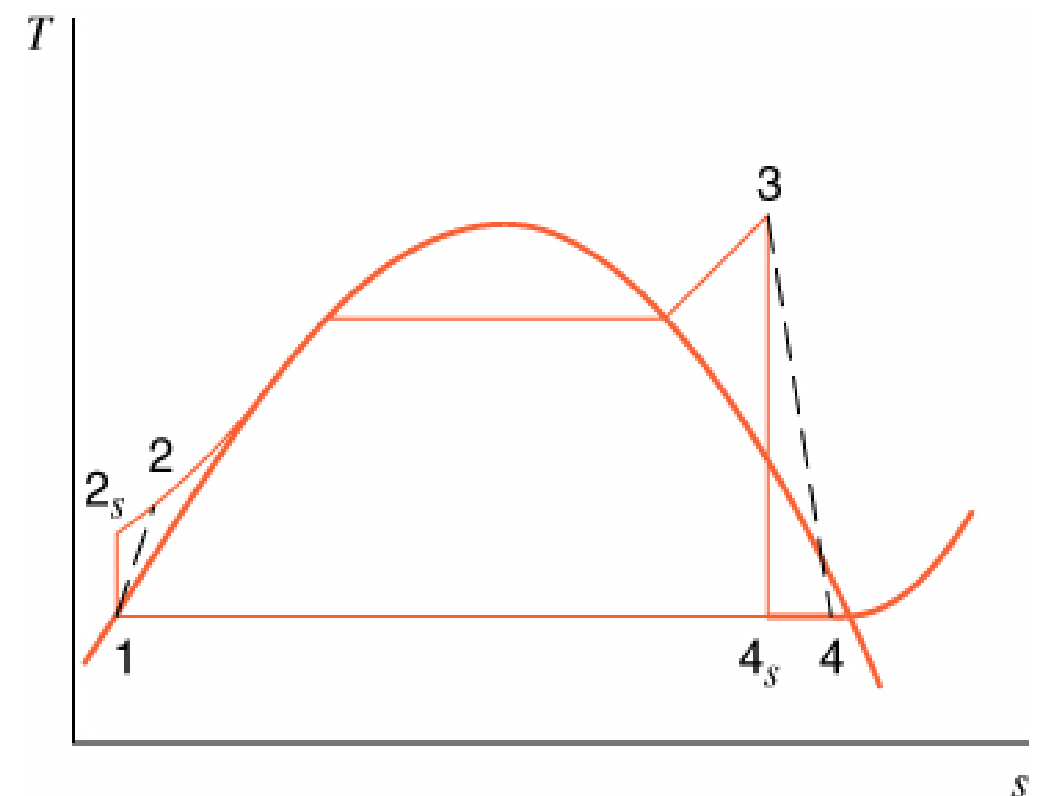
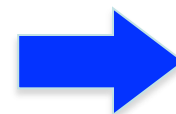
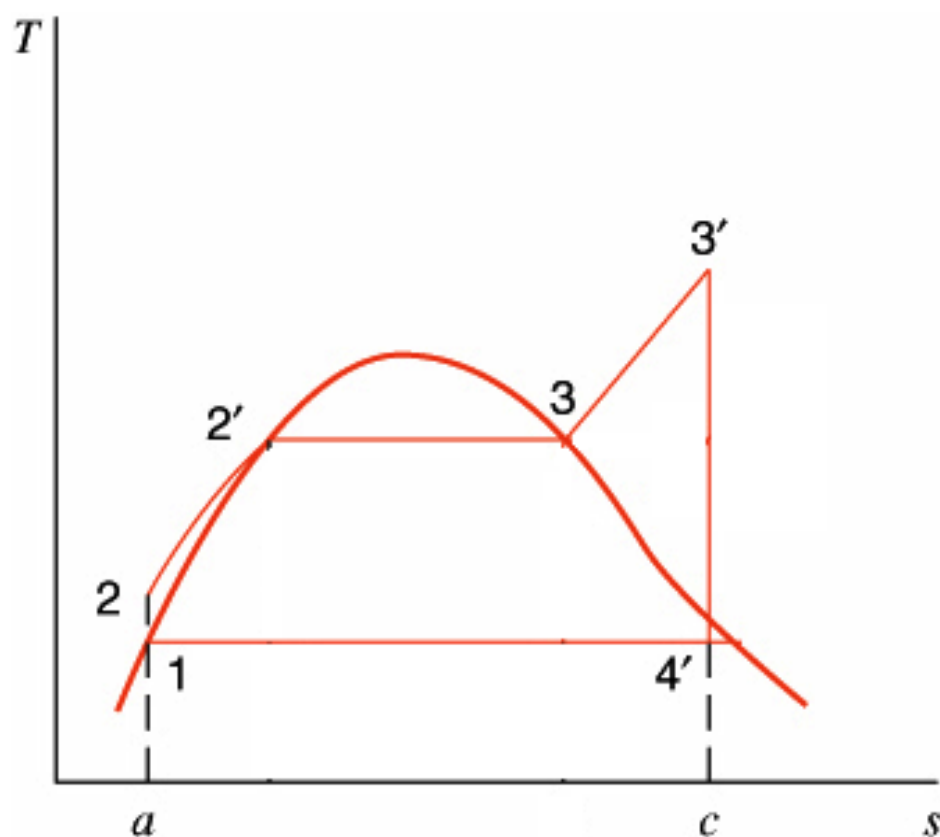
$$\eta' = \frac{h_{3'} - h_{4'} + h_1 - h_2}{h_{3'} - h_2} = 0,376$$

$$w_t = h_{3'} - h_{4'} = 1234 \text{ kJ / kg}$$



# Rankine - exemplos

2) No ciclo Rankine com superaquecimento anterior, admita que os rendimentos isentrópicos da turbina e da bomba sejam de 90% e 85%, respectivamente. Qual o novo rendimento térmico?



## Estado 2: líquido comprimido

$$\eta_b = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} \Rightarrow h_1 - h_2 = \frac{h_1 - h_{2s}}{\eta_b} = \frac{-4,02}{0,85} = -4,73 \text{ kJ / kg}$$

$$h_2 = 173,5 \text{ kJ / kg}$$

## Estado 4': mistura (?)

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \Rightarrow h_3 - h_4 = \eta_t \cdot (h_3 - h_{4s}) = 0,9 \cdot (3445,21 - 2211) = 1111 \text{ kJ / kg}$$

$$h_4 = 2334 \text{ kJ / kg}$$

|         |       | Volume específico   |        | Energia interna |        | Entalpia |        | Entropia    |        |
|---------|-------|---------------------|--------|-----------------|--------|----------|--------|-------------|--------|
| Pressão | Temp. | m <sup>3</sup> / kg |        | kJ / kg         |        | kJ / kg  |        | kJ / (kg.K) |        |
| kPa     | °C    | Líquido             | Vapor  | Líquido         | Vapor  | Líquido  | Vapor  | Líquido     | Vapor  |
| 7,5     | 40,29 | 0,001008            | 19,238 | 168,76          | 2430,5 | 168,77   | 2574,8 | 0,5763      | 8,2514 |



## Novo rendimento

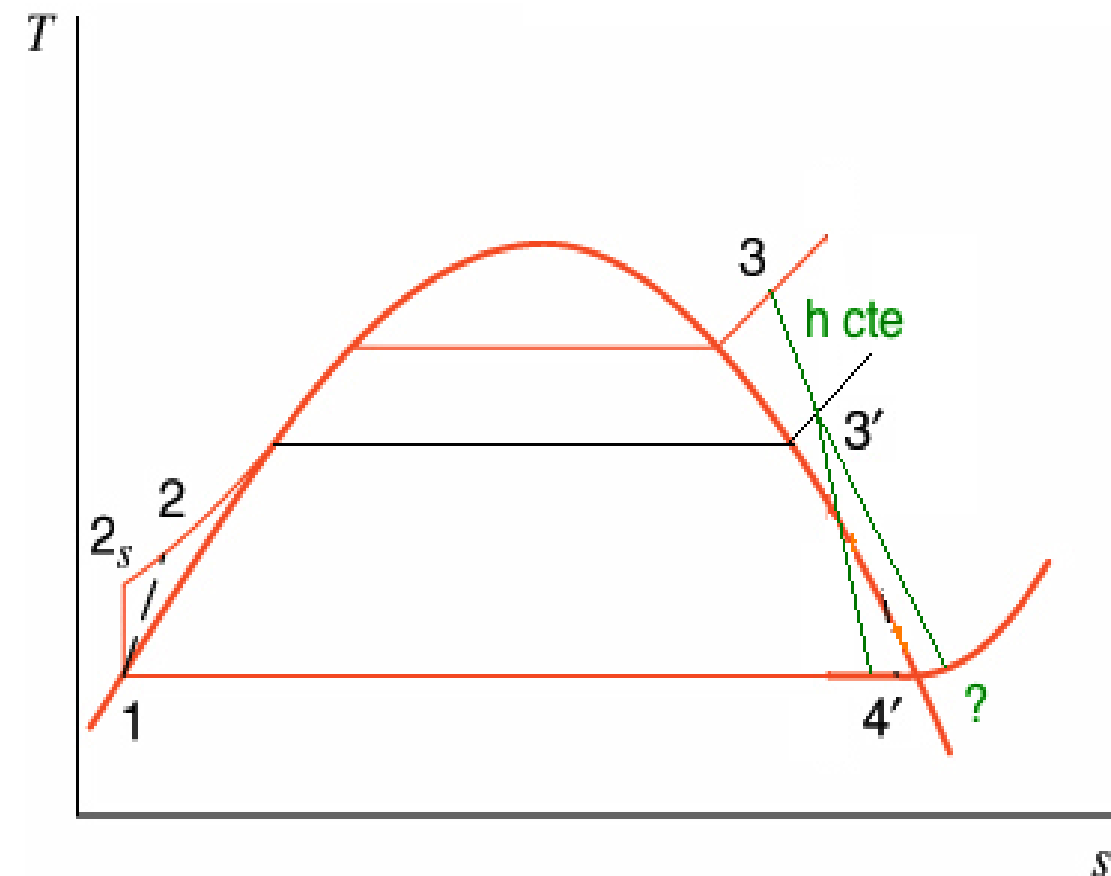
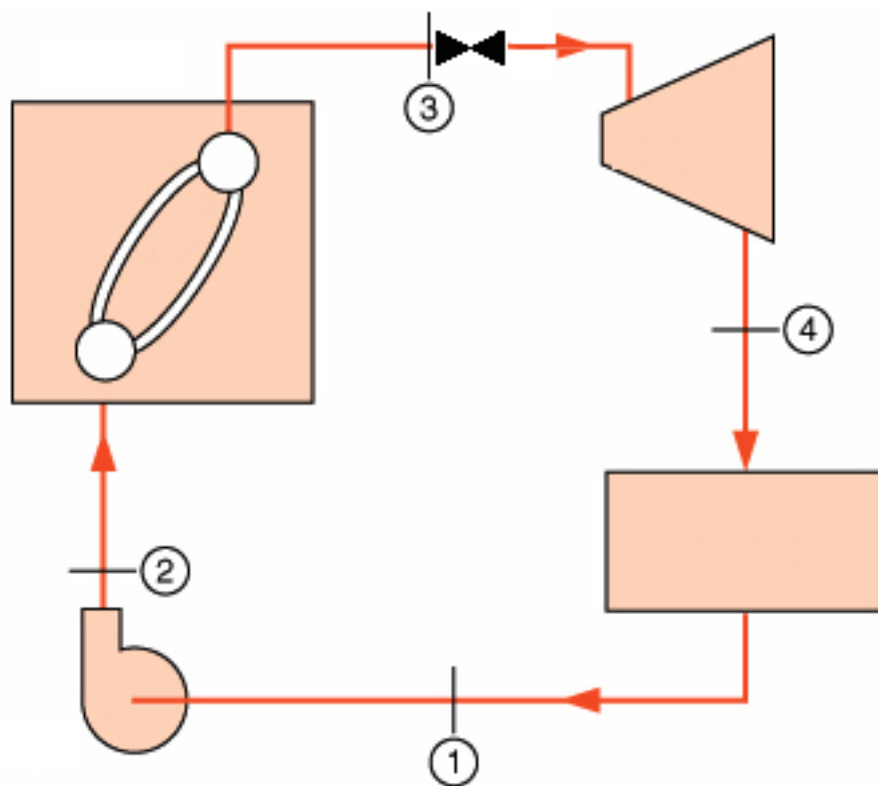
$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{1111 - 4,73}{3445,21 - 173,5} = 0,338$$

**Compare com o anterior de 0,376.**



# Rankine - exemplos

3) No ciclo anterior, para qual pressão deve o vapor ser estrangulado em uma válvula garganta antes da turbina, para operar em carga parcial de 80% da potência anterior? Admita a mesma vazão no novo ciclo, proporcionada pelo sistema de controle da planta.



$$h_3 = 3445,21 \text{ kJ/kg}$$



# Rankine - exemplos

- Potência anterior e trabalho específico

$$\dot{W} = \dot{m}(h_3 - h_4) \Rightarrow \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = 1111 \text{ kJ / kg}$$

- Nova potência e trabalho específico (mesma vazão)

$$\dot{W}' = 0,8 \cdot \dot{W} \Rightarrow \frac{\dot{W}'}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}(h_{3'} - h_{4'})}{\dot{m}(h_3 - h_4)} = \frac{h_{3'} - h_{4'}}{h_3 - h_4} = 0,8$$

$$\Rightarrow h_{3'} - h_{4'} = 889 \text{ kJ / kg}$$

- Para o mesmo rendimento isentrópico da turbina

$$\eta_t = \frac{h_{3'} - h_{4'}}{h_{3'} - h_{4s}} \Rightarrow h_{4s} = h_{3'} - \frac{h_{3'} - h_{4'}}{\eta_t} = 2457 \text{ kJ / kg}$$



# Rankine - exemplos

## Estado 4's: mistura

$$h_{4s} = 2457 \text{ kJ / kg}$$

| Pressão<br>kPa | Temp.<br>°C | Volume específico<br>m <sup>3</sup> / kg |        | Energia interna<br>kJ / kg |        | Entalpia<br>kJ / kg |        | Entropia<br>kJ / (kg.K) |        |
|----------------|-------------|------------------------------------------|--------|----------------------------|--------|---------------------|--------|-------------------------|--------|
|                |             | Líquido                                  | Vapor  | Líquido                    | Vapor  | Líquido             | Vapor  | Líquido                 | Vapor  |
| 7,5            | 40,29       | 0,001008                                 | 19,238 | 168,76                     | 2430,5 | 168,77              | 2574,8 | 0,5763                  | 8,2514 |

$$\Rightarrow x_{4s} = 0,951 \Rightarrow s_{4s} = 7,88 \text{ kJ / kgK}$$

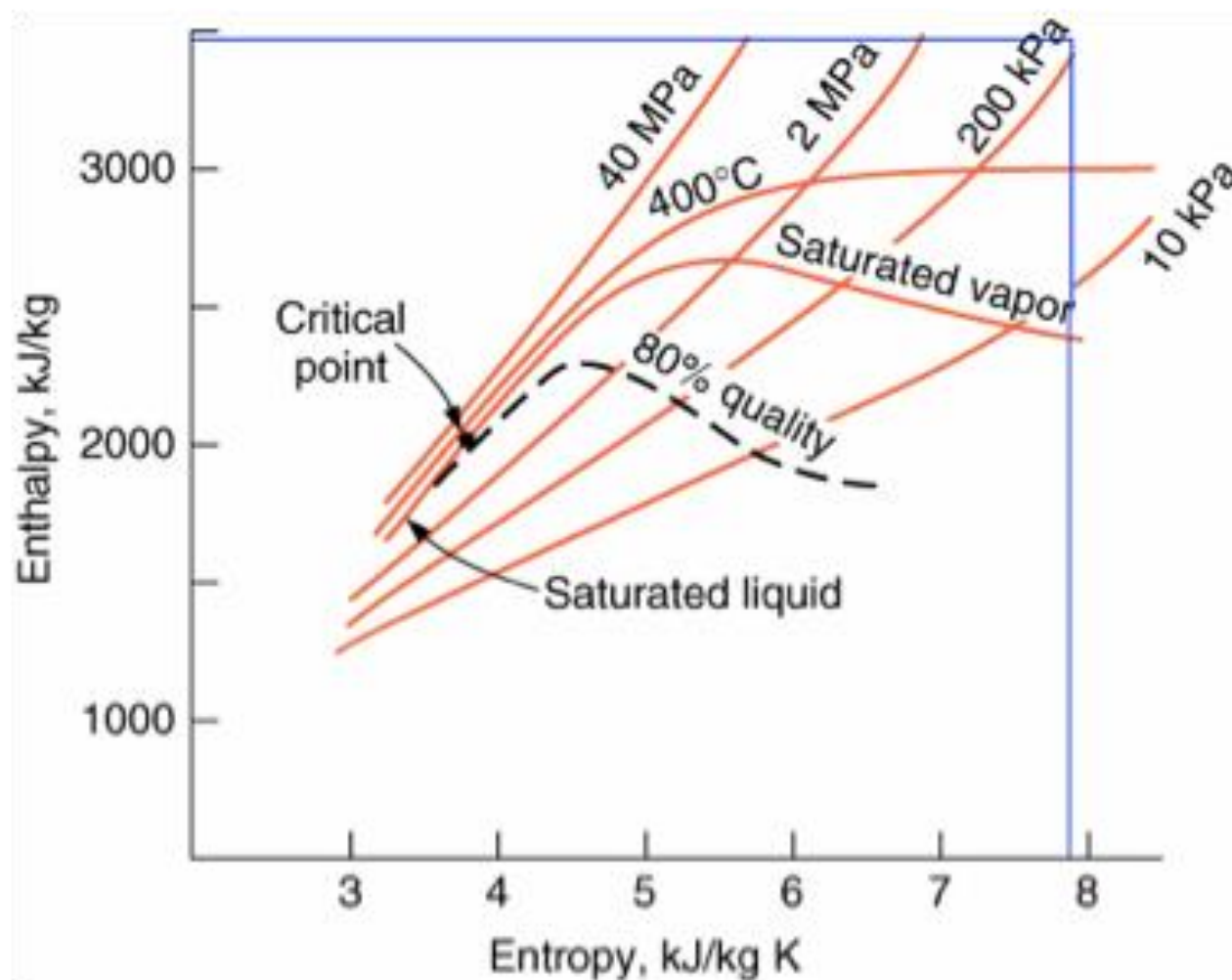
## Estado 3': vapor superaquecido

$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ / kgK}$$

$$h_{3'} = h_3 = 3445,21 \text{ kJ / kg}$$

## Estado 3': vapor superaquecido

$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ / kgK} \quad h_{3'} = h_3 = 3445,21 \text{ kJ / kg}$$



$$400 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$200 \text{ kPa} < P < 2 \text{ MPa}$$



## Estado 3': vapor superaquecido

|                  | $P = 600 \text{ kPa (158,85 °C)}$ |        |        |        | $P = 800 \text{ kPa (170,43 °C)}$ |        |        |        |
|------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| $T \text{ (°C)}$ | $v$                               | $u$    | $h$    | $s$    | $v$                               | $u$    | $h$    | $s$    |
| 400              | 0,51372                           | 2962,0 | 3270,2 | 7,7078 | 0,38426                           | 2959,7 | 3267,1 | 7,5715 |
| 500              | 0,59199                           | 3127,6 | 3482,7 | 8,0020 | 0,44331                           | 3125,9 | 3480,6 | 7,8672 |

Inteporlação para  
determinar T

Inteporlação para determinar P

Chegamos em  $T = 482 \text{ °C}$   
 $P = 700 \text{ kPa}$

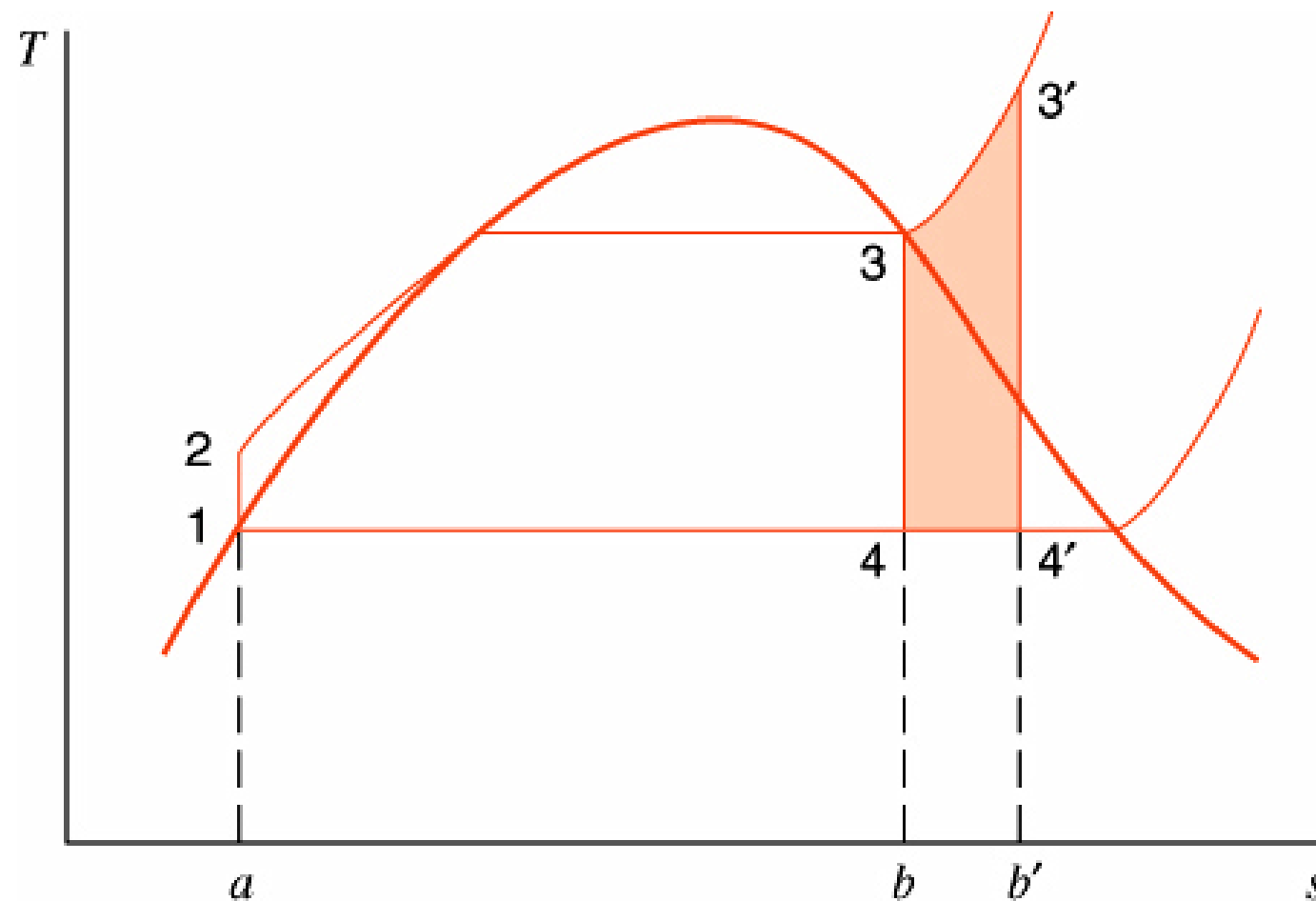
Software  $T = 482,8 \text{ °C}$   
 $P = 705 \text{ kPa}$

**Resposta  $P = 700 \text{ kPa}$**



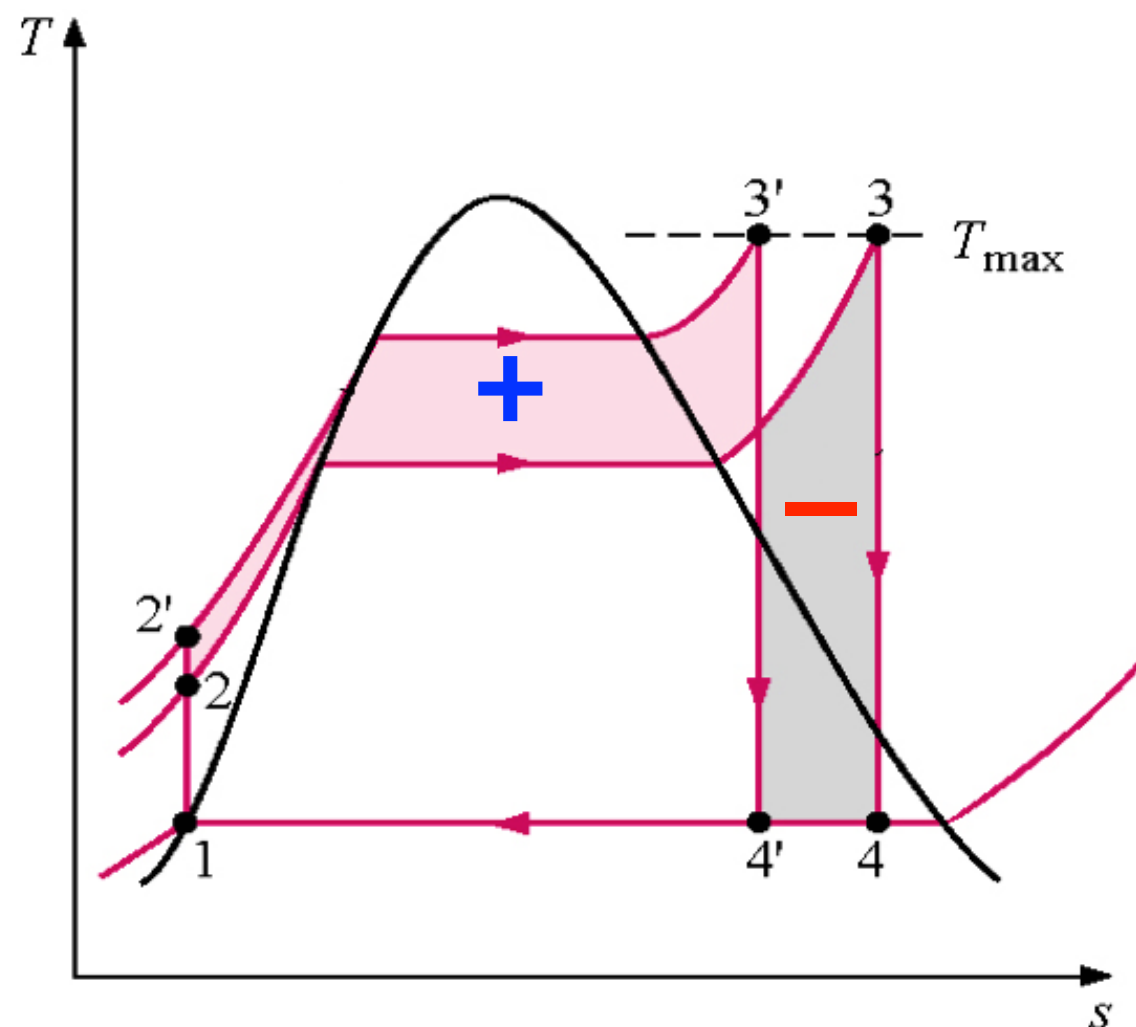
## ★ Superaquecimento do vapor:

- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Menor umidade na saída da turbina.



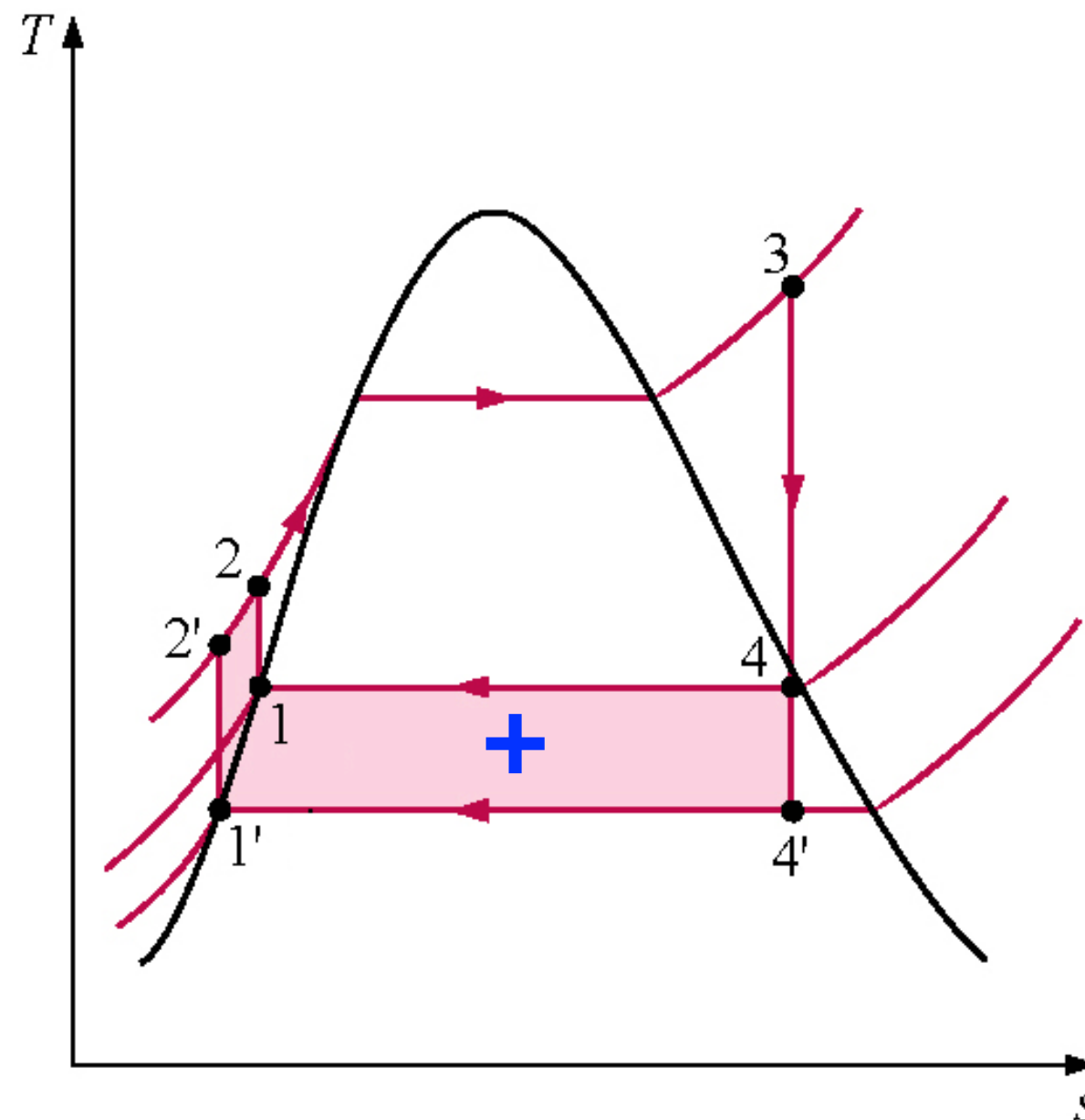
## ★ Aumento da pressão do gerador de vapor

- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Maior umidade na saída da turbina.



## ★ Diminuição da pressão no condensador

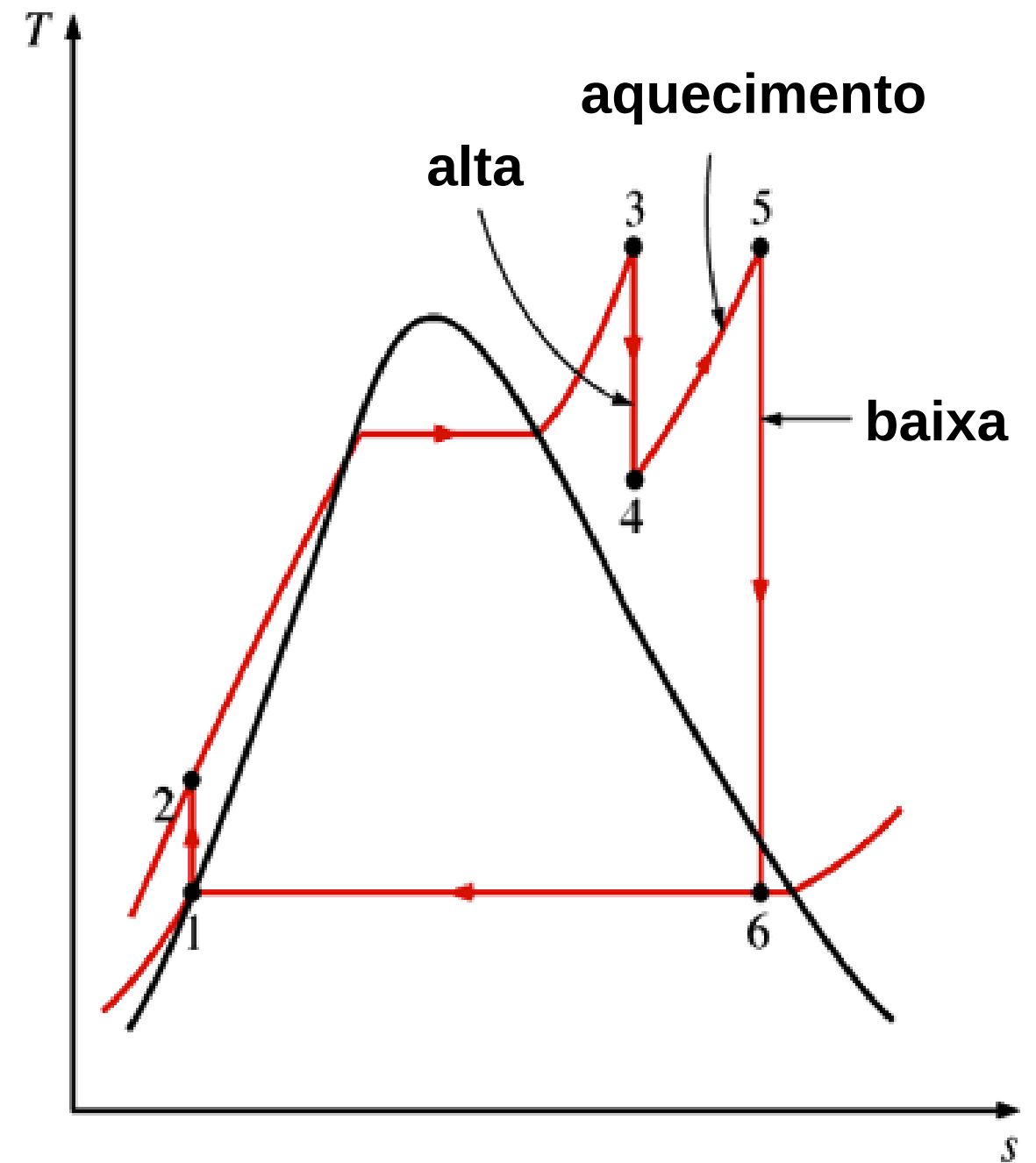
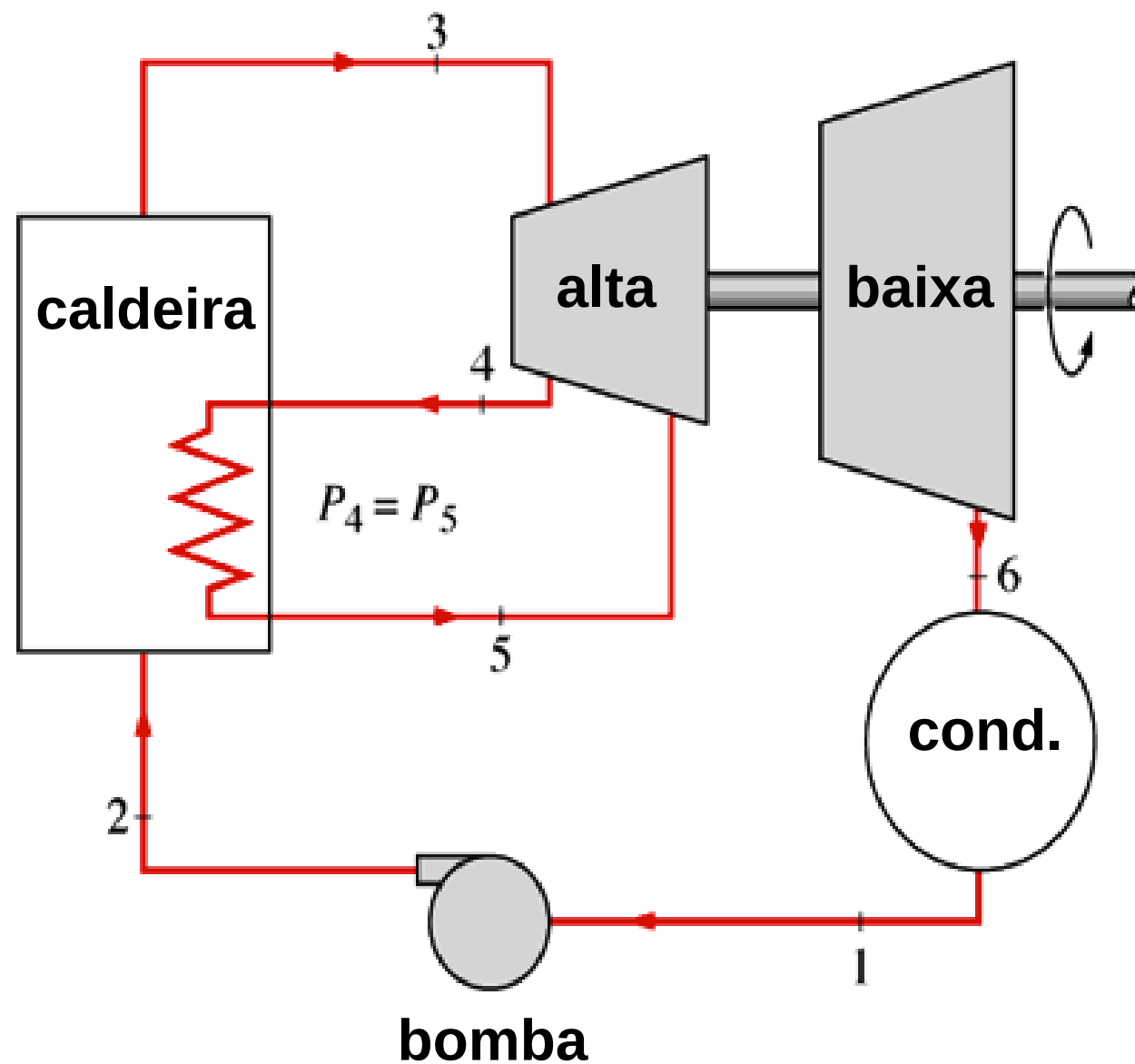
- Menor perda de calor para o ambiente;
- Maior umidade na saída da turbina.



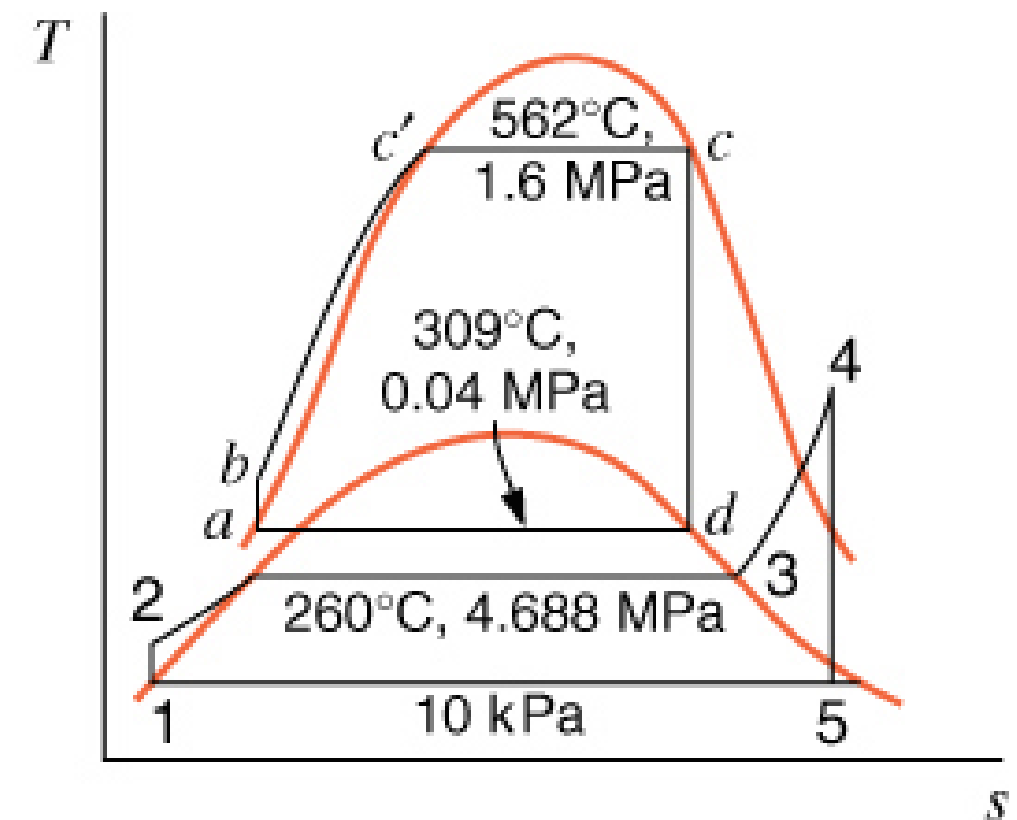
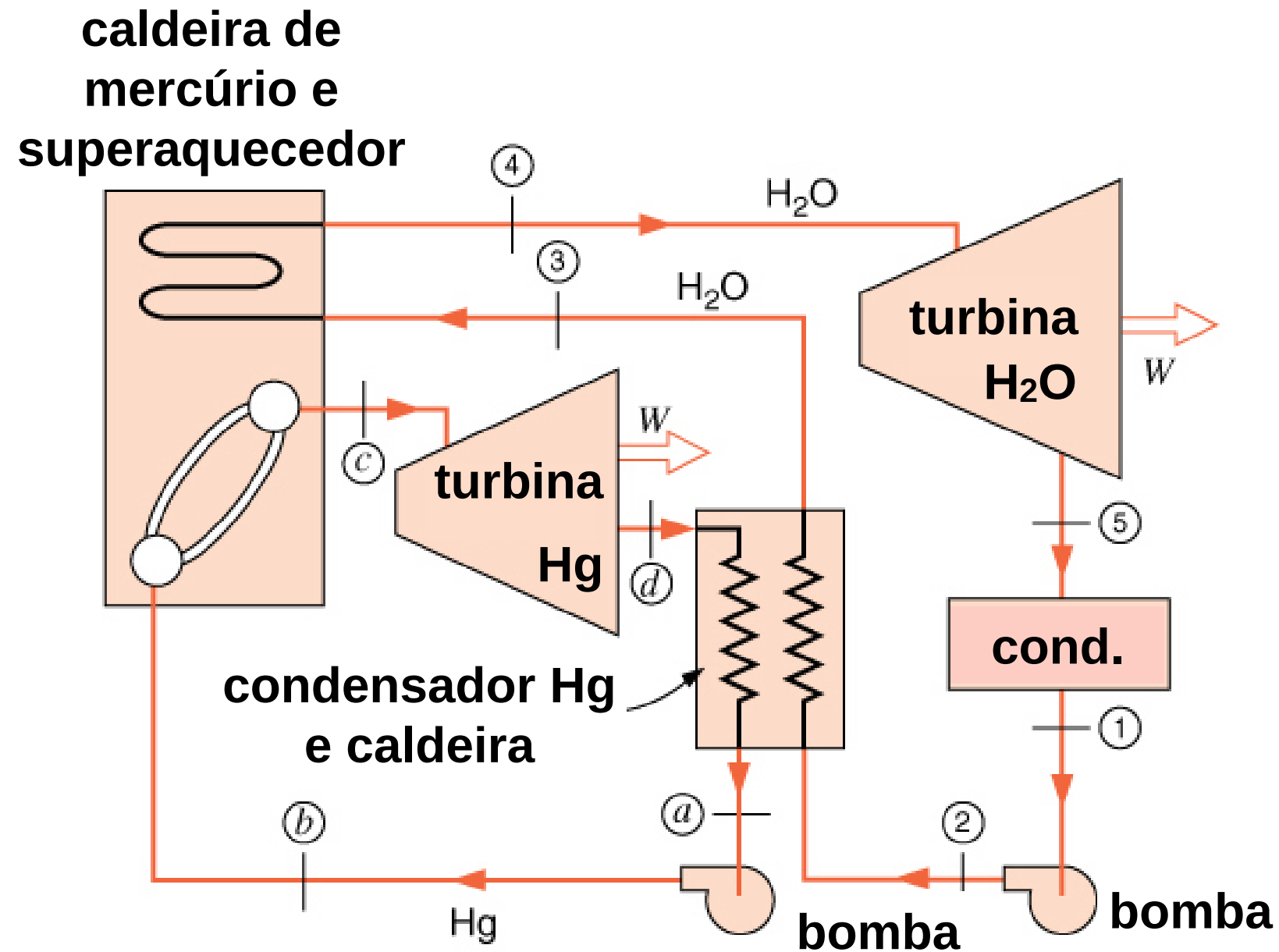
# Rankine com reaquecimento

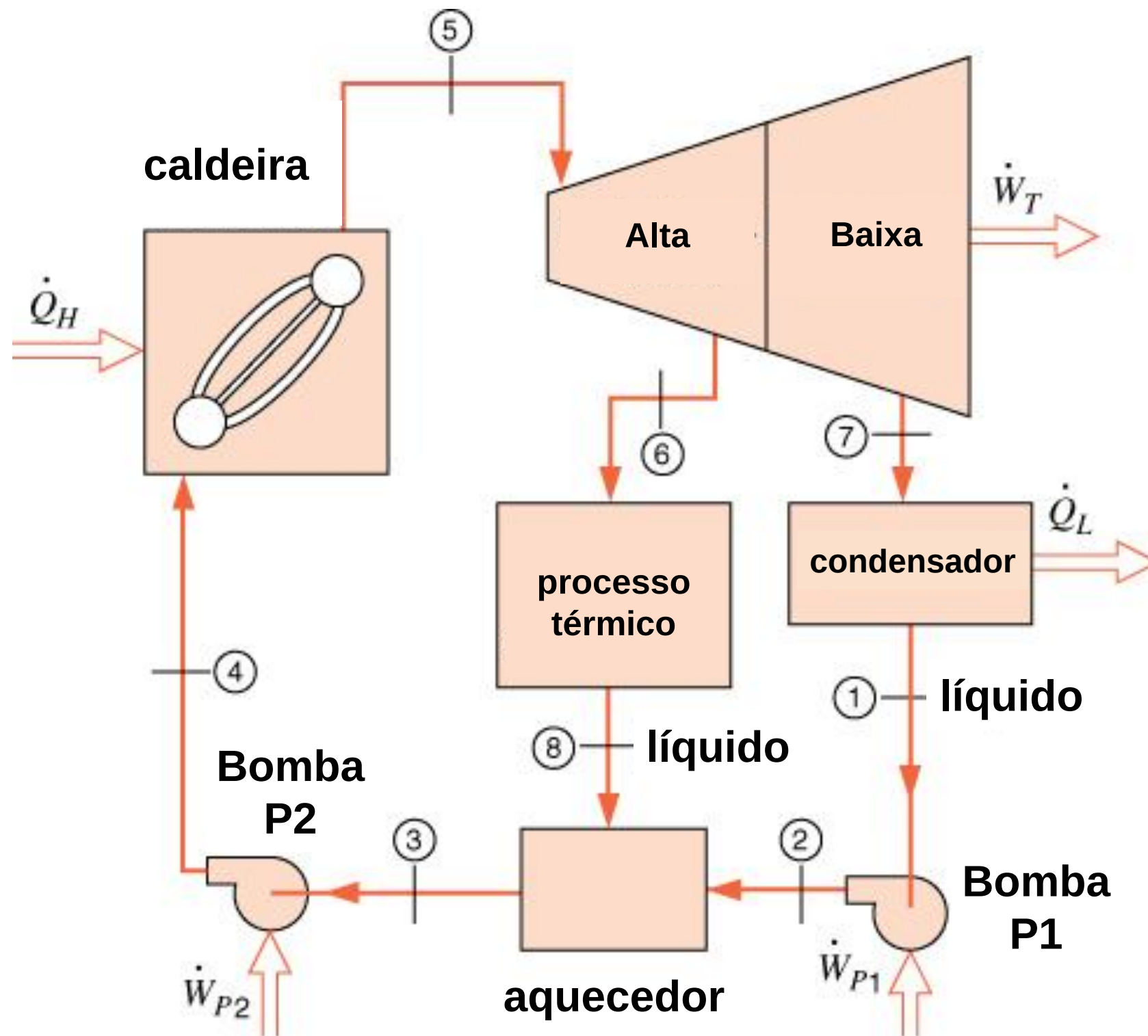


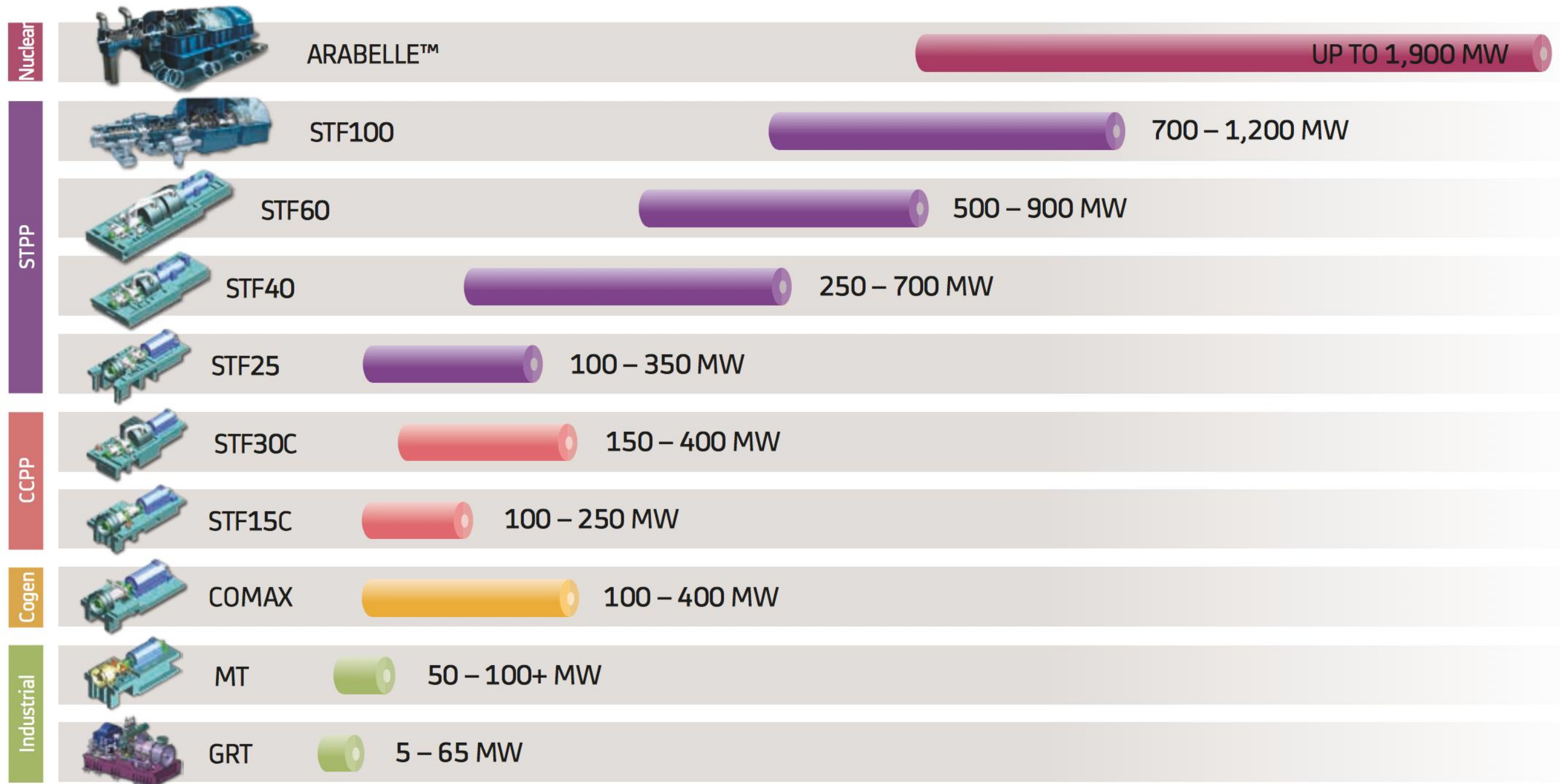
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



# Ciclo Rankine binário







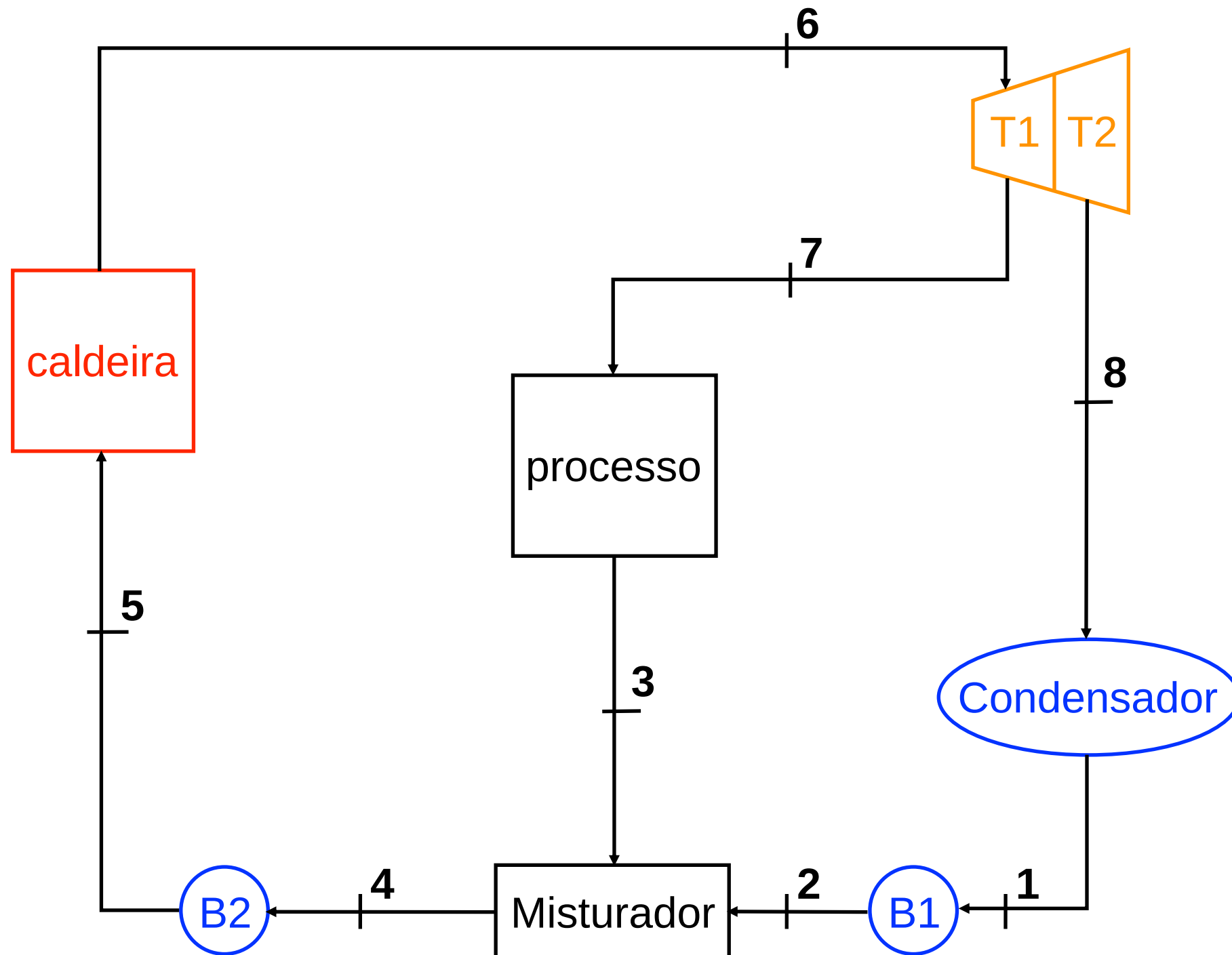


# Rankine - exemplos

4) Uma planta têxtil utiliza 4kg/s de vapor a 2MPa, extraído da turbina de dois estágios de uma planta de cogeração. Vapor entra na turbina a 8MPa e 500°C com vazão mássica de 11kg/s e a deixa a 20kPa. O vapor extraído deixa o aquecedor de processo como líquido saturado e é misturado com a água de alimentação. A mistura é então bombeada para a caldeira. Assumindo eficiências isentrópicas de 88% para as turbinas e bombas, pede-se para:

- a) determinar a potência fornecida em cada estágio pela turbina;
- b) determinar a taxa de transferência de calor no aquecedor de processo;
- c) desenhar o diagrama T-s incluindo as linhas de saturação;
- d) determinar o rendimento térmico do ciclo considerando o calor fornecido ao processo como energia útil;
- e) listar todas as hipóteses envolvidas nos cálculos.

Esquema da instalação:





# Rankine - exemplos

## ◆ Estado 6: vapor superaquecido

$$P_6 = 8000\text{kPa}$$

$$T_6 = 500^\circ\text{C}$$

$$h_6 = 3399\text{kJ/kg}$$

$$s_6 = 6,724\text{kJ/kgK}$$

## ◆ Estado 7s: vapor superaquecido

$$s_{7s} = s_6 = 6,724\text{kJ/kgK}$$

$$P_7 = 2000\text{kPa e } h_{7s} = 3000\text{kJ/kg}$$

$$T_{7s} = 290,1^\circ\text{C}$$

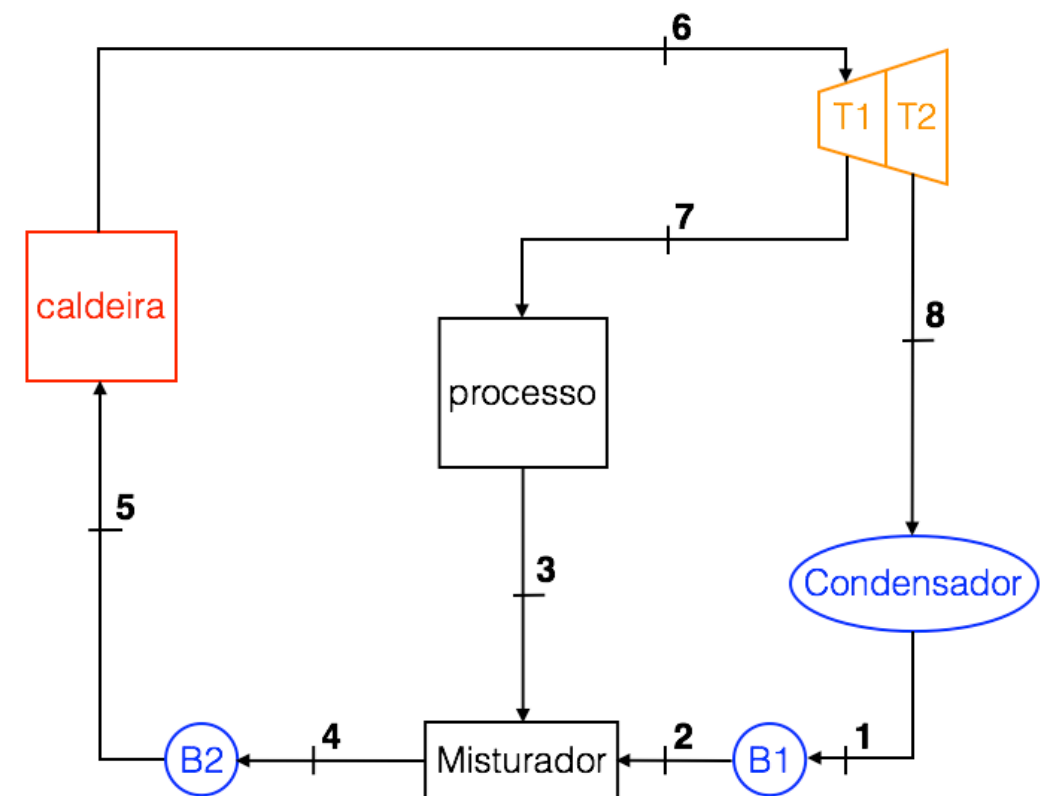
## ◆ Estado 7: vapor superaquecido

$$s_7 = 6,808\text{kJ/kgK}$$

$$P_7 = 2000\text{kPa}$$

$$h_7 = 3047\text{kJ/kg}$$

$$T_7 = 310,7^\circ\text{C}$$



$$\eta_{T,s} = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}}$$



# Rankine - exemplos

## ◆ Estado 8s: vapor superaquecido

$$s_{8s} = s_7 = 6,808 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_8 = 20 \text{ kPa e } h_{8s} = 2243 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{8s} = 60,07^\circ\text{C}$$

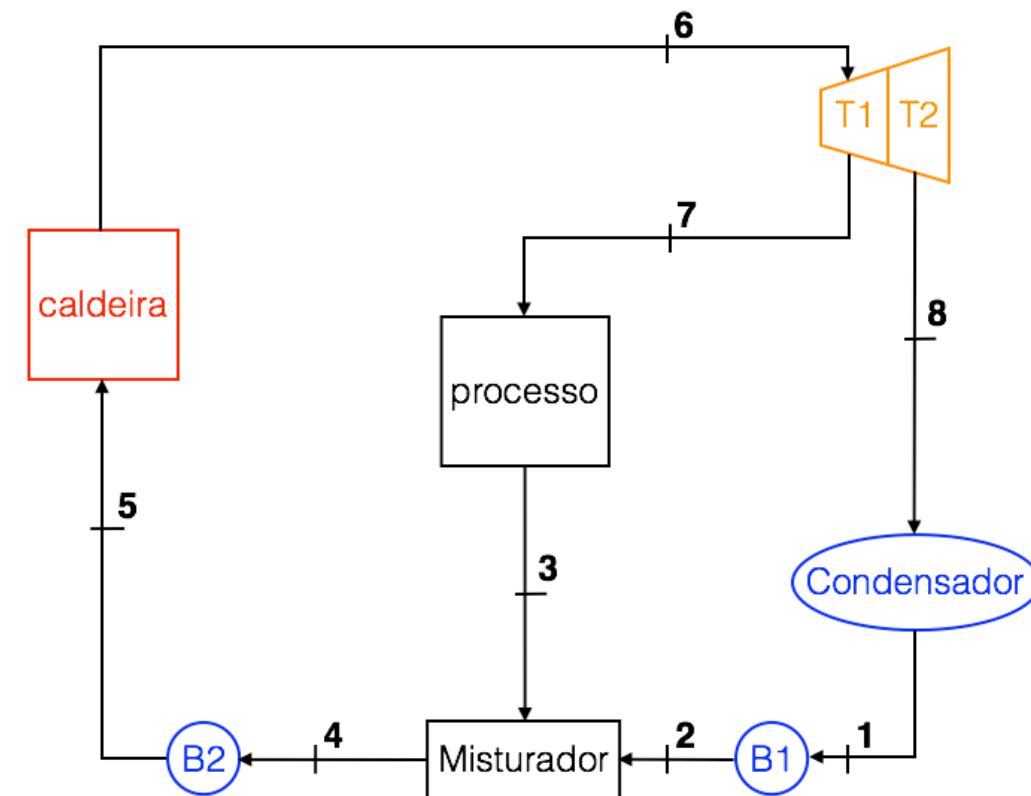
## ◆ Estado 8: mistura

$$h_8 = 2339 \text{ kJ/kg}$$

$$x_8 = 0,8856$$

$$P_8 = 20 \text{ kPa}$$

$$T_8 = 60,07^\circ\text{C}$$



$$0,88 = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8s}}$$



# Rankine - exemplos

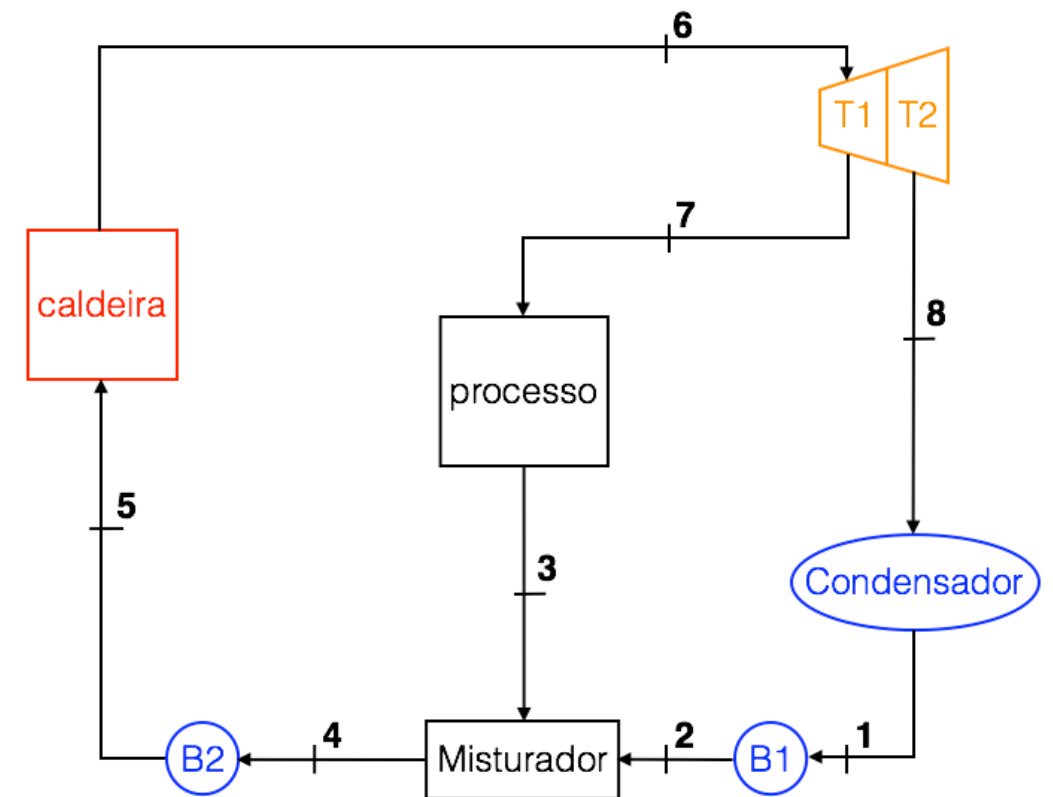
## ♦ Potência em T1:

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_6(h_6 - h_7) = 3862 \text{ kW}$$

## ♦ Potência em T2:

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_8(h_7 - h_8) = 4957 \text{ kW}$$

Note que  $\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$





# Rankine - exemplos

## ◆ Trabalho específico em B1:

$$W_{B1,rev} = v_1(P_1 - P_2) = 0,001017(20 - 2000) = -2,014\text{kJ/kg}$$

$$W_{B1} = W_{B1,rev} / \eta_{s,B1} = -2,289\text{kJ/kg}$$

## ◆ Estado 2: líquido comprimido

$$W_{B1} = h_1 - h_2 = -2,289\text{kJ/kg}$$

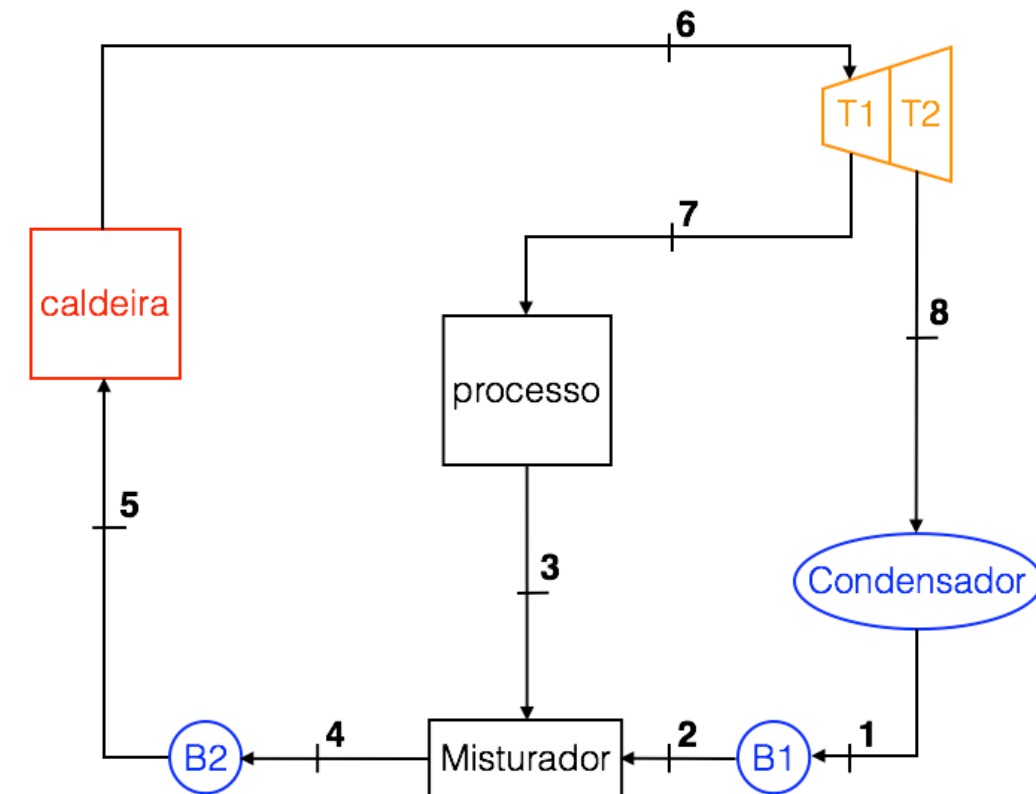
$$h_2 = 253,7\text{kJ/kg}$$

## ◆ Estado 3: líquido saturado

$$h_3 = 908,7\text{kJ/kg}$$

## ◆ Estado 4: $\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_2 h_2$

$$h_4 = 491,9\text{kJ/kg}$$





# Rankine - exemplos

## ◆ Trabalho específico em B2:

$$W_{B2,rev} = v_4(P_4 - P_5) = 0,001056(2000 - 8000) = -6,339\text{kJ/kg}$$

$$W_{B2} = W_{B2,rev} / \eta_{s,B2} = -7,203\text{kJ/kg}$$

## ◆ Estado 5: líquido comprimido

$$W_{B2} = h_4 - h_5 = -7,203\text{kJ/kg}$$

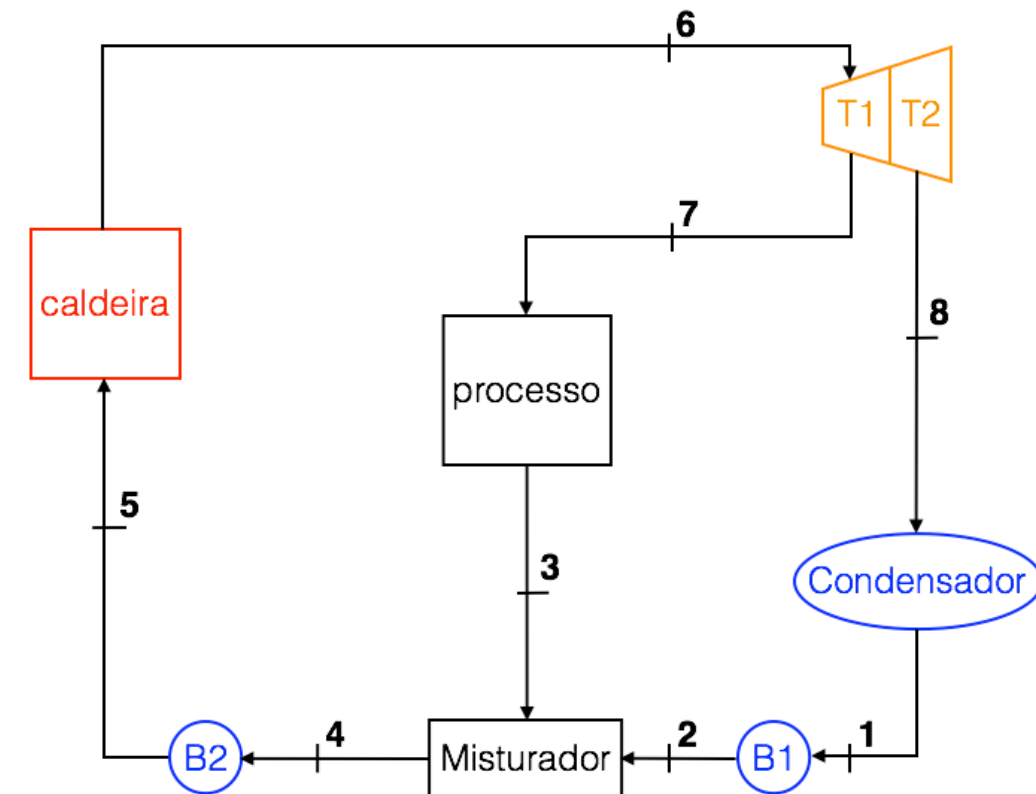
$$h_5 = 499,1\text{kJ/kg}$$

## ◆ Taxa de calor para o processo:

$$\dot{Q} = \dot{m}_7(h_7 - h_3) = 8555\text{kW}$$

## ◆ Taxa de calor na caldeira:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_5(h_6 - h_5) = 31894\text{kW}$$





## ◆ Rendimento

$$\eta_t = 0,5445$$

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} + \dot{W}_{B1} + \dot{W}_{B2} + \dot{Q}}{\dot{Q}_H}$$

