Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

PME 3344

Termodinâmica Aplicada

11) Ciclos motores a vapor

Por que estudar ciclos?

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?

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

Ciclos de potência a vapor

- Ciclo de Potência a Vapor = Ciclo de Rankine;

- O Ciclo de Rankine é o ciclo mais utilizado no mundo para
  produzir eletricidade;

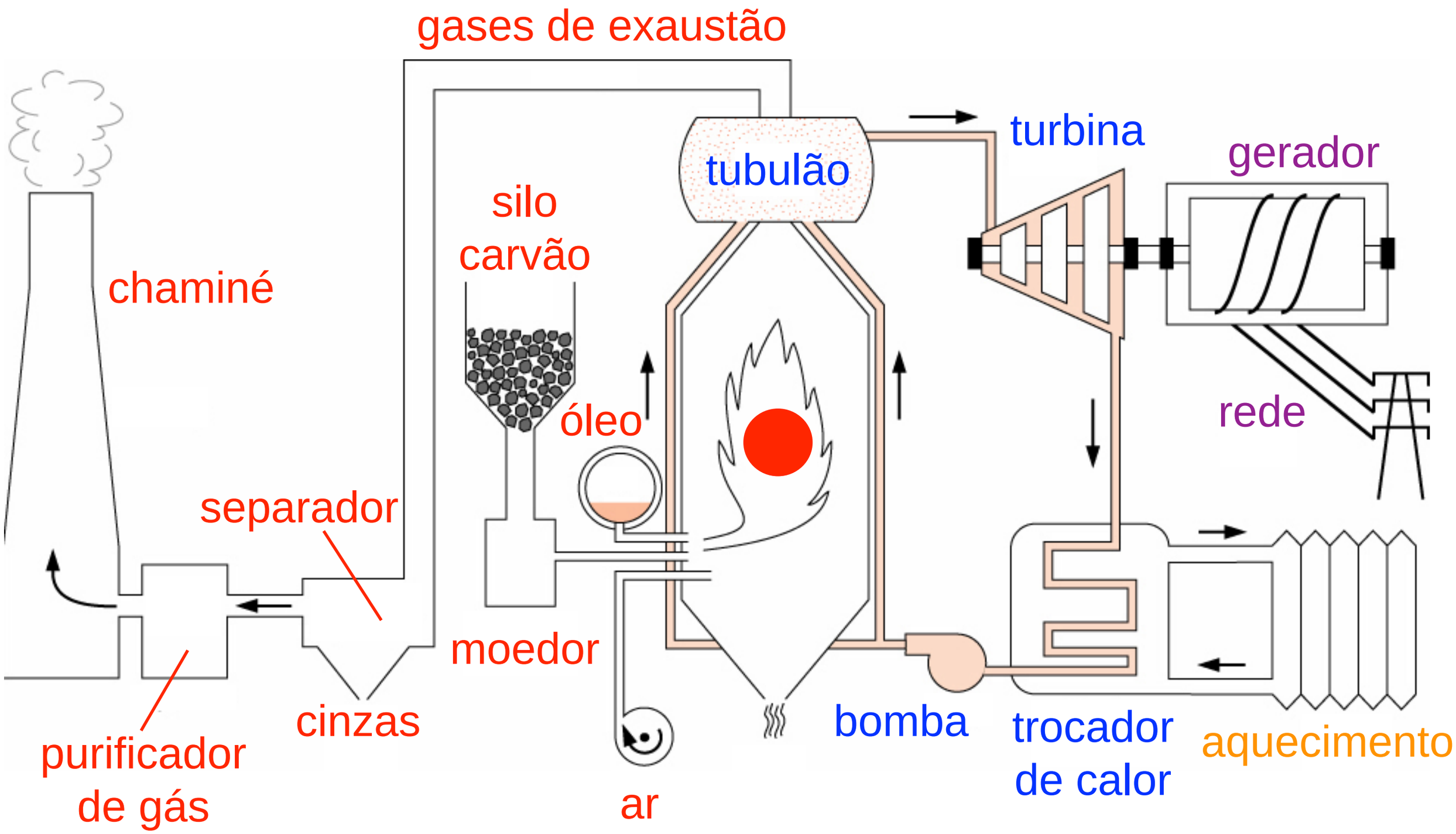
- O Ciclo de Rankine pode funcionar com diversos tipos de combustíveis (óleo, gás, biomassa, carvão mineral, combustível nuclear, etc.).

- O fluido de trabalho convencional do Ciclo de Rankine é a água.

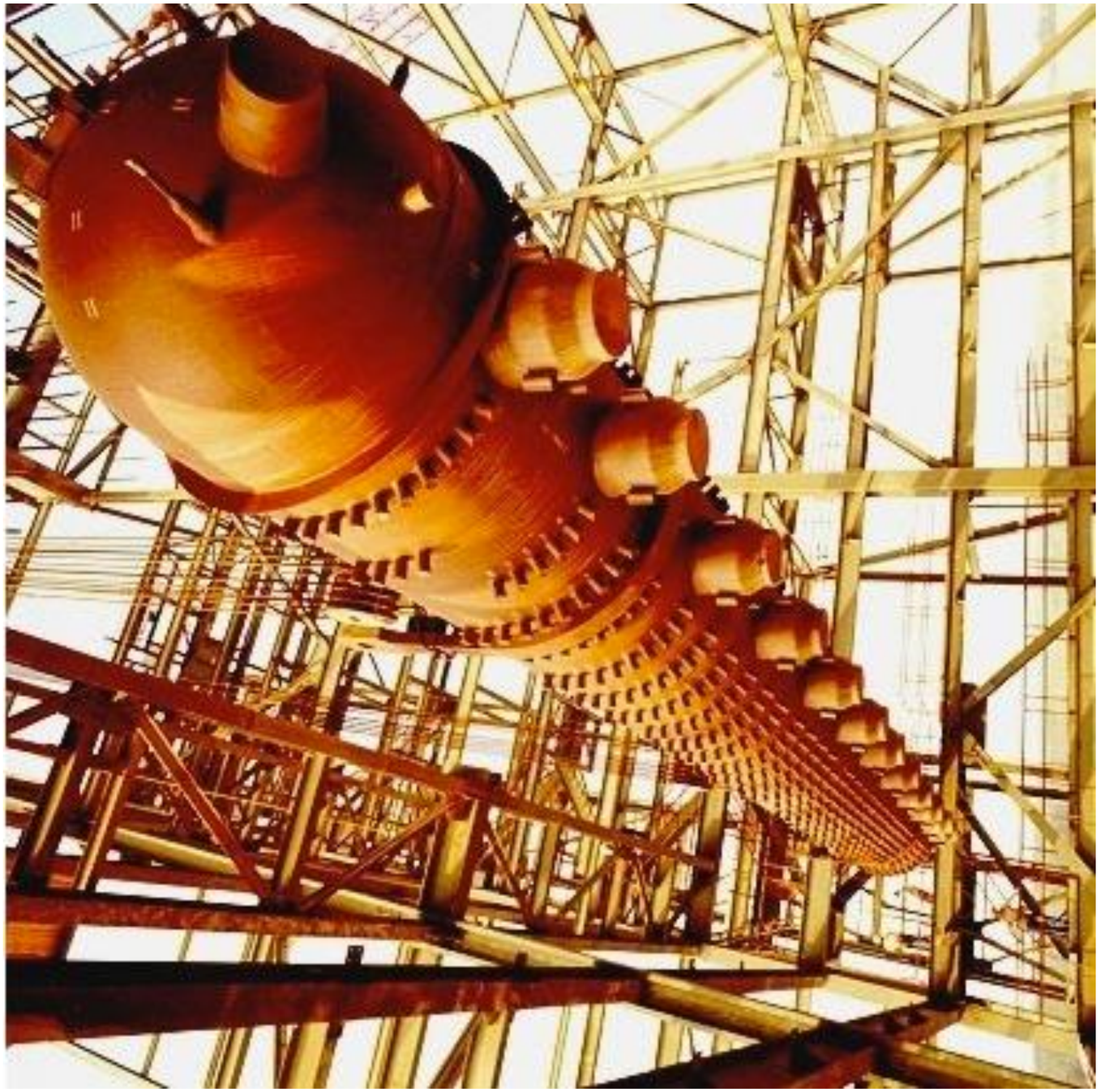
Algumas imagens...

Central termoelétrica a carvão

Central termoelétrica a carvão

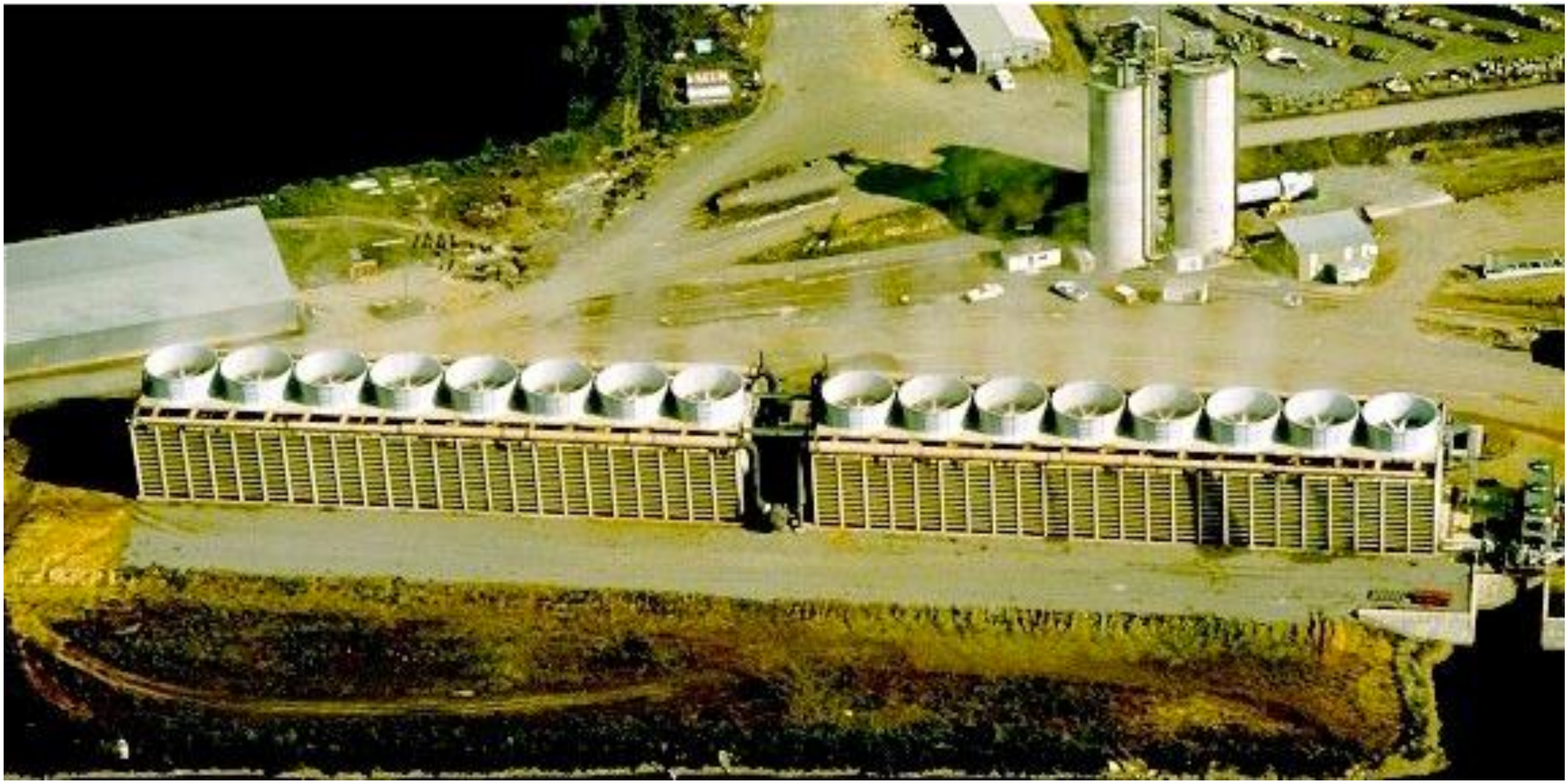


Algumas imagens...



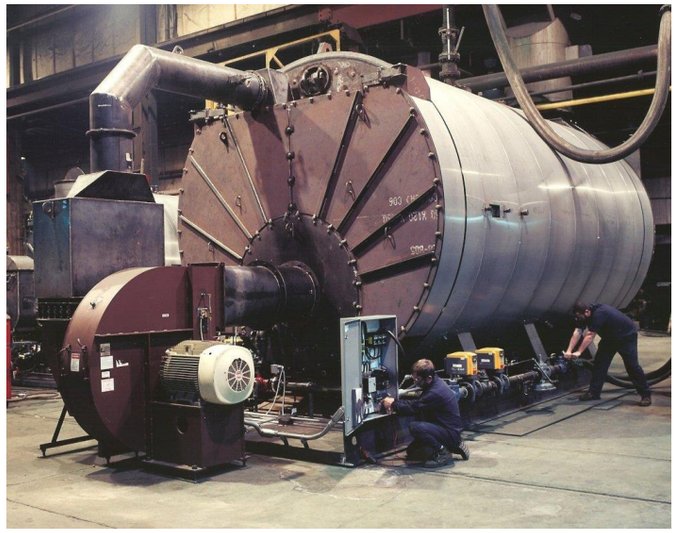
Tubulão de vapor

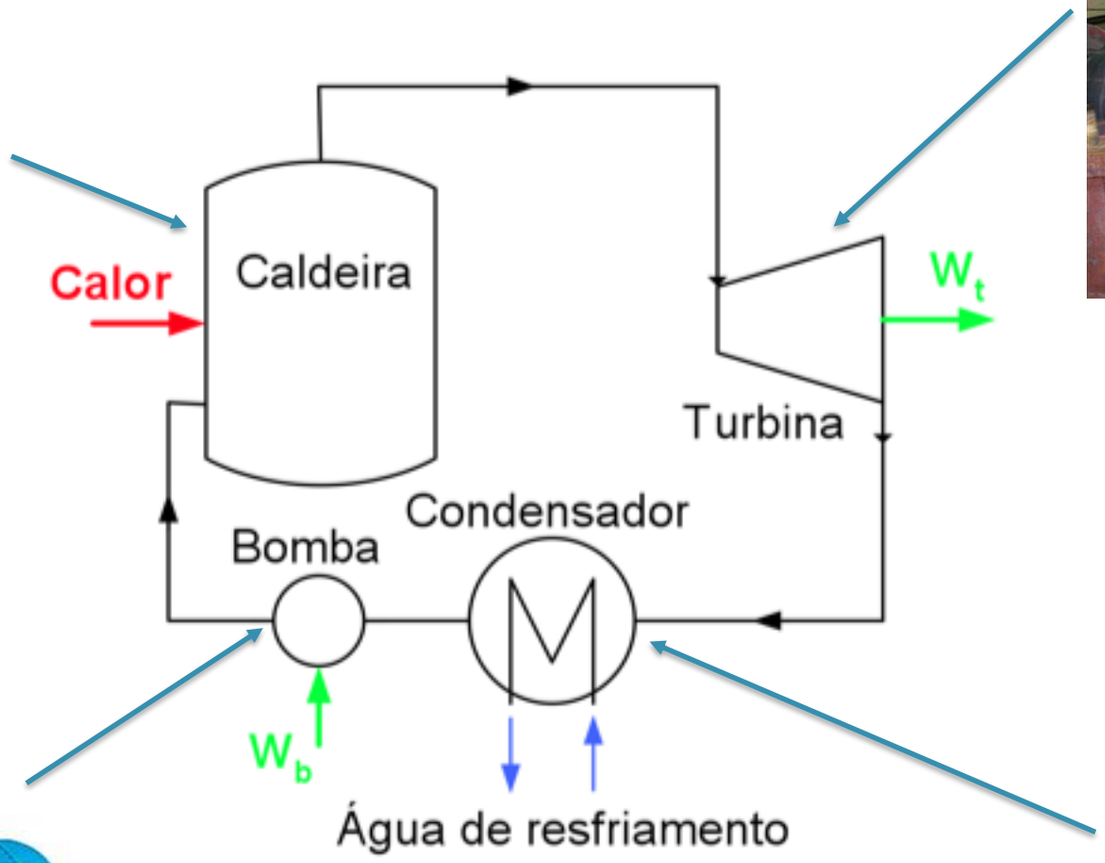
Algumas imagens



Torres de resfriamento

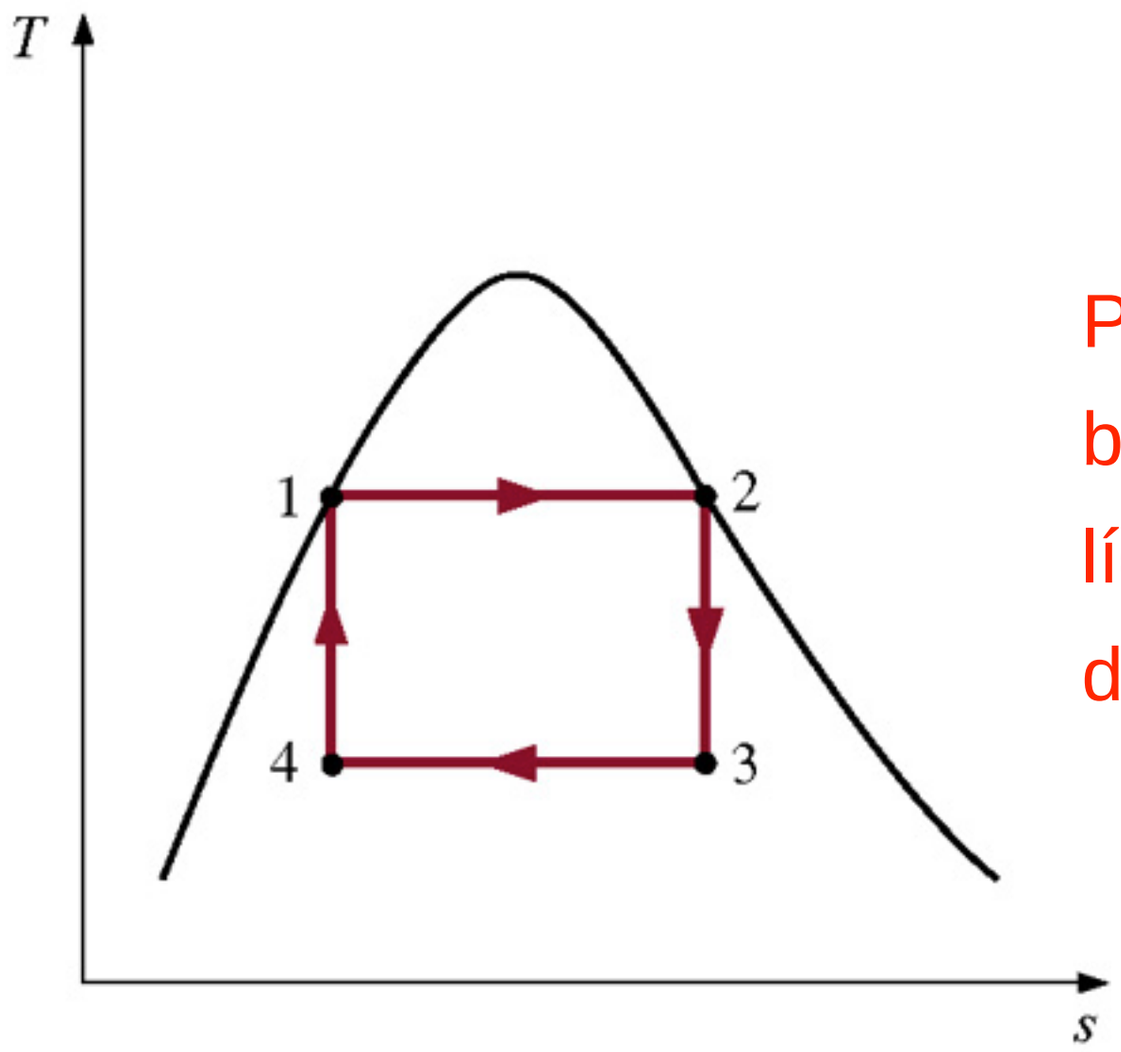
Fluido de trabalho: água





Por que não usar Carnot?

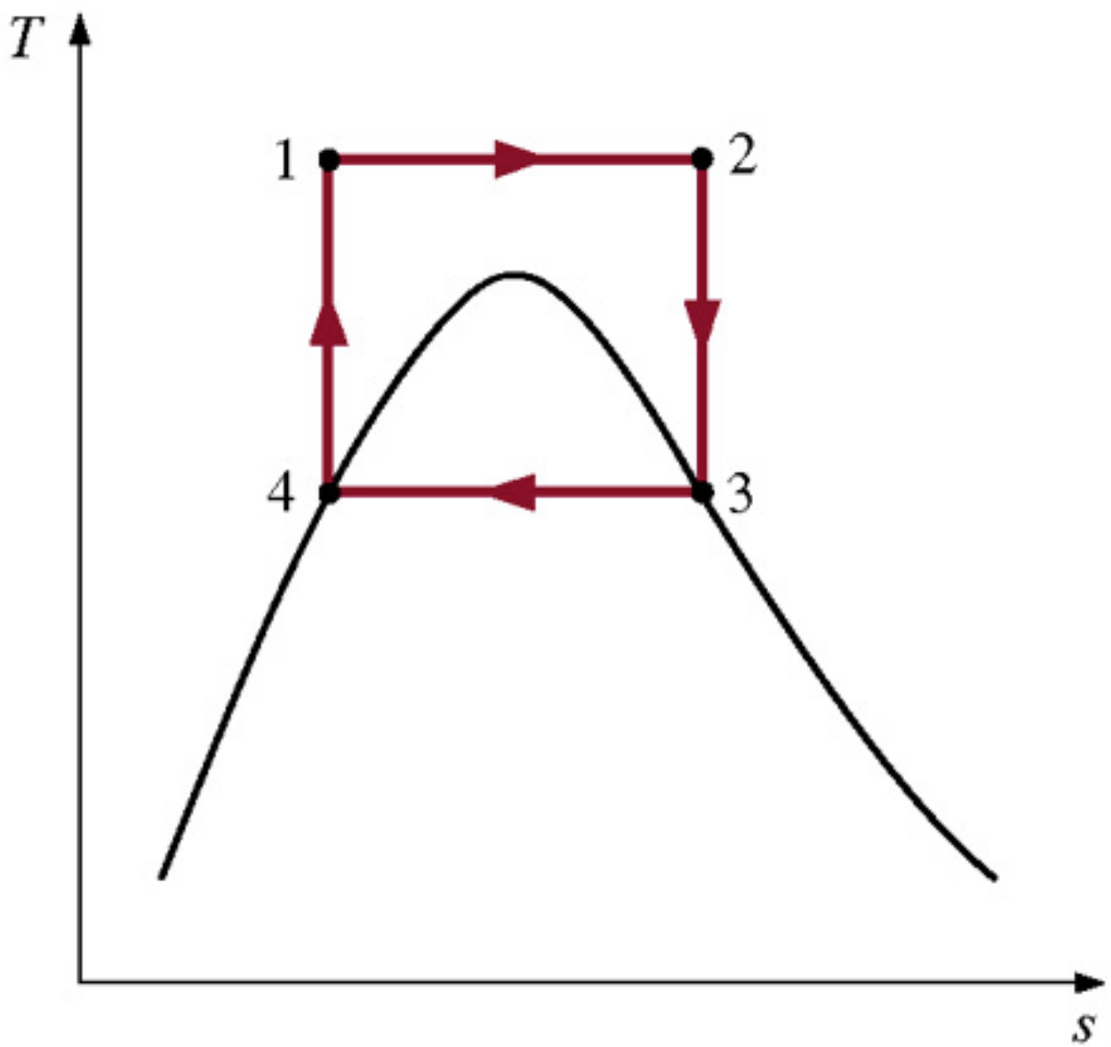
Observe:



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?

Observe:



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

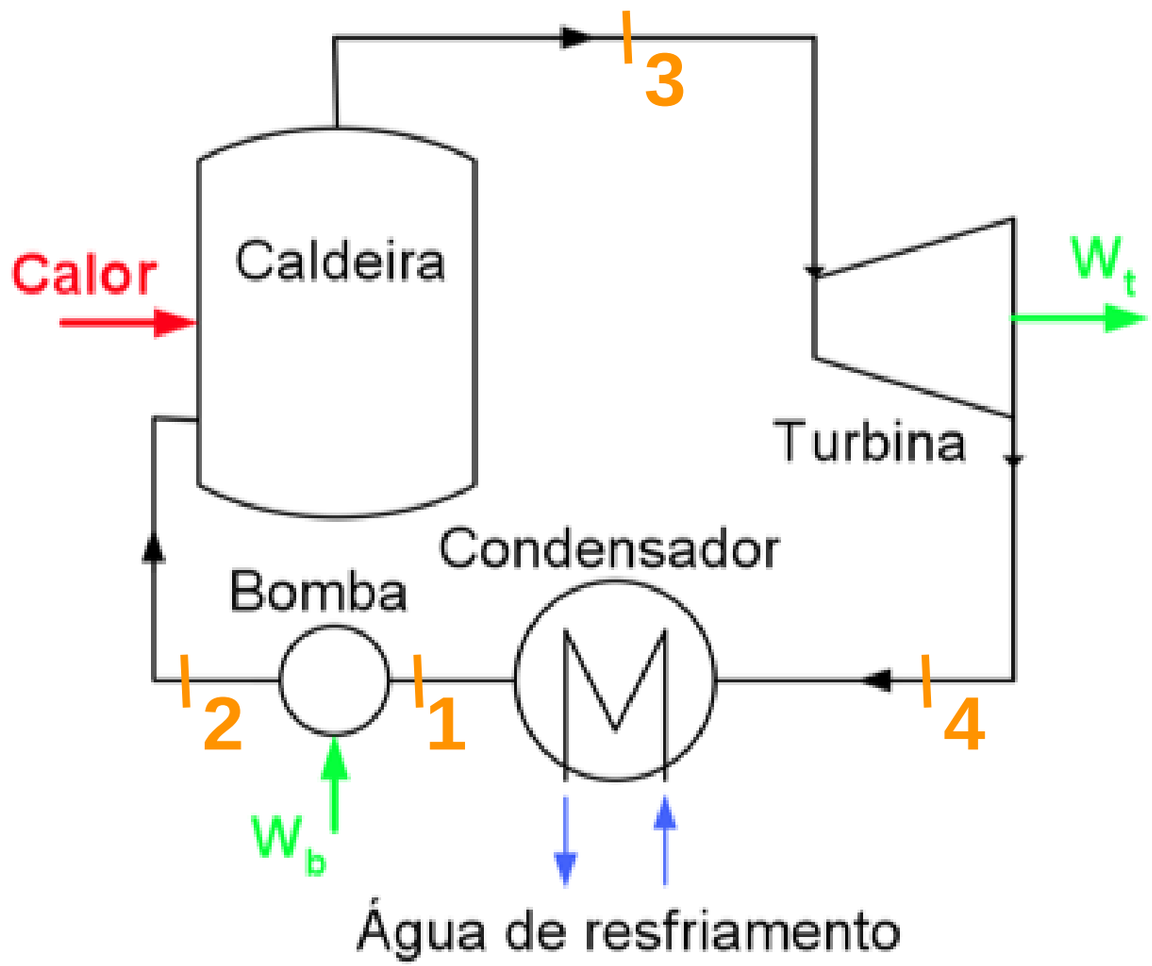
O Ciclo de Carnot não é um modelo adequado para ciclos a vapor pois não pode ser realizado na prática!

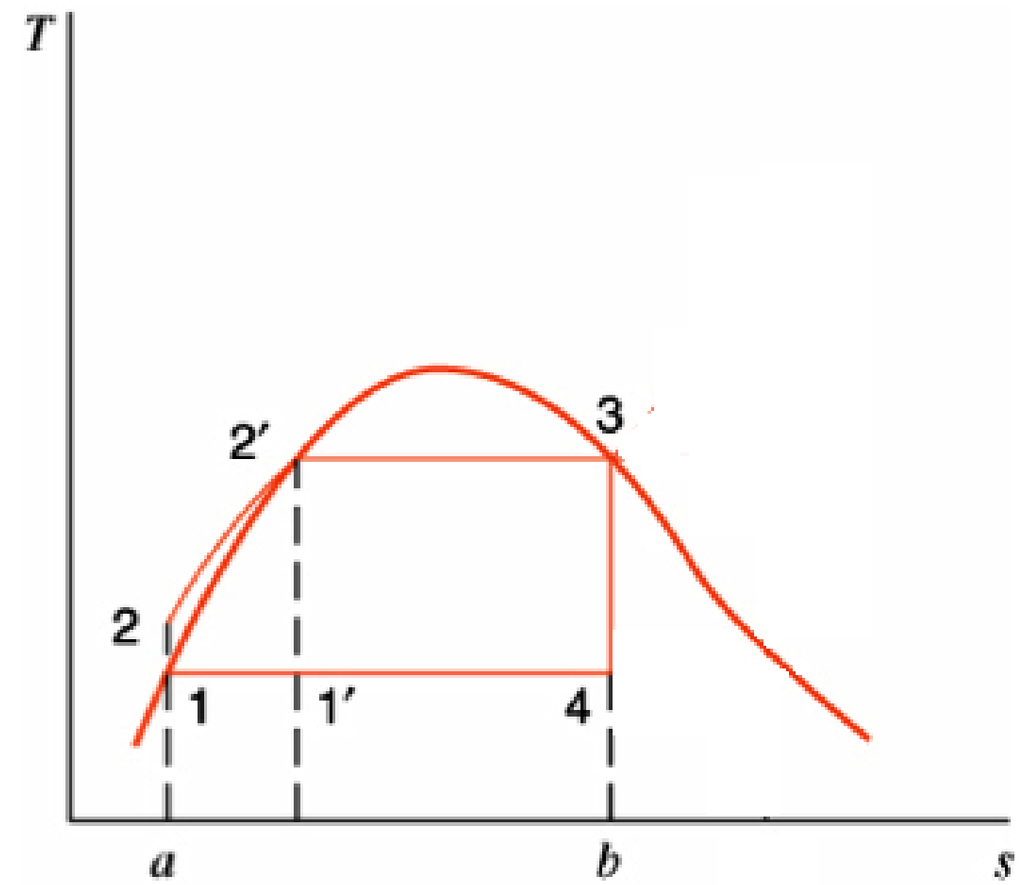
Ciclo Rankine ideal

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

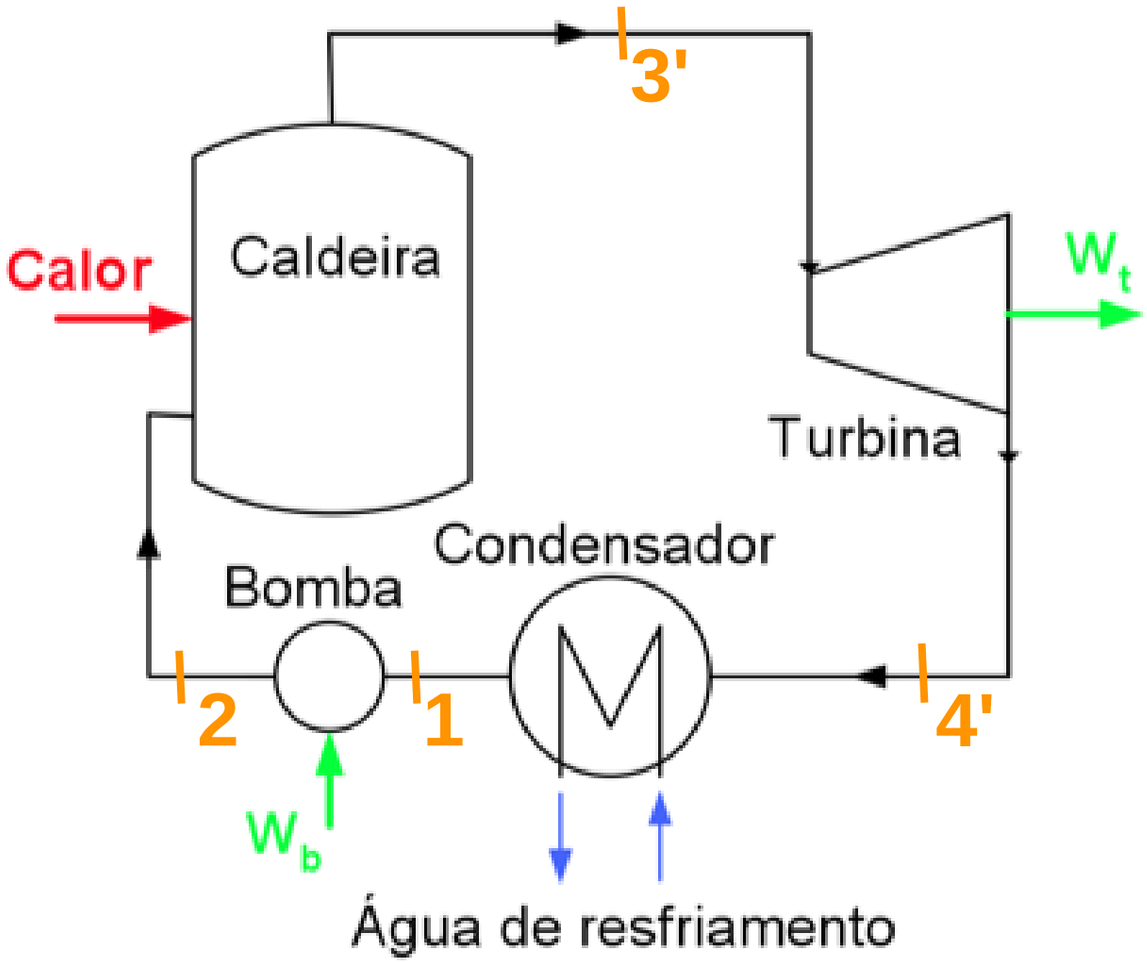
- Compressão isentrópica (bomba);
- Fornecimento de calor a pressão constante (gerador de vapor);
- Expansão isentrópica (turbina);
- Rejeição de calor a pressão constante (condensador).

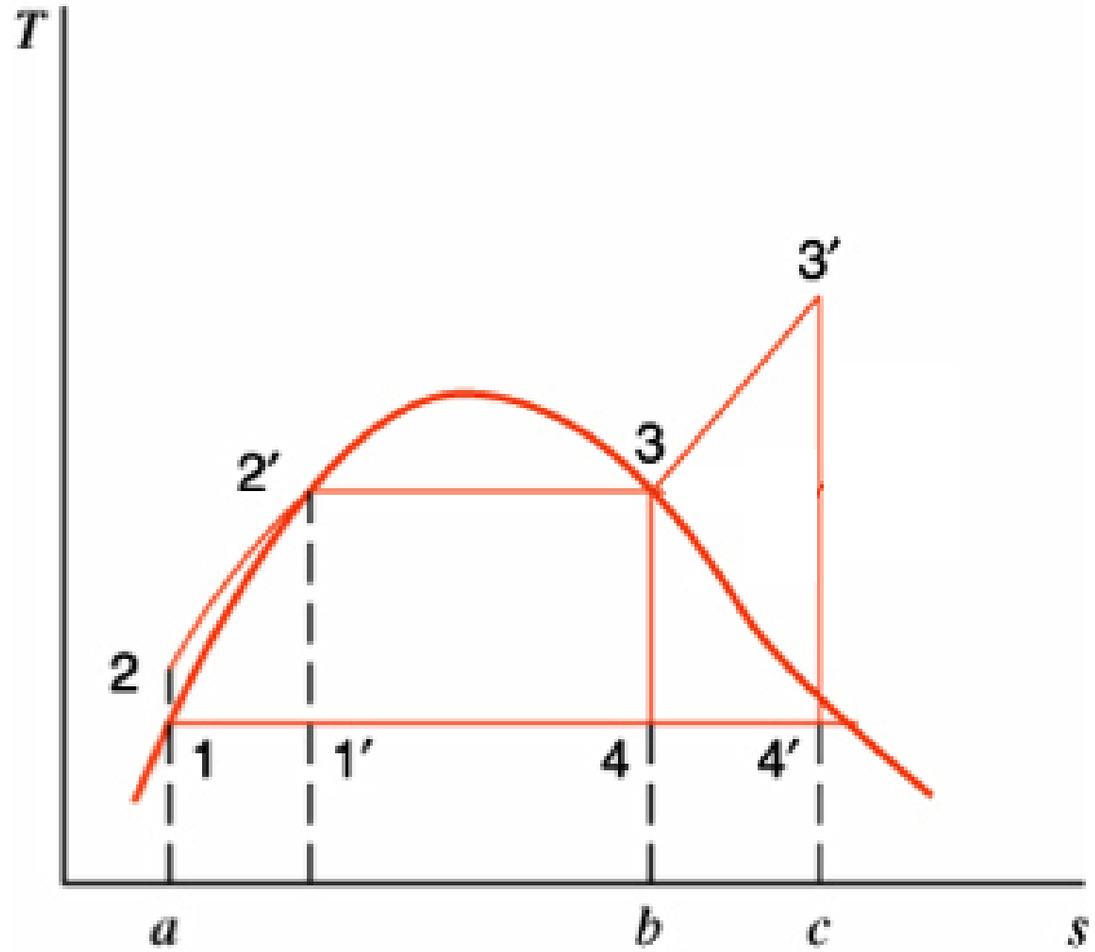
Ciclo Rankine ideal





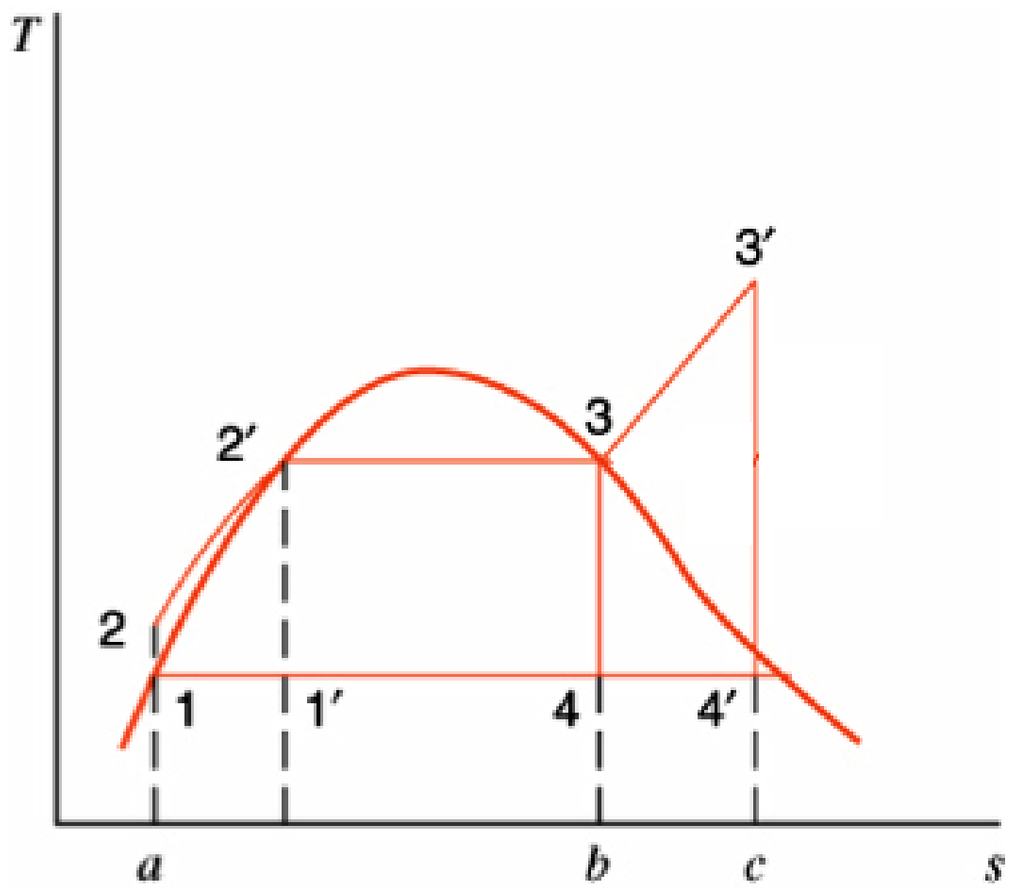
Ciclo Rankine com superaquecimento





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 250ºC de superaquecimento.



s/ superaquecimento:

1-2-2’-3-4-1

c/ superaquecimento:

1-2-2’-3-3’-4’-1

Rankine - exemplos

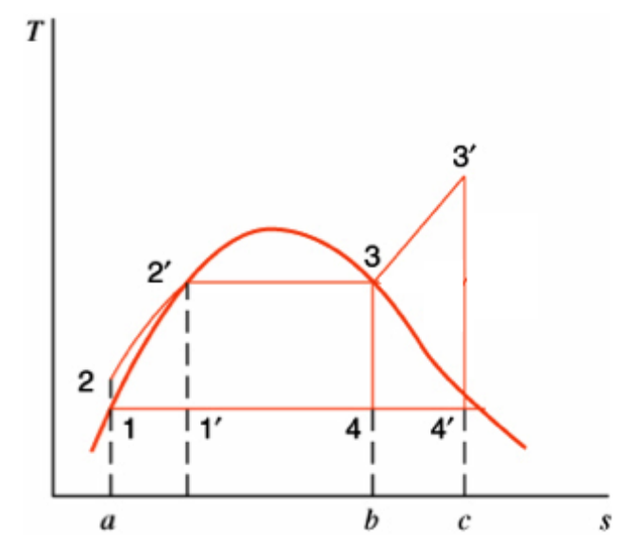
Estado 1: líquido saturado

		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

Estado 2: processo isentrópico

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

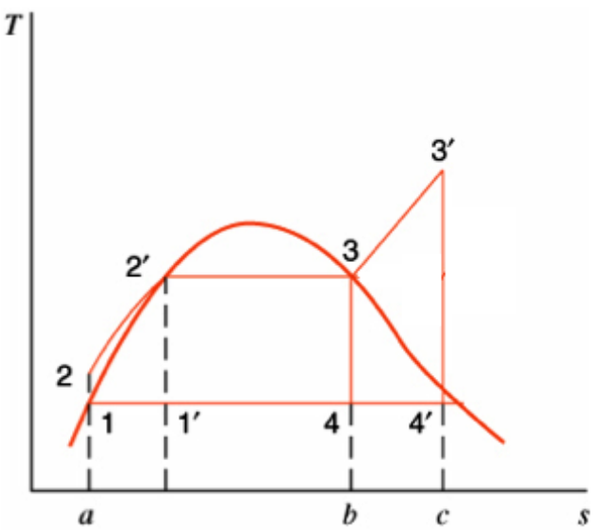
$$_1w_2 = h_1 - h_2 = -4{,}02\ kJ/kg \quad \Rightarrow h_2 = 172{,}8\ kJ/kg$$



Rankine - exemplos

Estado 3: vapor saturado

		Volume especifico		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

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

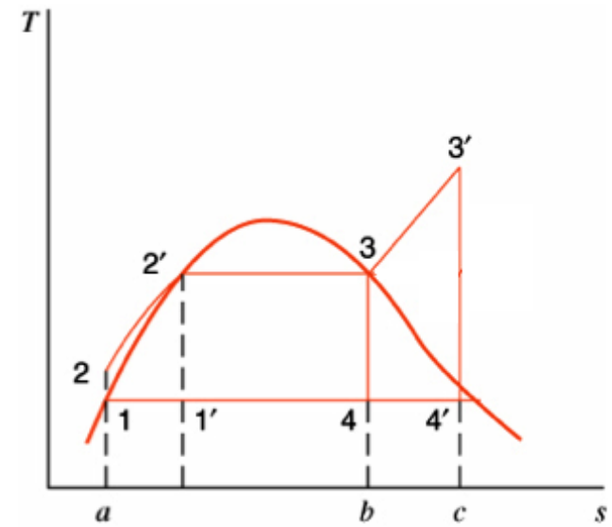
		Volume especifico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
Pressão	Temp.	m^3 / kg		kJ /kg		kJ / kg		kJ / (kg.K)	
kPa	°C	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2430,5	168,77	2574,8	0,5763	8,2514

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

Rankine - exemplos

Estado 3': vapor superaquecido

$$T_{3'} = T_3 + 250\,^oC = 500{,}4\,^oC$$



Estado 4': mistura - processo isentrópico

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

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

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

Rankine - exemplos

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

Estado	P / kPa	T / °C	v / (m^3/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

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

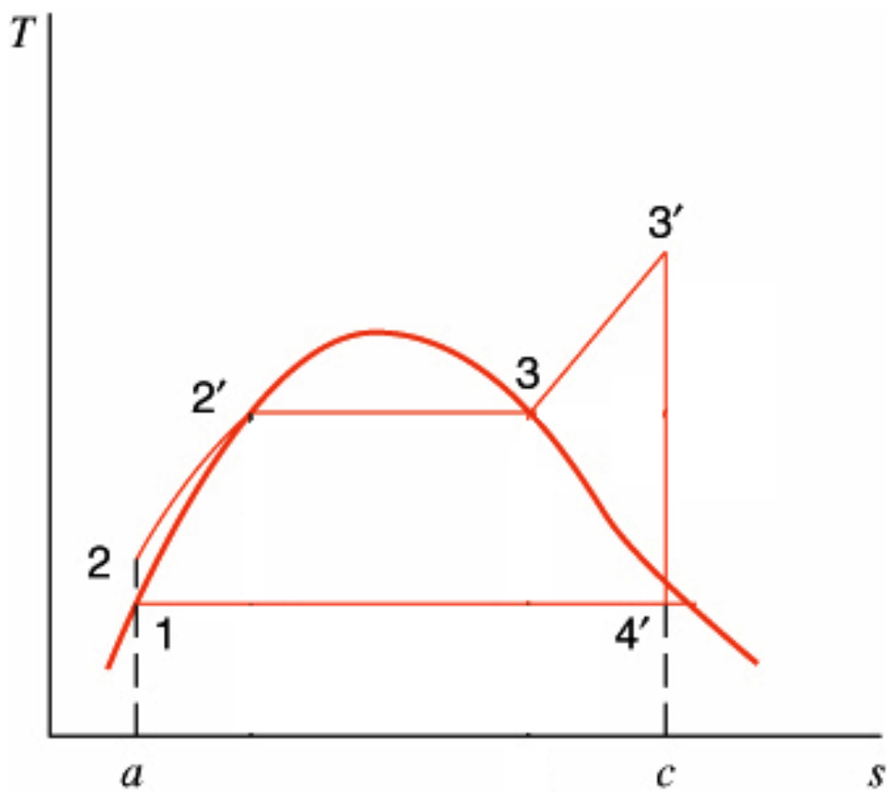
$$\eta' = \frac{h_{3'} - h_{4'} + h_1 - h_2}{h_{3'} - h_2} = 0{,}376$$

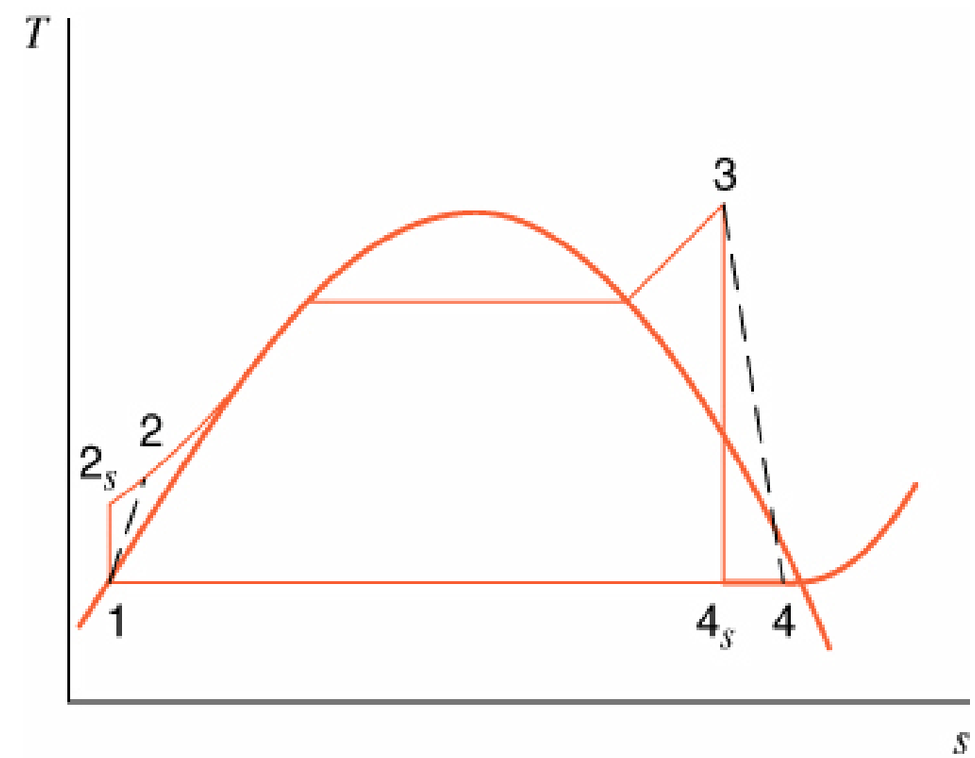
$$w_t = h_3 - h_4 = 910\ kJ/kg$$

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

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?





Rankine - exemplos

Estado 2: líquido comprimido

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

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

Estado 4': mistura (?)

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

$$h_4 = 2334\ kJ/kg$$

		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

Rankine - exemplos

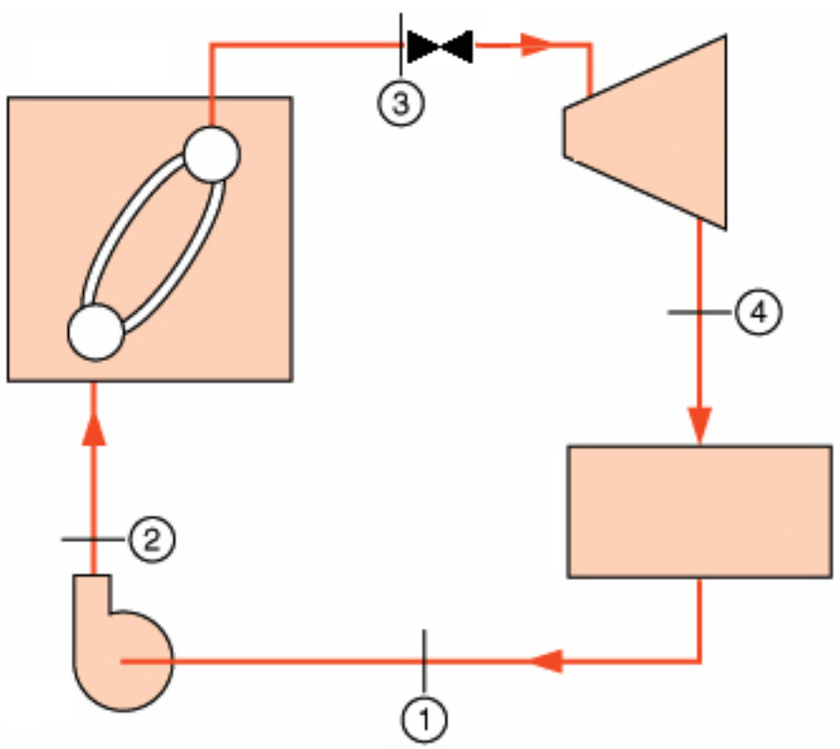
Novo rendimento

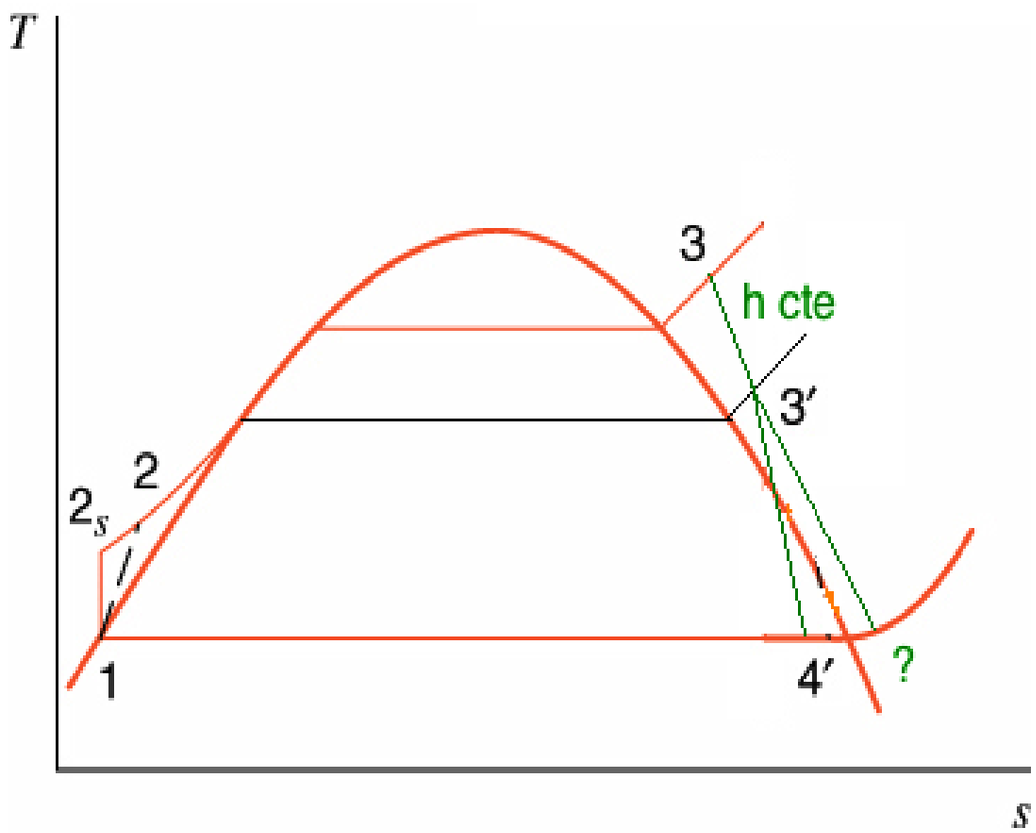
$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{1111 - 4{,}73}{3445{,}21 - 173{,}5} = 0{,}338$$

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 kJ/kg

Rankine - exemplos

- Potência anterior e trabalho específico

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

- Nova potência e trabalho específico (mesma vazão)

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

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

- Para o mesmo rendimento isentrópico da turbina

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

Rankine - exemplos

Estado 4's: mistura

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

		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

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

Estado 3': vapor superaquecido

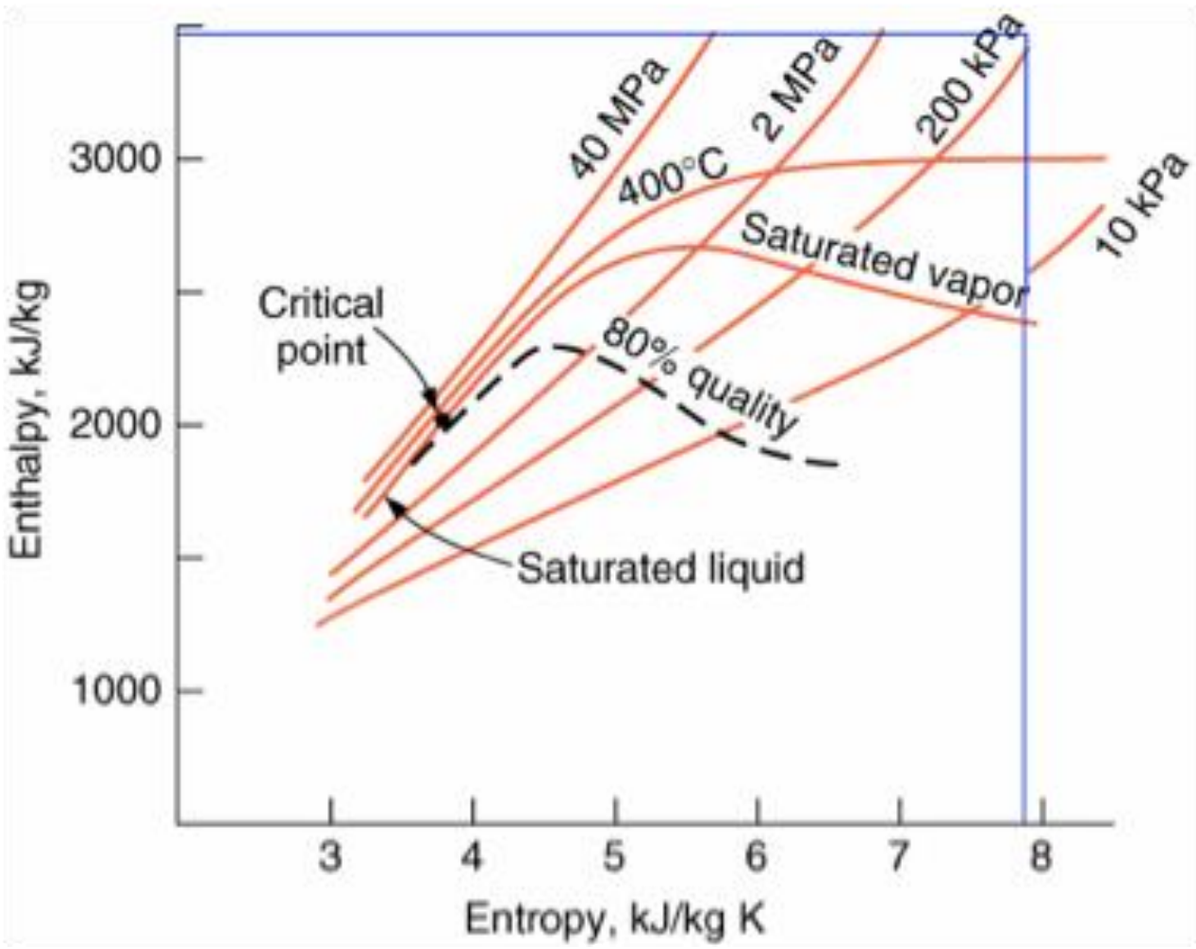
$$s_{3'} = s_{4s} = 7{,}88\ kJ/kgK$$

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

Rankine - exemplos

Estado 3': vapor superaquecido

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



400 ºC < T < 500 ºC

200 kPa < P < 2MPa

Rankine - exemplos

Estado 3': vapor superaquecido

	P = 600 kPa (158,85 °C)				P = 800 kPa (170,43 °C)			
T (°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 ºC
P = 700 kPa

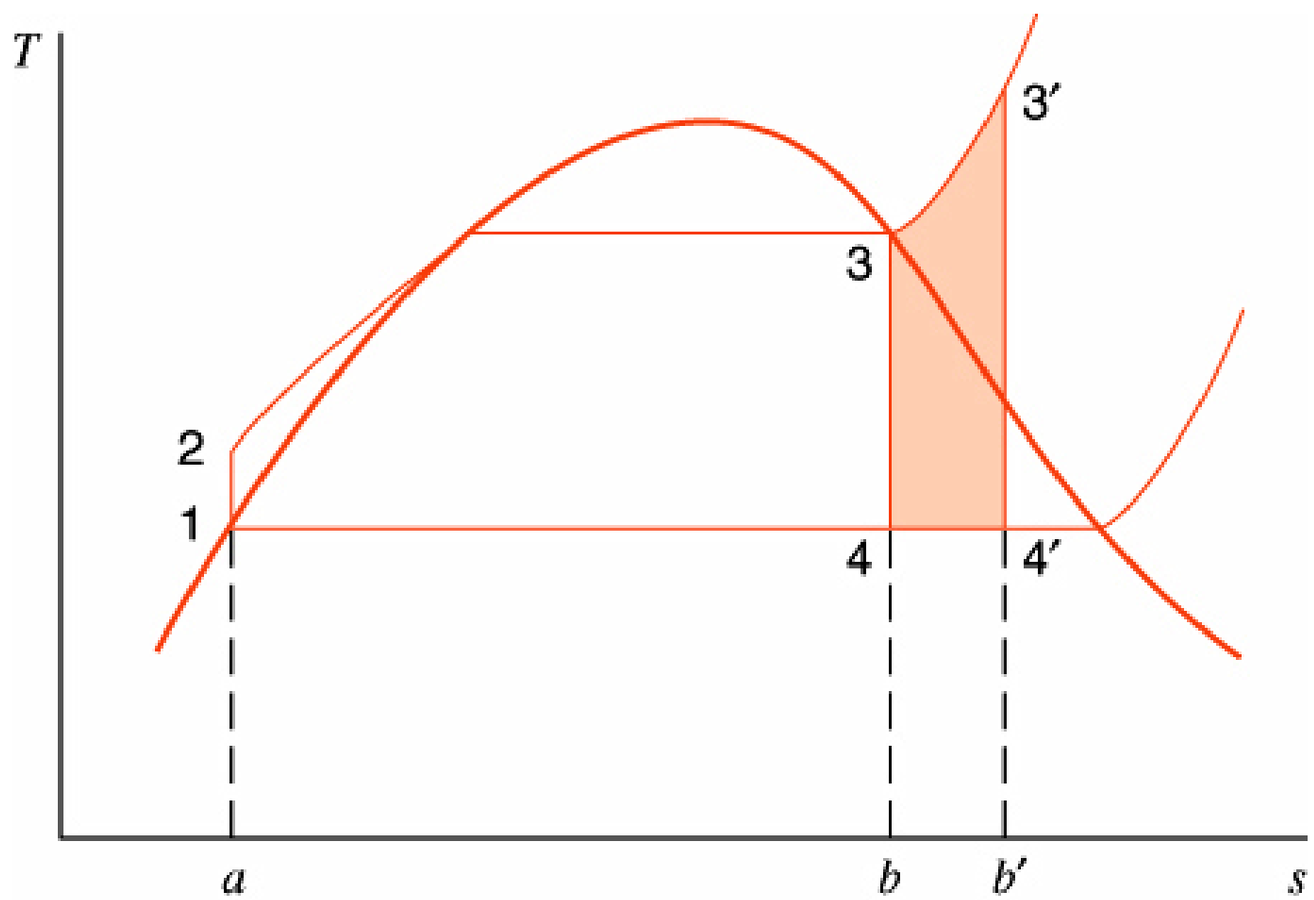
Software T = 482,8 ºC
P = 705 kPa

Resposta P = 700 kPa

Maior rendimento

★Superaquecimento do vapor:

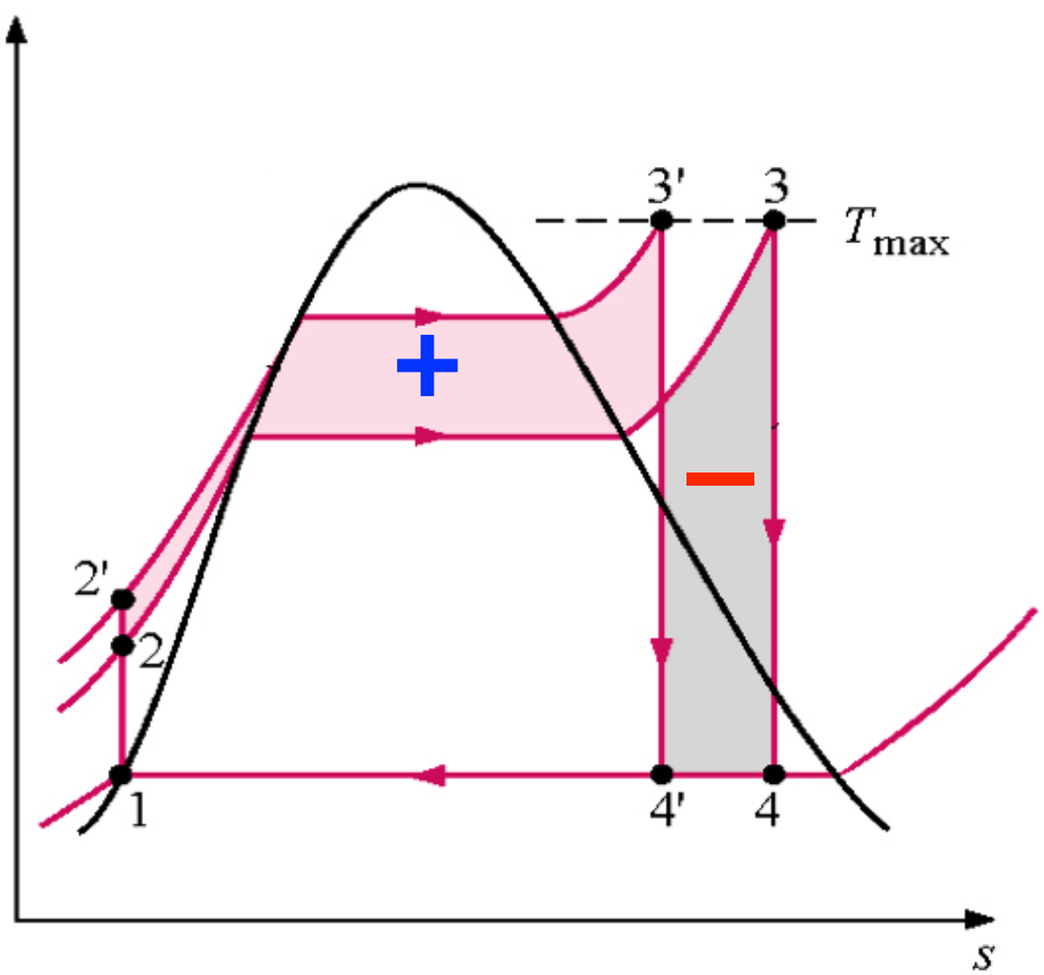
- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Menor umidade na saída da turbina.



Maior rendimento

★Aumento da pressão do gerador de vapor

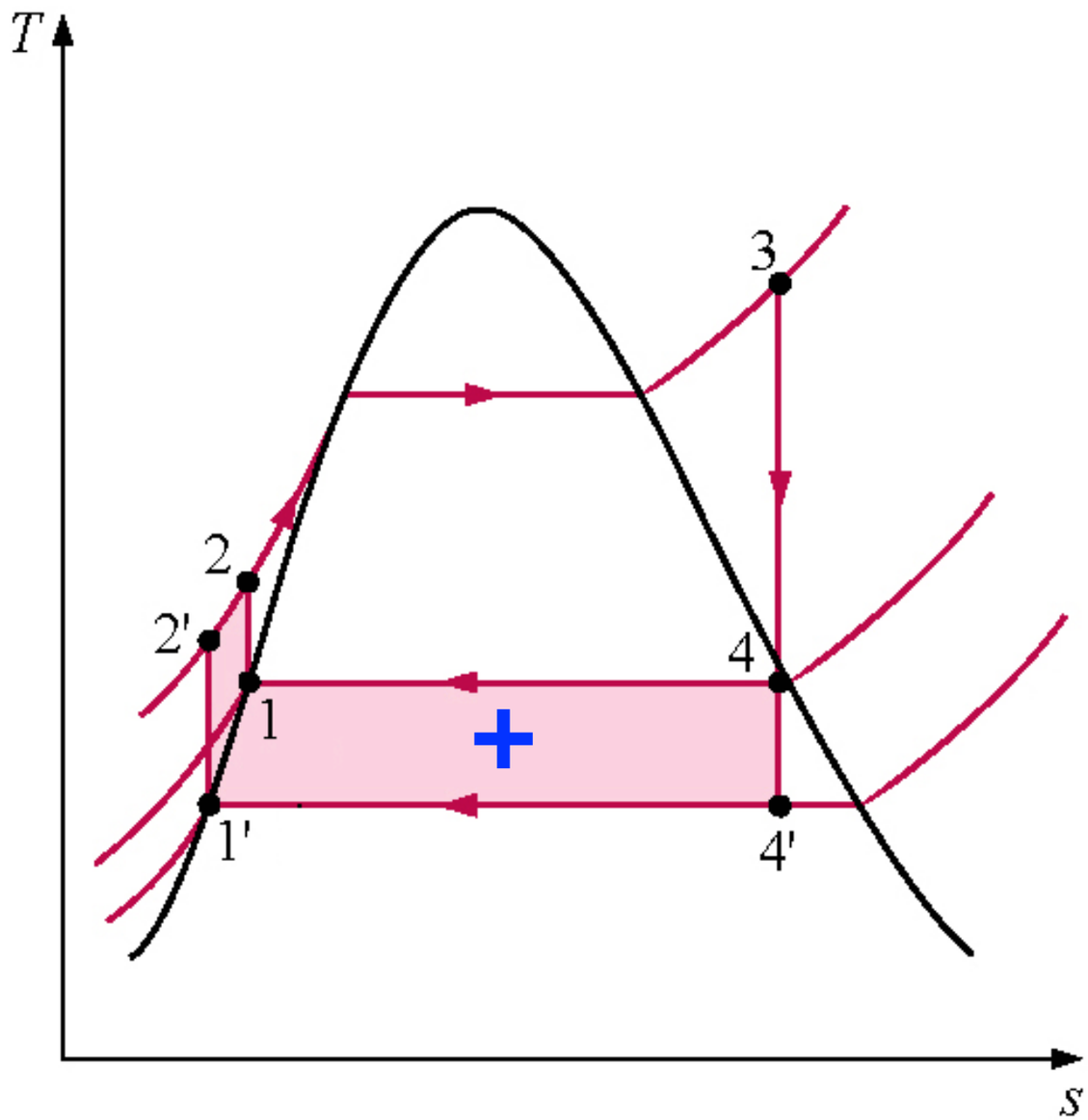
- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Maior umidade na saída da turbina.



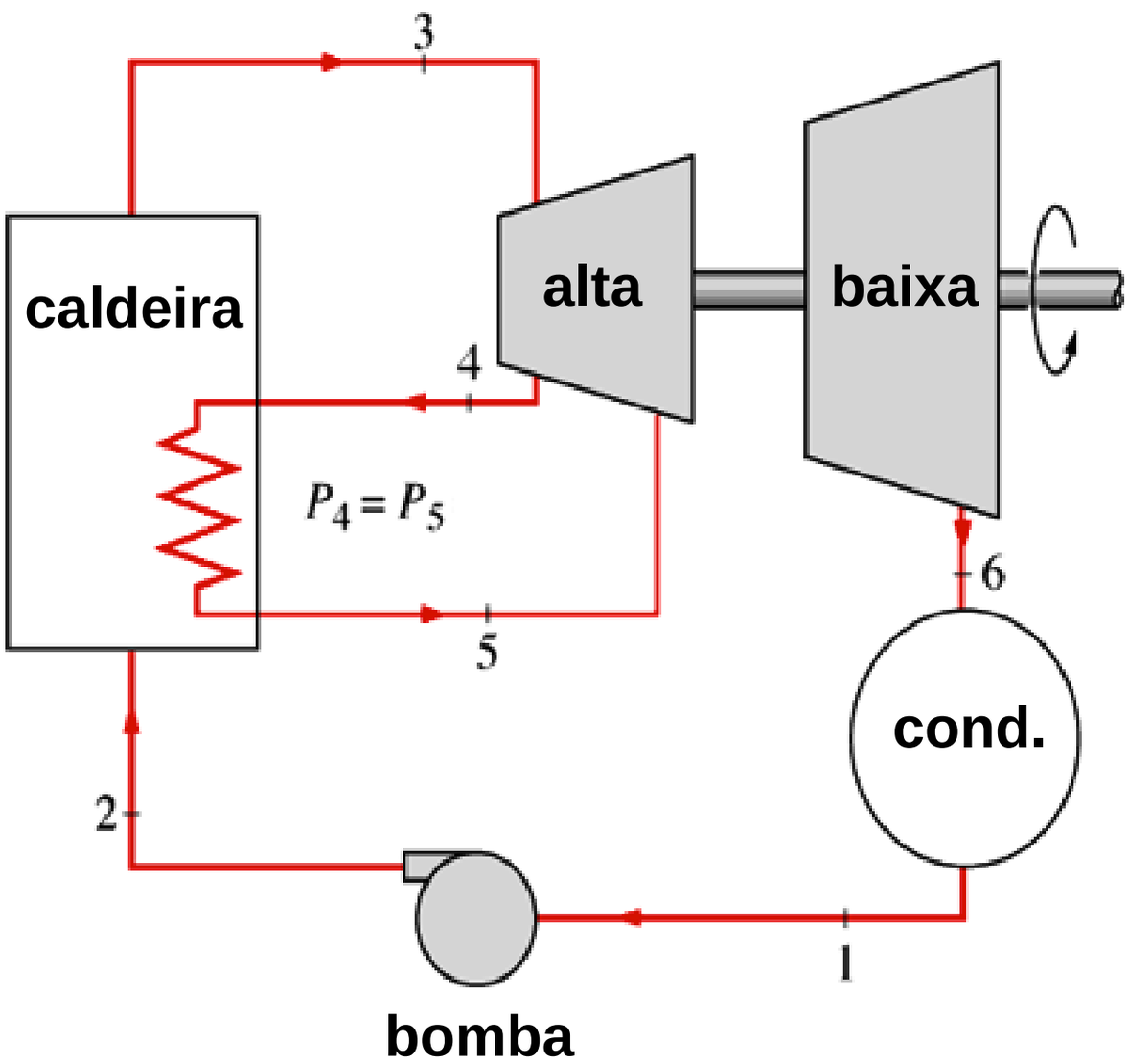
Maior rendimento

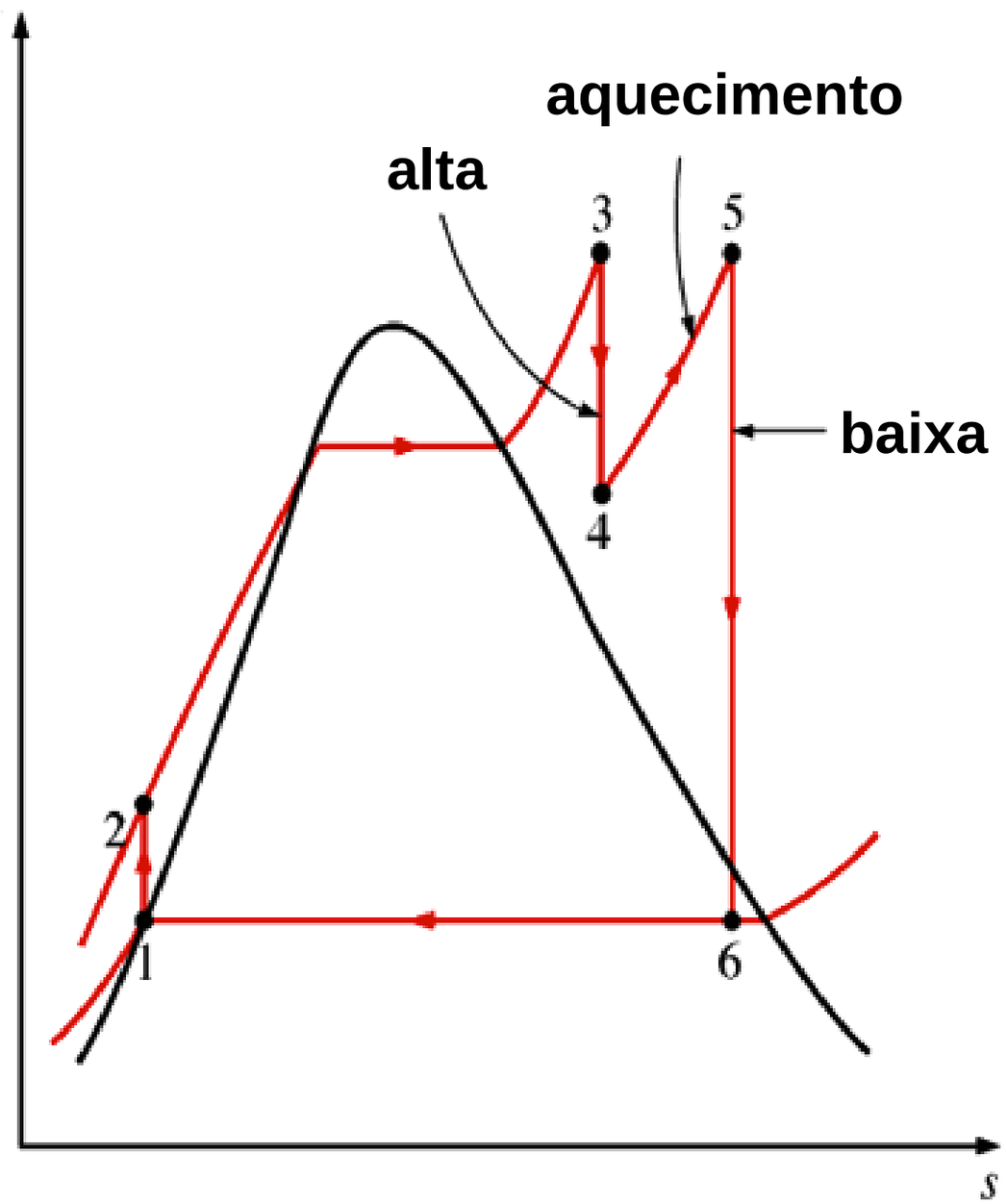
★Diminuição da pressão no condensador

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



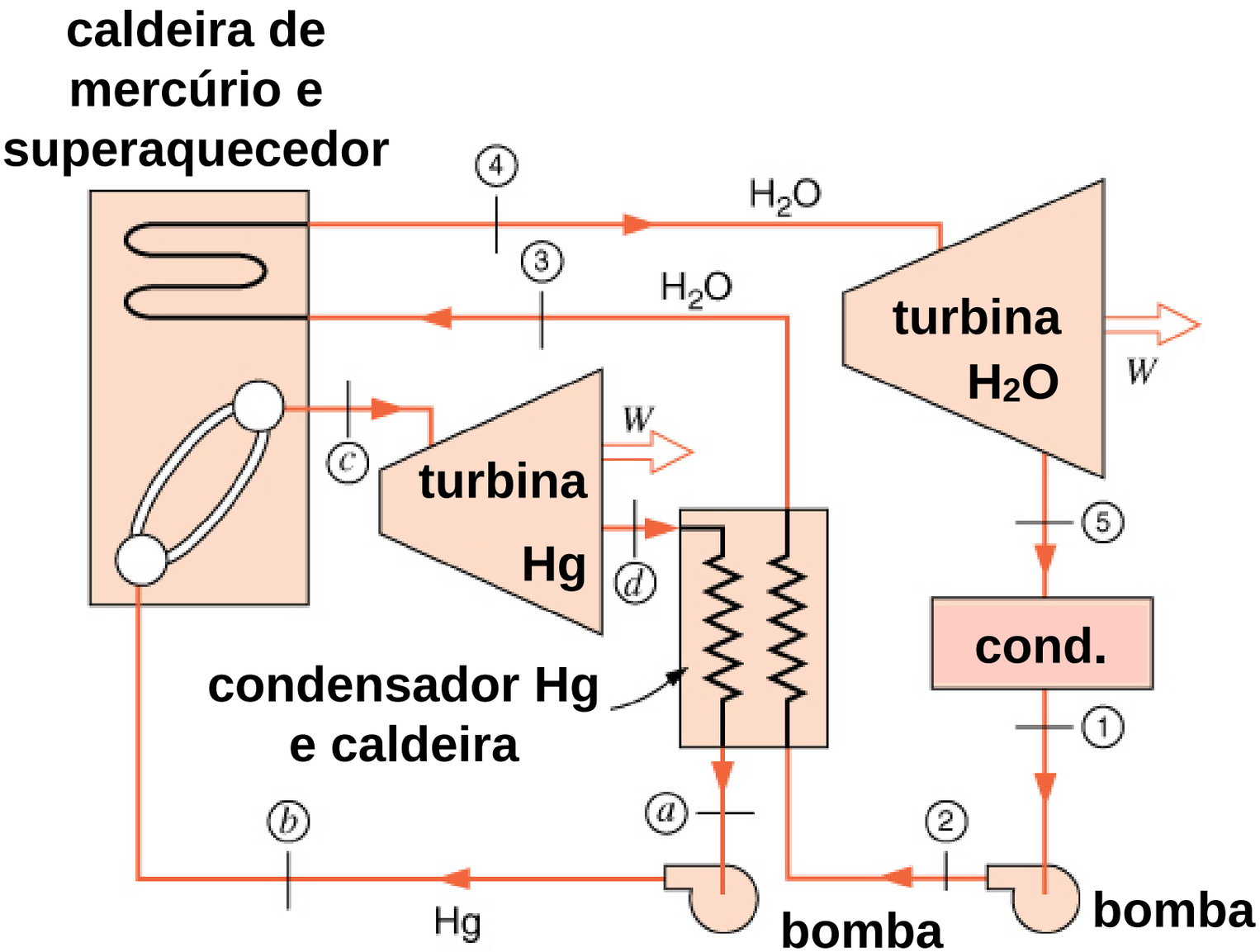
Rankine com reaquecimento

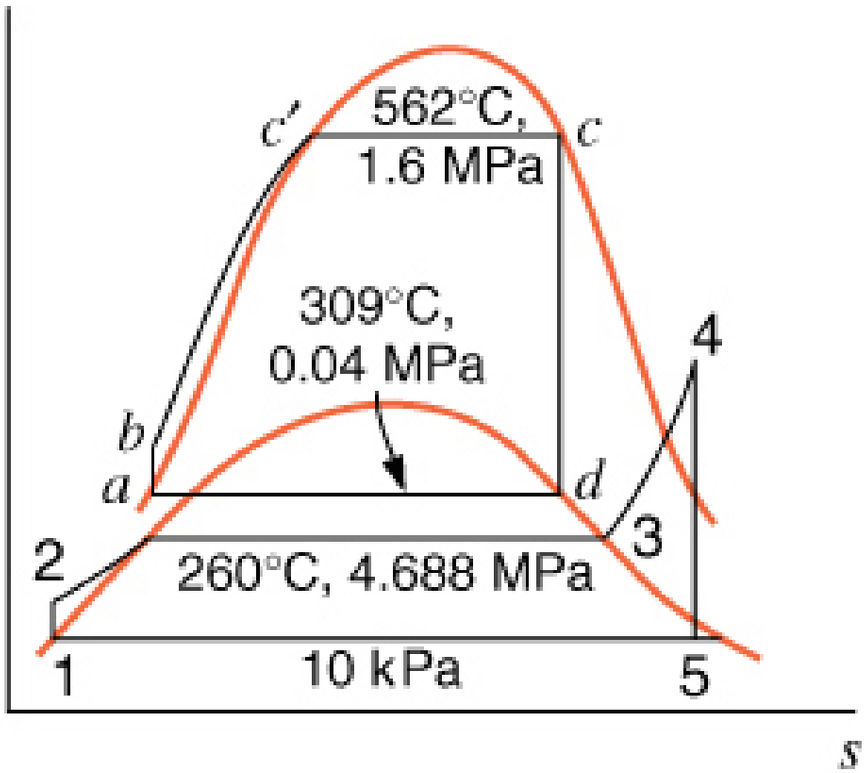




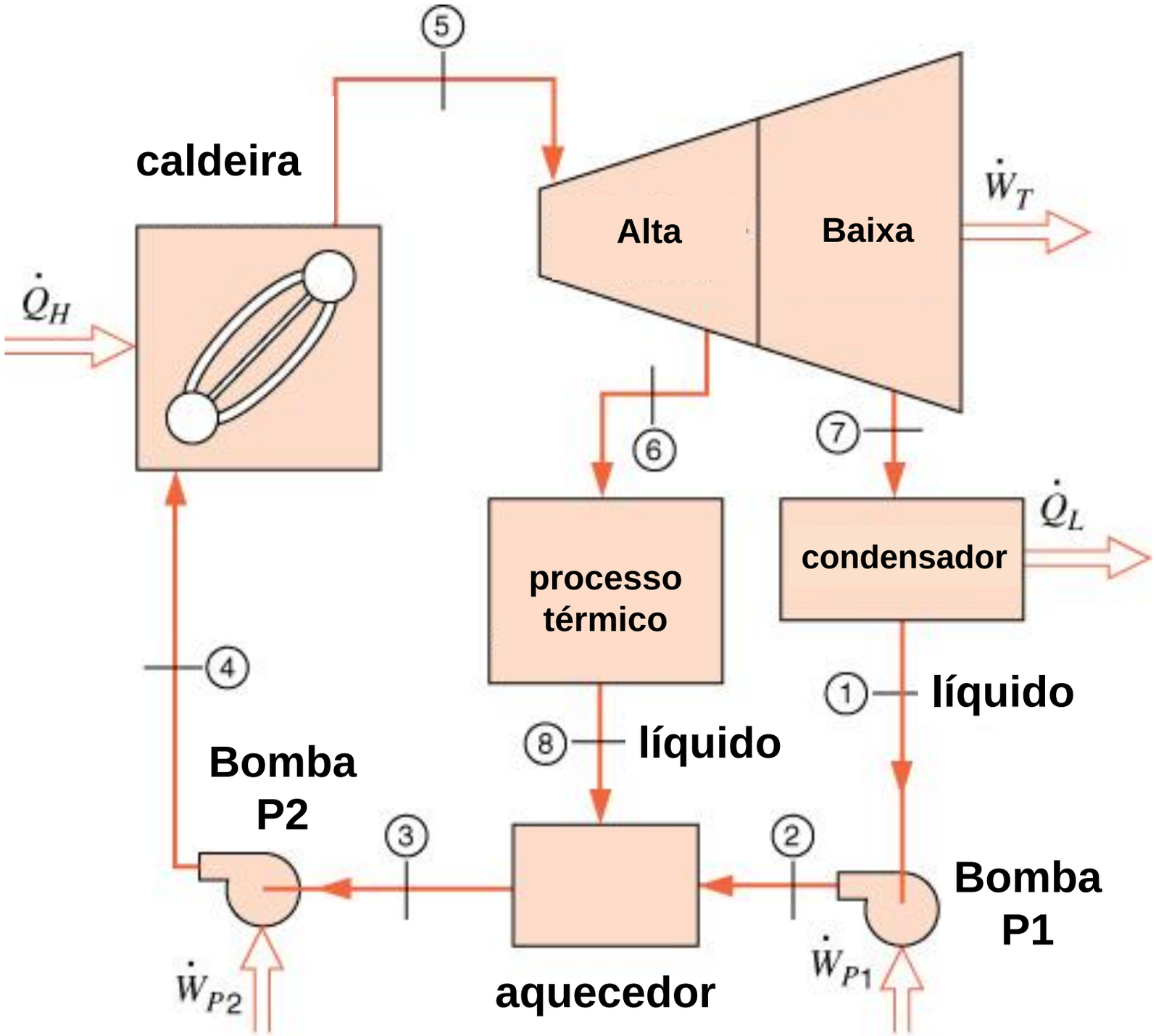
Ciclo Rankine binário

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

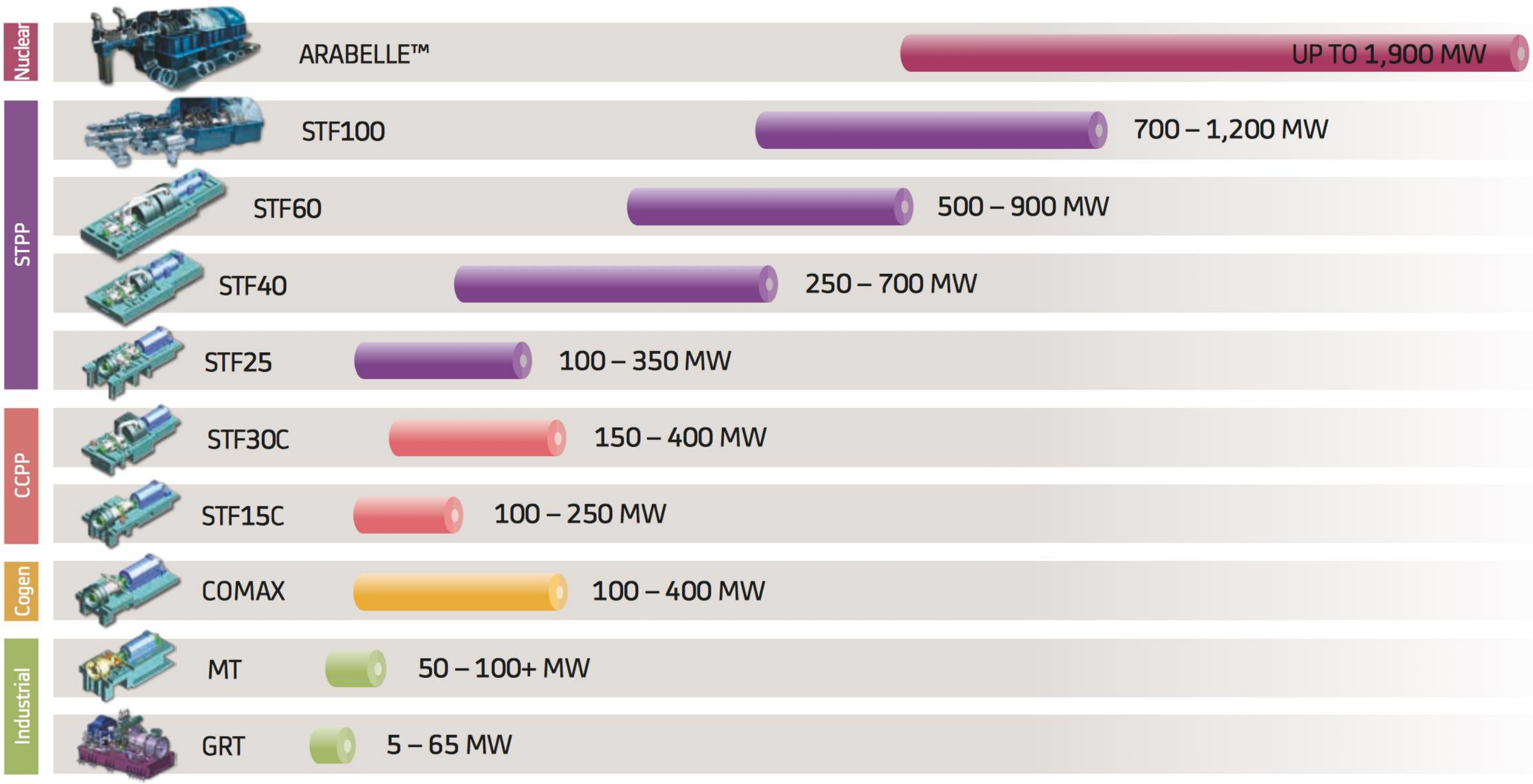




Cogeração


5
caldeira
Alta
Baixa
$\dot{W}_T$
$\dot{Q}_H$
6
7
$\dot{Q}_L$
processo
térmico
condensador
4
1
líquido
8
líquido
Bomba
P2
3
2
Bomba
P1
$\dot{W}_{P2}$
aquecedor
$\dot{W}_{P1}$

Aplicações



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

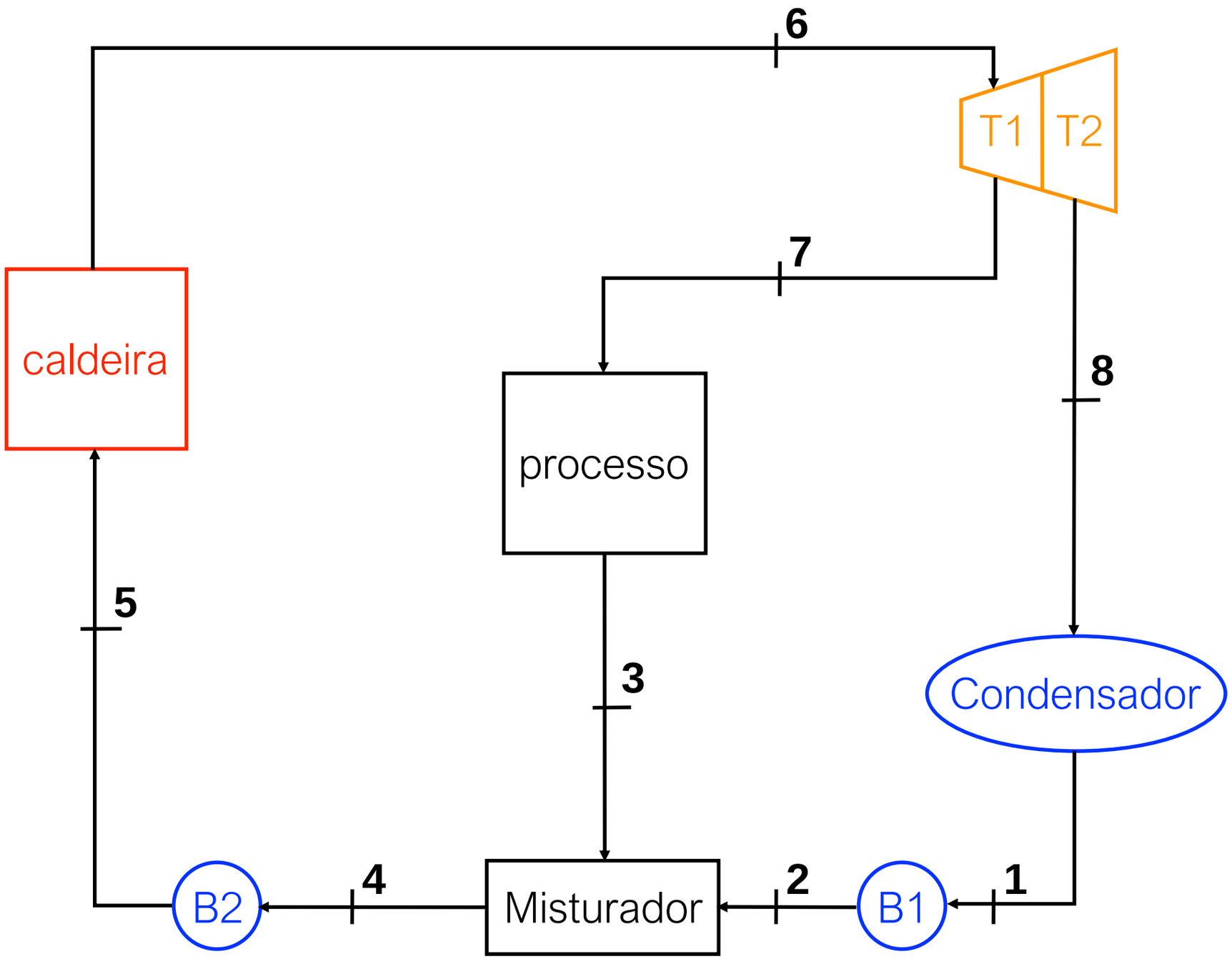
Rankine - exemplos

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 500ºC 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.

Rankine - exemplos

Esquema da instalação:



Rankine - exemplos

✦**Estado 6**: vapor superaquecido

P_6 = 8000kPa

T_6 = 500ºC

h_6 = 3399kJ/kg

s_6 = 6,724kJ/kgK

✦**Estado 7s**: vapor superaquecido

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

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

T_{7s} = 290,1ºC

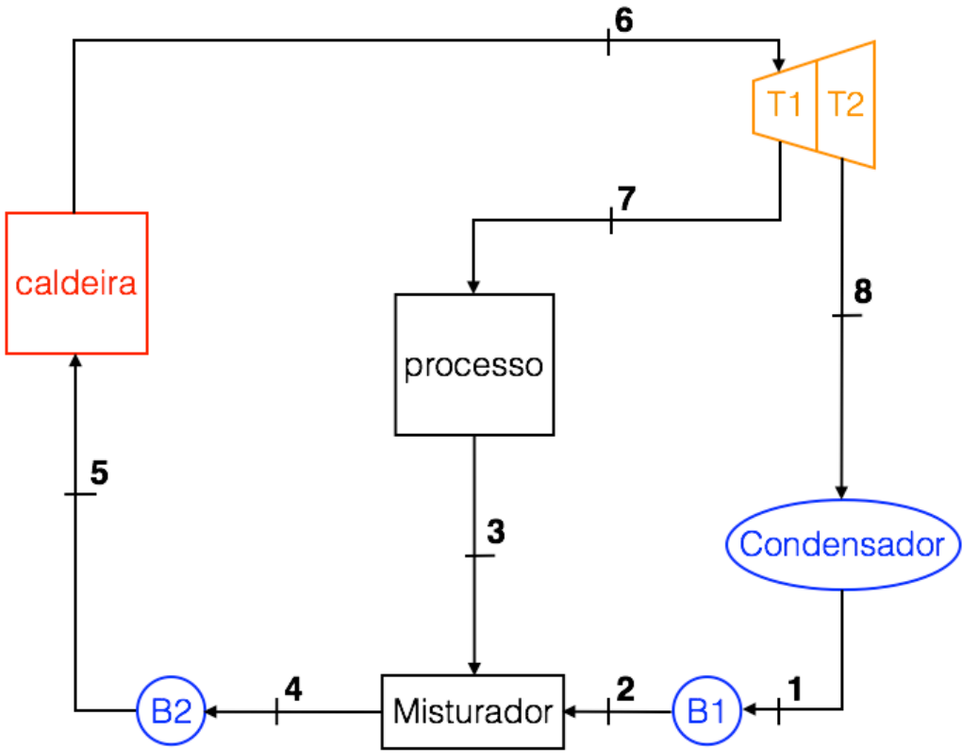
✦**Estado 7**: vapor superaquecido

s_7 = 6,808kJ/kgK

P_7 = 2000kPa

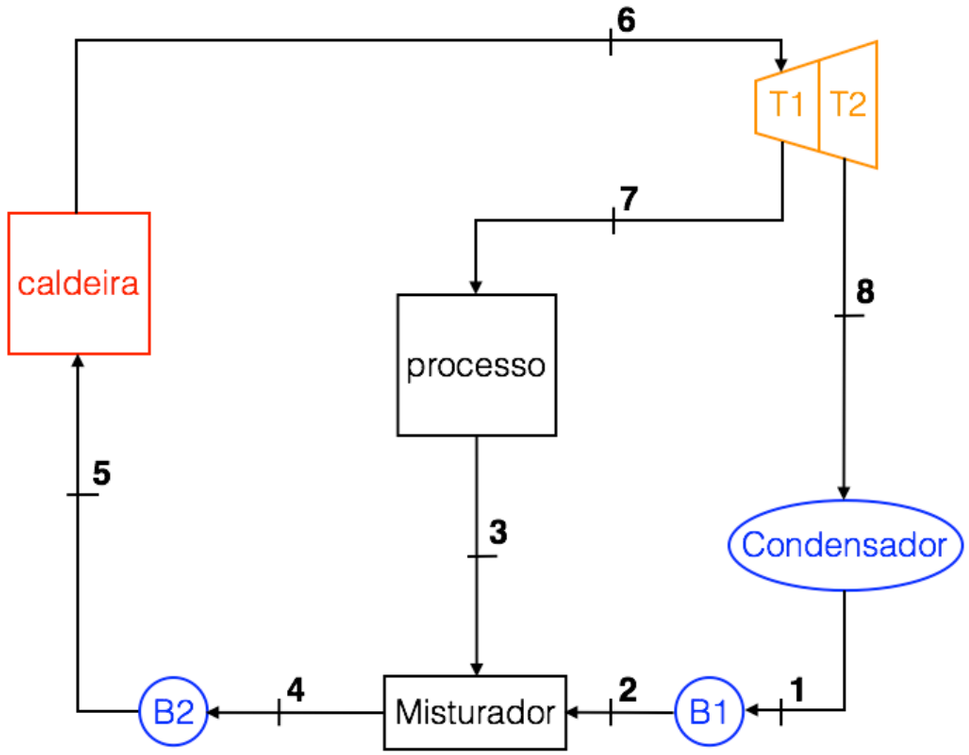
h_7 = 3047kJ/kg

T_7 = 310,7ºC



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

Rankine - exemplos



✦**Estado 8s**: vapor superaquecido

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

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

$T_{8s} = 60{,}07^oC$

✦**Estado 8**: mistura

$h_8 = 2339kJ/kg$

$x_8 = 0{,}8856$

$P_8 = 20kPa$

$T_8 = 60{,}07^oC$

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

Rankine - exemplos

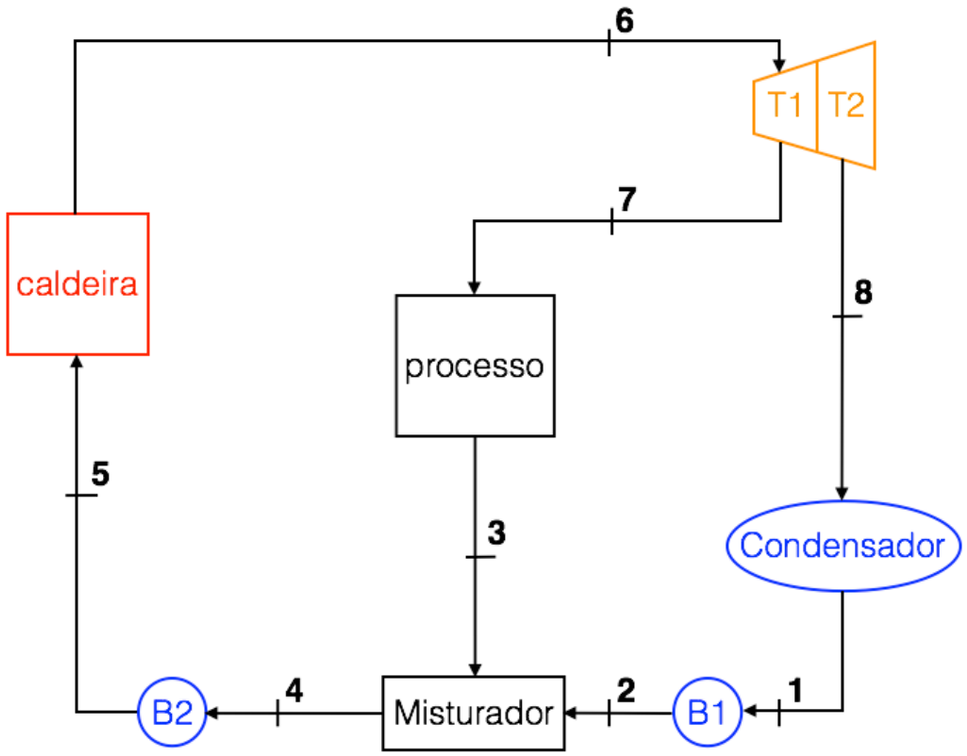
✦**Potência em T1**:

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

✦**Potência em T2**:

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

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



Rankine - exemplos

✦**Trabalho específico em B1**:

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

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

✦**Estado 2**: líquido comprimido

$w_{B1} = h_1 - h_2 = -2{,}289 kJ/kg$

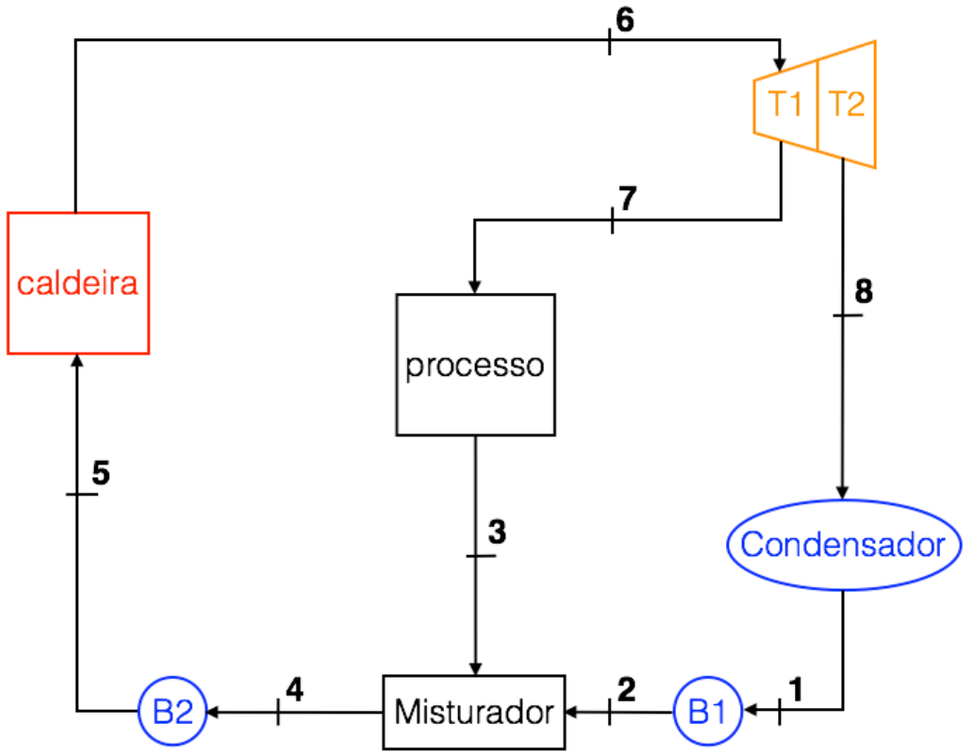
$h_2 = 253{,}7 kJ/kg$

✦**Estado 3**: líquido saturado

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

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

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



Rankine - exemplos

✦**Trabalho específico em B2**:

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

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

✦**Estado 5**: líquido comprimido

$w_{B2} = h_4 - h_5 = -7{,}203 kJ/kg$

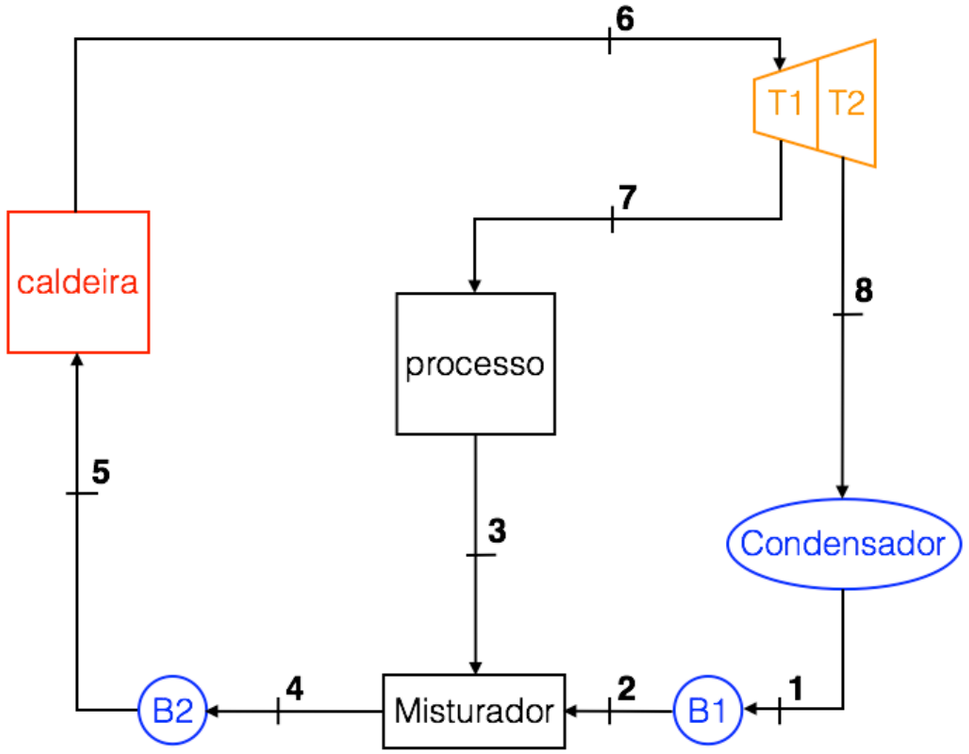
$h_5 = 499{,}1 kJ/kg$

✦**Taxa de calor para o processo**:

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

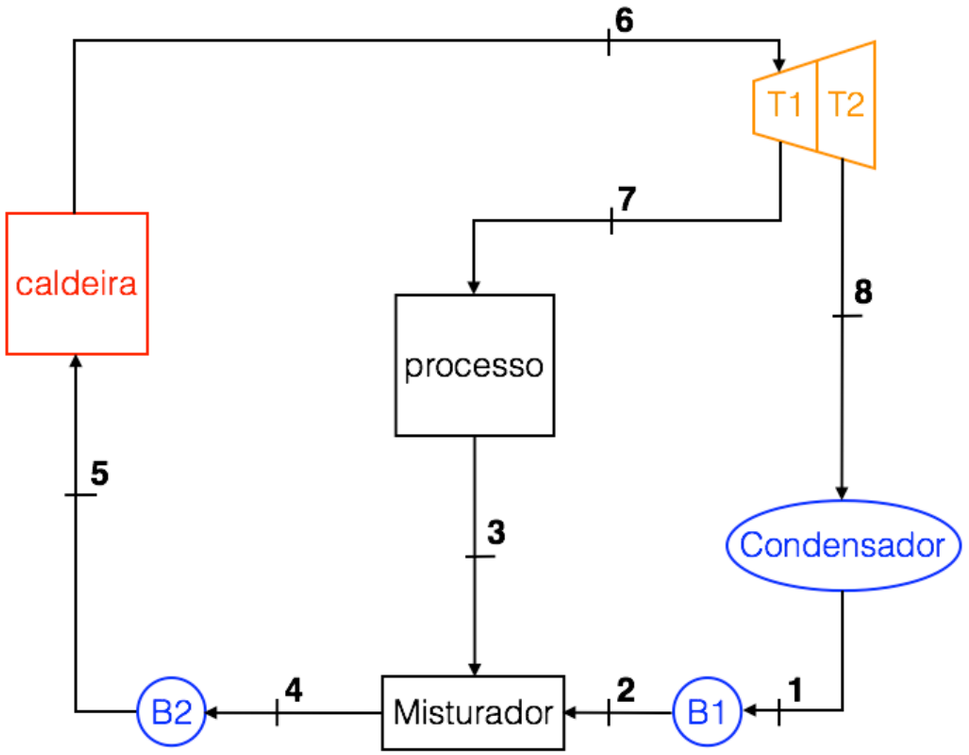
✦**Taxa de calor na caldeira**:

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



Rankine - exemplos

✦Rendimento

$\eta_t = 0{,}5445$

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