

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Termodinâmica

10) 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



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

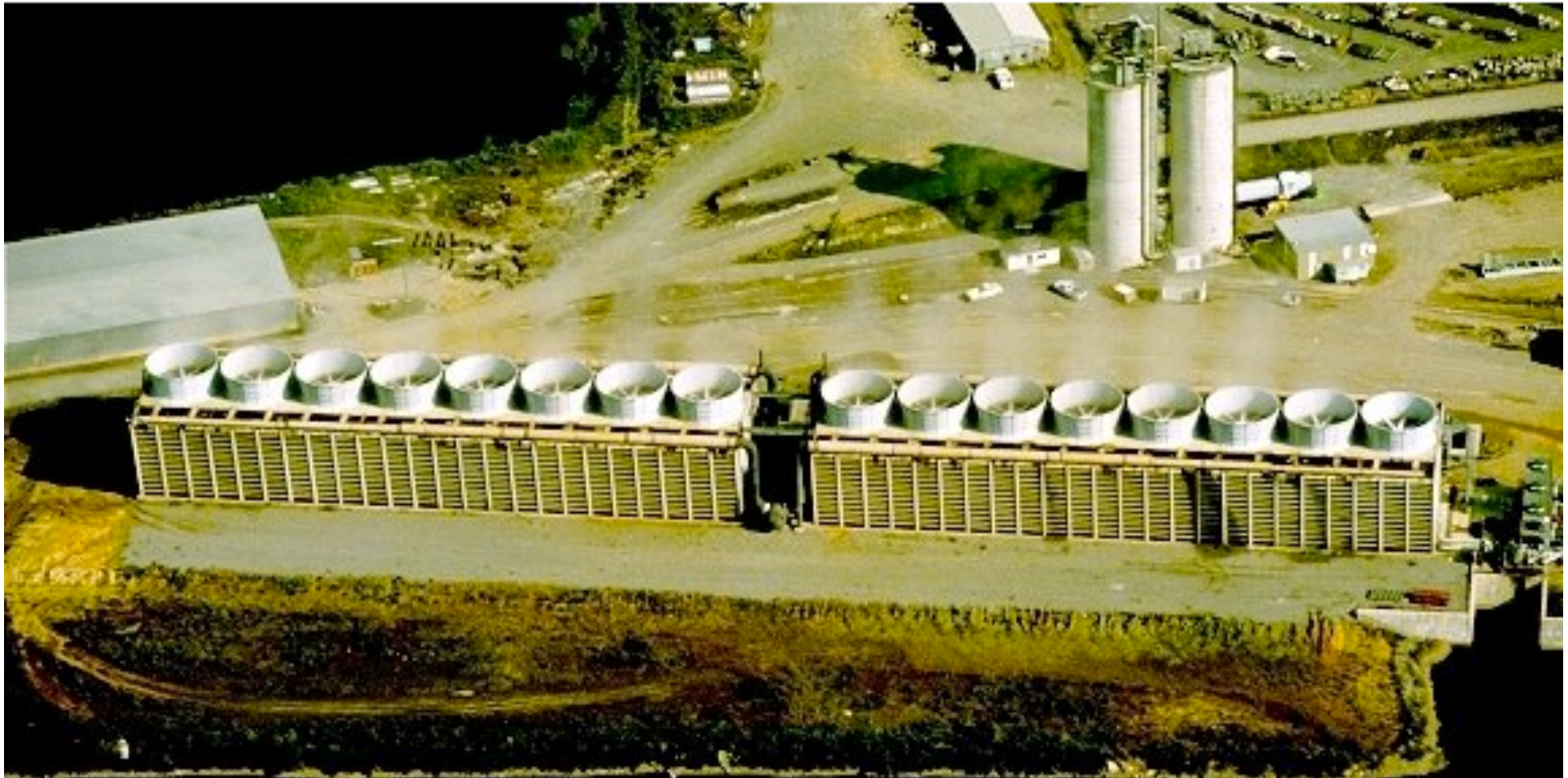
Algumas imagens...



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Tubulão de vapor

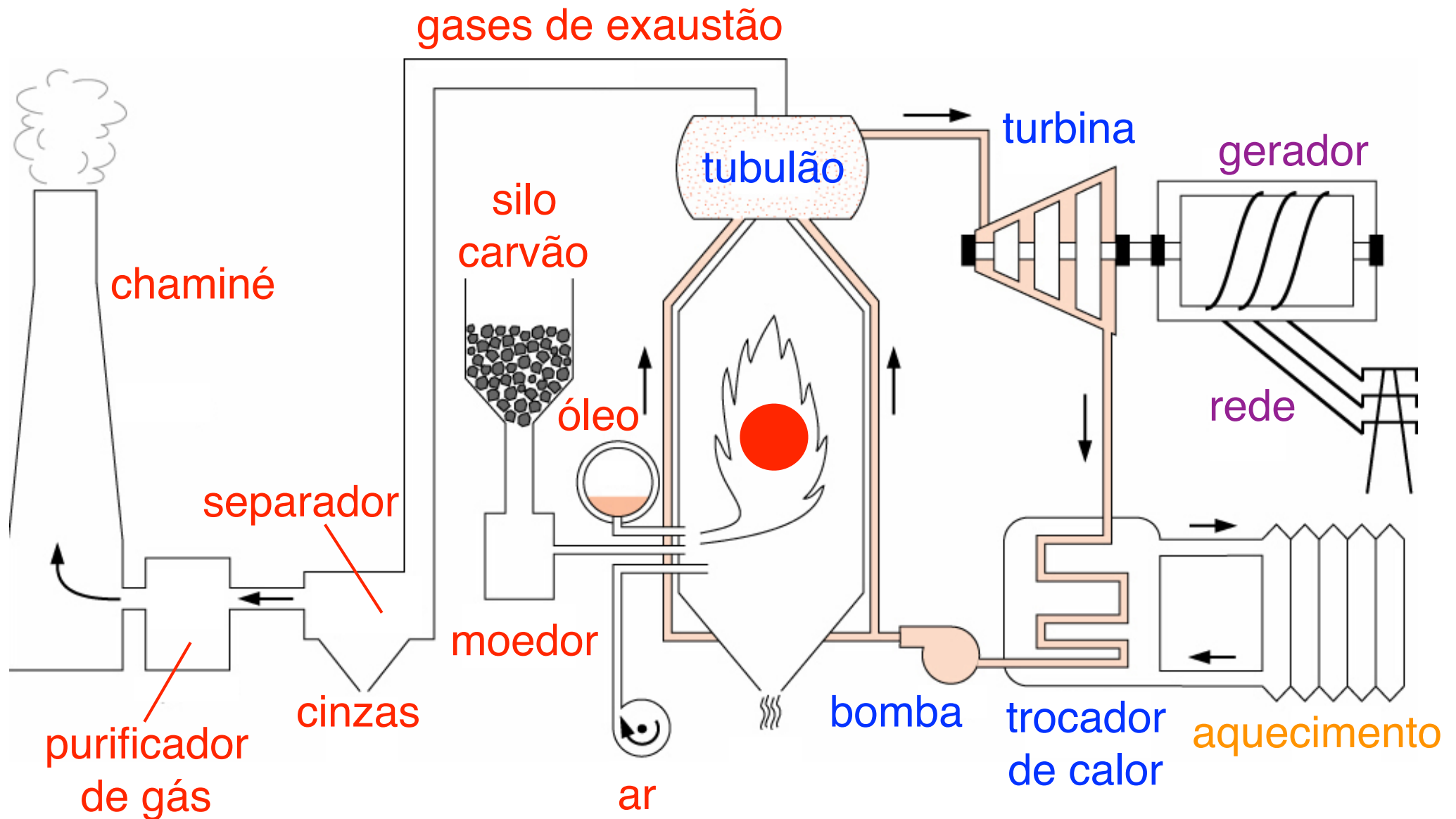


Torres de resfriamento

Central termoeleétrica a carvão



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

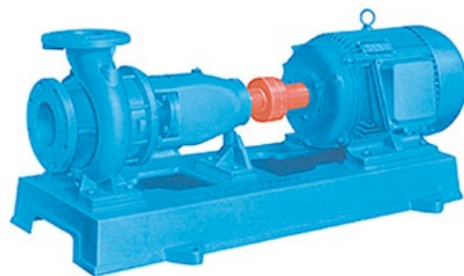
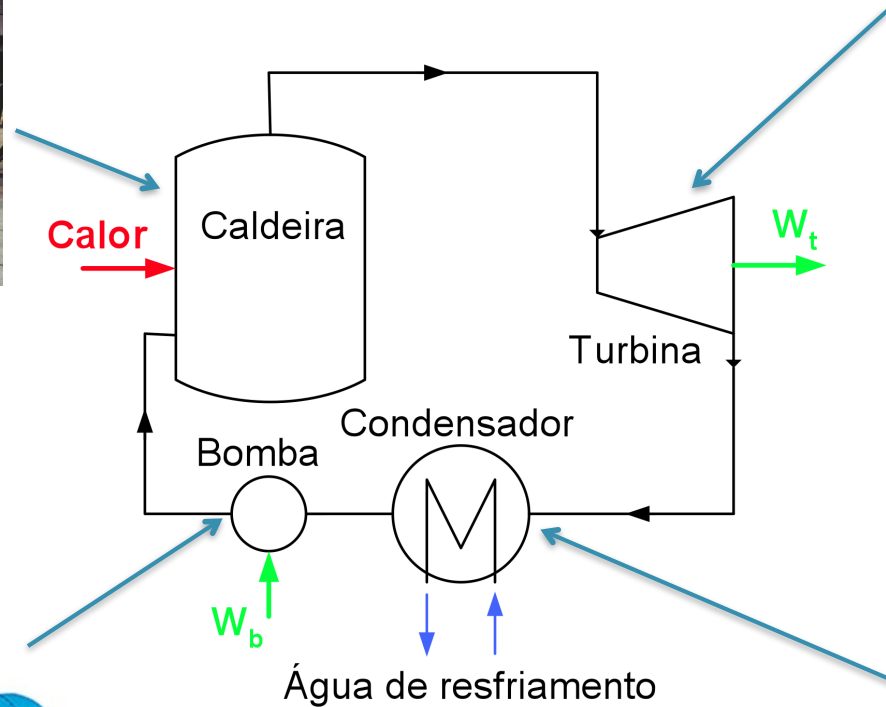
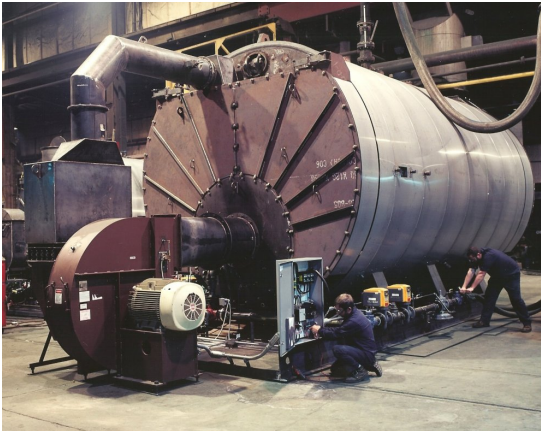


Ciclo de potência a vapor



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

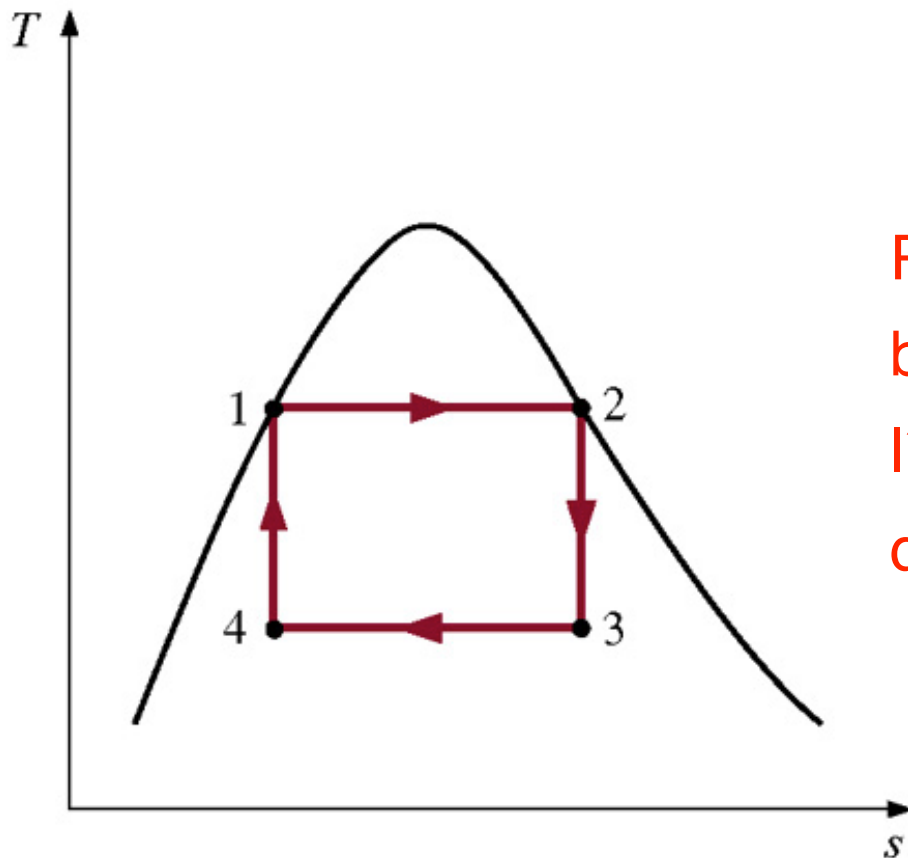
Fluido de trabalho: água



Por que não usar Carnot?



Observe:



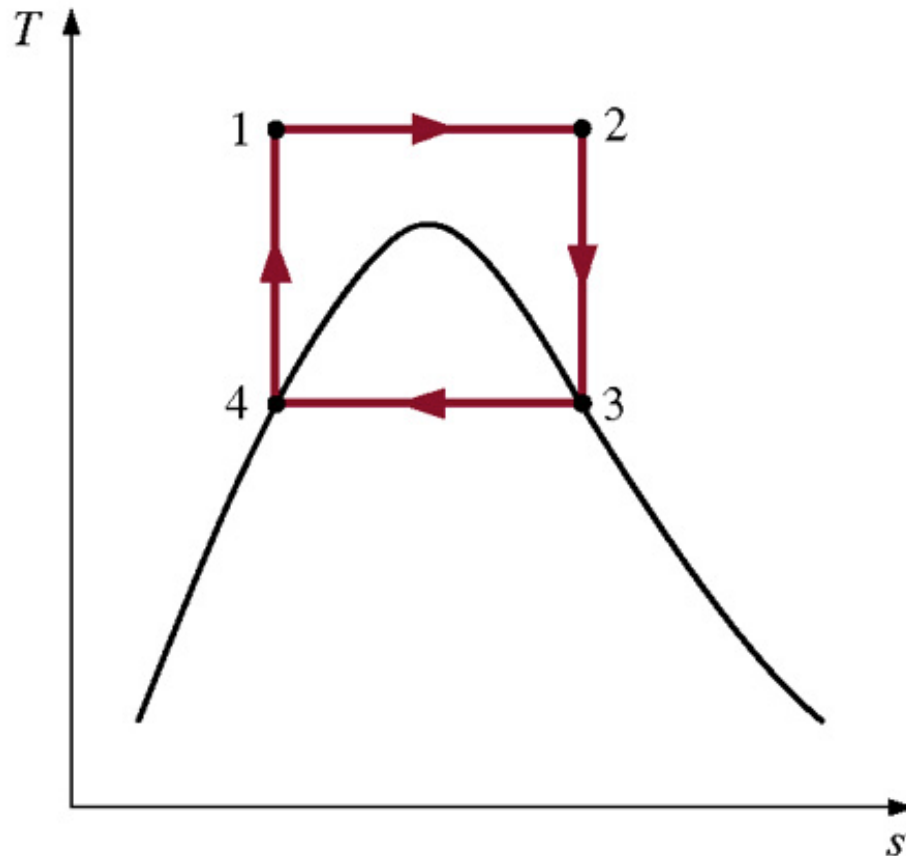
Para o ciclo, o processo 4-1 envolve o bombeamento de uma mistura de líquido e vapor saturados que deve sair da bomba como líquido saturado.

Por que não usar Carnot?



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

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.

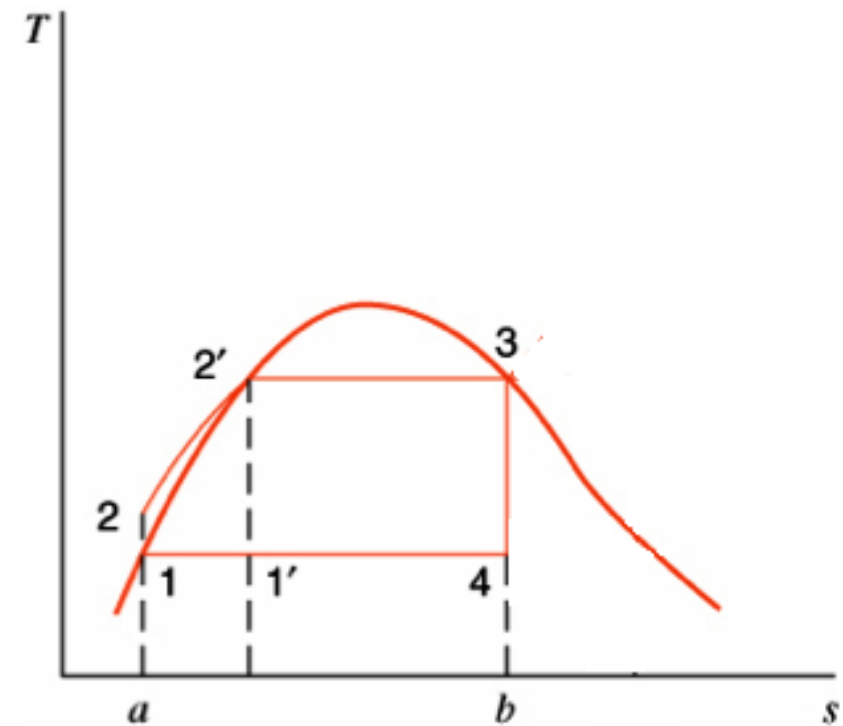
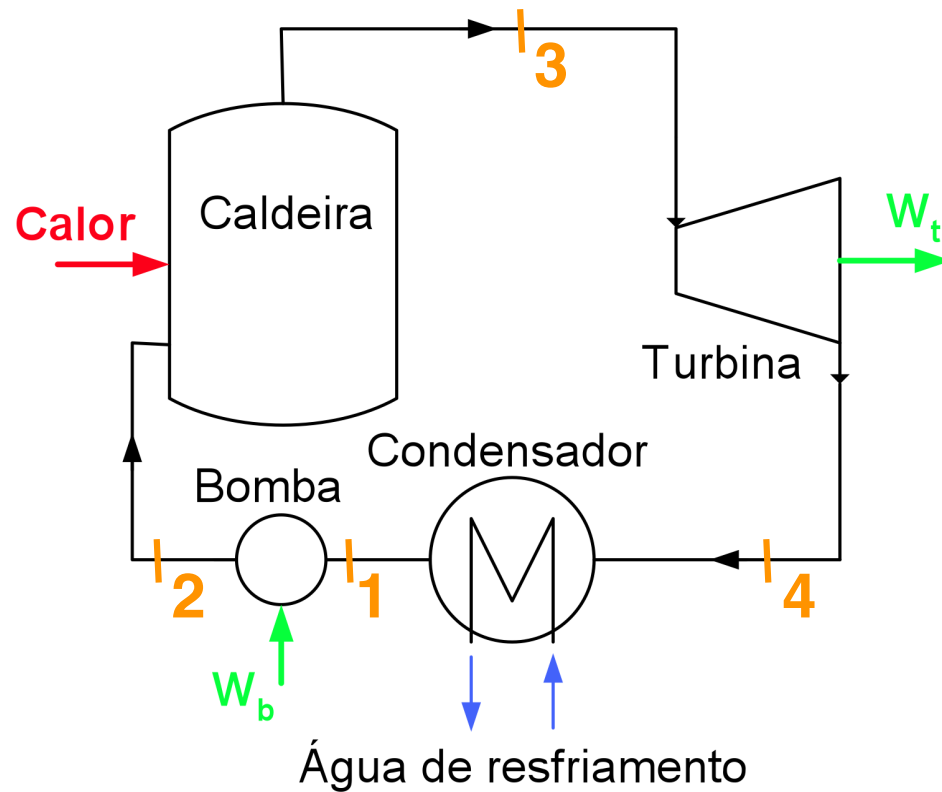
O Ciclo de Carnot não é um modelo adequado para ciclos a vapor pois não pode ser realizado na prática!

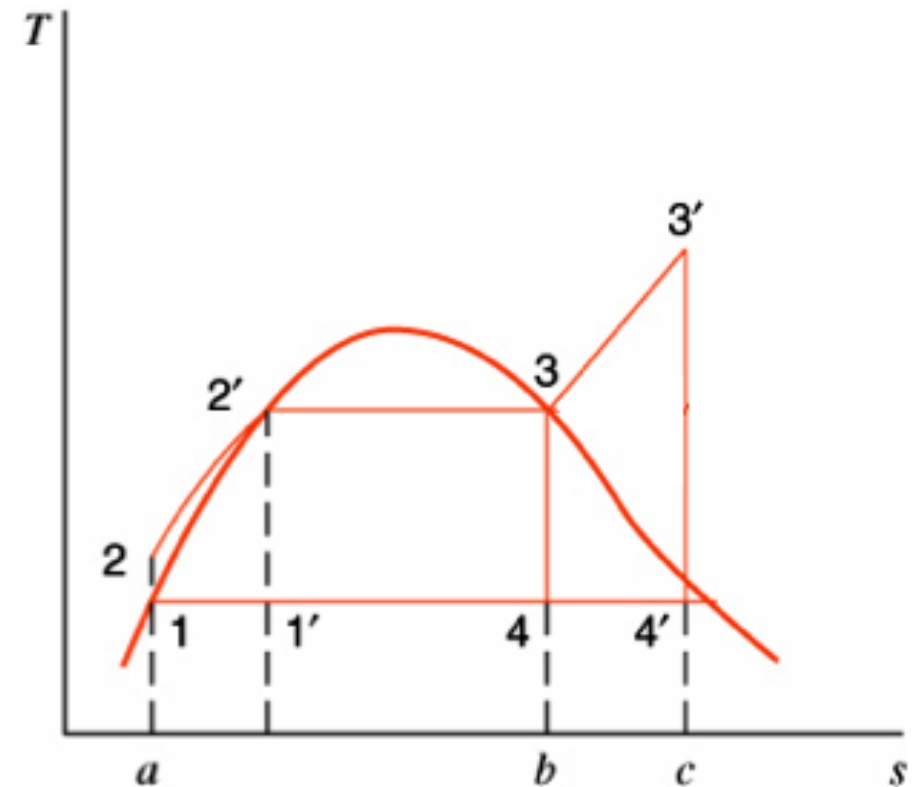
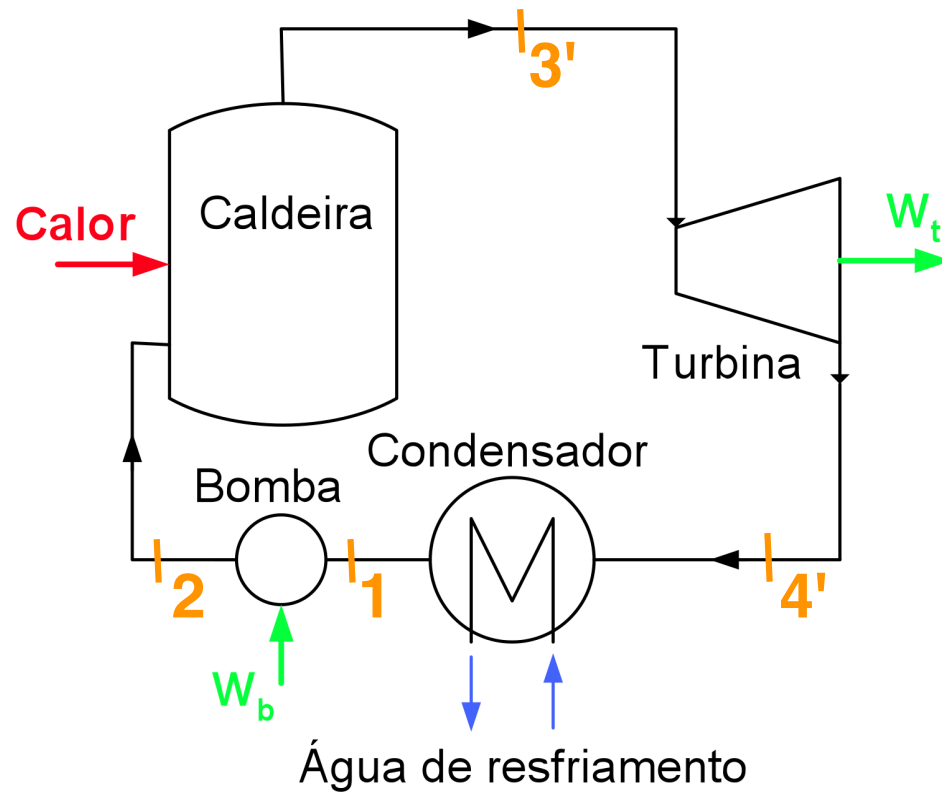


O ciclo de potência a vapor ideal é o Ciclo de Rankine, que é composto por quatro processos reversíveis:

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

Ciclo Rankine ideal





Como funciona uma caldeira?



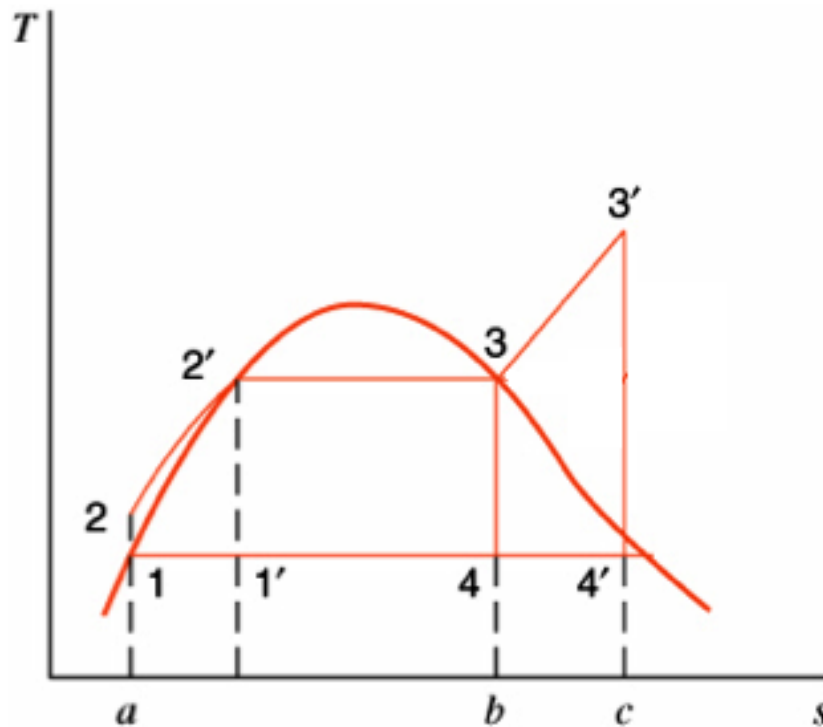
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



www.LearnEngineering.org

A **YouTube** PARTNER...

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

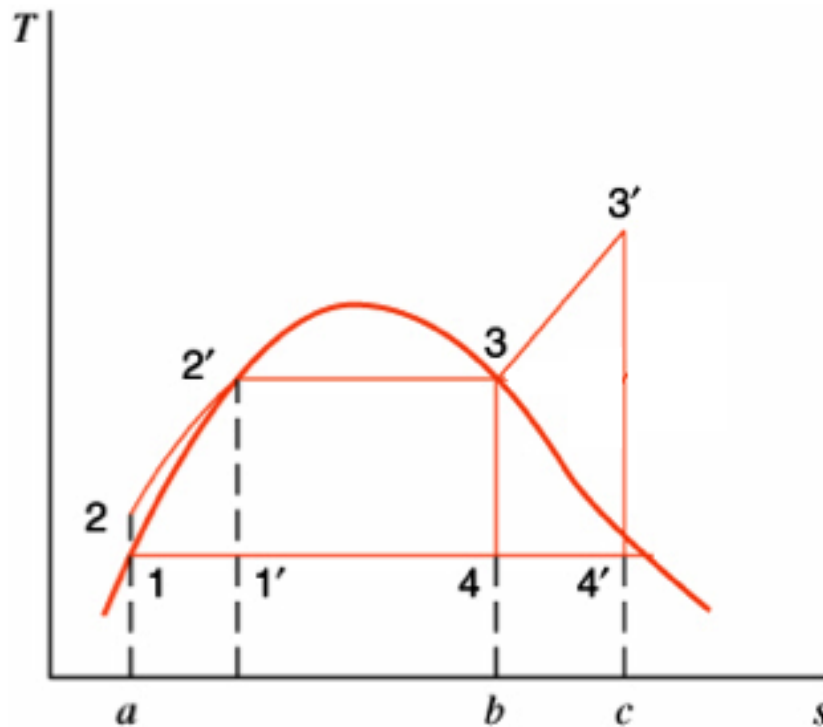
c/ superaquecimento:

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

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

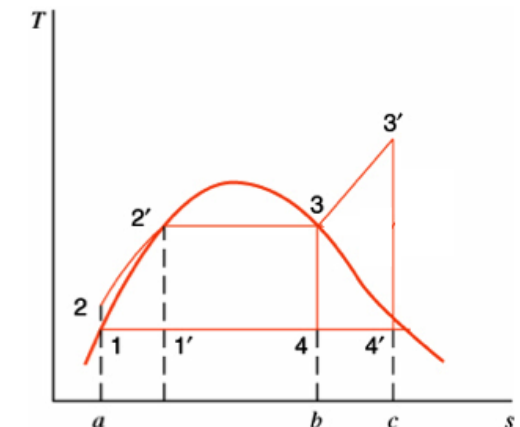
Estado 1: líquido saturado

Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m ³ / 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

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

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

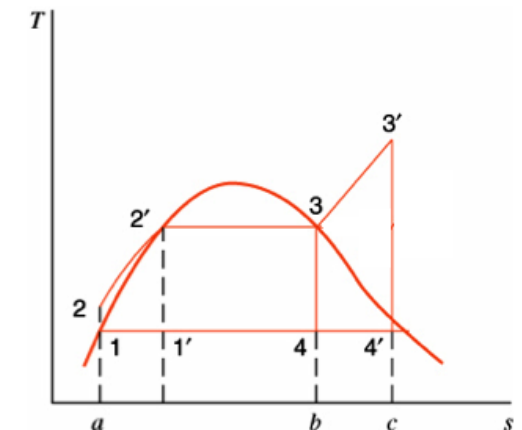


Estado 3: vapor saturado

		Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
Pressão	Temp.	m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
MPa	°C	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

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

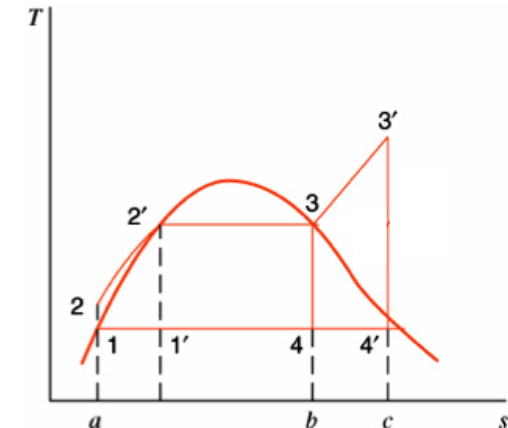


		Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
Pressão	Temp.	m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
kPa	°C	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514

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

Estado 3': vapor superaquecido

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



Estado 4': mistura - processo isentrópico

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

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico m ³ / kg		Energia interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg		Entropia 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

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

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

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

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

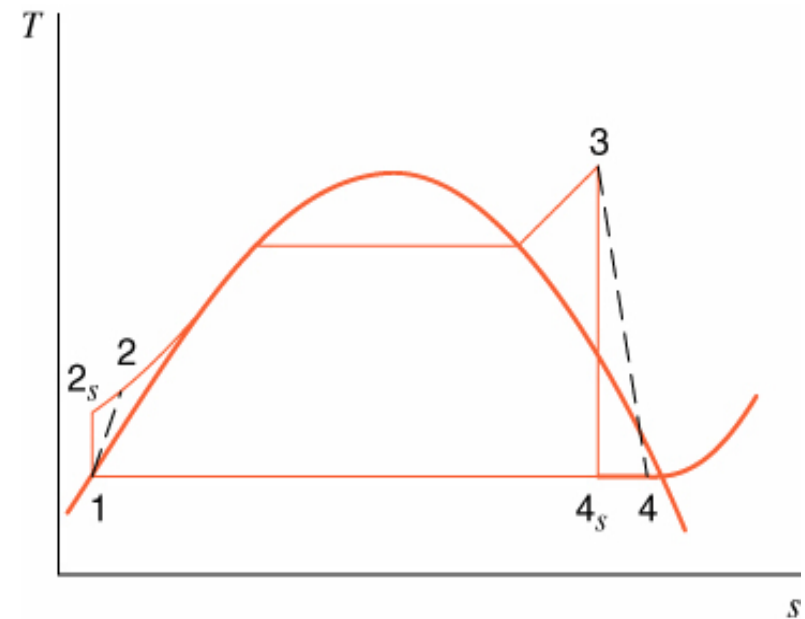
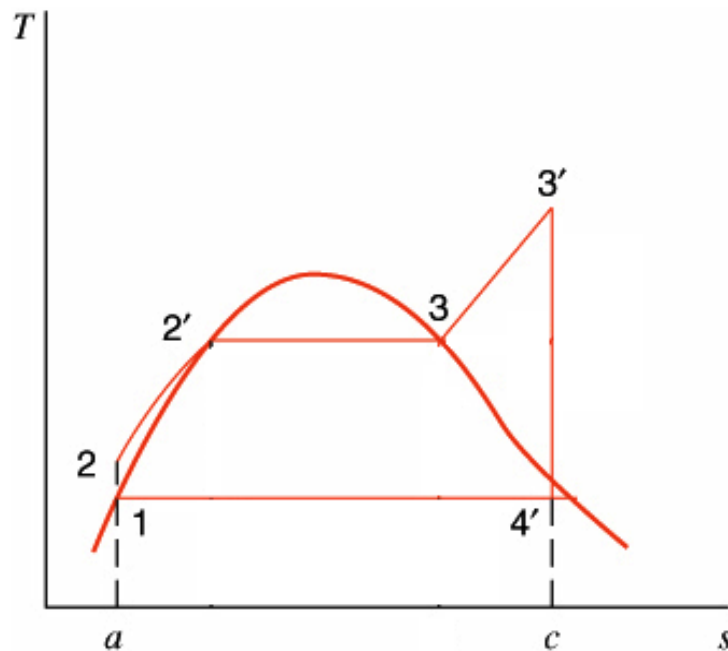
$$\eta' = \frac{h_{3'} - h_{4'} + h_1 - h_2}{h_{3'} - h_2} = 0,376$$

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

Rankine - exemplos



2) No ciclo Rankine anterior, com superaquecimento, 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 (?)

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

$$h_4 = 2334 \text{ kJ/kg} \Rightarrow x_4 = 0,900$$

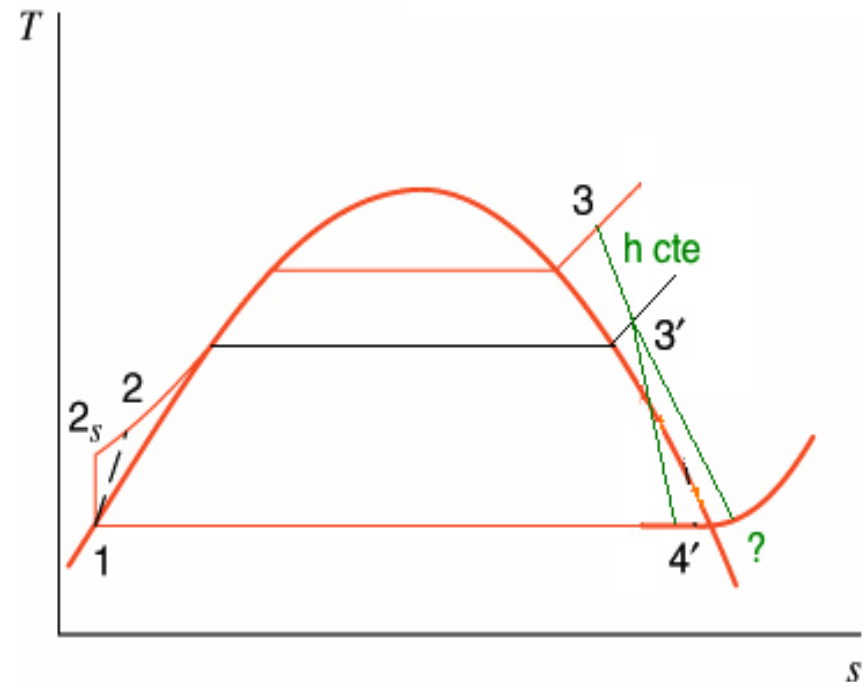
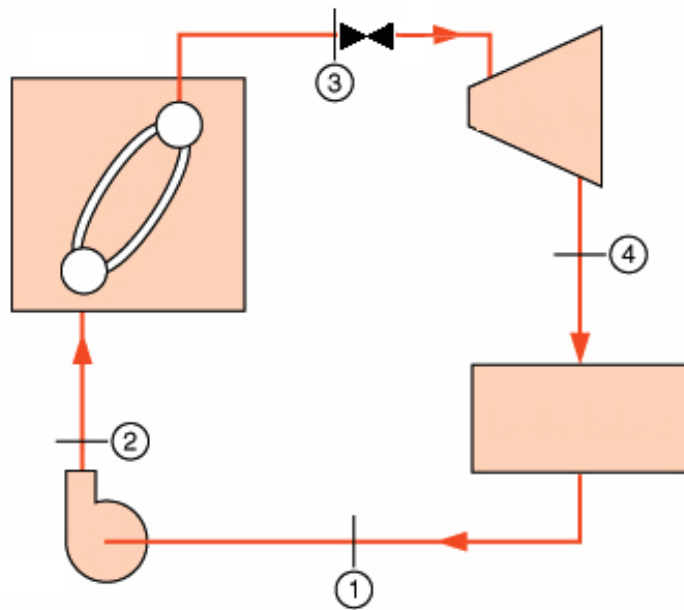
Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico m³ / kg		Energia interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg		Entropia kJ / (kg.K)	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514



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.



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

- 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

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

Estado 4's: mistura

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

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico m ³ / kg		Energia interna kJ / kg		Entalpia kJ / kg		Entropia 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

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

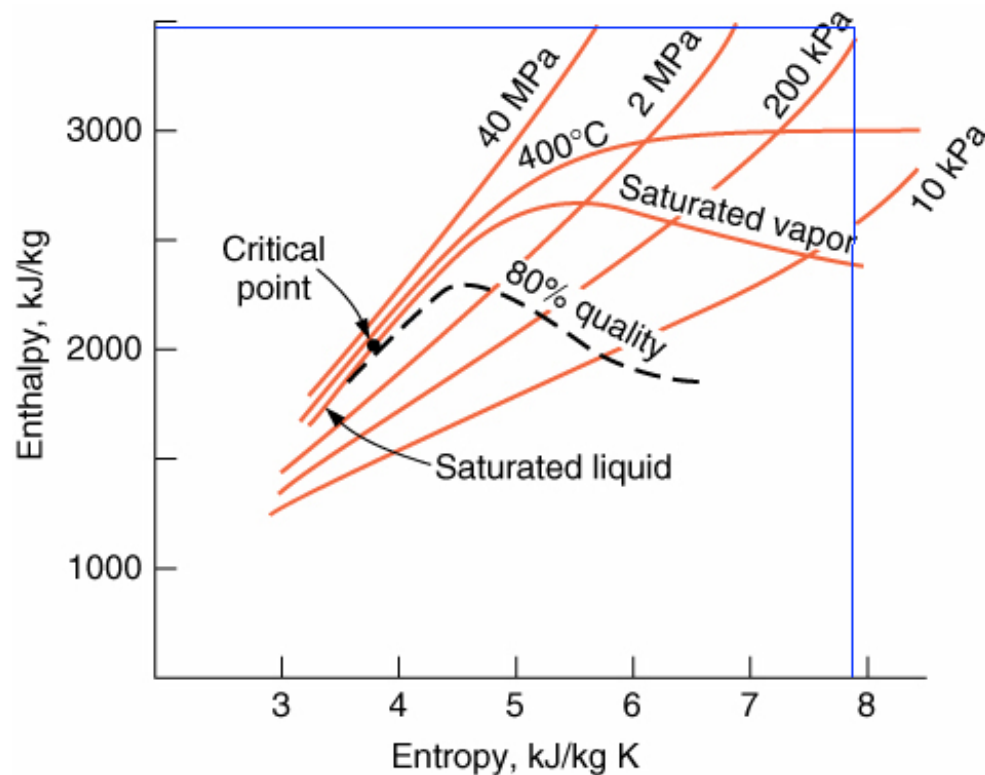
Estado 3': vapor superaquecido

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

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

Estado 3': vapor superaquecido

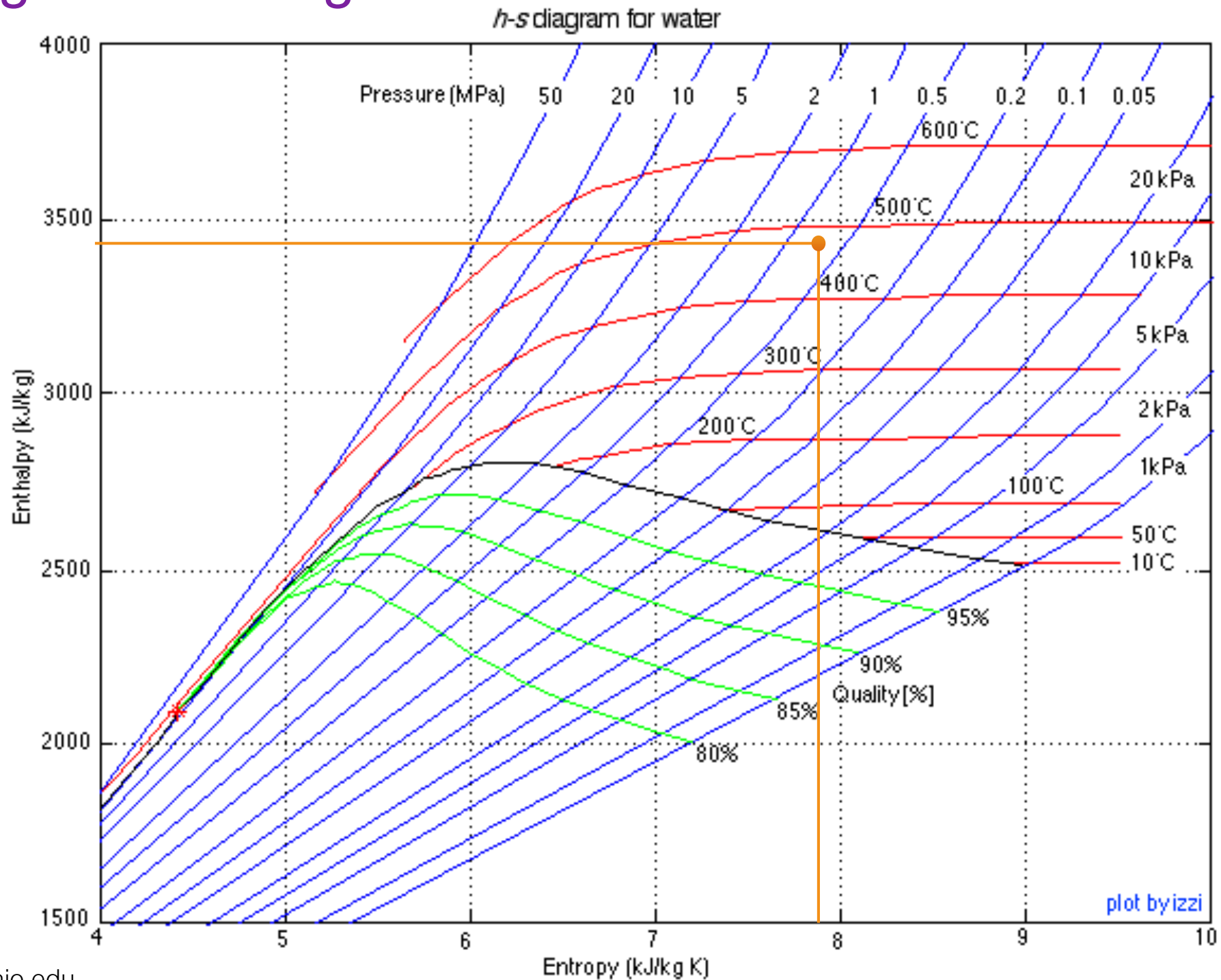
$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ/kgK} \quad h_{3'} = h_3 = 3445,21 \text{ kJ/kg}$$



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

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

Diagrama T-s: água



Estado 3': vapor superaquecido

	$P = 600 \text{ kPa} (158,85 \text{ }^{\circ}\text{C})$				$P = 800 \text{ kPa} (170,43 \text{ }^{\circ}\text{C})$			
$T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	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

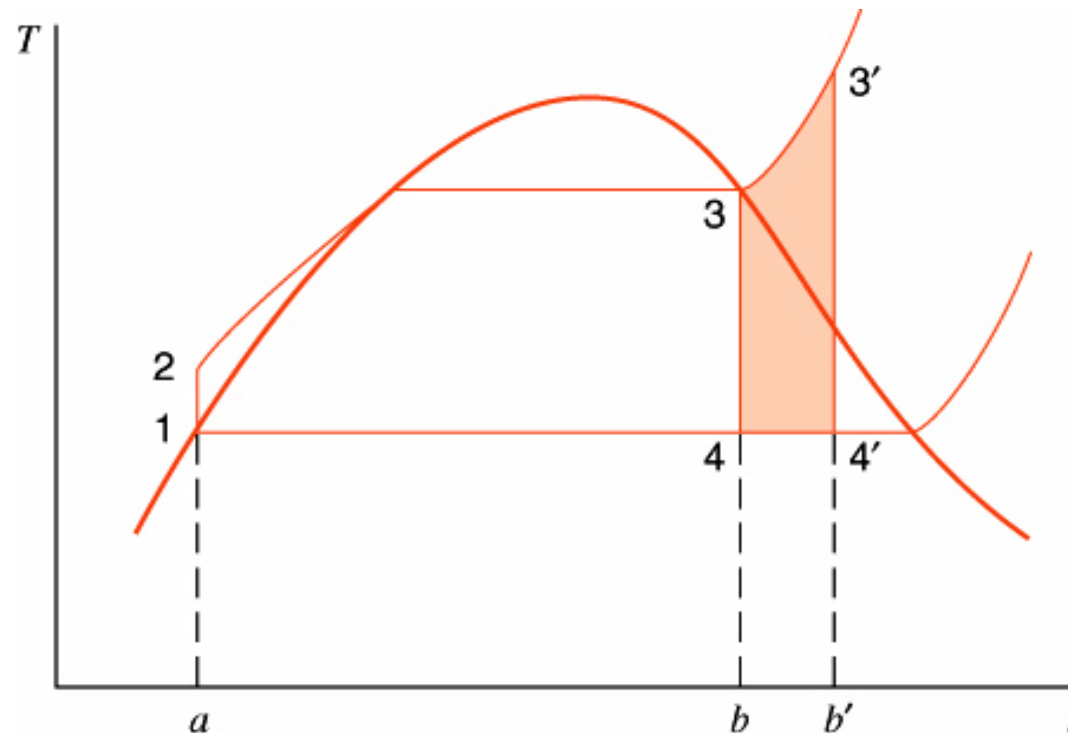
Chegamos em $T = 482 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $P = 700 \text{ kPa}$

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

Resposta $P = 700 \text{ kPa}$

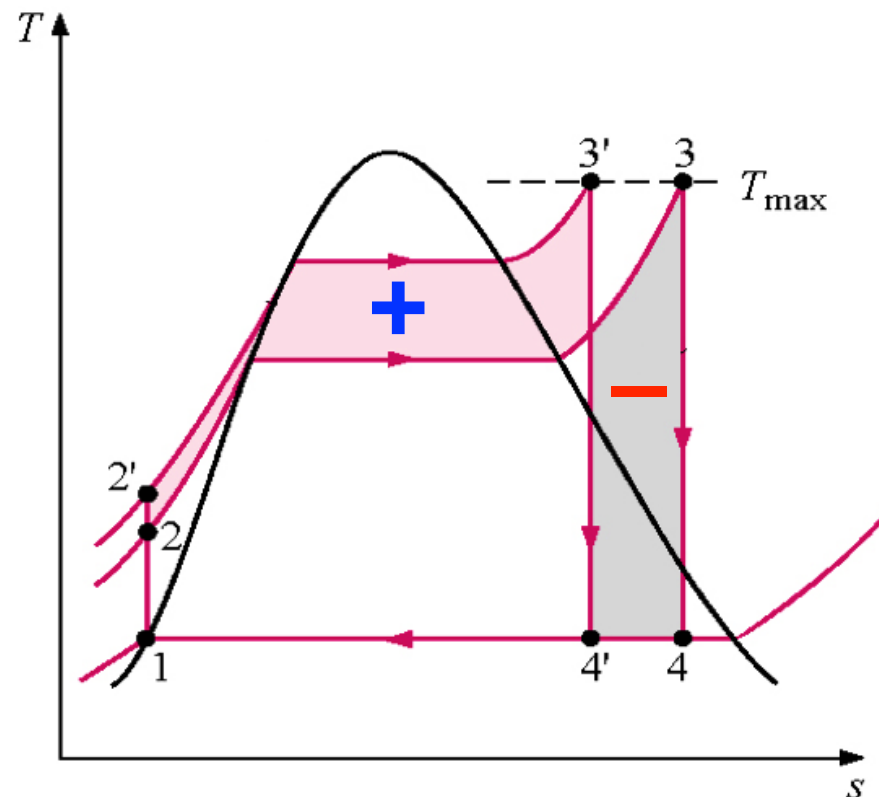
★Superaquecimento do vapor:

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

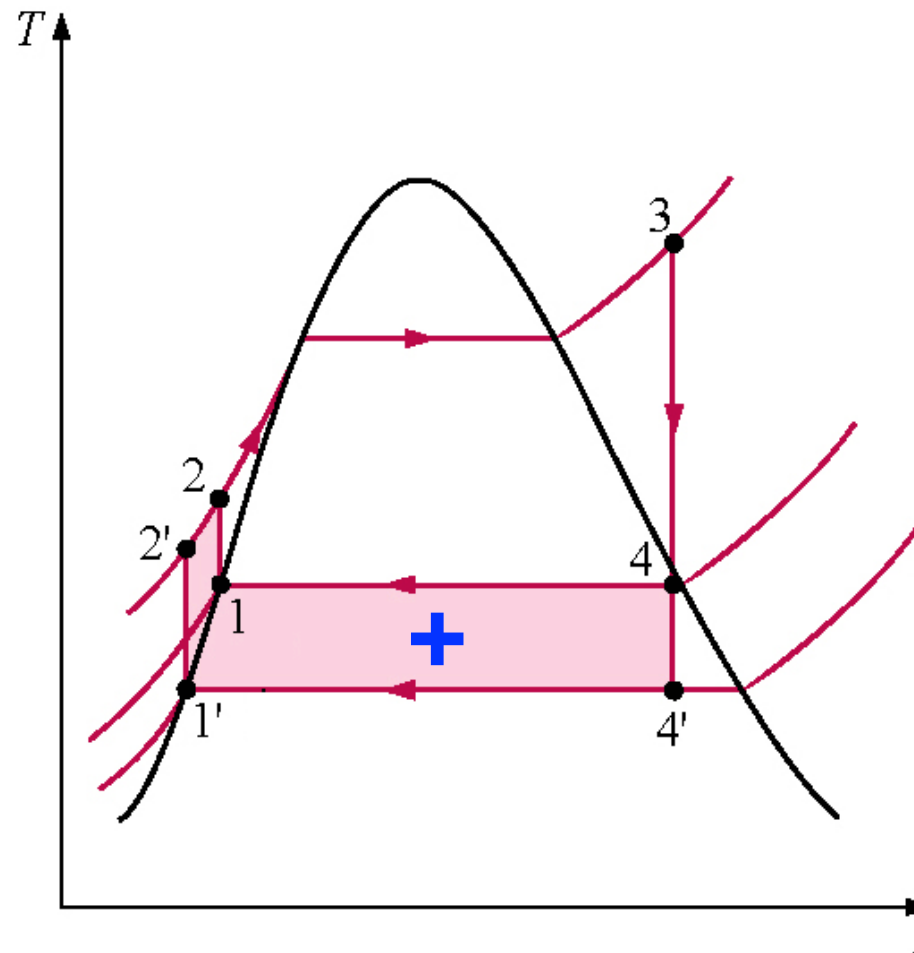


★ Aumento da pressão do gerador de vapor

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

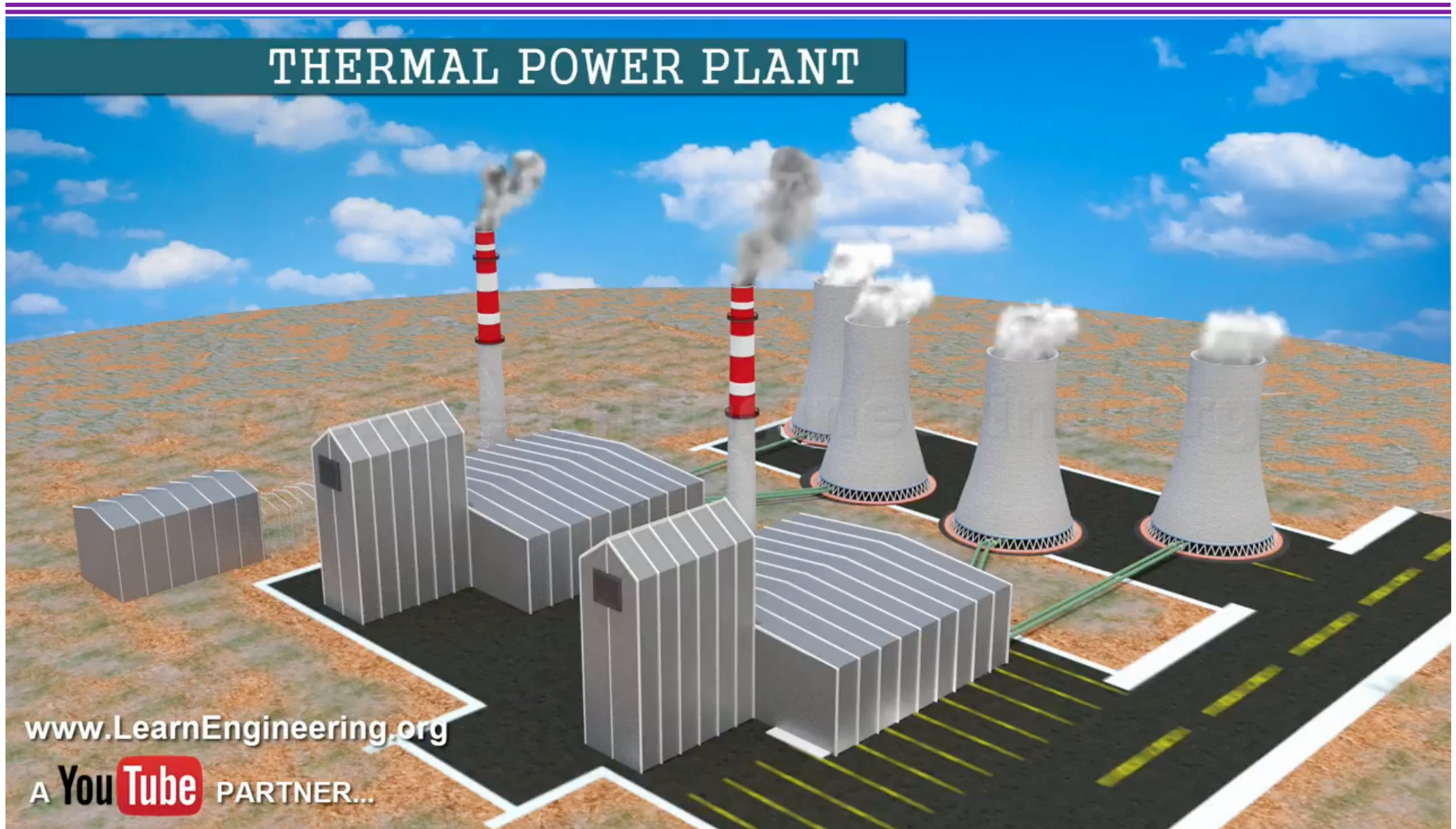


- ★ Diminuição da pressão no condensador
 - Menor perda de calor para o ambiente;
 - Maior umidade na saída da turbina.





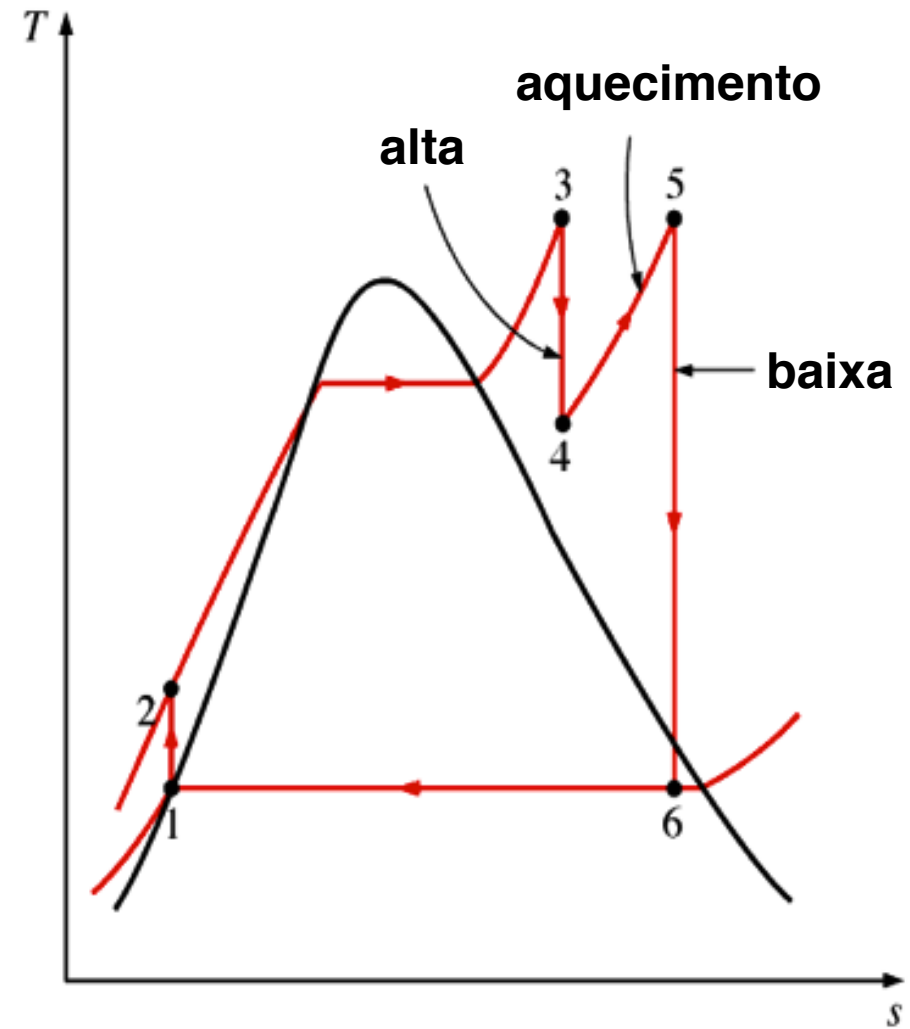
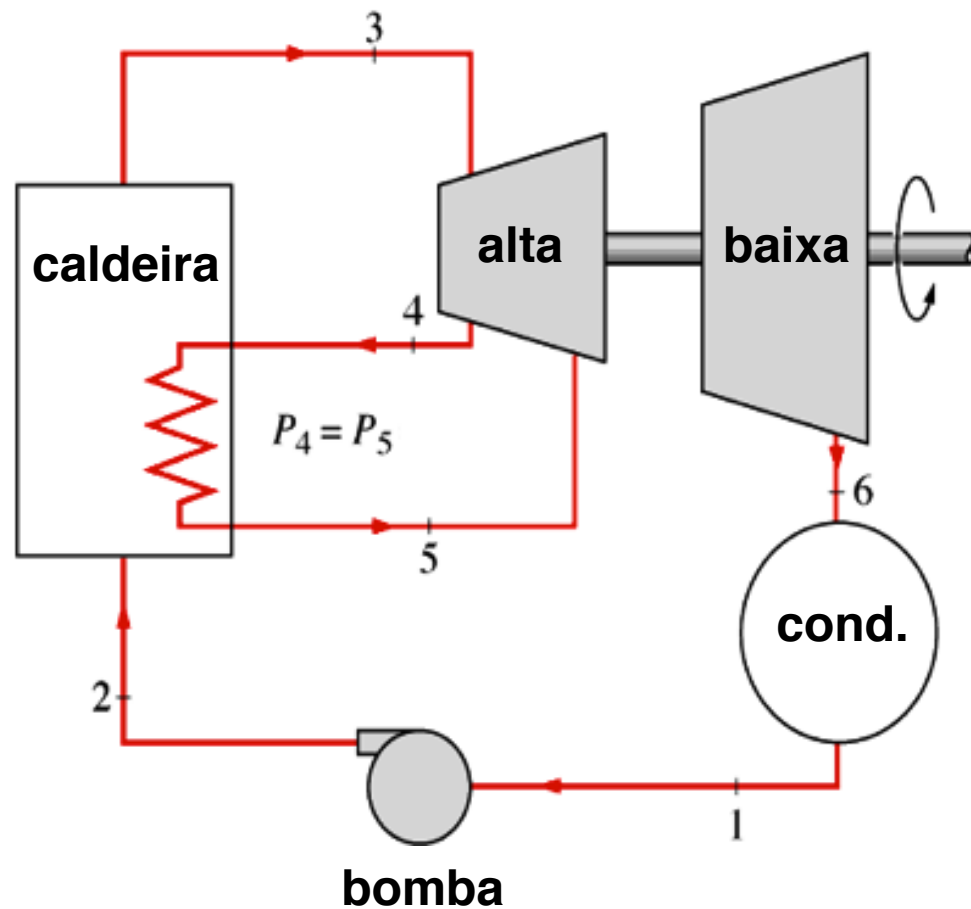
THERMAL POWER PLANT



Rankine com reaquecimento



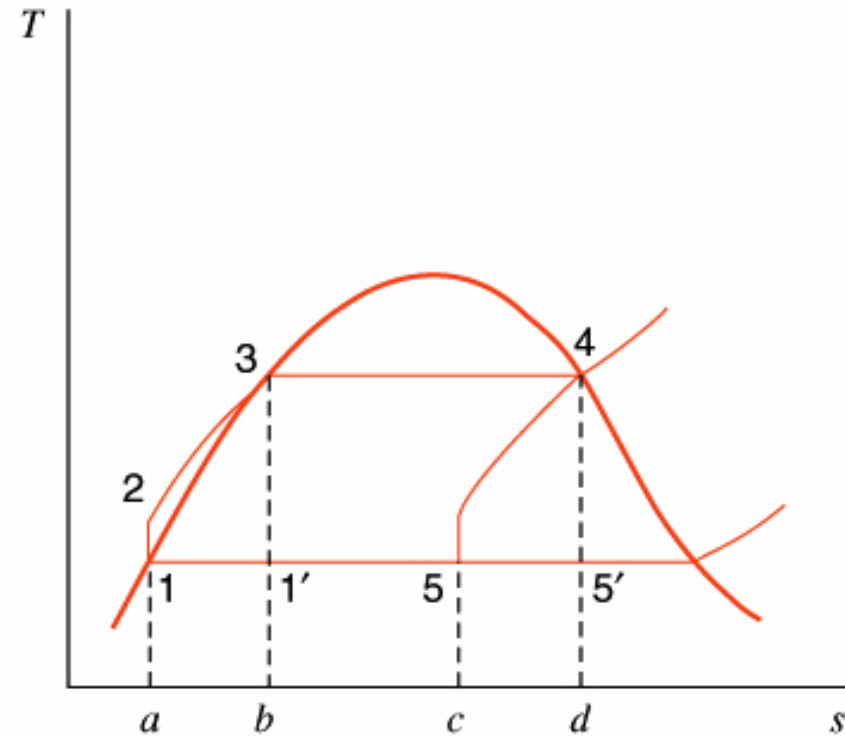
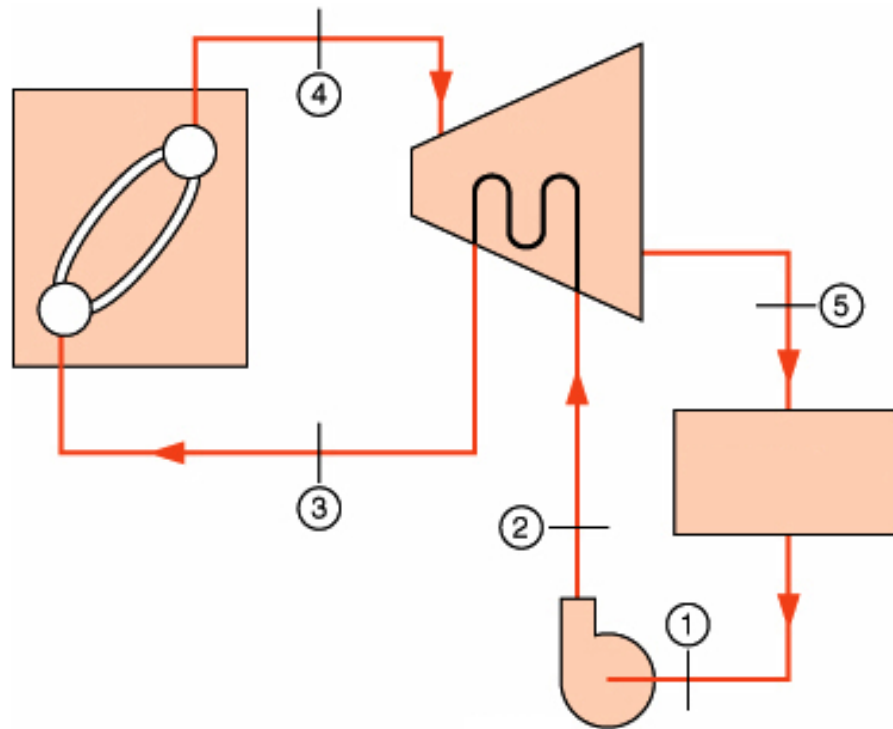
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



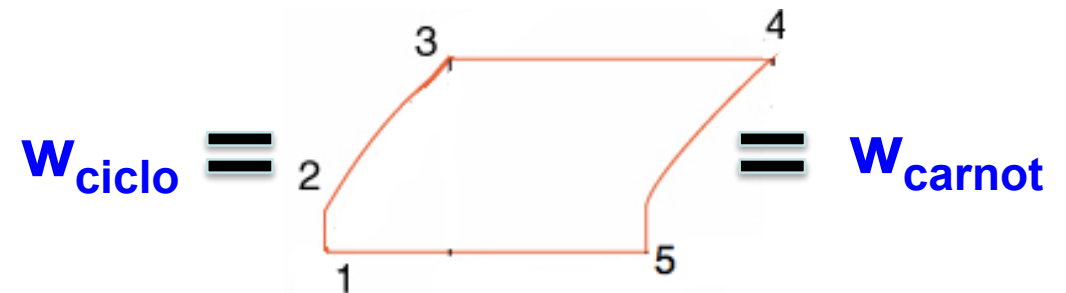
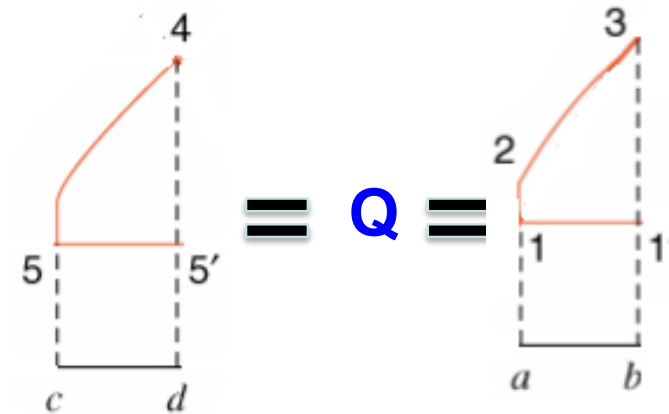
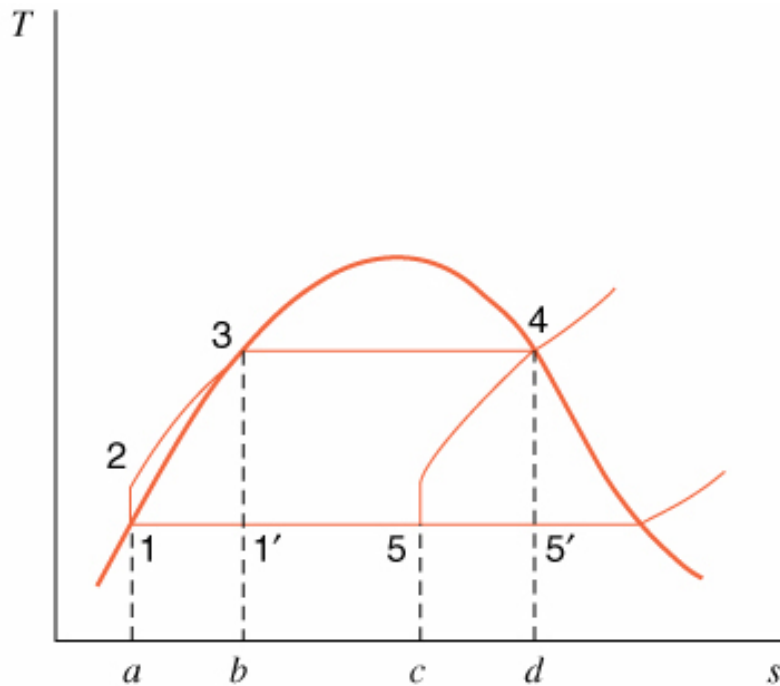
Rankine regenerativo



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



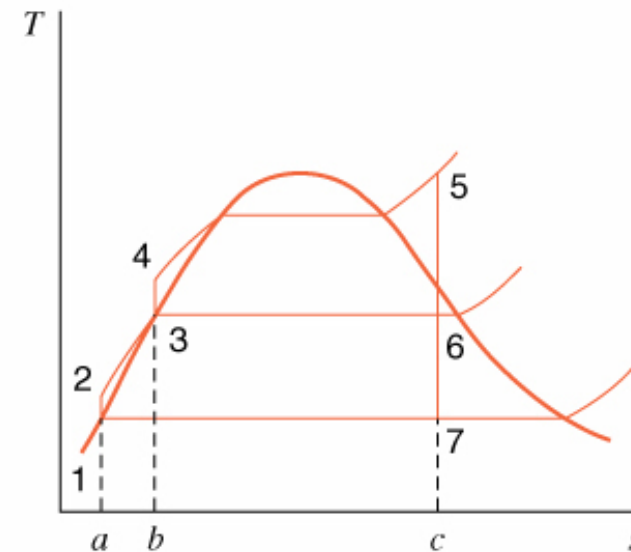
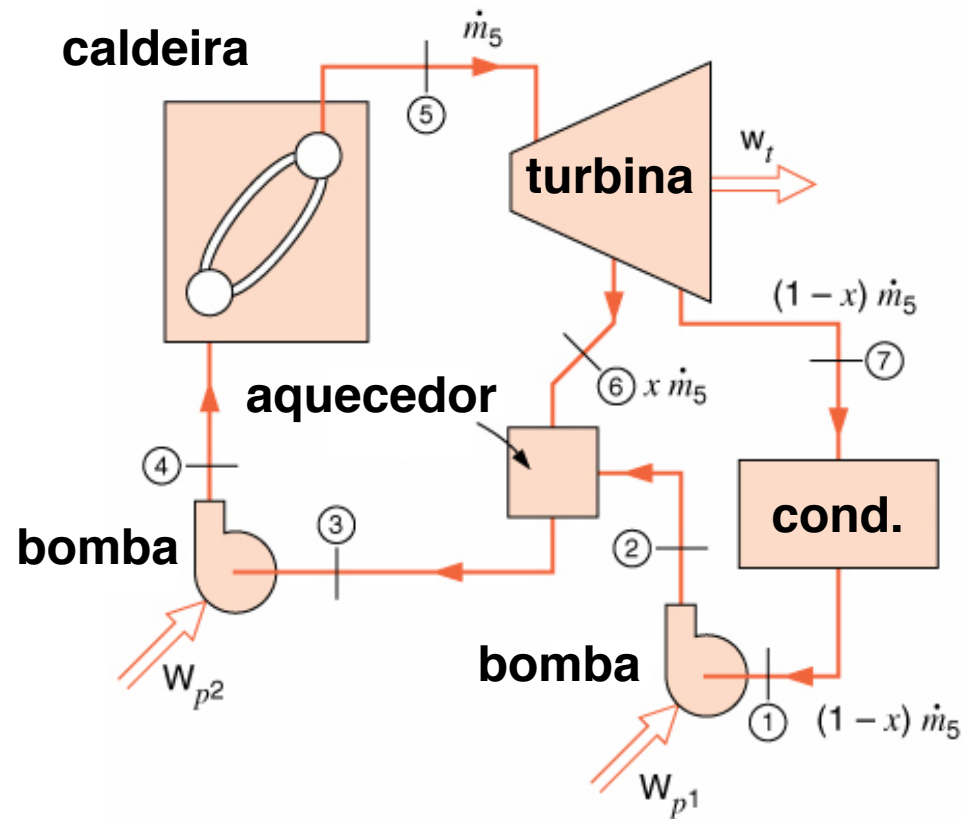
Rankine regenerativo



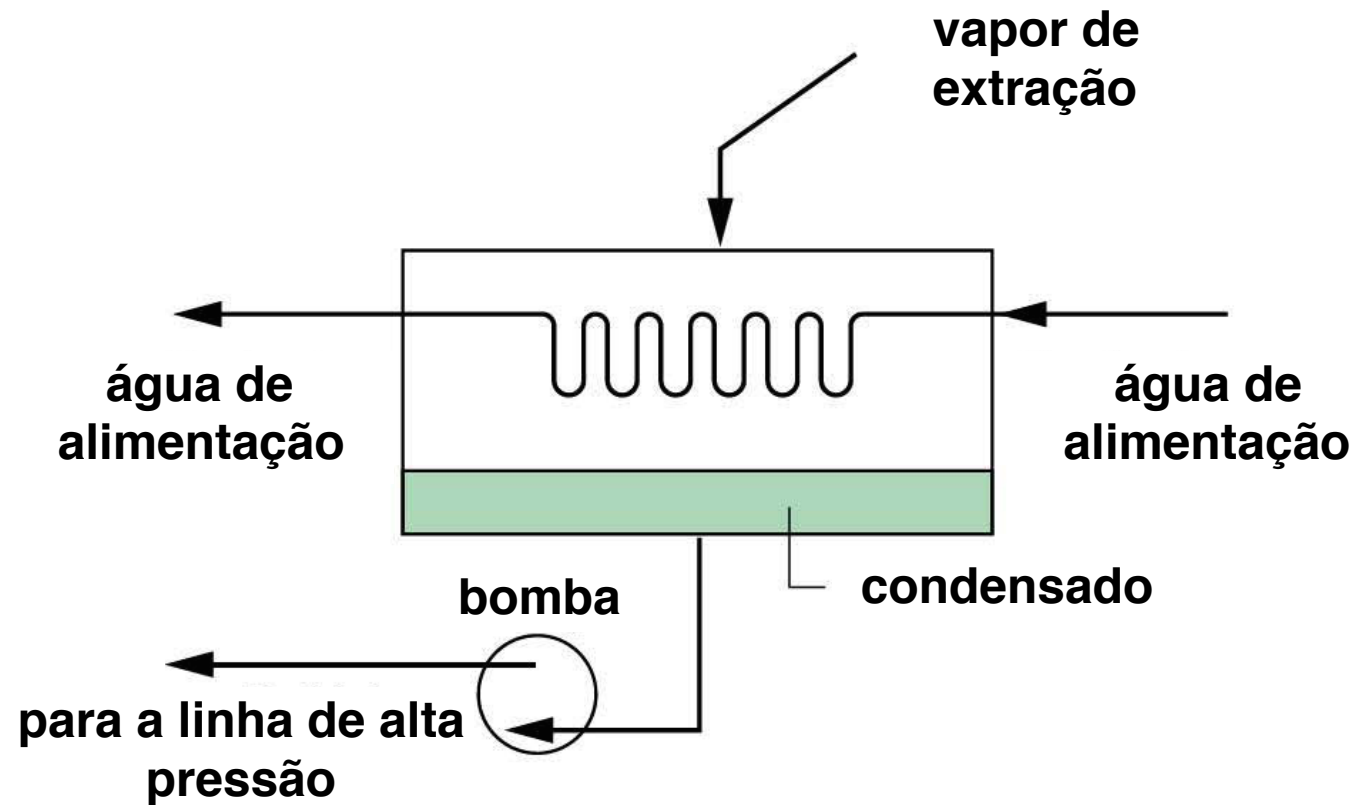
Regenerativo c/ aquecedor de mistura



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

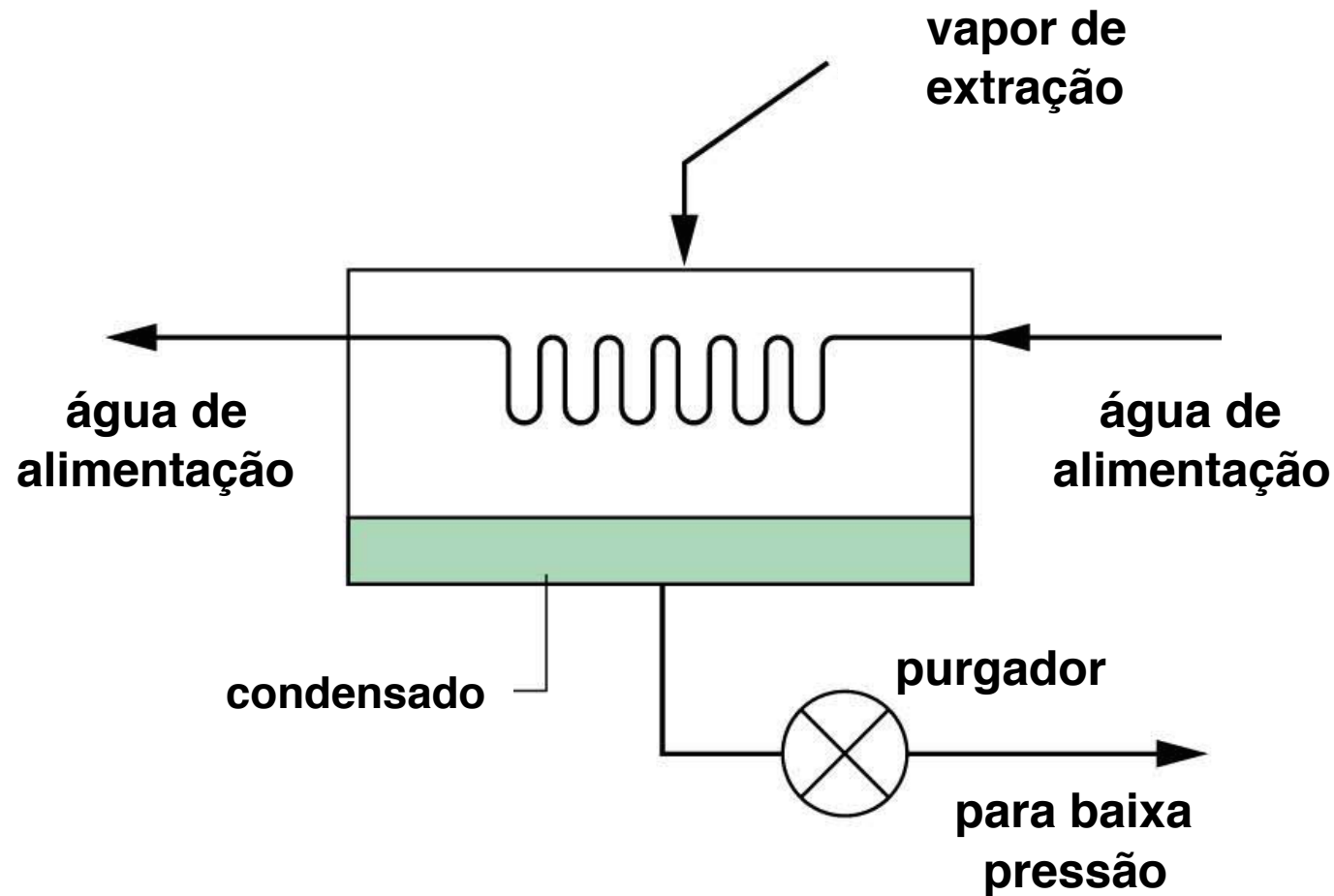


1º arranjo

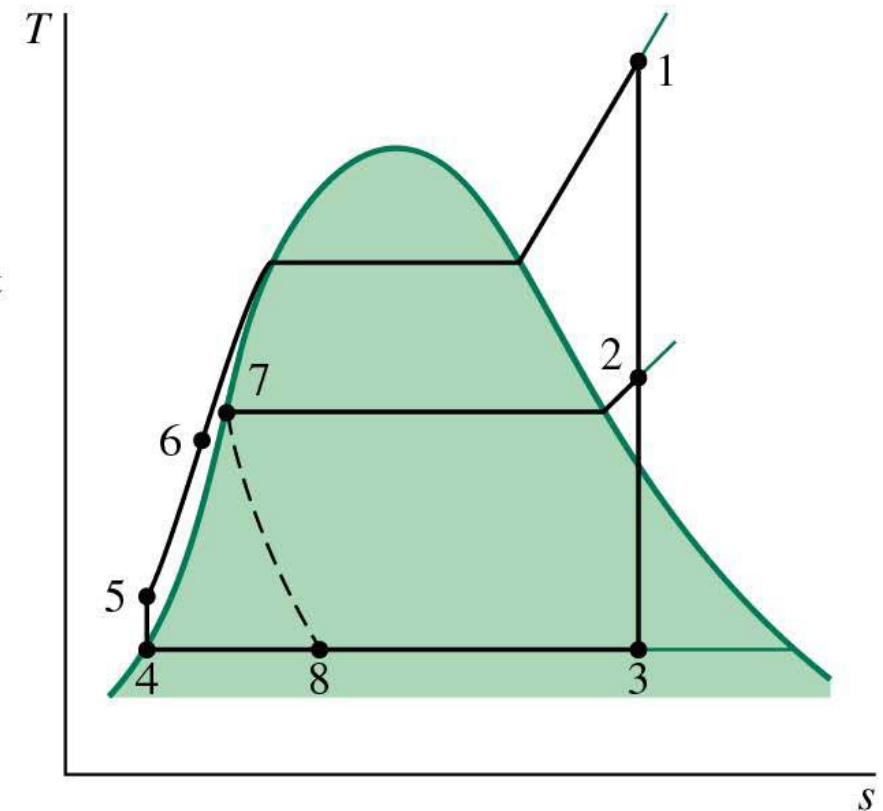
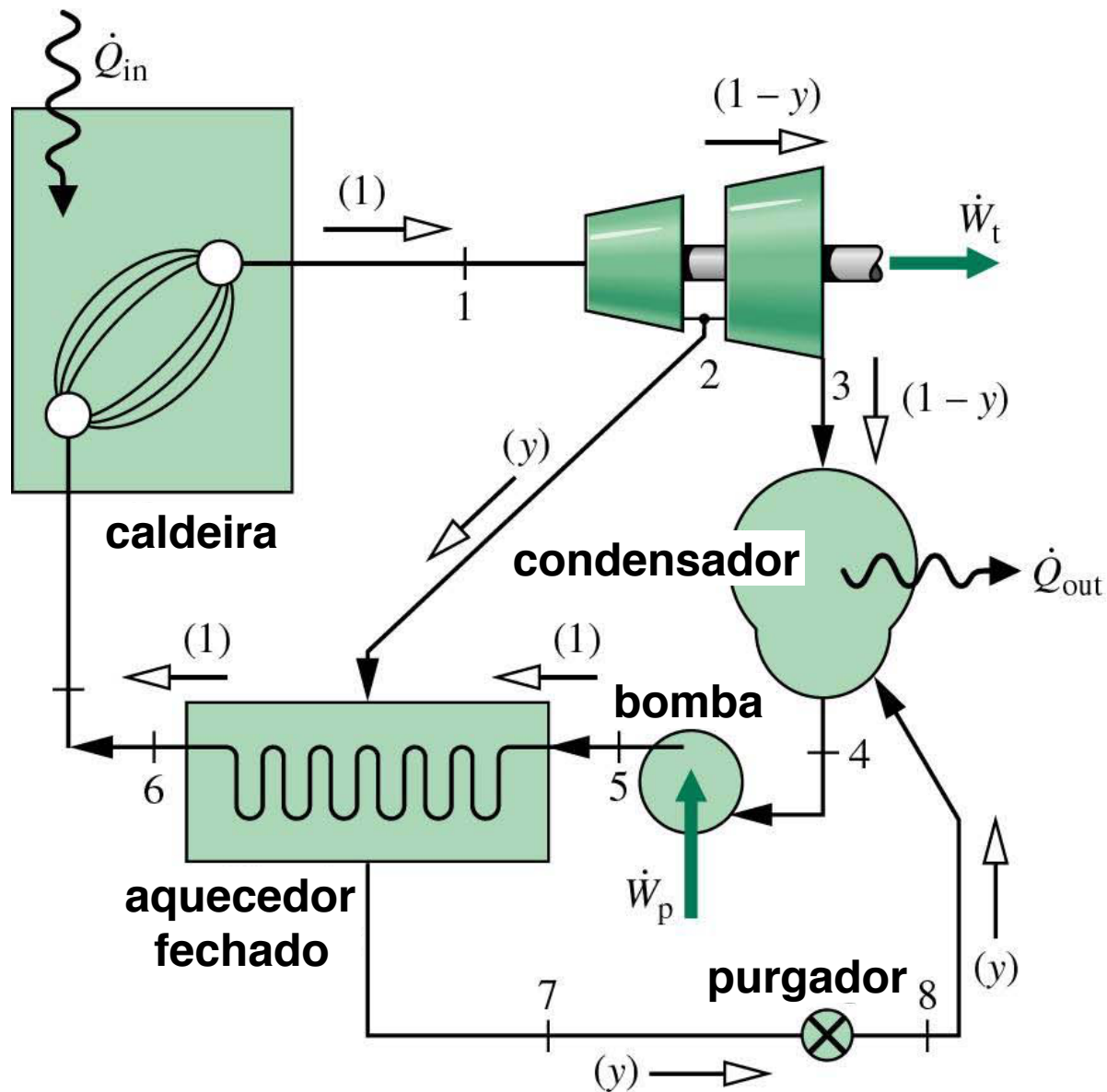




2º arranjo



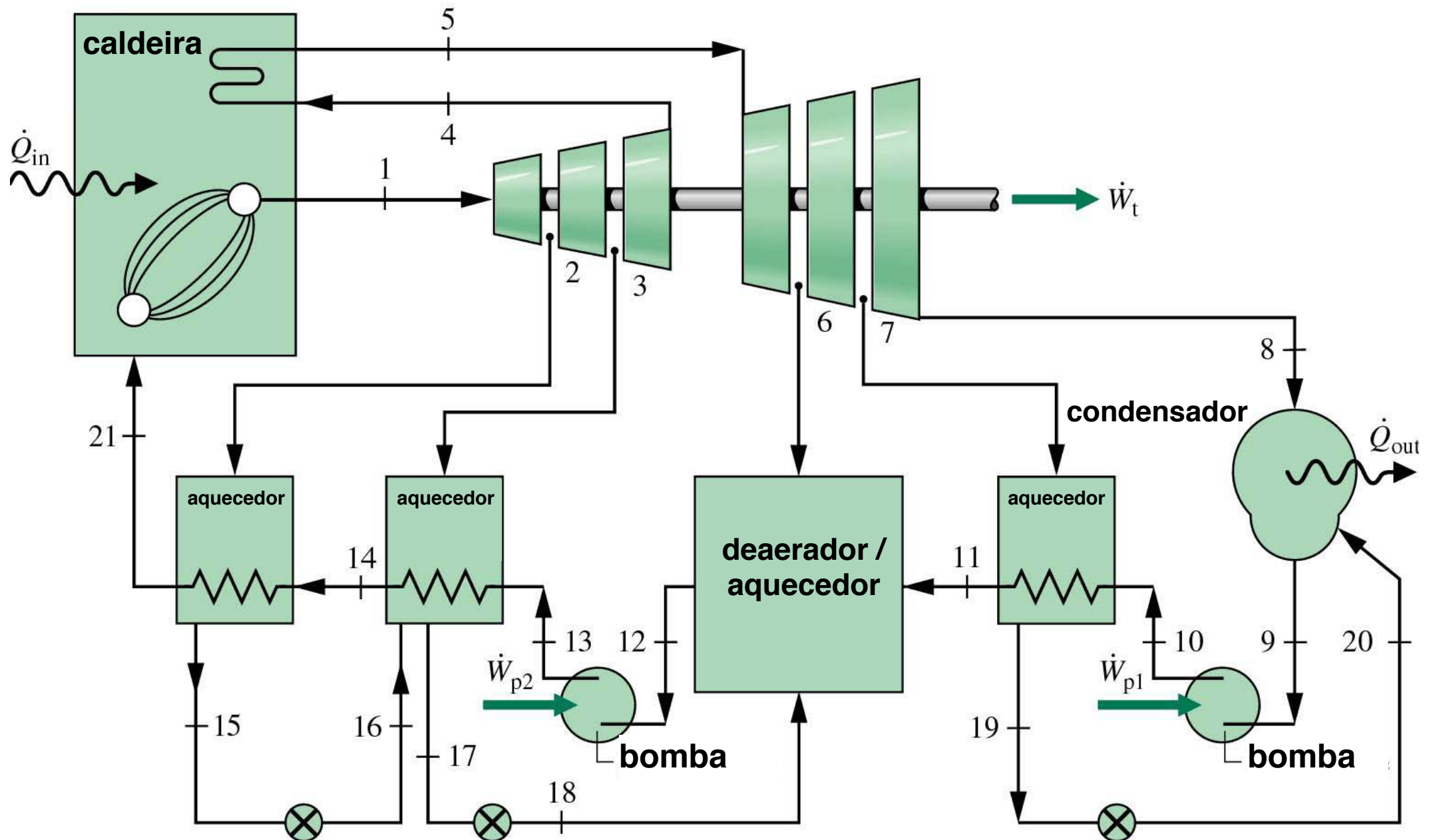
Regenerativo c/ aquecedor de passagem



Regenerativo c/ reaquecimento



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

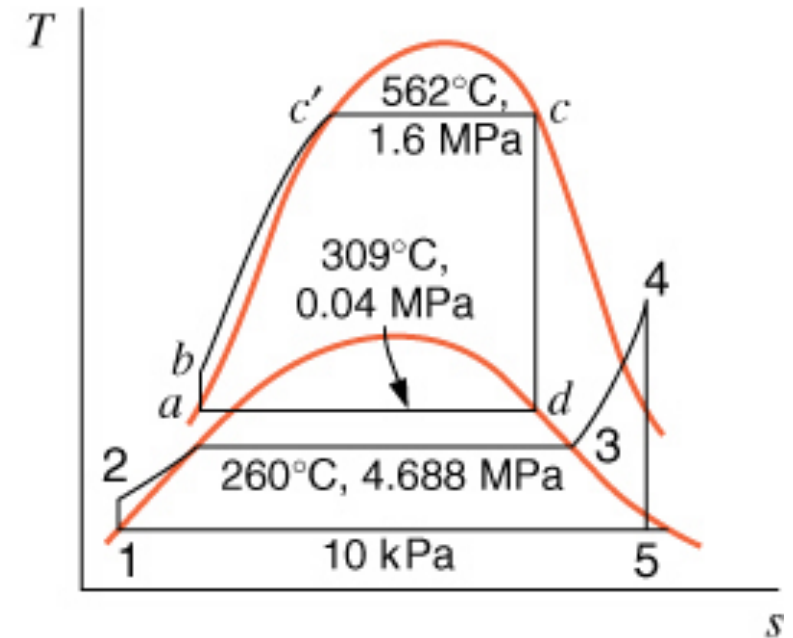
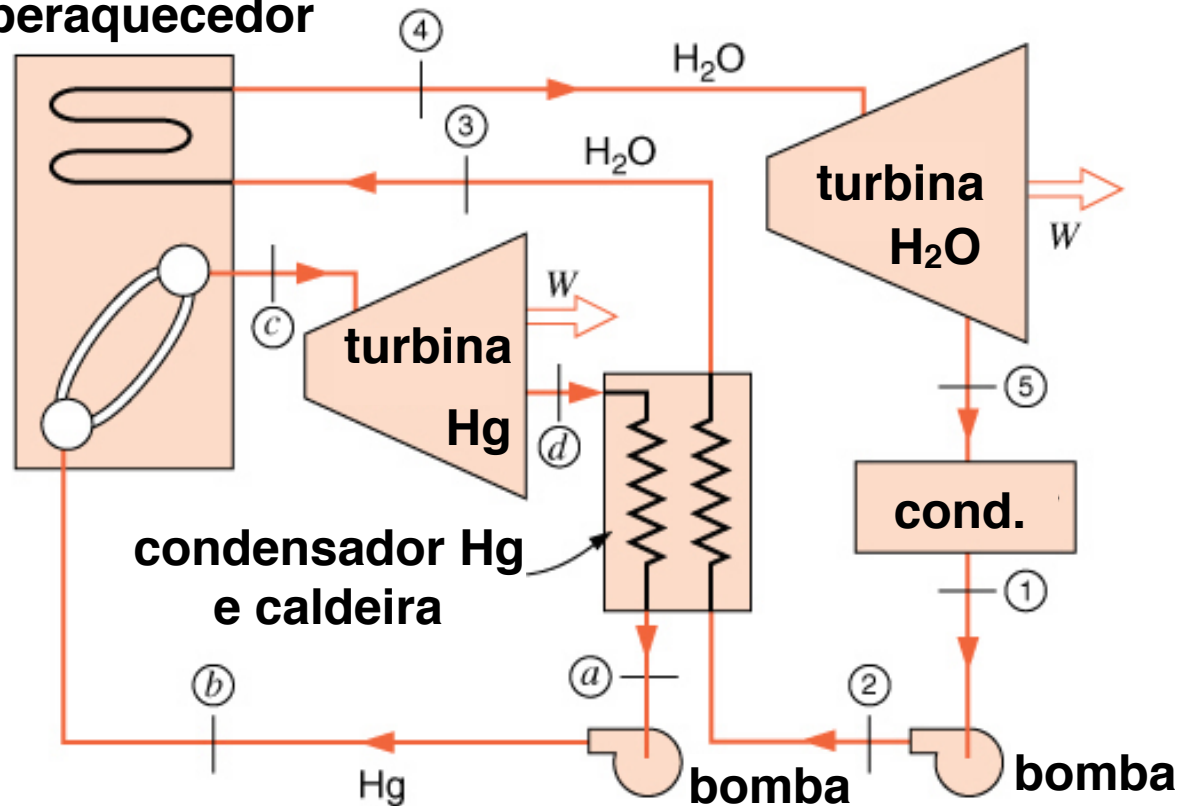


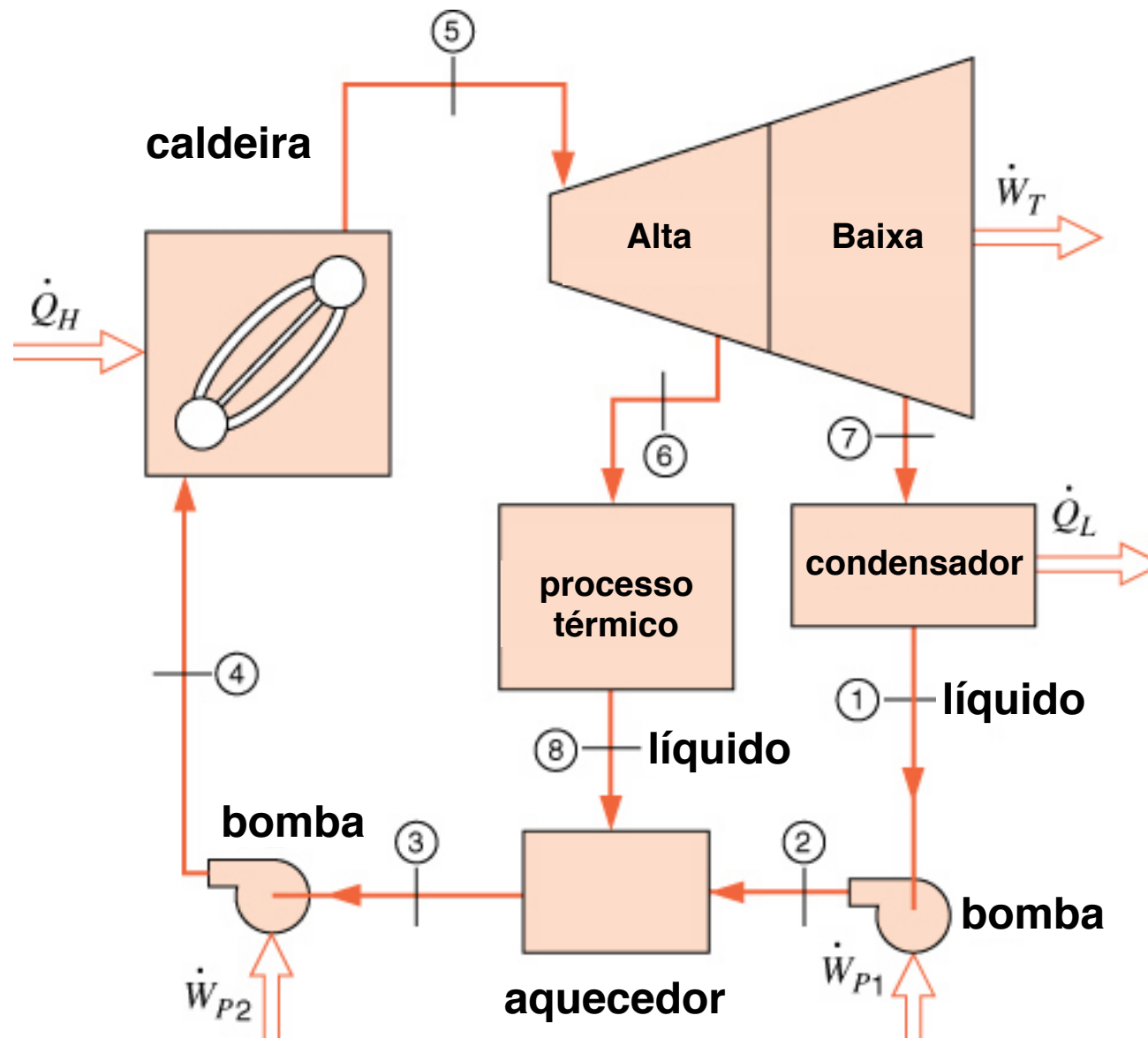
Ciclo Rankine binário

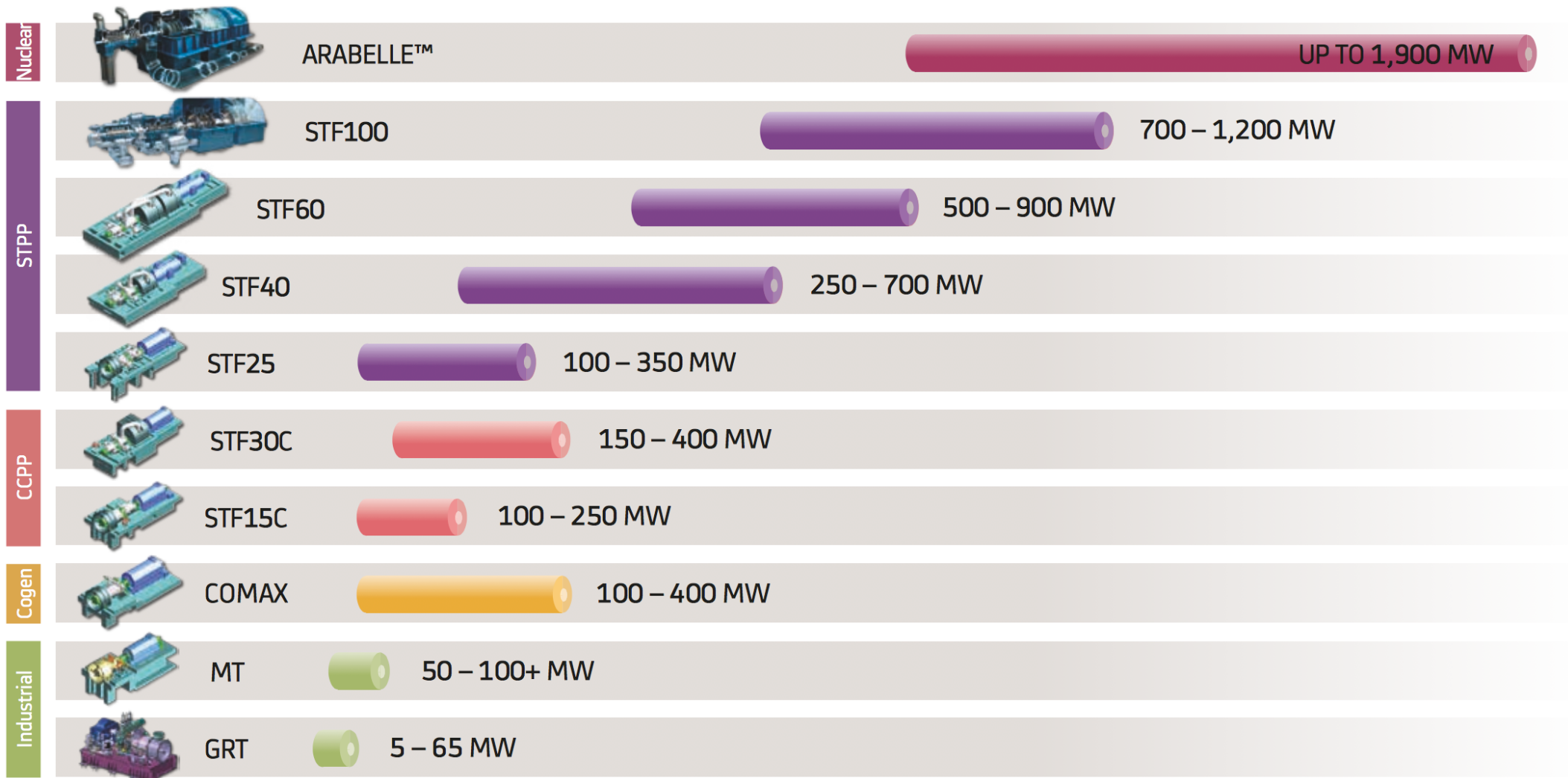


Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

caldeira de
mercúrio e
superaquecedor







<http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/steam-turbines-a-full-range-to-fit-your-needs.pdf>



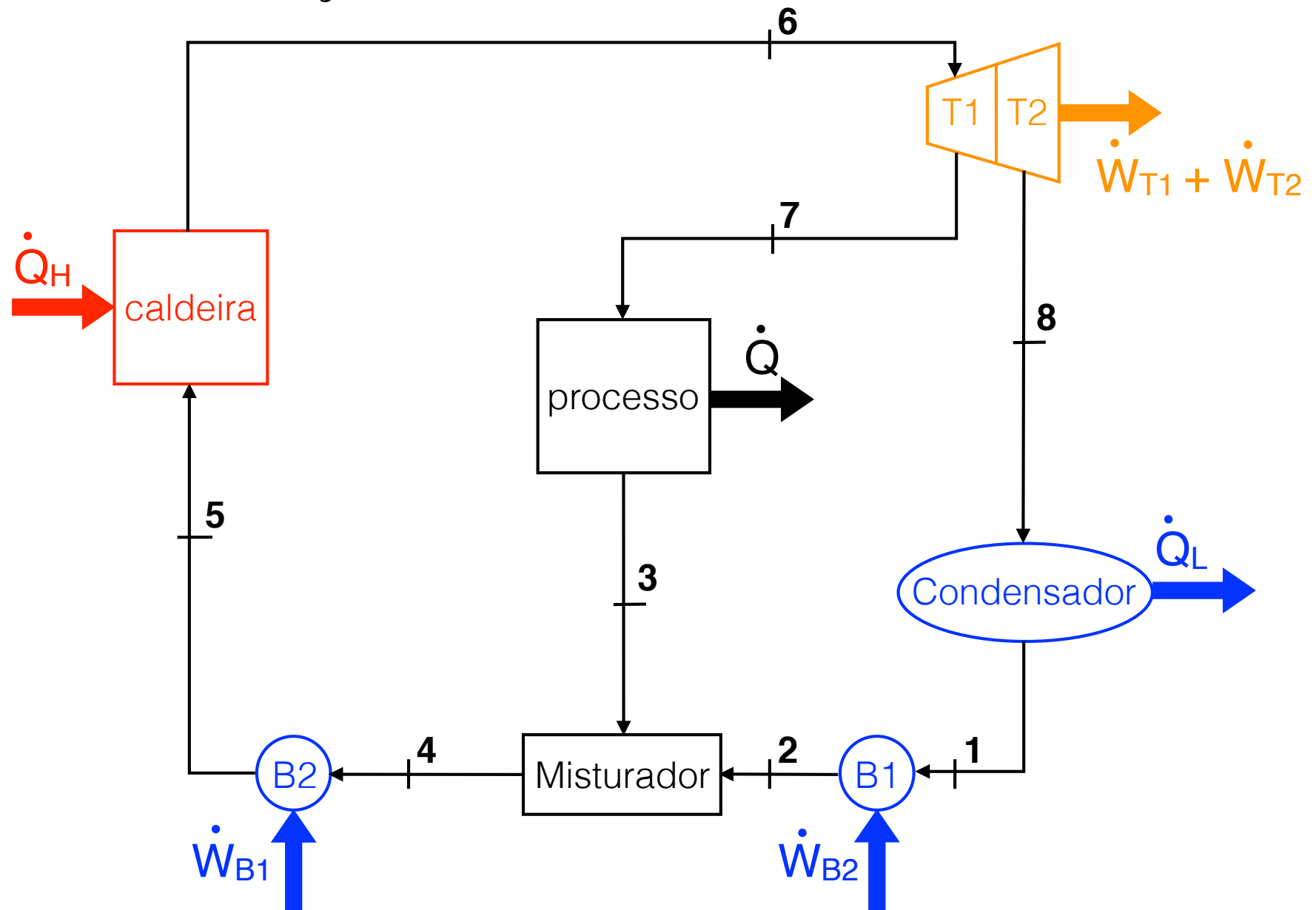
4) Uma planta têxtil utiliza 4kg/s de vapor a 2MPa, extraído da turbina de dois estágios de uma planta de cogeração. Vapor entra na turbina a 8MPa e 500°C com vazão mássica de 11kg/s e a deixa a 20kPa. O vapor extraído deixa o aquecedor de processo como líquido saturado e mistura com a água de alimentação. 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 da 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.

Rankine - exemplos



Esquema da instalação:



◆ **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

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

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

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

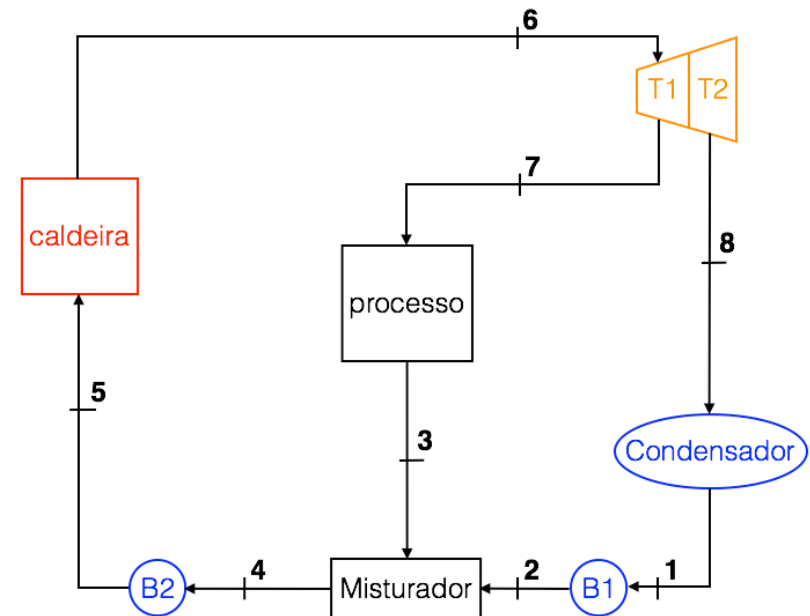
◆ **Estado 7:** vapor superaquecido

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

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

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

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



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

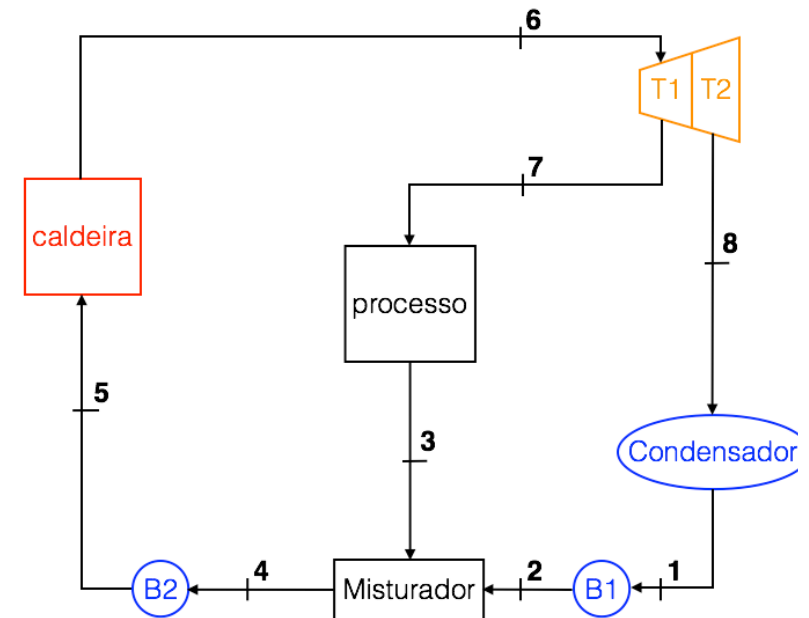
◆ Estado 8s: mistura

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

$$x_{8s} = 0,8445$$

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

$$T_{8s} = 60,07^{\circ}\text{C} \text{ (} T_{\text{sat}} \text{ @ } 20 \text{ kPa)}$$



◆ Estado 8: mistura

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

$$x_8 = 0,8856$$

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

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

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

◆ 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

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

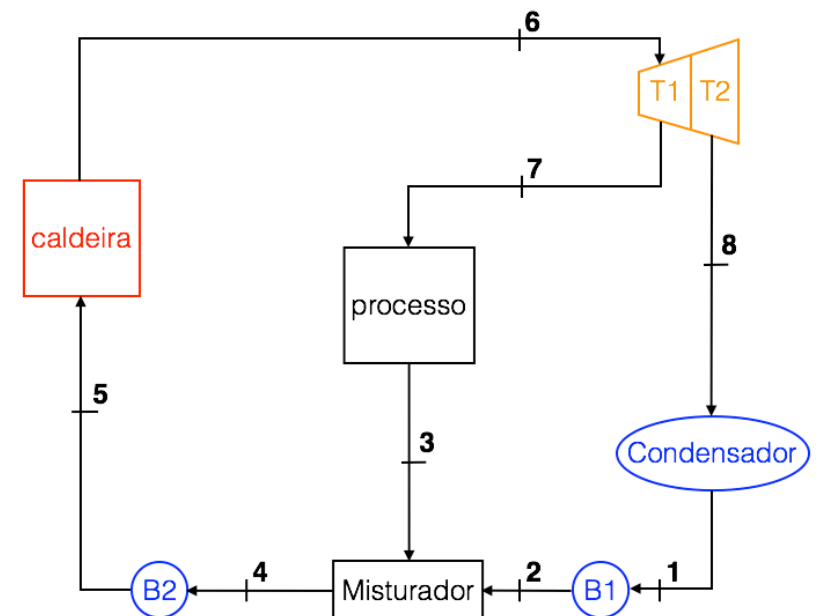
$$h_2 = 253,7 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 3: líquido saturado

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

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

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



◆ 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

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

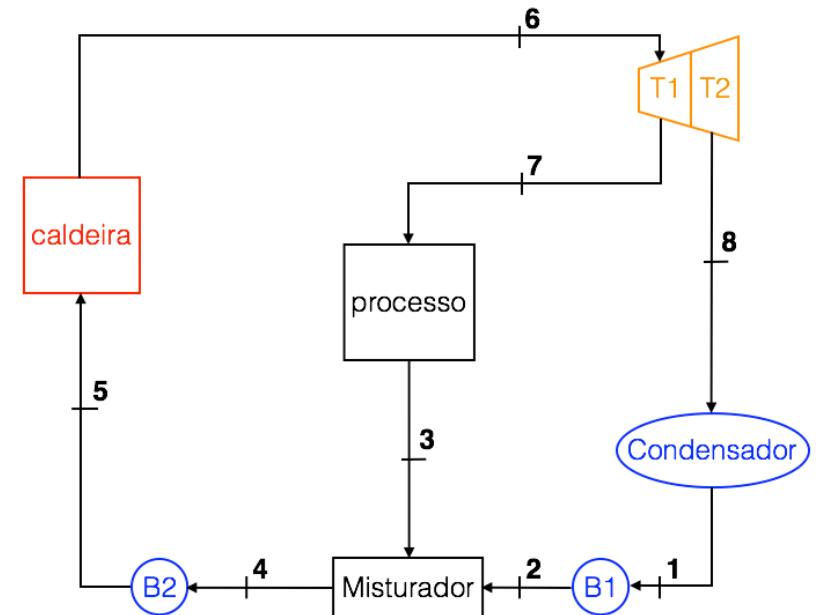
$$h_5 = 499,1 \text{ kJ/kg}$$

◆ Taxa de calor para o processo:

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

◆ Taxa de calor na caldeira:

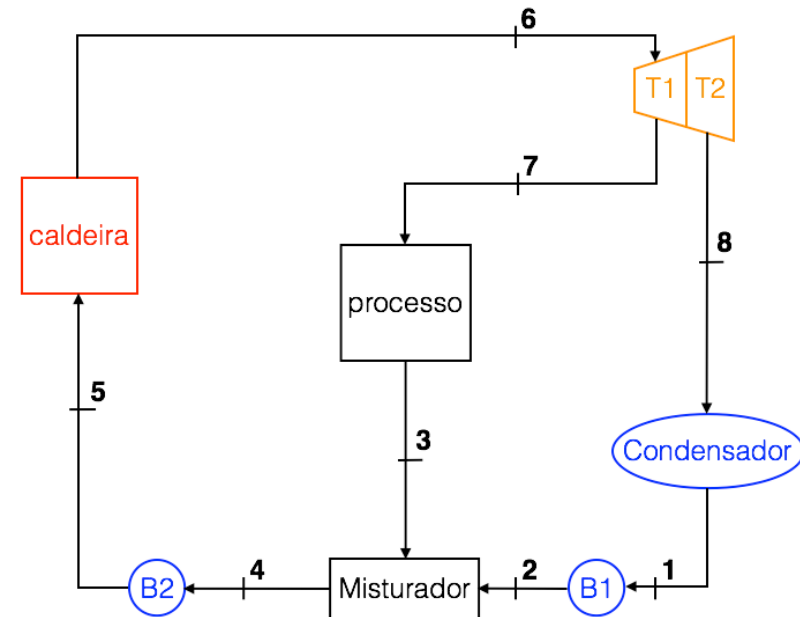
$$\dot{Q}_H = \dot{m}_5(h_6 - h_5) = 31894 \text{ kW}$$



◆Rendimento

$$\eta_t = 0,5445$$

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



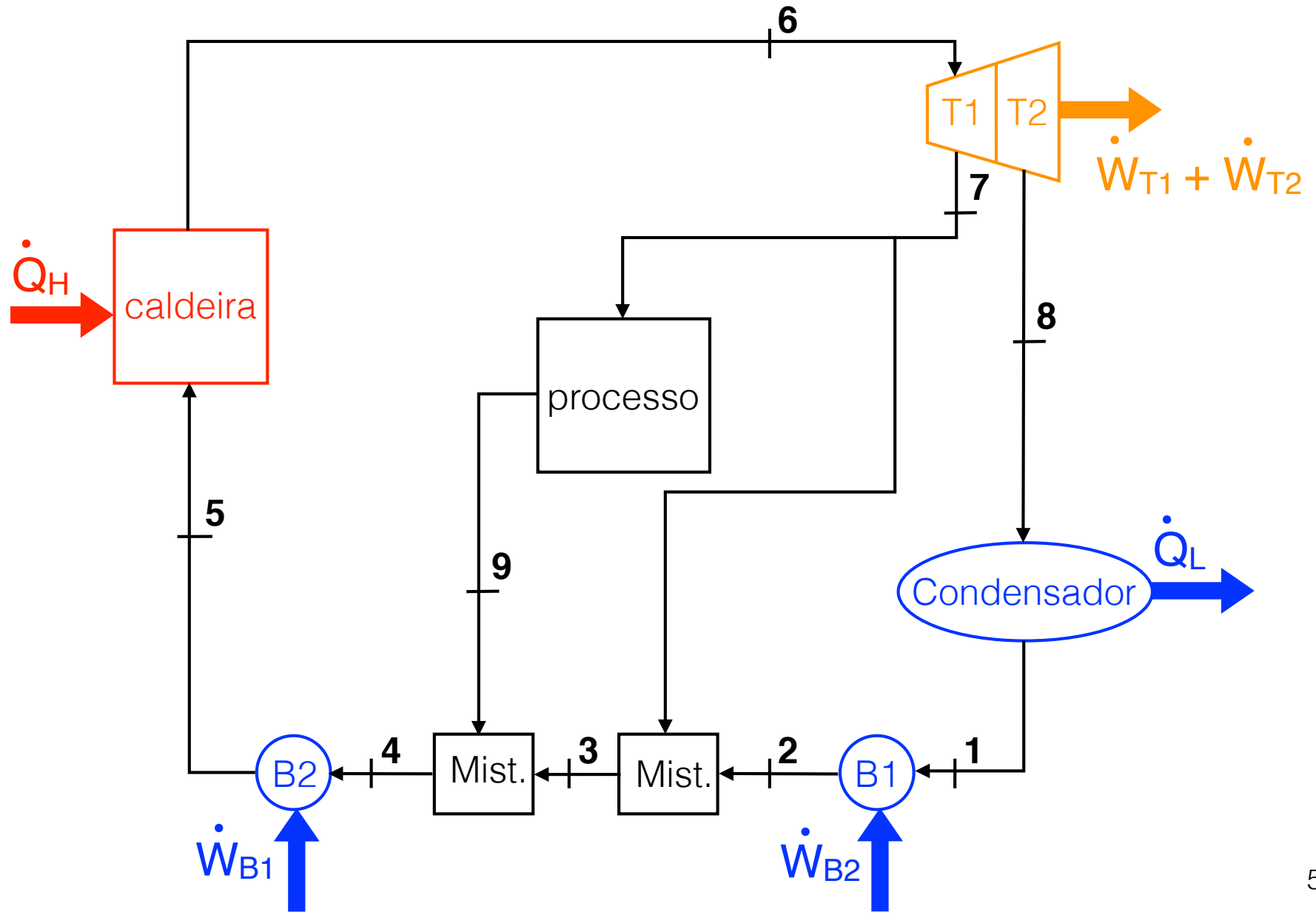


5) Considere uma planta de cogeração modificada para incluir regeneração. Vapor entra na turbina a 6MPa e 450°C e expande até uma pressão de 0,4MPa. Nessa pressão, 60% do vapor é extraído da turbina e o restante expande até 10kPa. Parte do fluido extraído é usado para aquecimento industrial e deixa o aquecedor como líquido saturado a 0,4MPa. Na sequência ele é misturado com água de alimentação que deixa o primeiro misturador. A mistura é, então, bombeada até a pressão da caldeira. Assuma turbinas e bombas adiabáticas reversíveis. Determine a vazão mássica de vapor no ciclo para uma potência de 15MW. Represente o ciclo em um diagrama T-s.

Rankine - exemplos



Esquema da instalação:





Solução

Hipóteses:

1. Regime permanente;
2. Variações de energia cinética e potencial desprezíveis.
3. Turbinas e bombas adiabáticas e reversíveis.

Rankine - exemplos



◆ Estado 1: líquido saturado

$$P_1 = 10\text{kPa}$$

$$h_1 = 191,8\text{kJ/kg}$$

$$v_1 = 0,00101\text{m}^3/\text{kg}$$

◆ Trabalho específico em B1:

$$w_{B1} = 0,4 \cdot v_1 (P_1 - P_2)$$

$$w_{B1} = 0,4 \cdot 0,001010 (10 - 400) = -0,1576\text{kJ/kg}$$

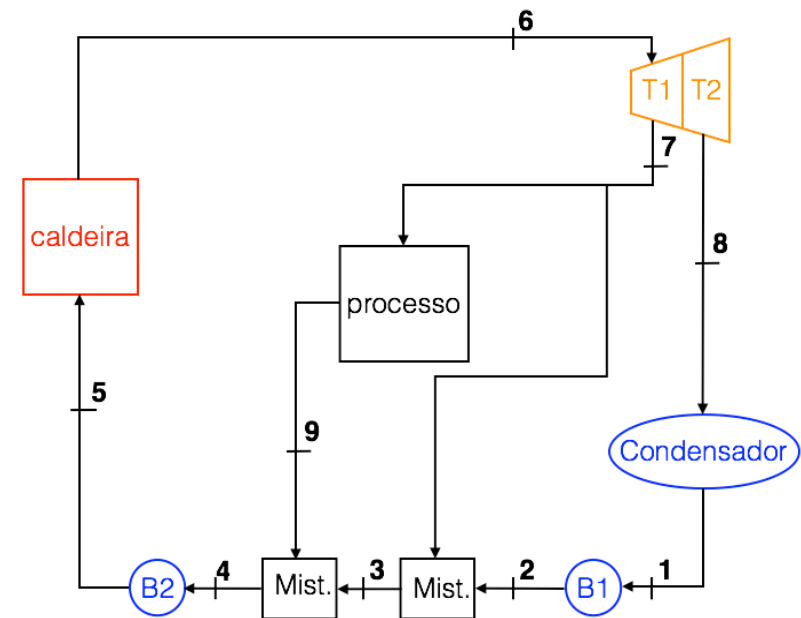
◆ Estado 2: líquido comprimido

$$h_2 = h_1 + w_{b1} / 0,4 = 192,2\text{kJ/kgK}$$

◆ Estados 4 e 9: líquido saturado ($P = 0,4\text{MPa}$)

$$h_4 = h_9 = 604,9\text{kJ/kgK}$$

$$v_4 = 0,001084\text{m}^3/\text{kg}$$



◆ Trabalho específico em B2:

$$w_{B2} = v_4(P_4 - P_5)$$

$$w_{B2} = 0,001084(400 - 6000) = -6,068 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 5: líquido comprimido

$$h_5 = h_4 + w_{b2} = 611,0 \text{ kJ/kgK}$$

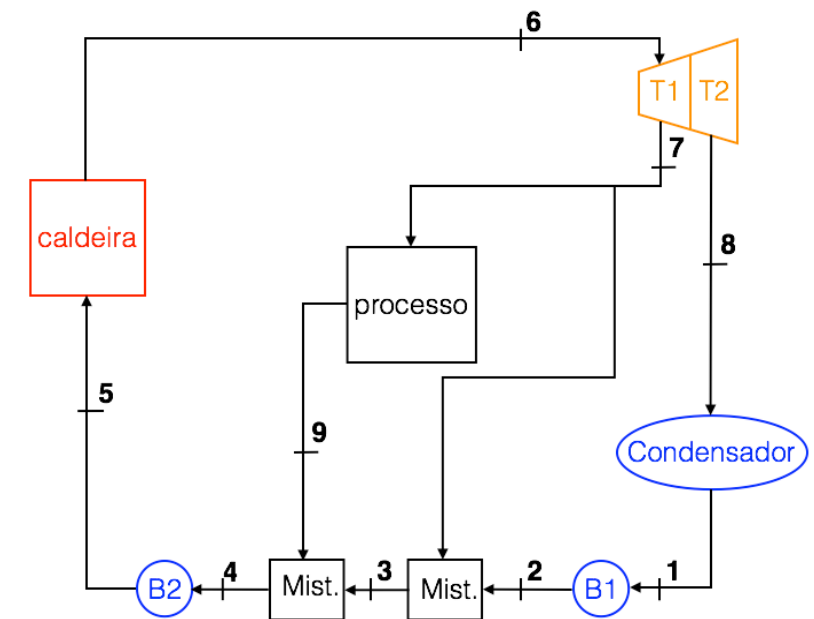
◆ Estado 6: vapor superaquecido

$$P_6 = 6000 \text{ kPa}$$

$$T_6 = 450^\circ\text{C}$$

$$h_6 = 3302 \text{ kJ/kg}$$

$$s_6 = 6,720 \text{ kJ/kgK}$$

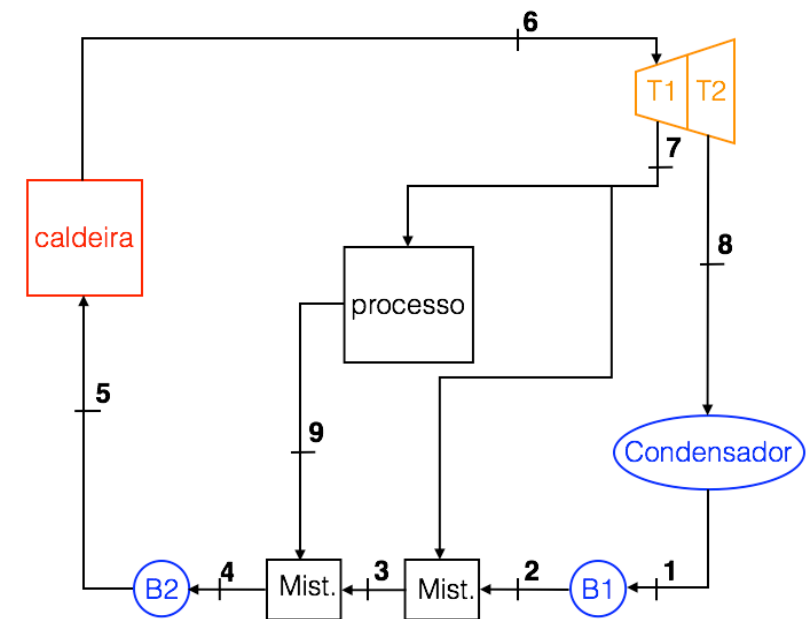


Rankine - exemplos



◆ **Estado 7:** mistura (143,6 °C)
 $s_7 = s_6 = 6,720 \text{ kJ/kgK}$
 $P_7 = 400 \text{ kPa}$
 $x_7 = 0,9655$
 $h_7 = 2665 \text{ kJ/kg}$

◆ **Estado 8:** mistura (45,82 °C)
 $s_8 = s_6 = 6,720 \text{ kJ/kgK}$
 $P_8 = 10 \text{ kPa}$
 $x_8 = 0,8095$
 $h_8 = 2128 \text{ kJ/kg}$



Rankine - exemplos



◆ trabalho específico em T1 + T2:

$$w_T = (h_6 - h_7) + 0,4 (h_7 - h_8)$$

$$w_T = 851,8 \text{ kJ/kg}$$

◆ Trabalho específico em B1 + B2:

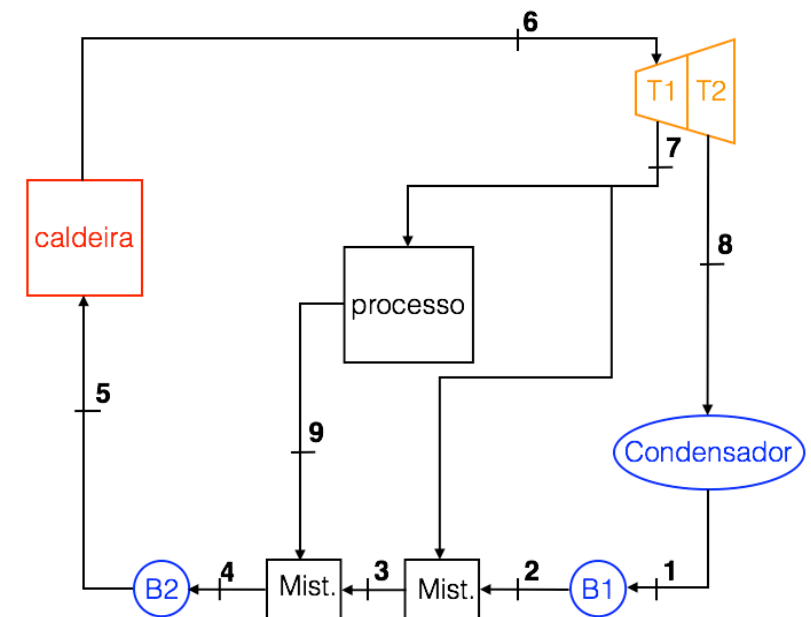
$$w_B = w_{B1} + w_{B2} = -6,225 \text{ kJ/kg}$$

◆ Trabalho líquido:

$$w_{liq} = w_T - w_B = 845,8 \text{ kJ/kg}$$

◆ vazão mássica

$$\dot{m} = 15000 / 845,5 = 17,74 \text{ kg/s}$$





◆ Diagrama T-s

