



Termodinâmica

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



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.



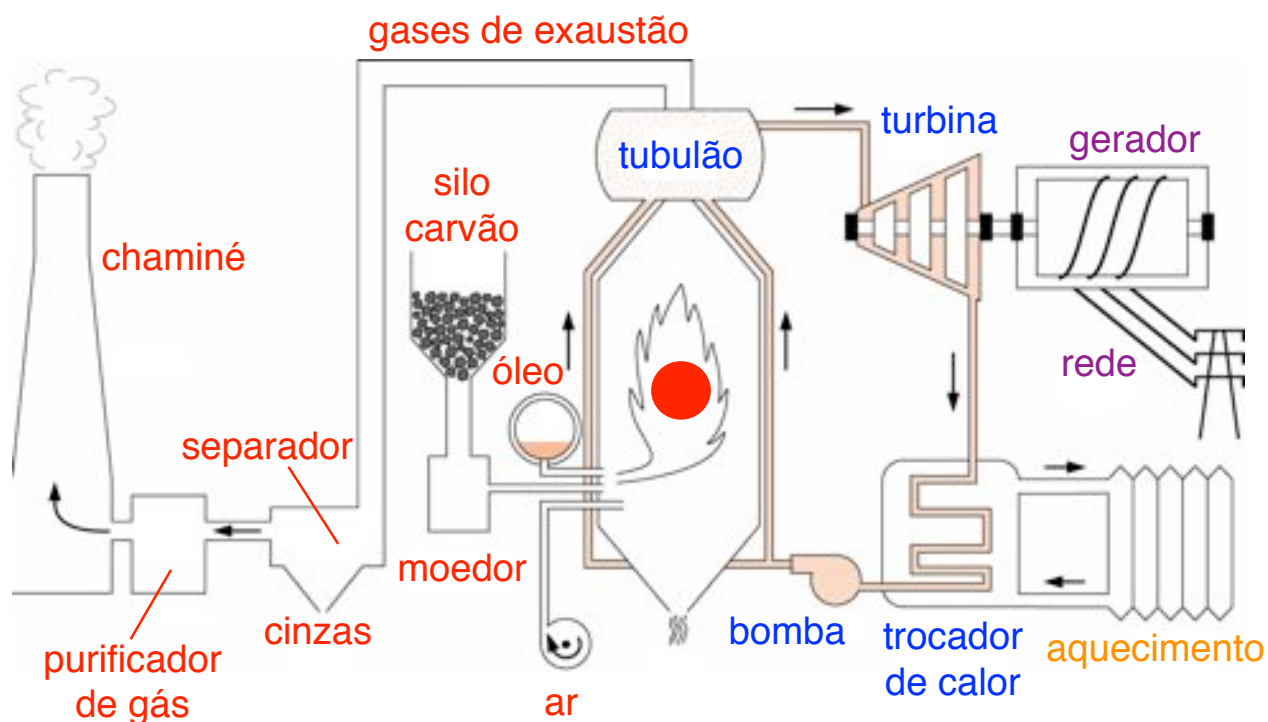
Central termoelétrica a carvão



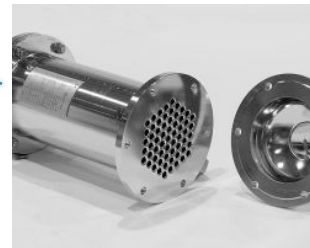
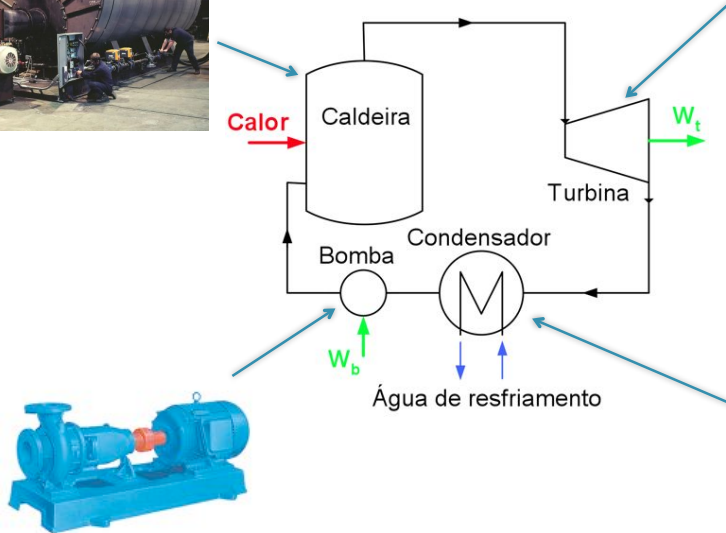
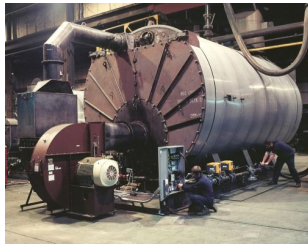
Tubulão de vapor



Torres de resfriamento

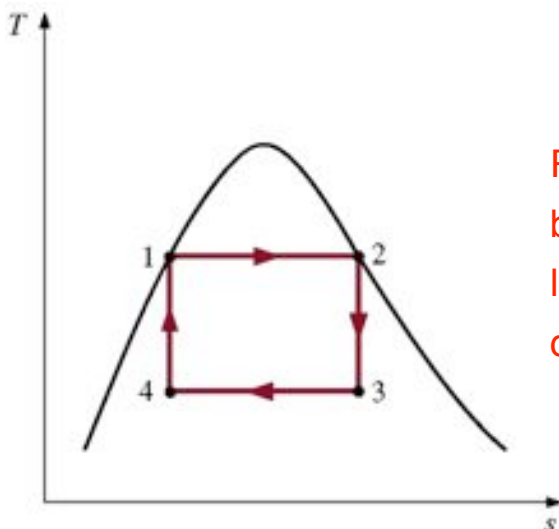


Fluido de trabalho: água



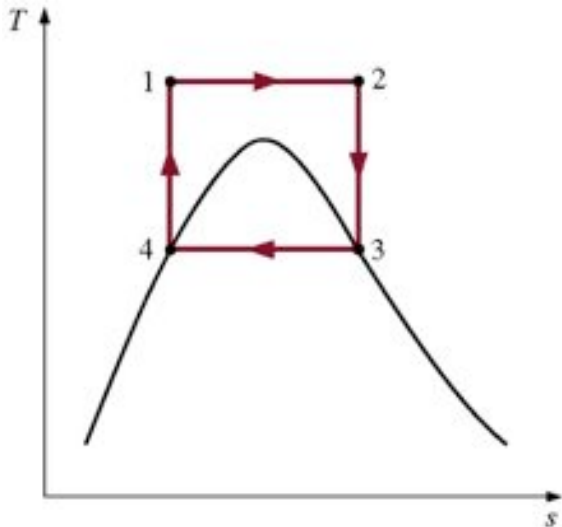
Por que não usar Carnot?

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.

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!

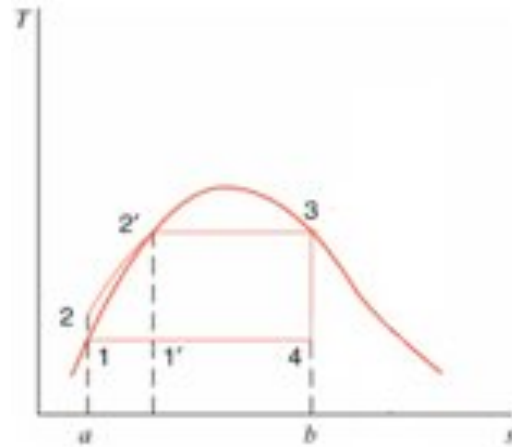
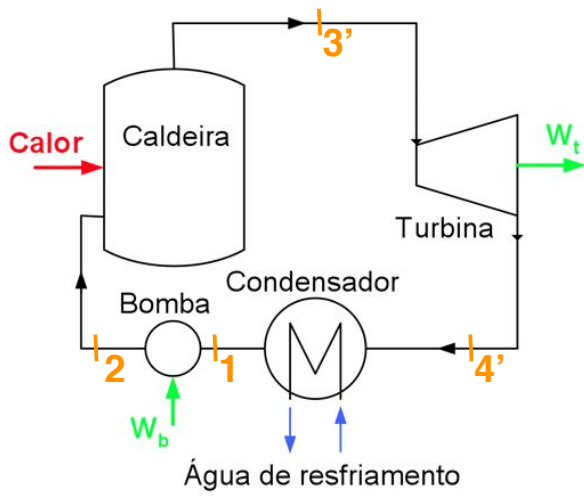
11

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

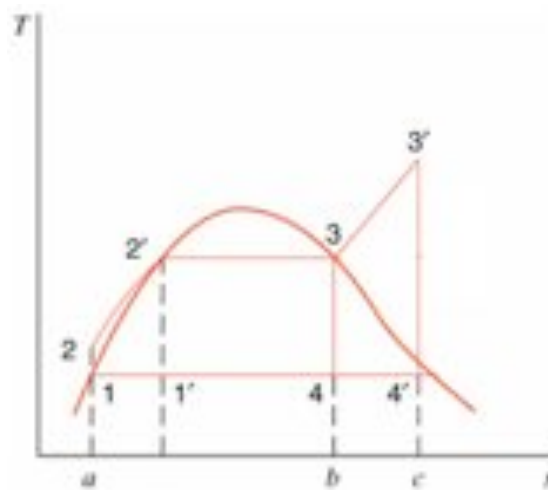
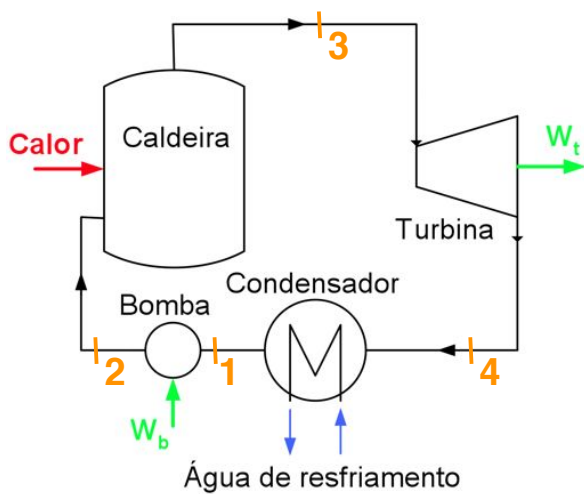
- Compressão isoentrópica (bomba);
- Fornecimento de calor a pressão constante (gerador de vapor);
- Expansão isoentrópica (turbina);
- Rejeição de calor a pressão constante (condensador).

12

Ciclo Rankine ideal



Ciclo Rankine com superaquecimento

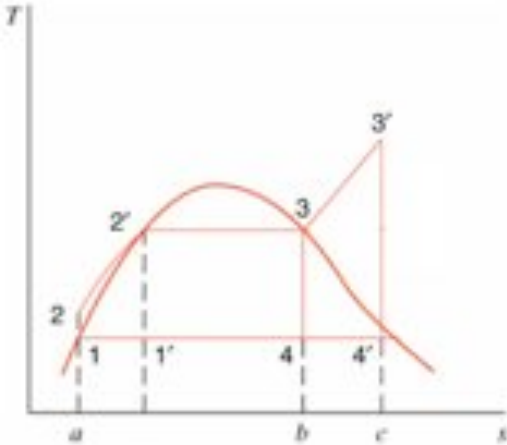


Rankine - exemplos



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

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

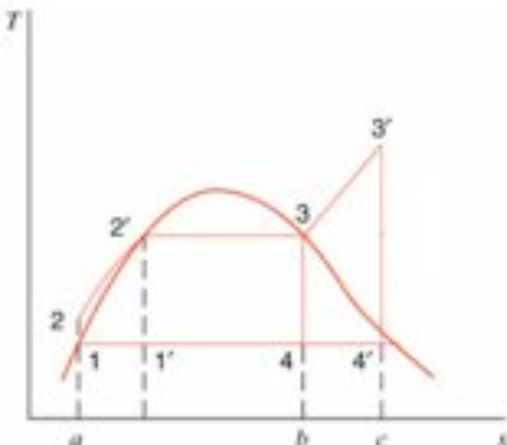
15

Rankine - exemplos



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

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

16



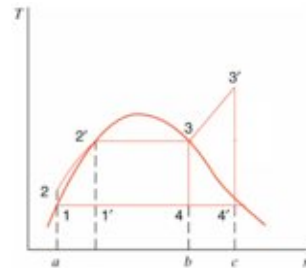
Estado 1: líquido saturado

Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m^3/kg		kJ/kg		kJ/kg		$kJ/(kg.K)$	
kPa	$^{\circ}C$	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

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

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

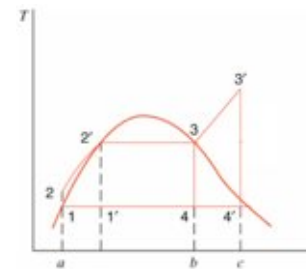


17



Estado 3: vapor saturado

Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m^3/kg		kJ/kg		kJ/kg		$kJ/(kg.K)$	
MPa	$^{\circ}C$	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

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

Pressão	Temp.	Volume específico		Energia interna		Entalpia		Entropia	
		m^3/kg		kJ/kg		kJ/kg		$kJ/(kg.K)$	
kPa	$^{\circ}C$	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

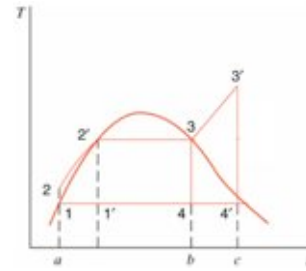
$$s_4 = (1 - x_4)s_l + x_4s_v \Rightarrow x_4 = 0,716 \Rightarrow h_4 = 1891 \text{ kJ/kg}$$

18



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 / (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

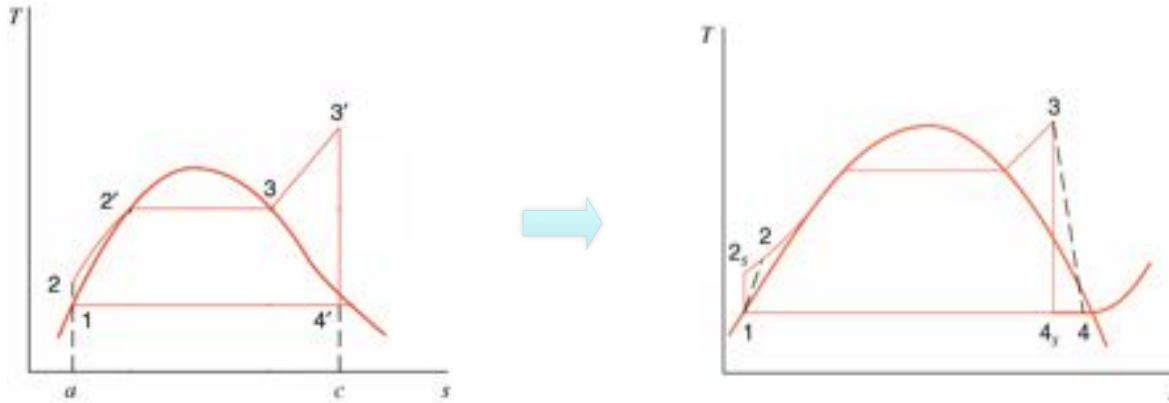
$$\eta = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = 0,344$$

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

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

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

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?



21

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 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

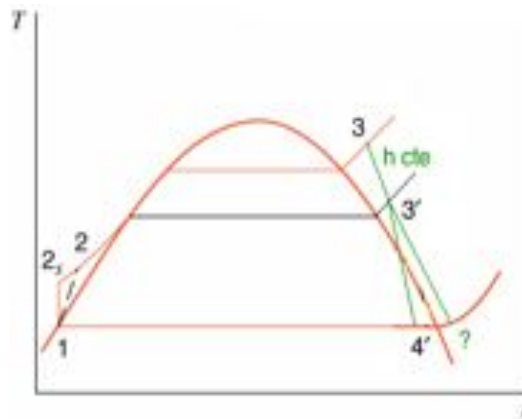
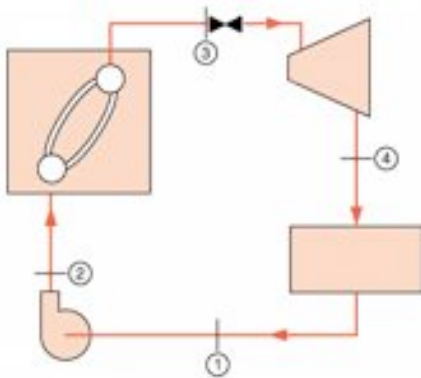
22

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.

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.



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



- 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

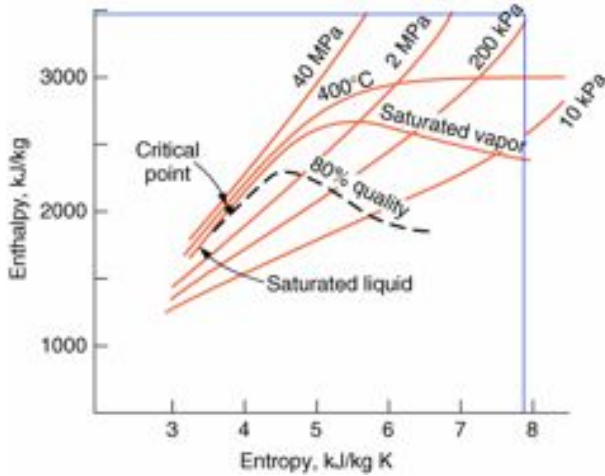
$$s_{3'} = s_{4s} = 7,88 \text{ kJ/kgK}$$

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



Estado 3': vapor superaquecido

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



$$400 \text{ °C} < T < 500 \text{ °C}$$

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

27



Estado 3': vapor superaquecido

	$P = 600 \text{ kPa} (158,85 \text{ °C})$				$P = 800 \text{ kPa} (170,43 \text{ °C})$			
$T \text{ (°C)}$	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 $T = 482 \text{ °C}$
 $P = 700 \text{ kPa}$

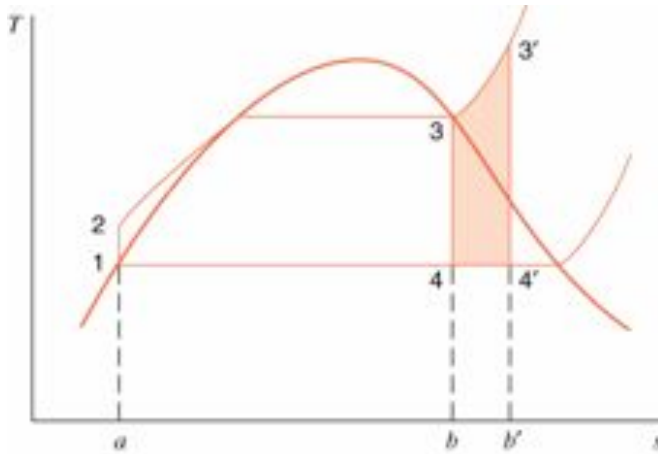
Software $T = 482,8 \text{ °C}$
 $P = 705 \text{ kPa}$

Resposta $P = 700 \text{ kPa}$

28

★Superaquecimento do vapor:

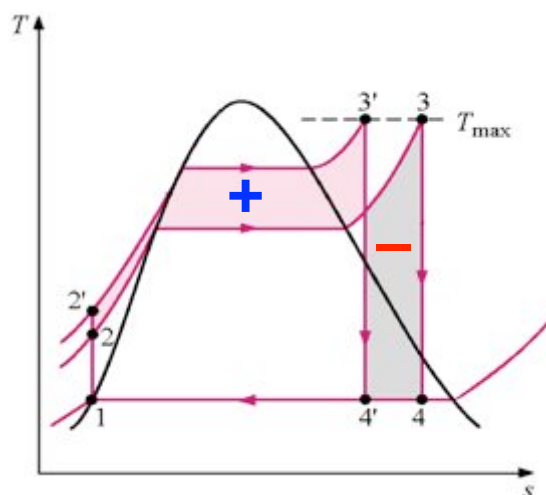
- Maiores temperaturas no processo de fornecimento de calor ao ciclo;
- Menor umidade na saída da turbina.



29

★Aumento da pressão do gerador de vapor

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

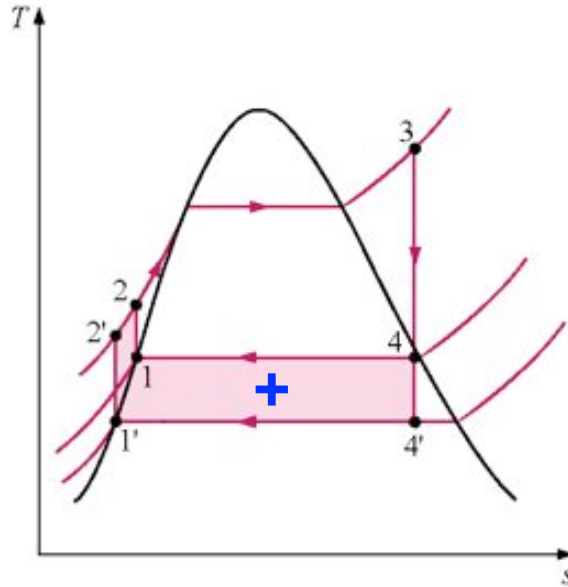


30

Maior rendimento

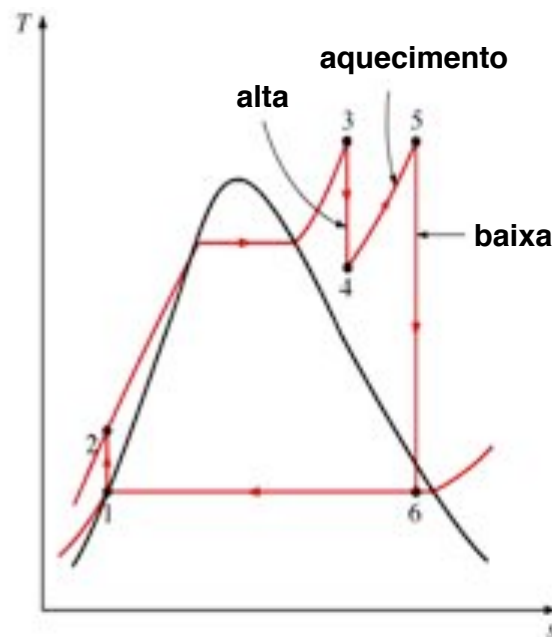
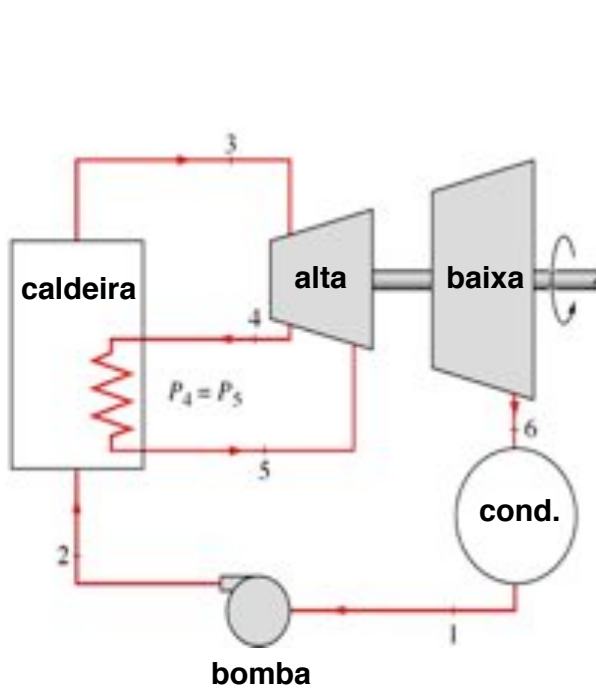


- ★ Diminuição da pressão no condensador
 - Menor perda de calor para o ambiente;
 - Maior umidade na saída da turbina.



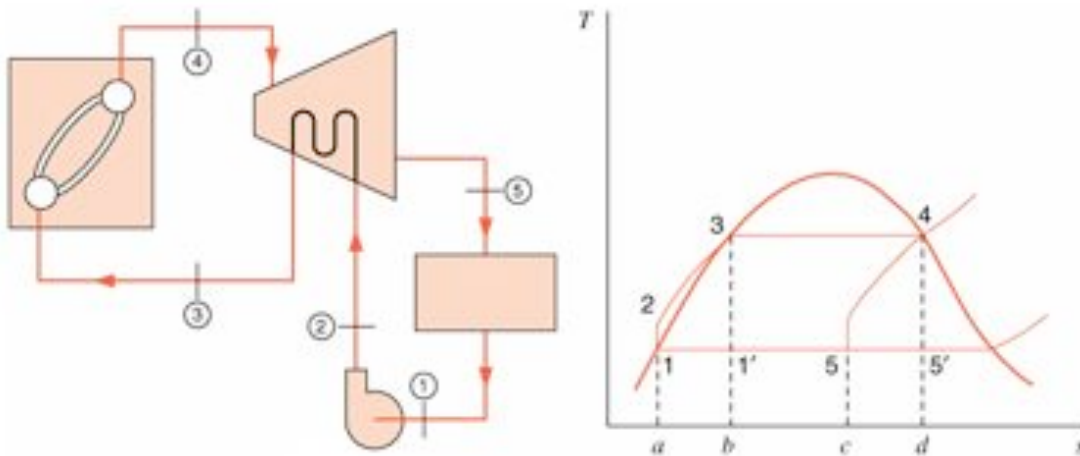
31

Rankine com reaquecimento



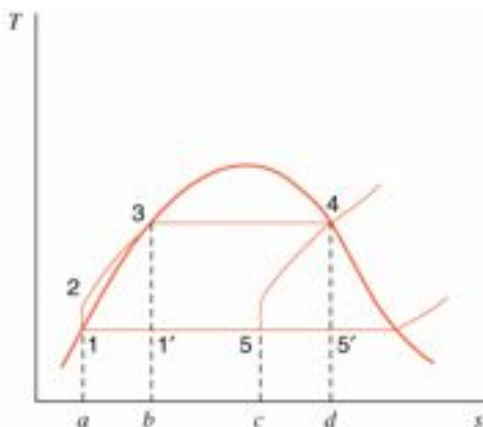
32

Rankine regenerativo



33

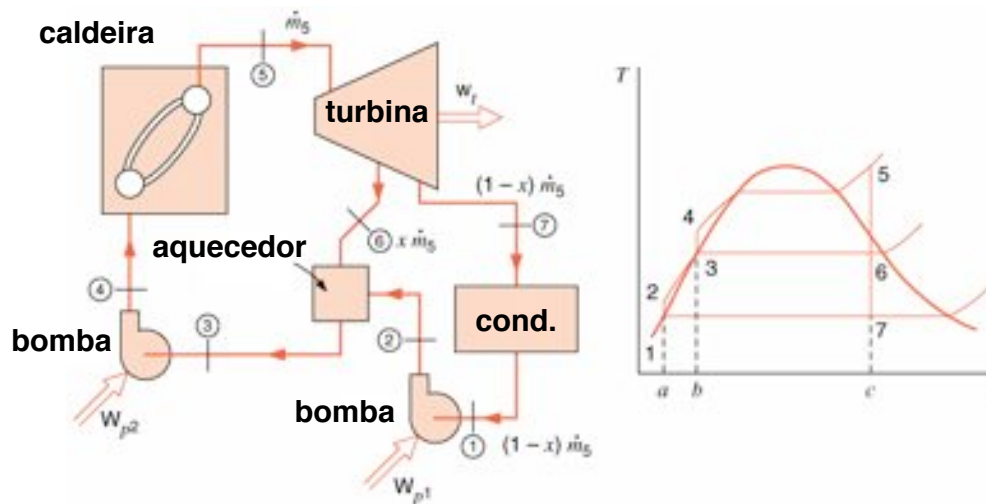
Rankine regenerativo



$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|} \hline 4 \\ \hline \text{curve} \\ \hline 5 \\ \hline c \quad d \\ \hline \end{array}
 \quad = \quad
 \mathbf{Q} \quad = \quad
 \begin{array}{|c|c|} \hline 2 \\ \hline \text{curve} \\ \hline 1 \\ \hline a \quad b \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

$$\mathbf{W}_{\text{ciclo}} = \begin{array}{|c|c|} \hline 3 \\ \hline \text{curve} \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} = \mathbf{W}_{\text{carnot}}$$

34

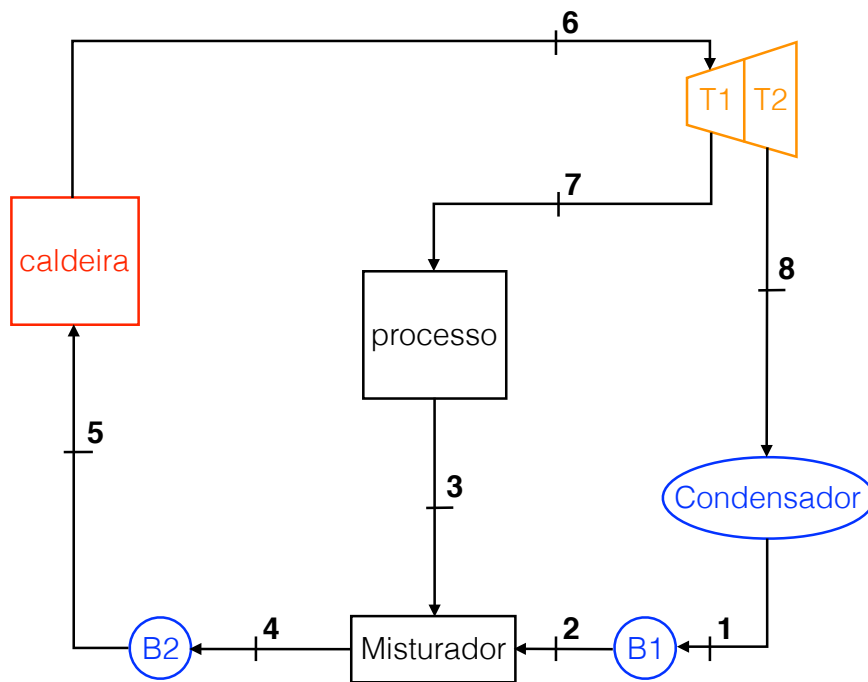


Rankine - exemplos

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 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:

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

Esquema da instalação:



37

◆ **Estado 6:** vapor superaquecido

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

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

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

$$s_6 = 6,726\text{kJ/kgK}$$

◆ **Estado 7s:** vapor superaquecido

$$s_{7s} = s_6 = 6,726\text{kJ/kgK}$$

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

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

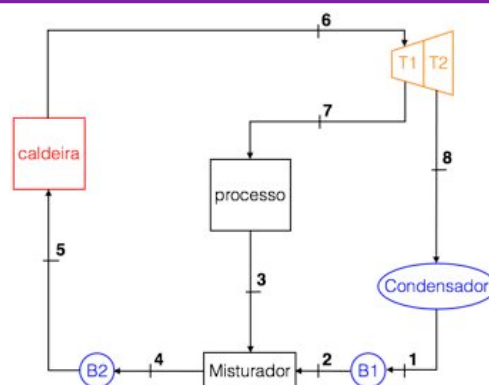
◆ **Estado 7:** vapor superaquecido

$$s_7 = 6,830\text{kJ/kgK}$$

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

$$h_7 = 3060\text{kJ/kg}$$

$$T_7 = 316^\circ\text{C}$$



38

Rankine - exemplos



◆ **Estado 8s:** vapor superaquecido

$$s_{8s} = s_7 = 6,830 \text{kJ/kgK}$$

$$P_8 = 20 \text{kPa e } h_{8s} = 2250 \text{kJ/kg}$$

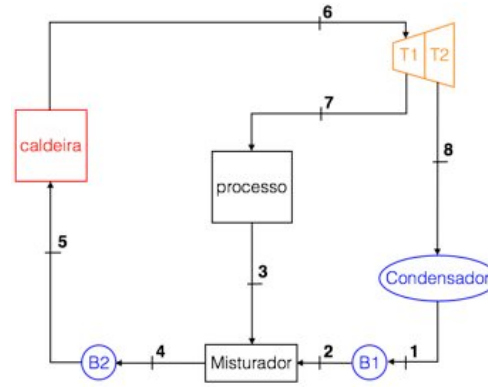
◆ **Estado 8:** mistura

$$h_8 = 2372 \text{kJ/kg}$$

$$x_8 = 0,8995$$

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

$$T_8 = 60,06^\circ\text{C}$$



$$0,85 = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}}$$

Rankine - exemplos



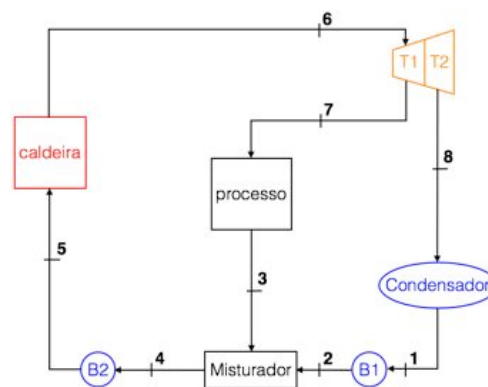
◆ **Potência em T1:**

$$W_{T1} = \dot{m}_6(h_6 - h_7) = -3731 \text{kW}$$

◆ **Potência em T2:**

$$W_{T2} = \dot{m}_8(h_7 - h_8) = -4820 \text{kW}$$

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



◆ Trabalho específico em B1:

$$w_{B1,rev} = v_1(P_2 - P_1) = -2,014 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{B1} = w_{B1,rev} / \eta_{s,B1} = -2,369 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 2: líquido comprimido

$$w_{B1} = h_1 - h_2 = -2,369 \text{ kJ/kg}$$

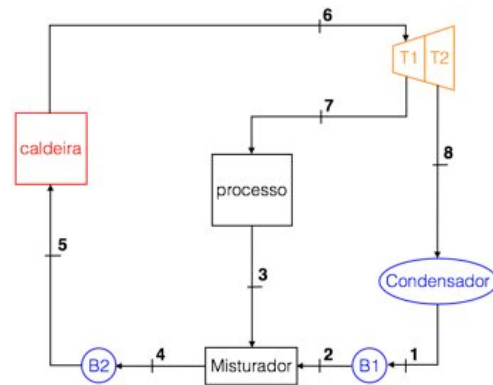
$$h_2 = 253,8 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 3: líquido saturado

$$h_3 = 908,6 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 4: líquido saturado

$$h_4 = 908,6 \text{ kJ/kg}$$



◆ Trabalho específico em B2:

$$w_{B2,rev} = v_4(P_5 - P_4) = -6,342 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{B2} = w_{B2,rev} / \eta_{s,B2} = -7,461 \text{ kJ/kg}$$

◆ Estado 5: líquido comprimido

$$w_{B2} = h_4 - h_5 = -7,461 \text{ kJ/kg}$$

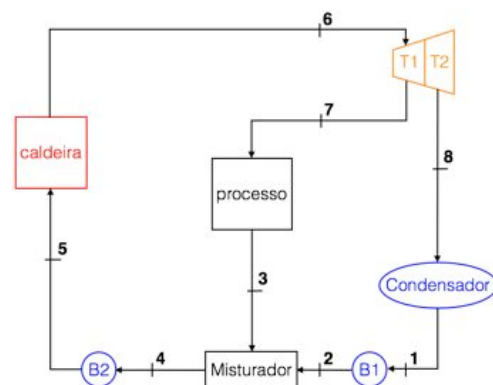
$$h_5 = 499,4 \text{ kJ/kg}$$

◆ Taxa de calor no processo:

$$\dot{Q} = m_7(h_7 - h_3) = -8606 \text{ kW}$$

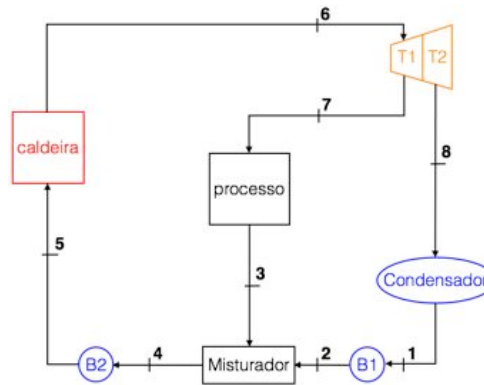
◆ Taxa de calor na caldeira:

$$\dot{Q}_H = m_5(h_6 - h_5)$$



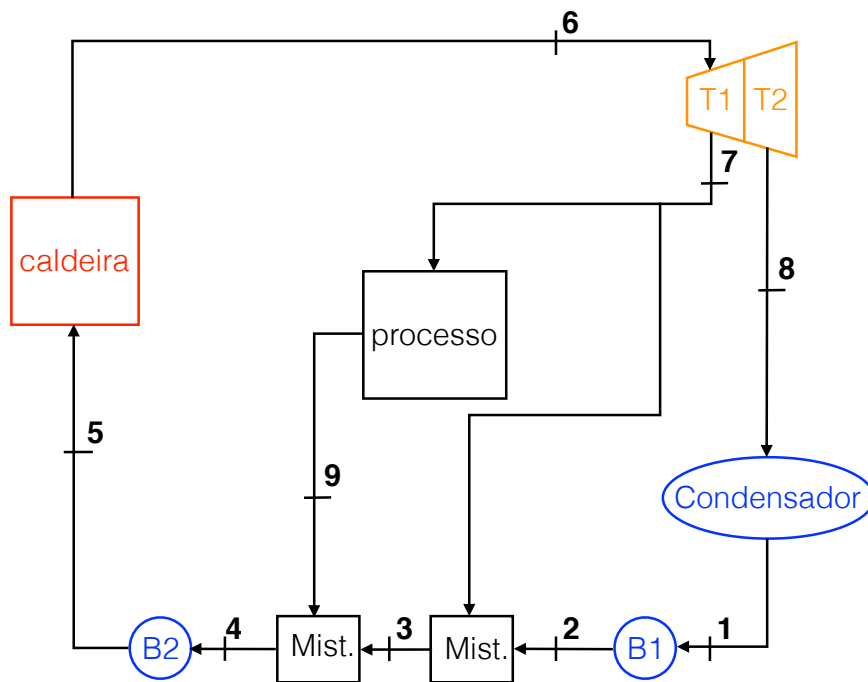
◆Rendimento

$$\eta_t = 0,535$$



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.

Esquema da instalação:



45

Exercícios



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

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

$$h_1 = 191,81\text{kJ/kg}$$

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

◆ Trabalho específico em B1:

$$w_{B1} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{B1} = 0,00101(400 - 10) = 0,39\text{kJ/kg}$$

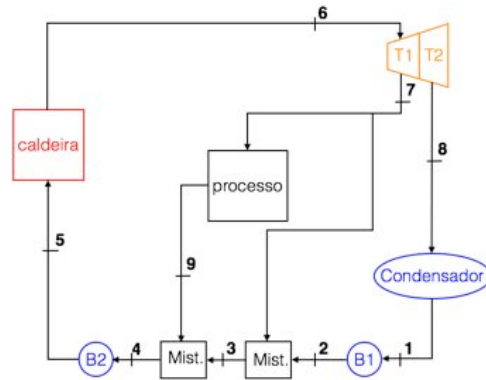
◆ Estado 2: líquido comprimido

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

◆ Estado 3, 4 e 9: líquido saturado ($P = 0,4\text{MPa}$)

$$h_3 = h_4 = h_9 = 604,66\text{kJ/kgK}$$

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



47



Rankine - exemplos

◆ Trabalho específico em B2:

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

$$w_{B2} = 0,001084(6000 - 400) = 6,07\text{kJ/kg}$$

◆ Estado 5: líquido comprimido

$$h_5 = h_4 + w_{b2} = 610,73\text{kJ/kgK}$$

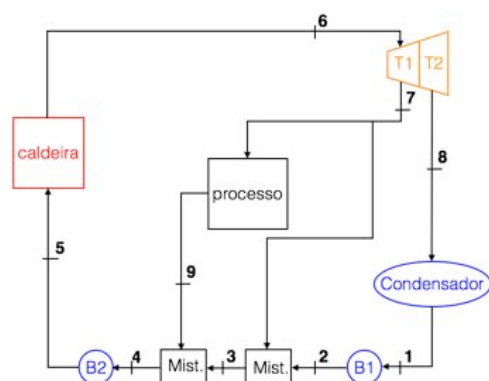
◆ Estado 6: vapor superaquecido

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

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

$$h_6 = 3302,9\text{kJ/kg}$$

$$s_6 = 6,7219\text{kJ/kgK}$$



48

◆ **Estado 7:** mistura

$$s_7 = s_6 = 6,7219 \text{kJ/kgK}$$

$$P_7 = 400 \text{kPa}$$

$$x_7 = 0,9661$$

$$h_7 = 2665,7 \text{kJ/kg}$$

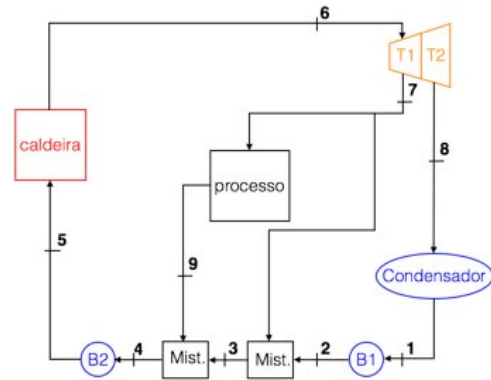
◆ **Estado 8:** mistura

$$s_8 = s_6 = 6,7219 \text{kJ/kgK}$$

$$P_8 = 10 \text{kPa}$$

$$x_8 = 0,80978$$

$$h_7 = 2128,7 \text{kJ/kg}$$



◆ **trabalho específico em T1 + T2:**

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

$$w_T = 852 \text{kJ/kg}$$

◆ **Trabalho específico em B1 + B2:**

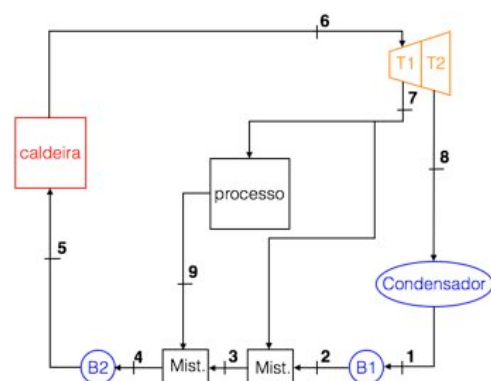
$$w_B = 0,4w_{B1} + w_{B2} = 6,23 \text{kJ/kg}$$

◆ **Trabalho líquido:**

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

◆ **vazão mássica**

$$\dot{m} = 15000/845,8 = 17,73 \text{kg/s}$$





◆ Diagrama T-s

