

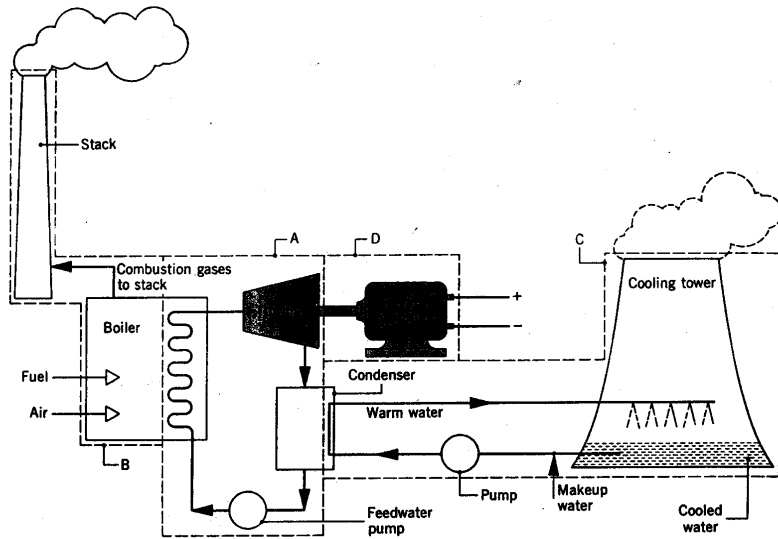
CICLOS MOTORES A VAPOR

Notas de Aula

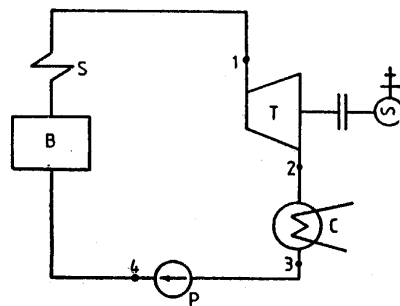
Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior

2001

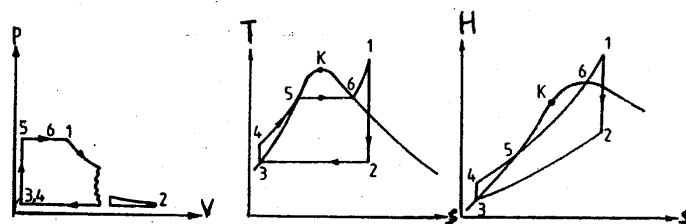
CICLO RANKINE



ESQUEMA DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA A VAPOR



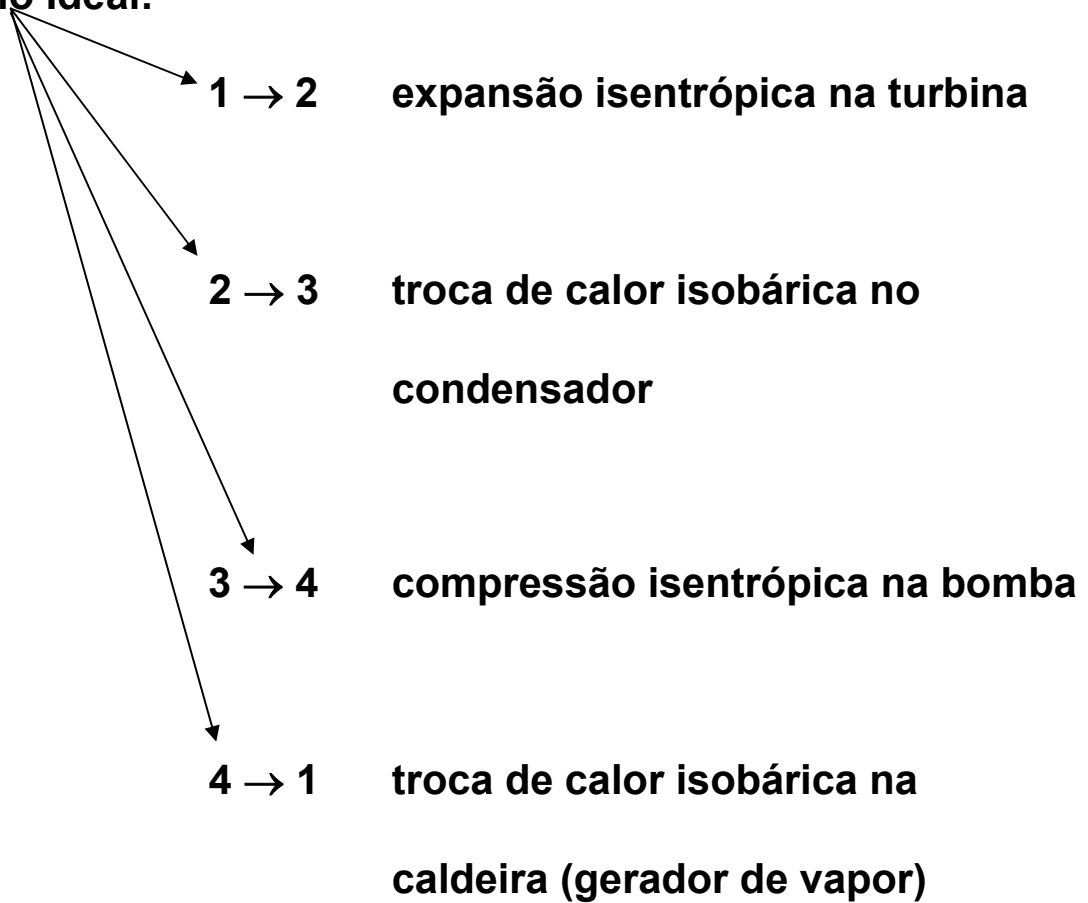
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TERMELÉTRICA



DIAGRAMAS DO CICLO IDEAL DE RANKINE

CICLO RANKINE

Ciclo Ideal:



Balanços de Energia (em Regime Permanente)

- ❖ Turbina: $W_t = m_v (h_1 - h_2)$
- ❖ Condensador: $Q_{cd} = m_v (h_2 - h_3)$
- ❖ Bomba: $W_b = m_v (h_4 - h_3) \cong m_v v_3 (p_4 - p_3)$
- ❖ Caldeira: $Q_{cald} = m_v (h_1 - h_4)$

RENDIMENTO TÉRMICO:

- ❖ $\eta = (W_t - W_b) / Q_{cald} = [(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)] / (h_1 - h_4)$

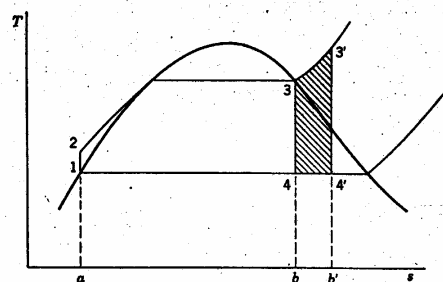
RELAÇÃO POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO / POTÊNCIA DA TURBINA

- ❖ $R_b = W_b / W_t = (h_4 - h_3) / (h_1 - h_2)$

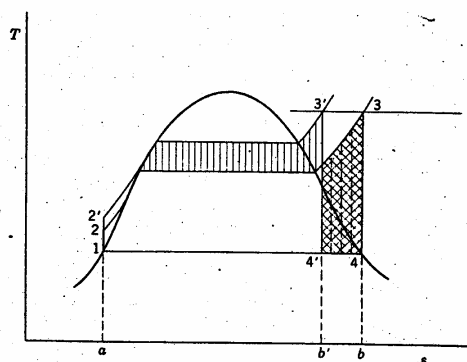
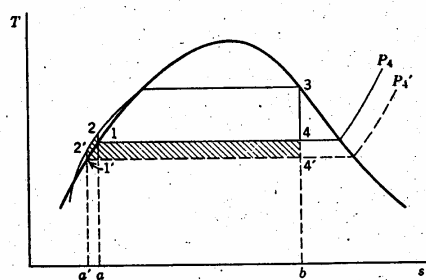
EVOLUÇÃO DOS CICLOS A VAPOR

Ano	1900	1920	1940	1960	1980
T_{vapor} (°C)	200	320	500	550	550
P_{vapor}(bar)	15	30	120	180	250
η_{ciclo}	12	16	33	45	48
W_{líquido} (MW)	10	50	160	500	1300

EFEITOS DA PRESSÃO E TEMPERATURA DO VAPOR NO DESEMPENHO DO CICLO RANKINE



Efeito do Superaquecimento



Efeitos da variação da pressão do condensador e da caldeira.

EFEITOS DA PRESSÃO E TEMPERATURA NO RENDIMENTO DO CICLO RANKINE

a) Efeito da pressão de geração do vapor

$P_{\text{condensação}} = 0,04 \text{ ata}$

$T_{\text{superaquecimento}} = 530 \text{ °C}$

P (ata)	40	60	80	100	140	160
η (%)	38,4	41,2	42,3	43,2	43,9	44,3

b) Efeito da pressão de condensação

$P_{\text{geração}} = 30 \text{ ata}$

$T_{\text{superaquecimento}} = 400 \text{ °C}$

P (ata)	1,00	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02
η (%)	25,5	33,9	34,7	35,5	36,7	38,5

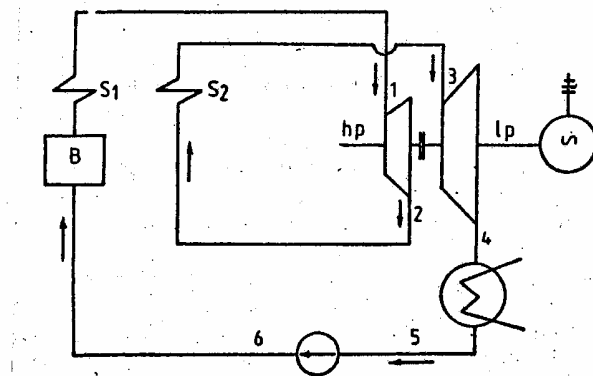
c) Efeito da temperatura de superaquecimento

$P_{\text{condensação}} = 0,04 \text{ ata}$

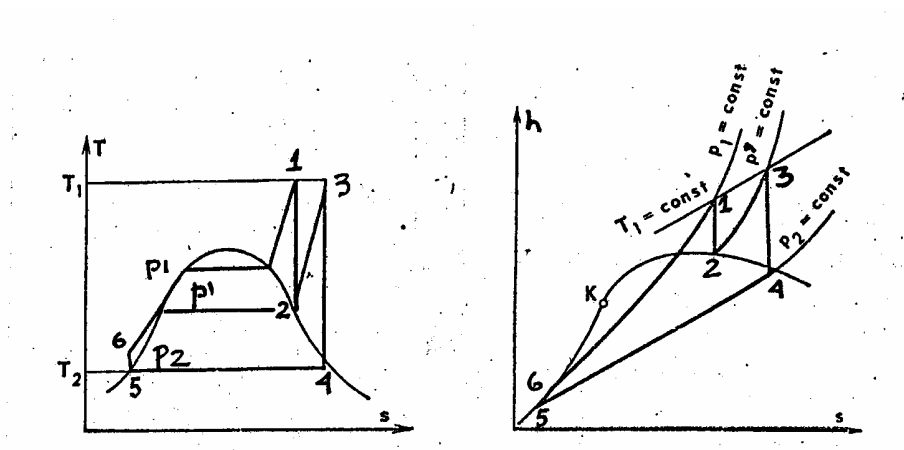
$P_{\text{geração}} = 25 \text{ ata}$

T (°C)	300	350	400	450	500	600
η (%)	35,2	35,6	36,2	37,0	37,6	39,2

CICLO COM REAQUECIMENTO INTERMEDIÁRIO DO VAPOR



Esquema de uma planta de potência com reaquecimento.

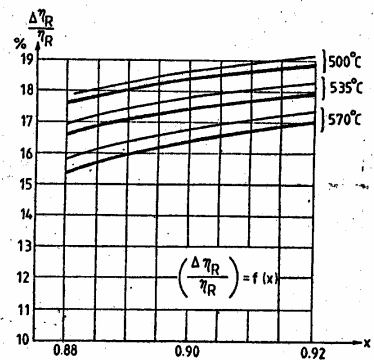
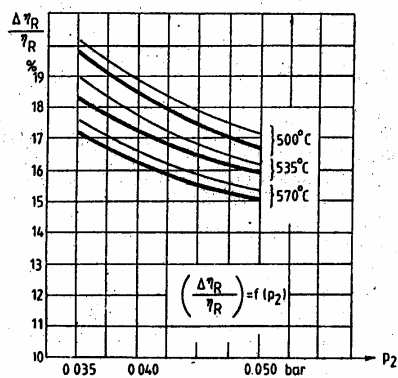
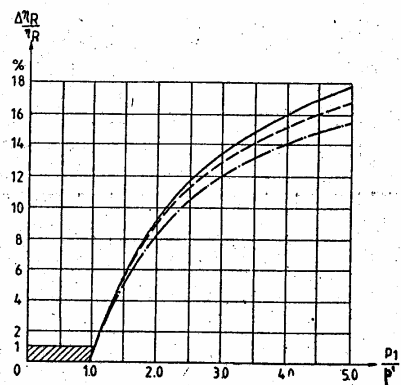
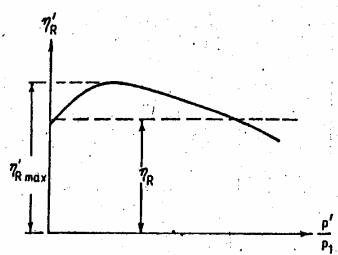


Representação dos processos termodinâmicos

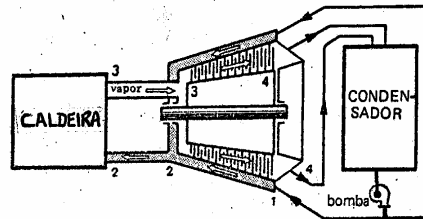
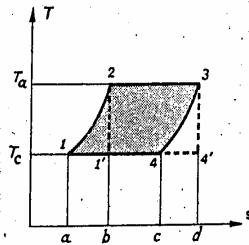
$$\eta = [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] / [(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)]$$

(desprezando a bomba)

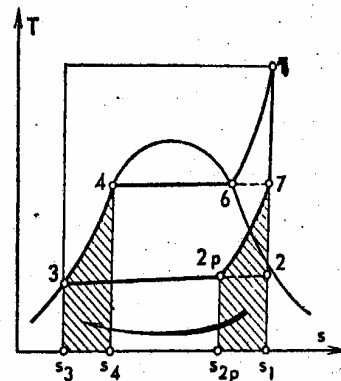
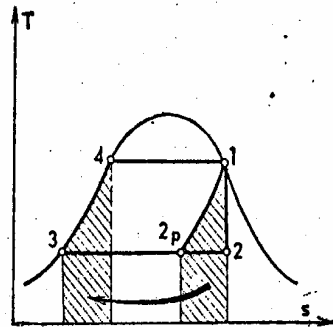
ALTERAÇÕES NO RENDIMENTO DO CICLO



CICLO COM REGENERAÇÃO



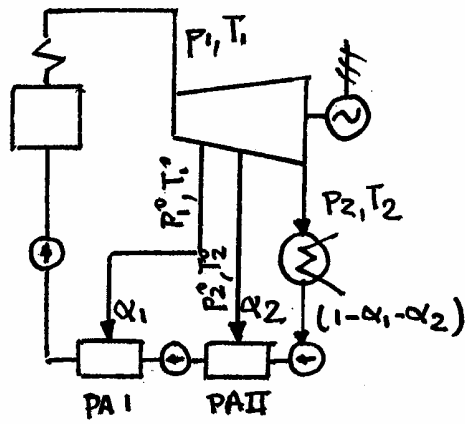
Ciclo de Ericsson



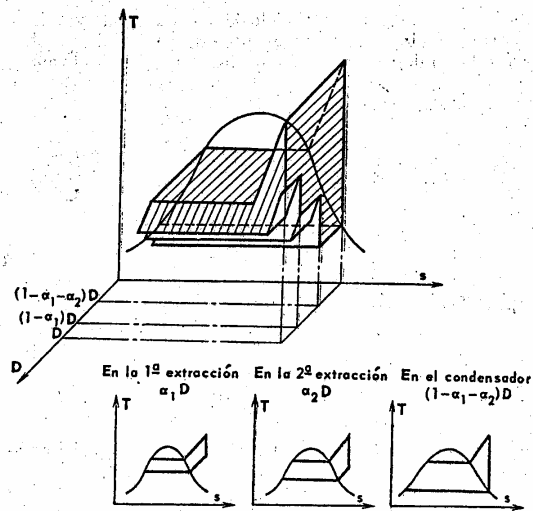
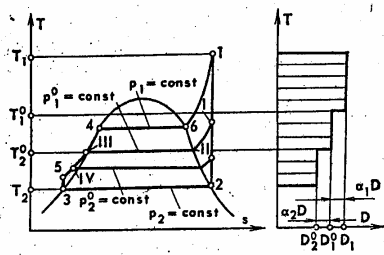
Ciclo Rankine com Regeneração

$$\eta_{\text{regeneração}} = 1 - [T_2(s_{2p}-s_3) / (h_1-h_4)]$$

CICLO REGENERATIVO

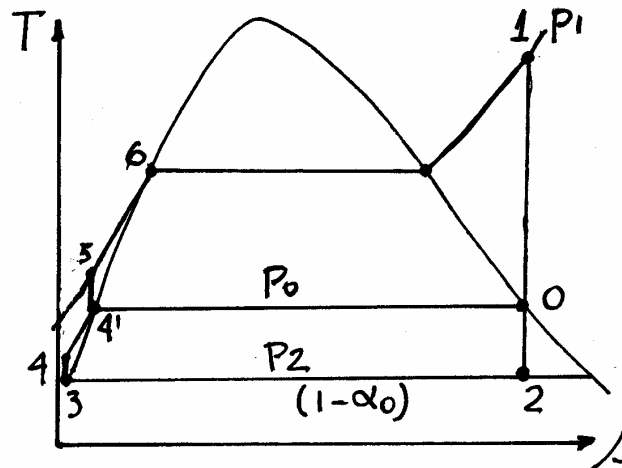


Esquema de um ciclo regenerativo.



Representação dos processos termodinâmicos.

AVALIAÇÃO DE RENDIMENTOS DE CICLOS COM REGENERAÇÃO



Balanços de Energia:

Turbina: $w = (h_1 - h_0) + (h_0 - h_2)(1 - \alpha_0)$

$$w = (h_1 - h_2) - (h_0 - h_2)\alpha_0$$

Caldeira: $q = (h_1 - h_5)$

Aquecedor de água: $(h_{4'} - h_4)(1 - \alpha_0) = (h_0 - h_{4'})\alpha_0$

Rendimentos:

$$\eta_{\text{reg}} = [(h_1 - h_2) - (h_0 - h_2)\alpha_0] / (h_1 - h_5) \quad \text{para ciclo com regeneração}$$

$$\eta_r = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_4) \quad \text{para ciclo 123461}$$

$$\eta_{\text{ro}} = (h_1 - h_0) / (h_1 - h_5) \quad \text{para ciclo 10561}$$

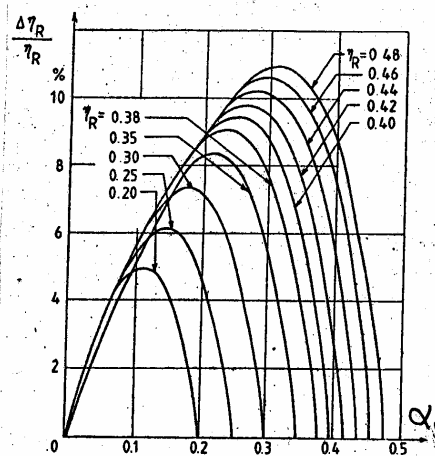
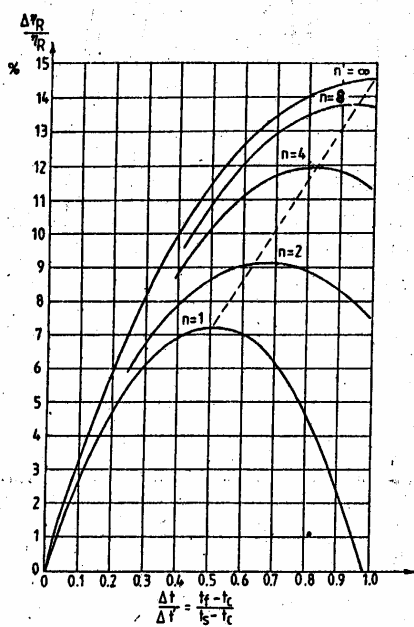
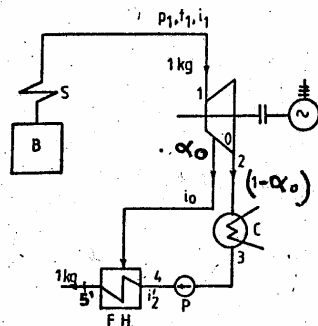
Relação entre Rendimentos:

$$\eta_{\text{reg}} = \eta_r + \alpha_0 \eta_{\text{ro}} (1 - \eta_r)$$

$$\Delta\eta = \eta_{\text{reg}} - \eta_r$$

$$\Delta\eta / \eta_r = (1 - \eta_r) / \eta_r \{ \alpha_0 (\eta_r - \alpha_0) / [1 - \alpha_0 (2 - \eta_r)] \}$$

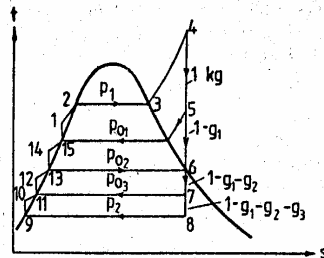
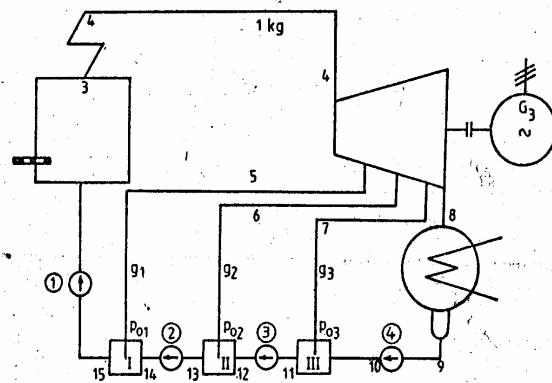
$$(\alpha_0)_{\text{ótimo}} = \eta_r / (2 - \eta_r)$$



Alterações no rendimento do ciclo.

CONFIGURAÇÕES DE CICLOS REGENERATIVOS

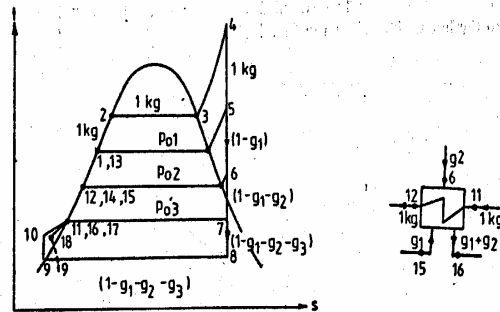
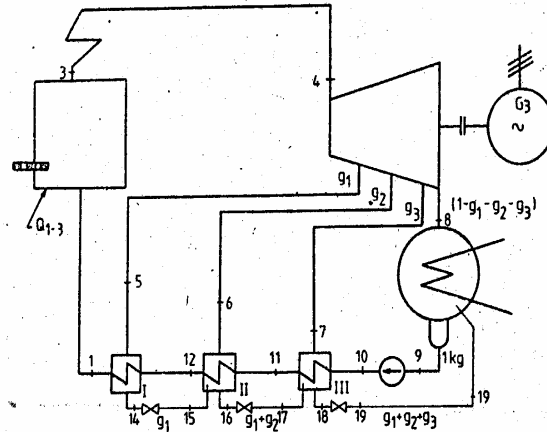
a) Ciclo Regenerativo com aquecedores de contato direto



$$\eta = [(h_4 - h_8) - g_1(h_5 - h_8) - g_2(h_6 - h_8) - g_3(h_7 - h_8) - w_b] / [(h_4 - h_1)]$$

com g = fração mássica

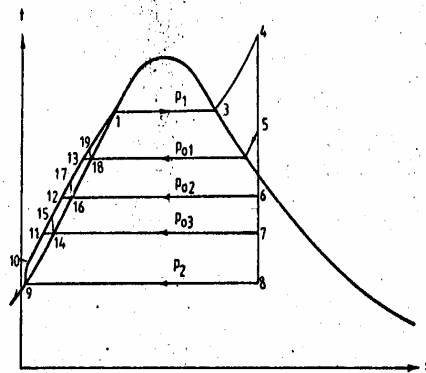
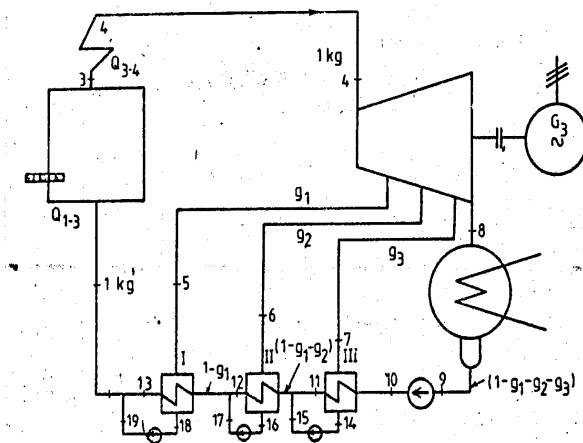
b) Ciclo Regenerativo com sistema de aquecimento em cascata



$$\eta = [(h_4 - h_5) + (1 - g_1)(h_5 - h_6) + (1 - g_1 - g_2)(h_6 - h_7) - (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_7 - h_8) - w_b] / [(h_4 - h_1)]$$

com g = fração mássica

c) Ciclo Regenerativo empregando o método de aquecimento com bomba de drenagem



CICLO COM PRESSÃO SUPERCRÍTICA

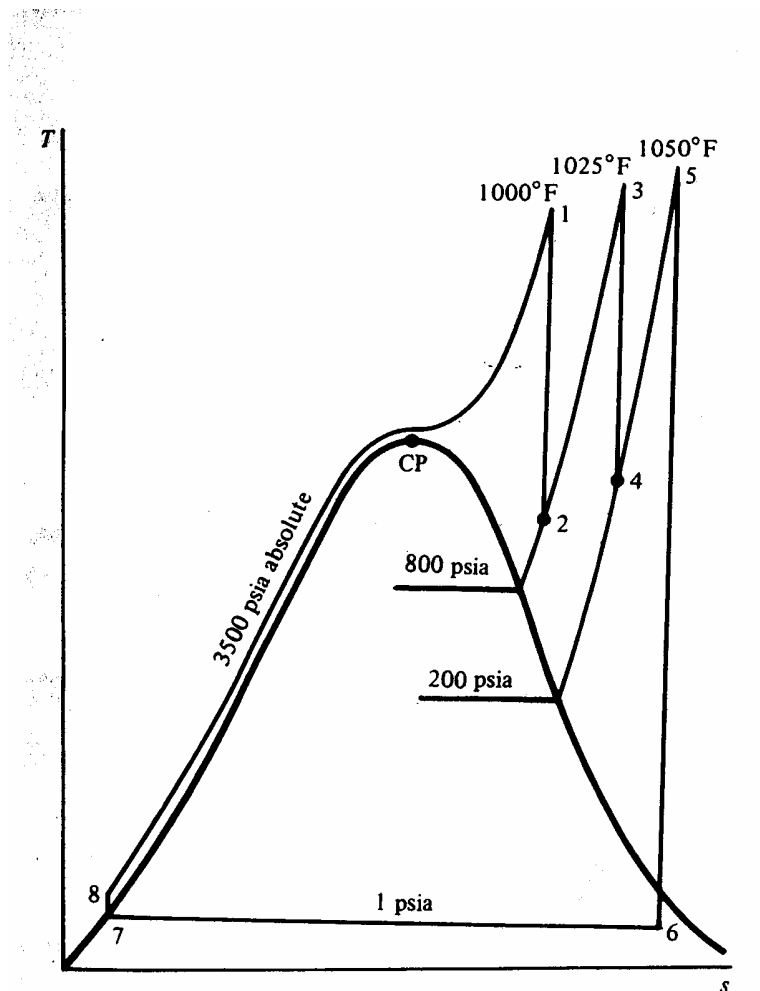
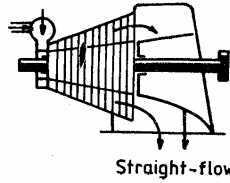


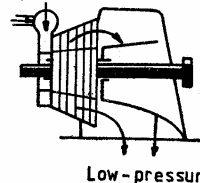
Diagrama $T - s$ de um ciclo vapor supercrítico ideal com dois reaquecimentos.

TIPOS DE TURBINAS A VAPOR

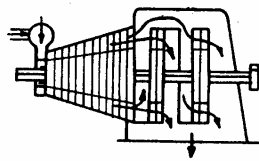
Turbinas de condensação e condensação-extração



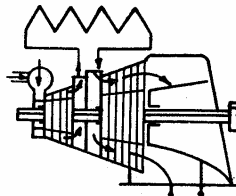
Straight-flow



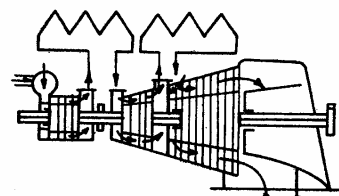
Low-pressure



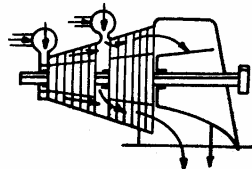
Double-flow-exhaust



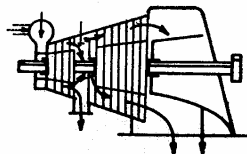
Single-reheat



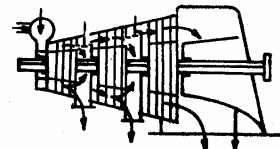
Double-reheat



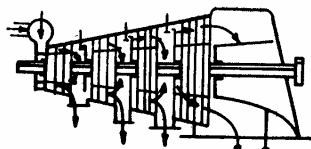
Mixed
pressure



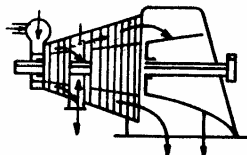
Single-automatic
extraction



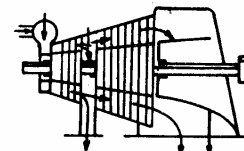
Double-automatic
extraction



Triple-automatic
extraction

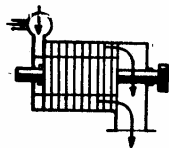


Single-automatic extraction
mixed pressure

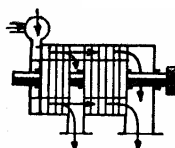


Single-nonautomatic
extraction

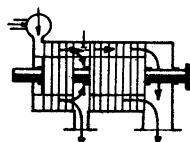
Turbinas de Contrapressão



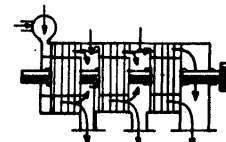
Straight-flow



Single-nonautomatic
extraction



Single-automatic
extraction



Double-automatic extraction

APLICAÇÕES PARA CICLO RANKINE

- 1) Considere o ciclo Rankine operando com água, com pressão de vaporização de 8,0 MPa e de condensação de 0,008 MPa, no qual o vapor gerado é saturado e o líquido sai saturado do condensador. Nesse ciclo a bomba e a turbina têm rendimento isentrópico de 85 %. Determine: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão mássica de vapor para uma potência útil de 100 MW; c) a taxa de transferência de calor no gerador de vapor; d) a taxa de transferência de calor no condensador; e) a vazão mássica de água de resfriamento no condensador, admitindo que $T_e = 15^\circ\text{C}$ e $T_s = 35^\circ\text{C}$.
- 2) Considere o ciclo ideal de Rankine com superaquecimento e reaquecimento. Nele vapor entra no primeiro estágio da turbina a 8,0 MPa e 480°C , expandindo até 0,7 MPa. Nessa pressão o vapor é extraído da turbina, enviado para o gerador de vapor e reaquecido até 440°C . A seguir é enviado para o segundo estágio da turbina onde expande até a pressão de 0,008 MPa. A potência líquida fornecida pelo ciclo é de 100 MW. Determine: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão mássica de vapor; c) a taxa de transferência de calor no condensador.
- 3) Em um ciclo vapor com regeneração com um pré-aquecedor do tipo de mistura, vapor é gerado a 8,0 MPa e 480°C . O vapor enviado para o pré-aquecedor é extraído da turbina a 0,7 MPa. A vazão restante de vapor é expandida até a pressão do condensador, que é de 0,008 MPa. Líquido saturado a 0,7 MPa deixa o pré-aquecedor. A eficiência isentrópica de cada estágio da turbina é de 85 %. Admitindo que a potência líquida gerada pelo ciclo seja 100 MW, pede-se: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão total de vapor.
- 4) Em um ciclo de Rankine com regeneração há duas extrações de vapor da turbina para os preaquecedores de mistura: uma a 6,86 bar e outra a 1,17 bar. As propriedades do vapor na entrada da turbina são $p = 88,2$ bar e $T = 535^\circ\text{C}$. A pressão no condensador é 0,0343 bar. Considerando que a água de alimentação na saída de cada preaquecedor atinge a temperatura de saturação do vapor extraído, pede-se: a) as frações da vazão total extraídas; b) o trabalho específico produzido pela turbina; c) o rendimento do ciclo regenerativo (compare-o com o do ciclo ideal de Rankine). Despreze a potência consumida pelas bombas.