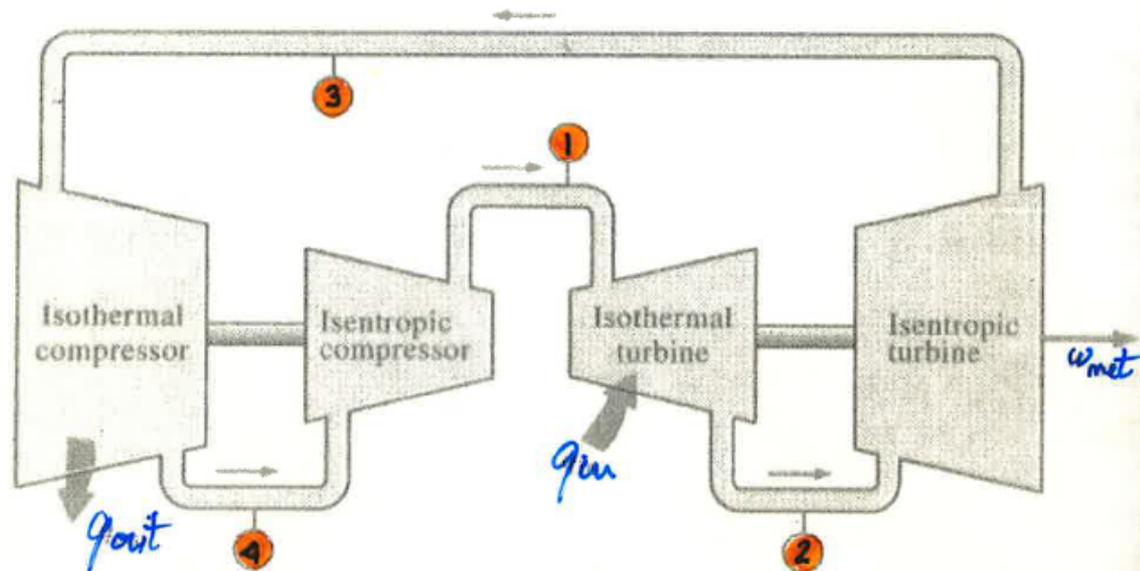
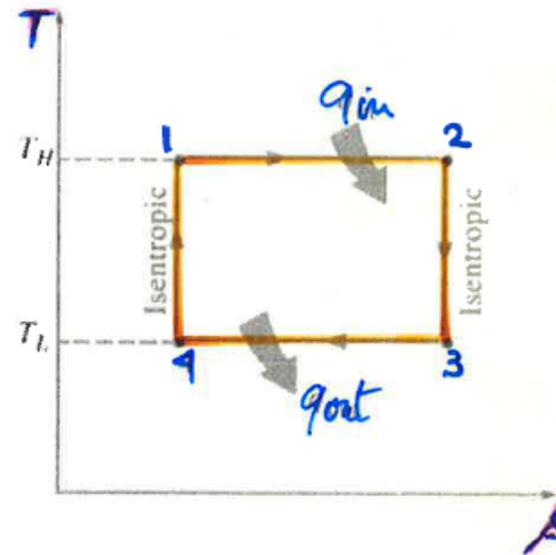
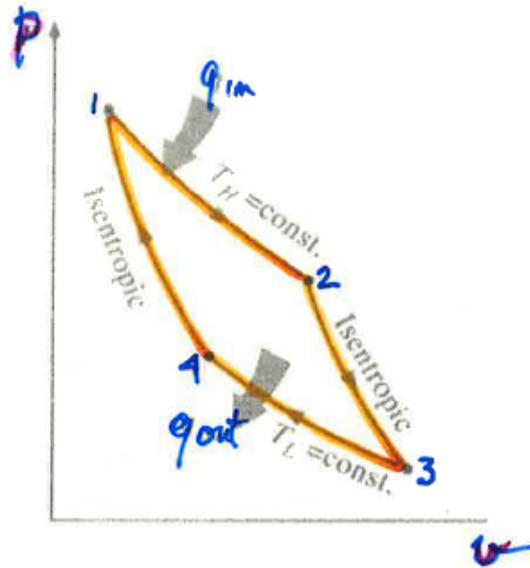
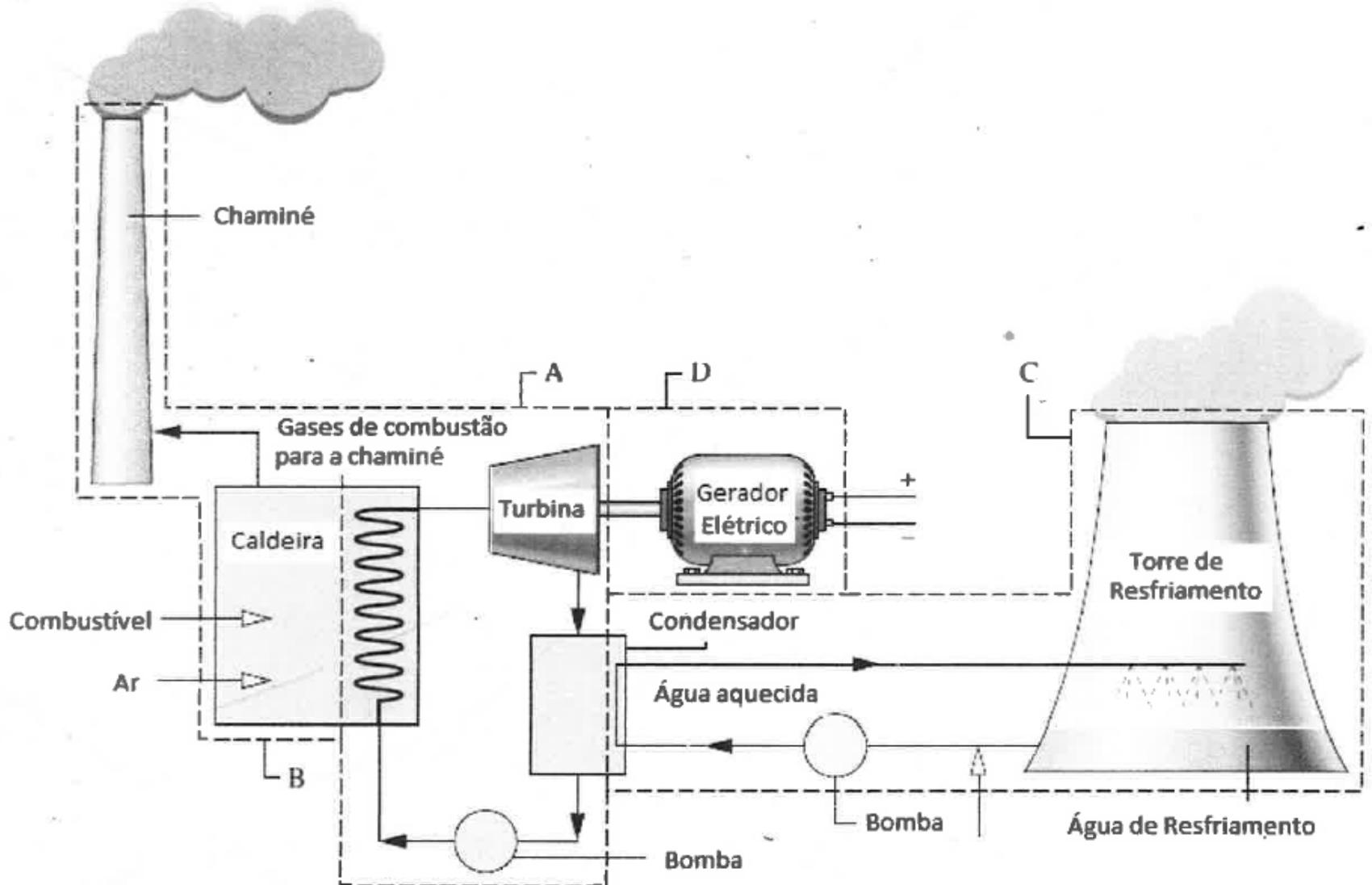


# **CICLO DE RANKINE**

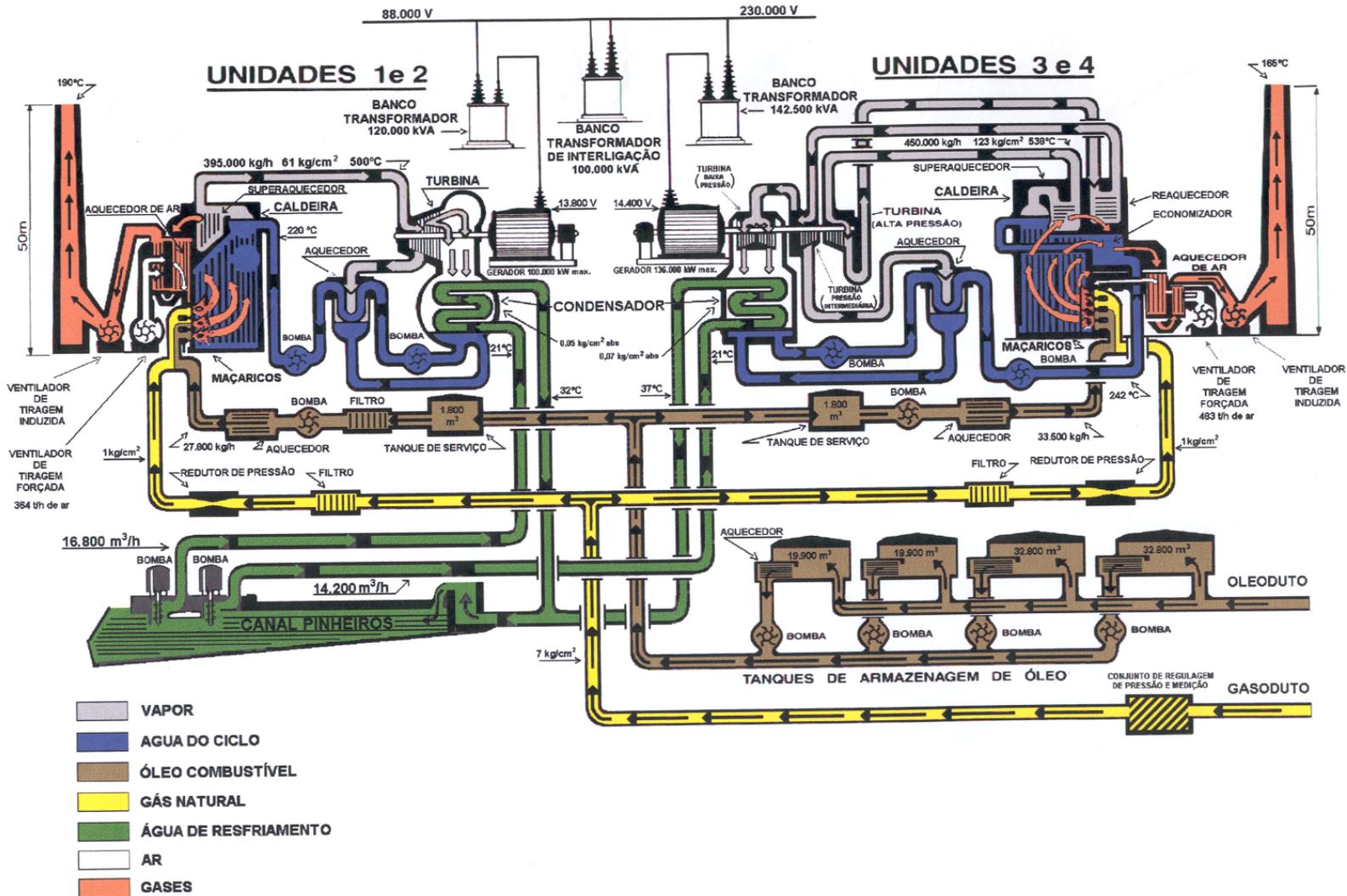
# CICLO DE CARNOT



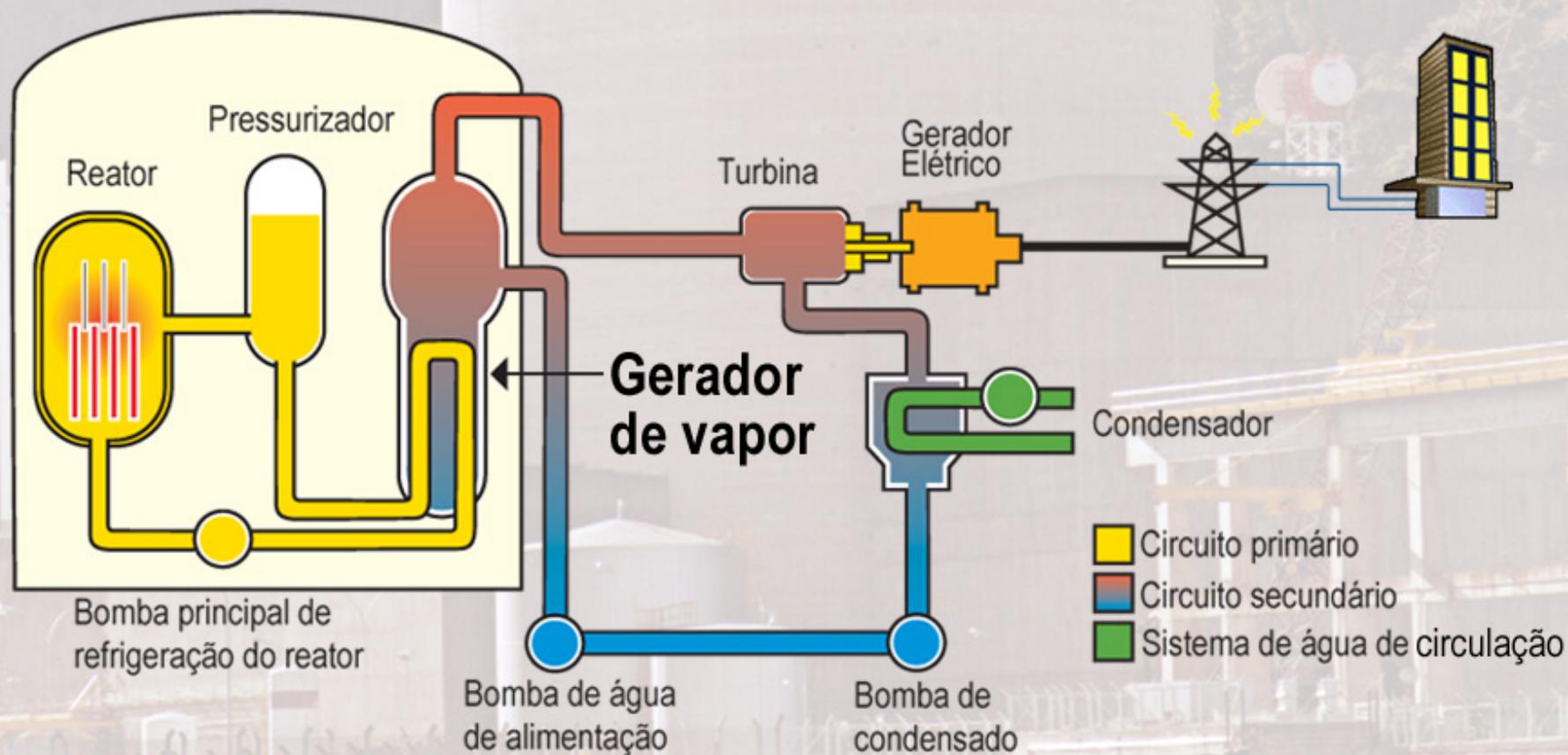
## Planta de Potência Baseada em Ciclo Rankine

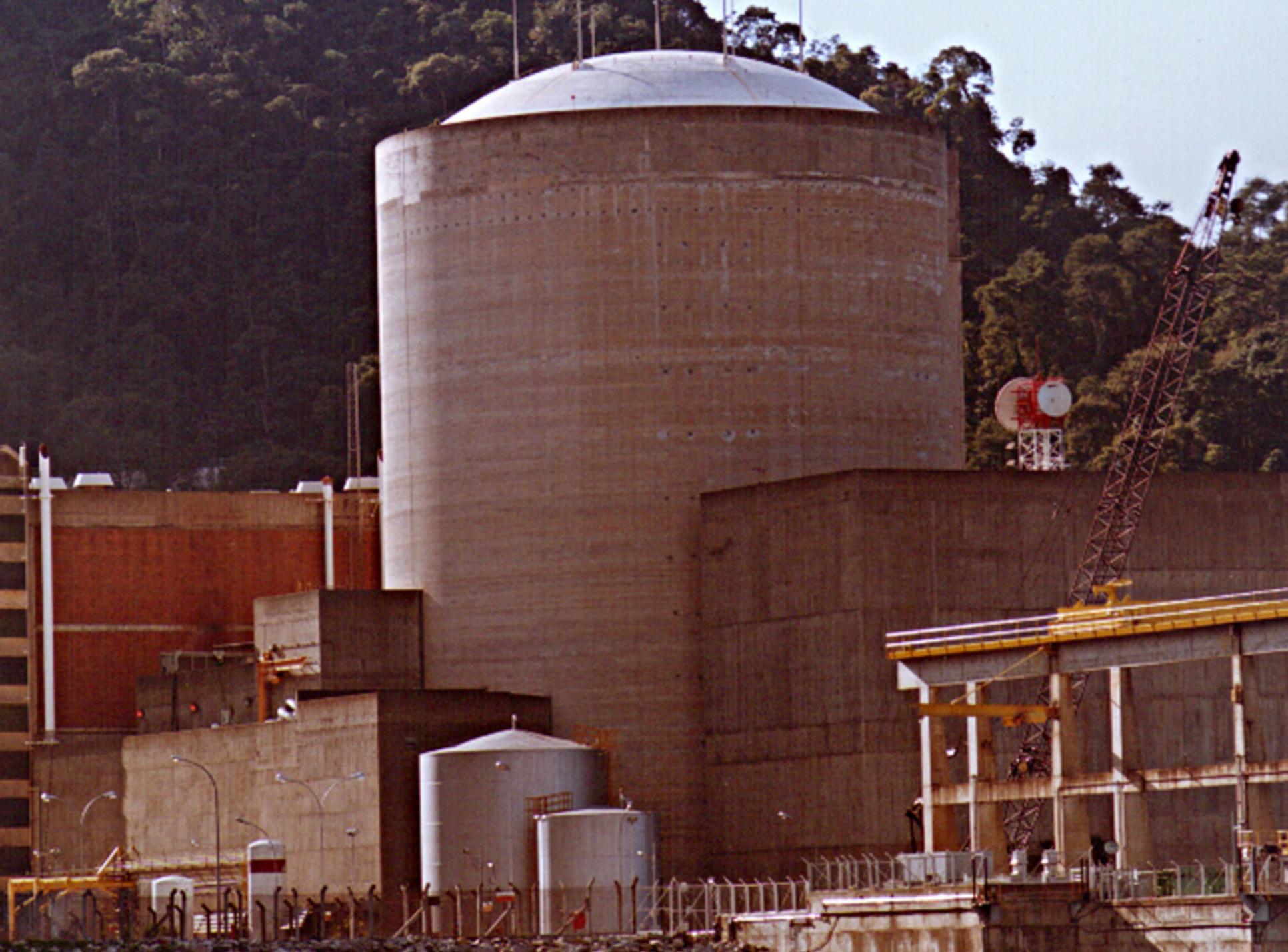


# ESQUEMA SIMPLIFICADO DO FUNCIONAMENTO DA USINA TERMOELÉTRICA PIRATININGA

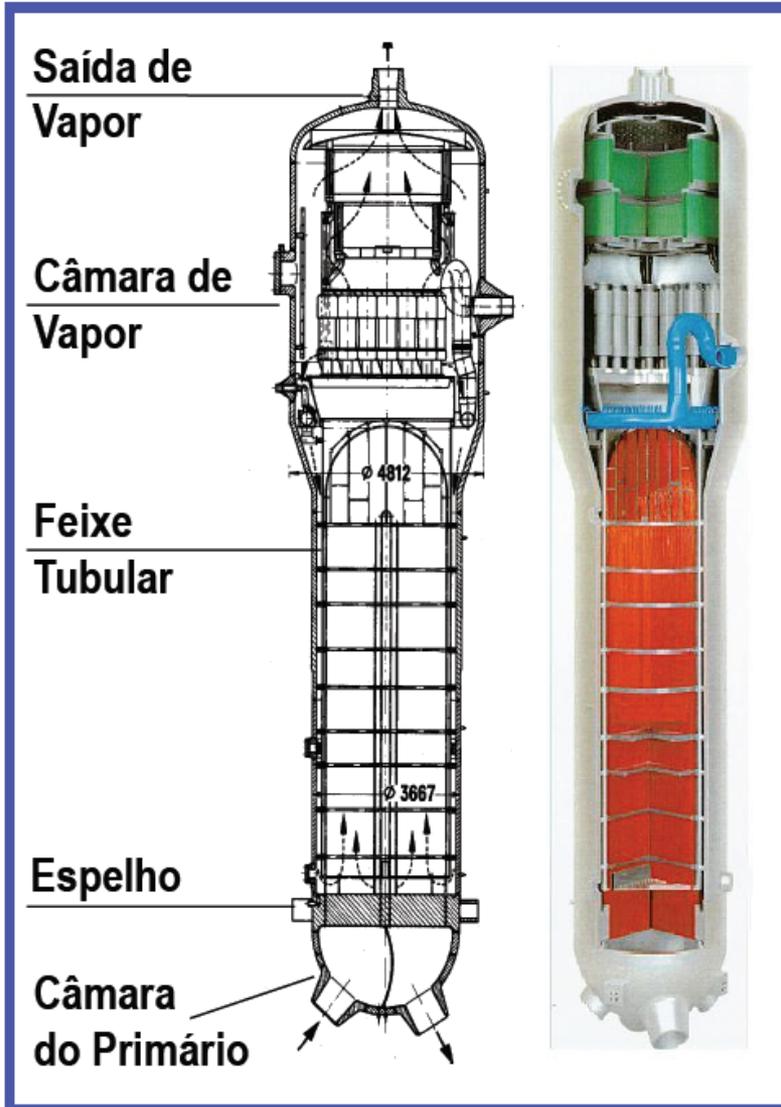


Vaso de contenção





# ANGRA I: Dados técnicos dos novos geradores de vapor



**Potência térmica: 1.000 MWt**

**Características operacionais**

▶ **Lado primário**

- . Pressão de projeto: 170 bar
- . Vazão: 4.500 kg/s
- . Temperatura de projeto: 343° C

▶ **Lado secundário**

- . Pressão de projeto: 82 bar
- . Vazão de vapor: 515 kg/s
- . Temperatura de projeto: 316° C

# ANGRA I: Dados técnicos dos novos geradores de vapor

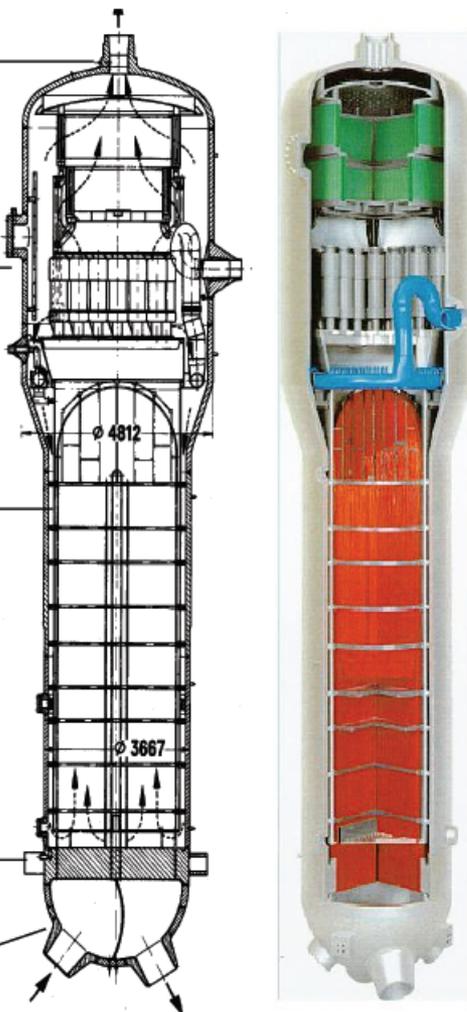
Saída de Vapor

Câmara de Vapor

Feixe Tubular

Espelho

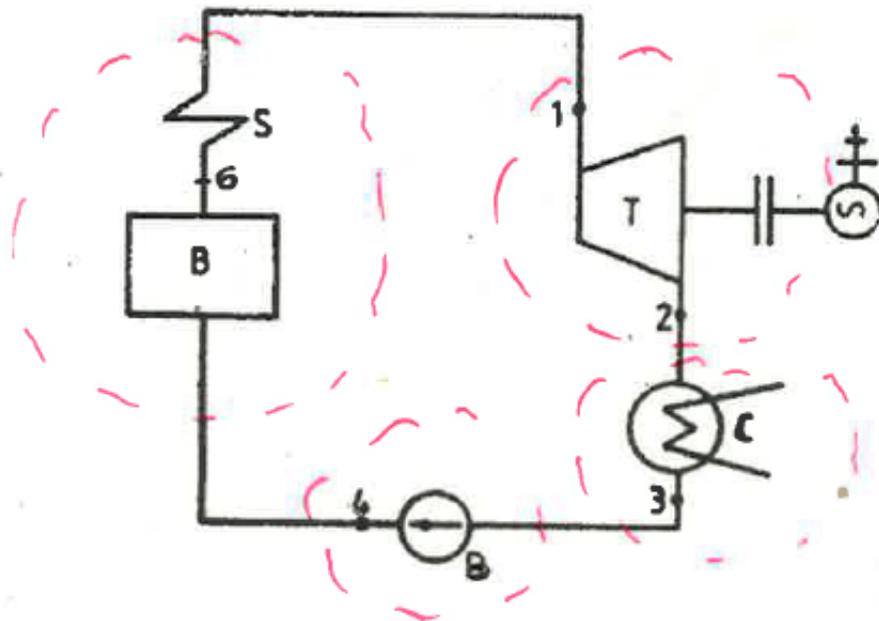
Câmara do Primário



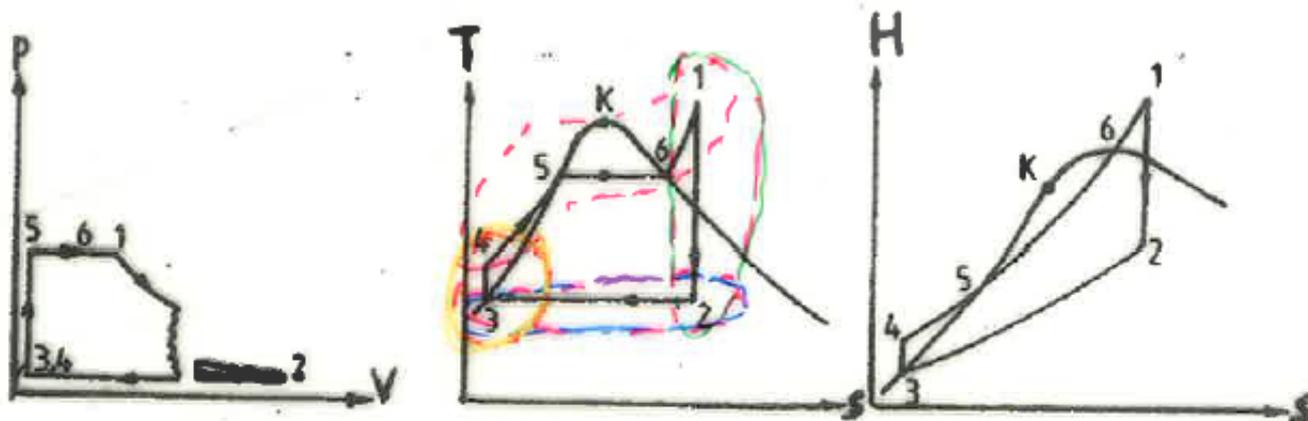
Potência térmica: 1.000 MWt

## ► Características mecânicas

- . Altura total: 20 m
- . Diâmetro do casco: 4,5 m
- . Material dos tubos: liga 690 ou liga 800
- . Peso do equipamento vazio: 350 t
- . Quantidade de tubos: 5.200



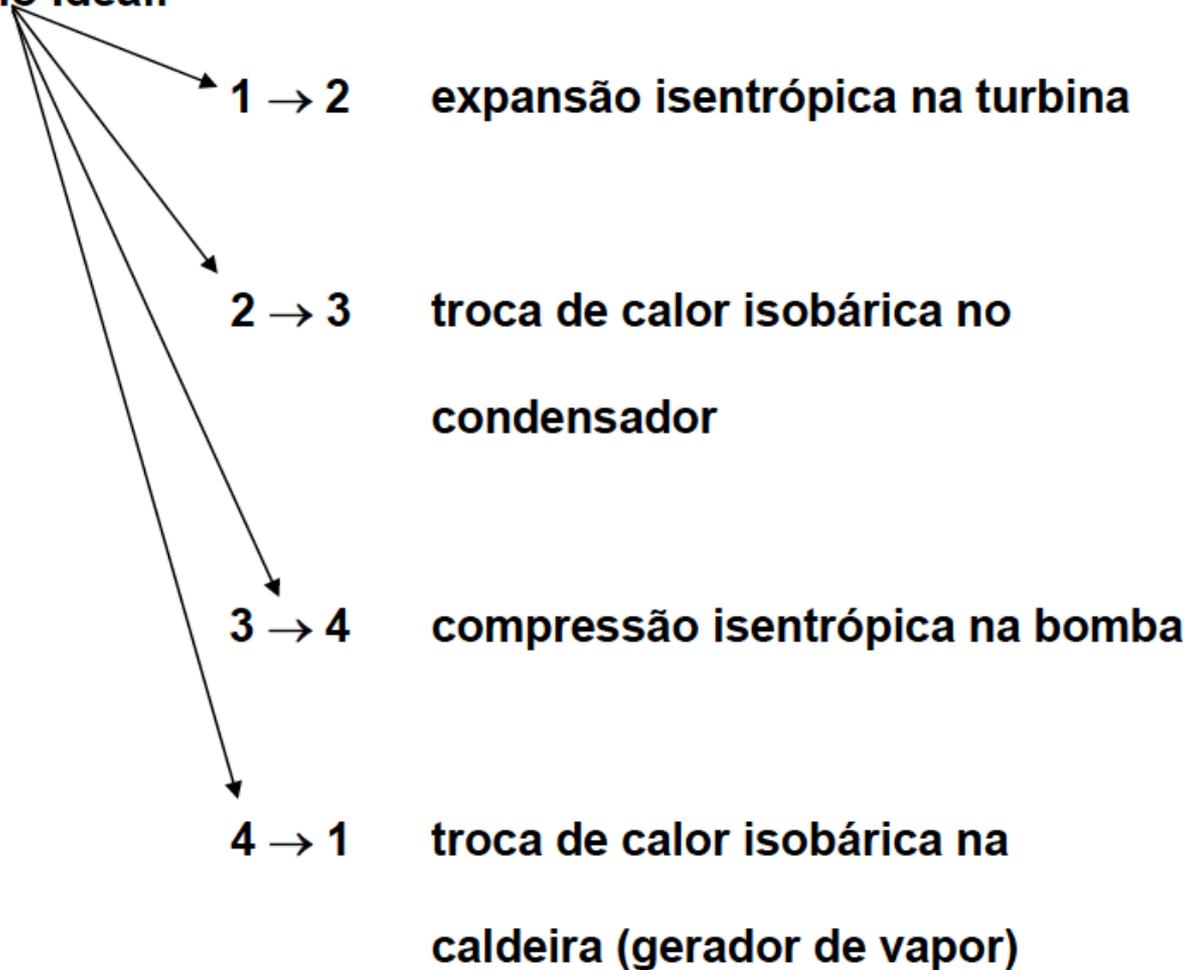
## REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TERMELÉTRICA



## DIAGRAMAS DO CICLO IDEAL DE RANKINE

# CICLO RANKINE

**Ciclo Ideal:**



## Balancos 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:

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

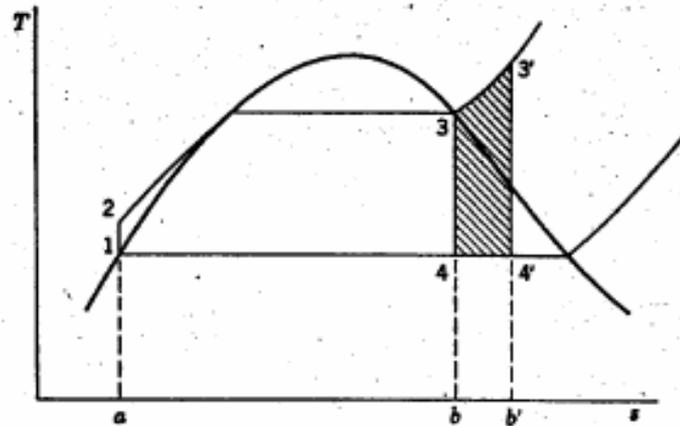
### RELAÇÃO POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO / POTÊNCIA DA TURBINA

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

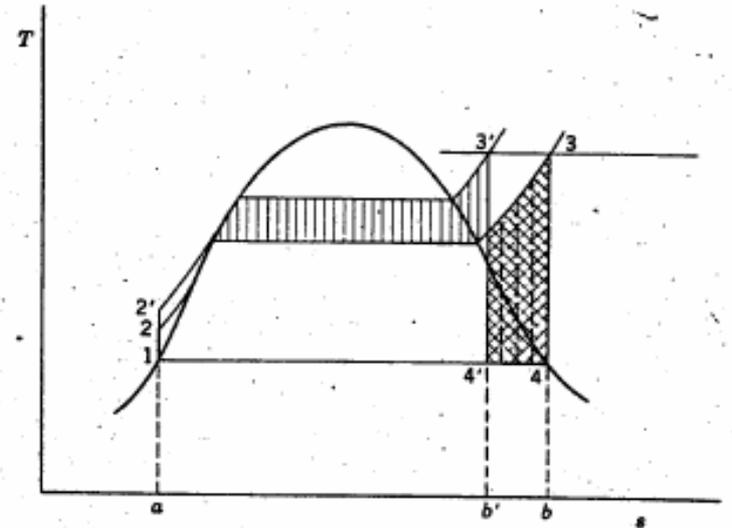
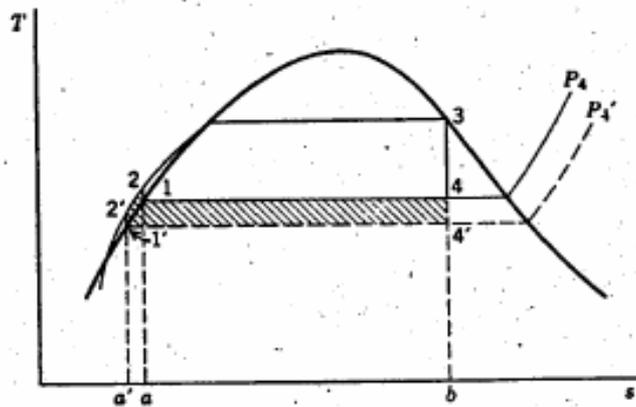
## EVOLUÇÃO DOS CICLOS A VAPOR

<b>Ano</b>	<b>1900</b>	<b>1920</b>	<b>1940</b>	<b>1960</b>	<b>1980</b>
<b><math>T_{\text{vapor}}</math> (°C)</b>	200	320	500	550	550
<b><math>P_{\text{vapor}}</math> (bar)</b>	15	30	120	180	250
<b><math>\eta_{\text{ciclo}}</math></b>	12	16	33	45	48
<b><math>W_{\text{liquido}}</math> (MW)</b>	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

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

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

<b>P (ata)</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>140</b>	<b>160</b>
<b><math>\eta</math> (%)</b>	<b>38,4</b>	<b>41,2</b>	<b>42,3</b>	<b>43,2</b>	<b>43,9</b>	<b>44,3</b>

### b) Efeito da pressão de condensação

$$P_{\text{geração}} = 30 \text{ ata}$$

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

<b>P (ata)</b>	<b>1,00</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
<b><math>\eta</math> (%)</b>	<b>25,5</b>	<b>33,9</b>	<b>34,7</b>	<b>35,5</b>	<b>36,7</b>	<b>38,5</b>

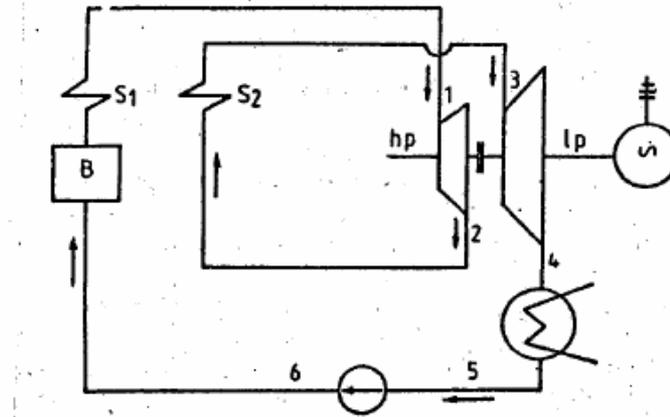
### c) Efeito da temperatura de superaquecimento

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

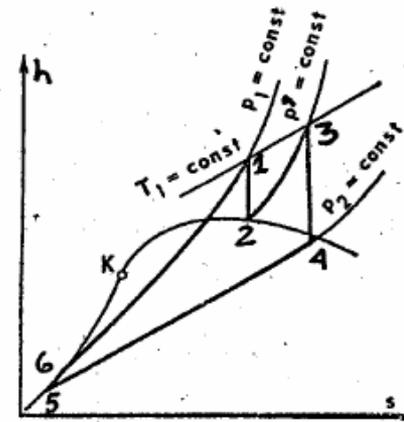
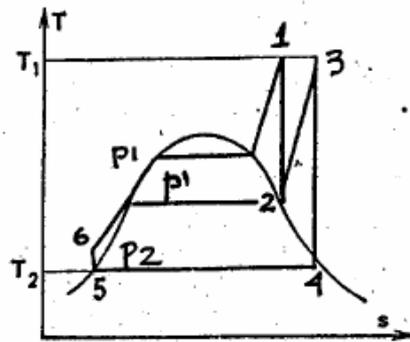
$$P_{\text{geração}} = 25 \text{ ata}$$

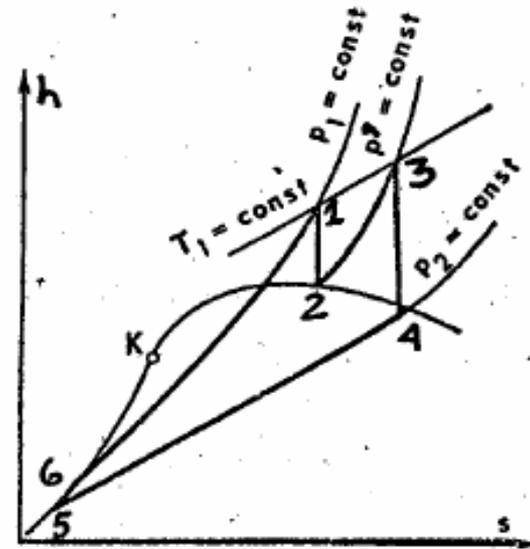
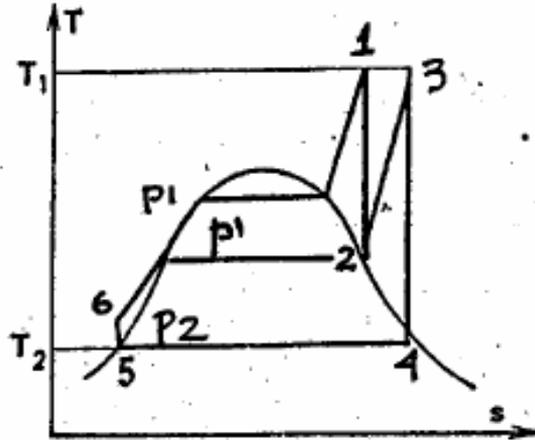
<b>T (°C)</b>	<b>300</b>	<b>350</b>	<b>400</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	<b>600</b>
<b><math>\eta</math> (%)</b>	<b>35,2</b>	<b>35,6</b>	<b>36,2</b>	<b>37,0</b>	<b>37,6</b>	<b>39,2</b>

## CICLO COM REAQUECIMENTO INTERMEDIÁRIO DO VAPOR



Esquema de uma planta de potência com reaquecimento.



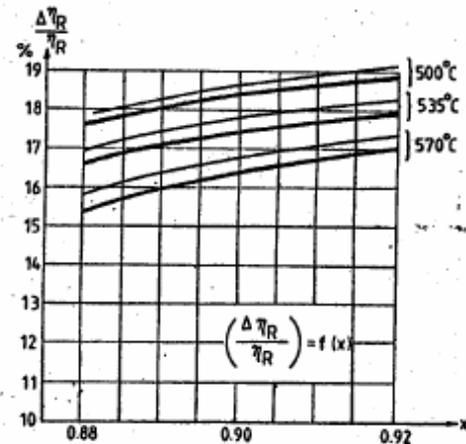
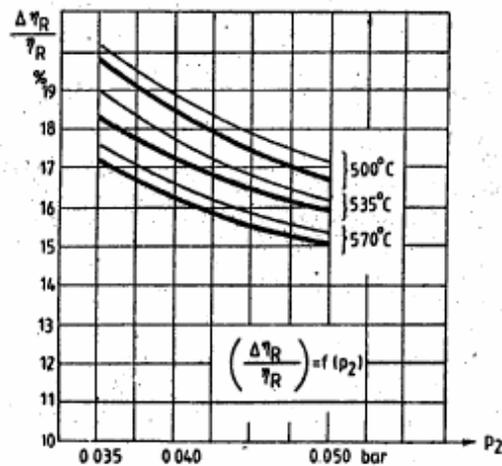
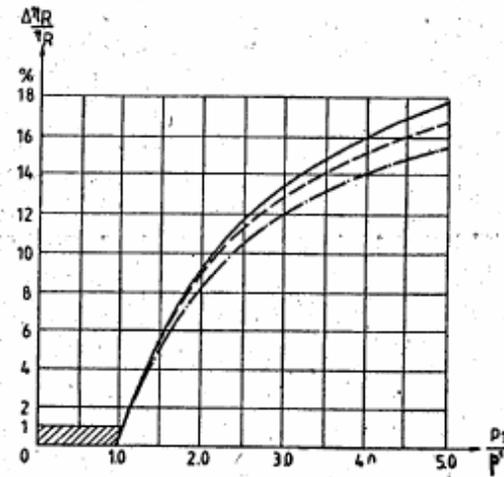
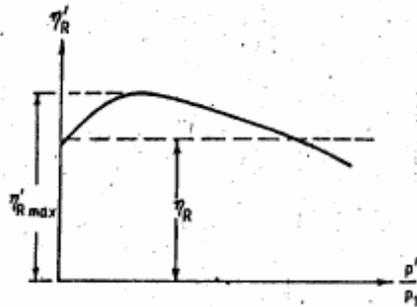


## Representação dos processos termodinâmicos

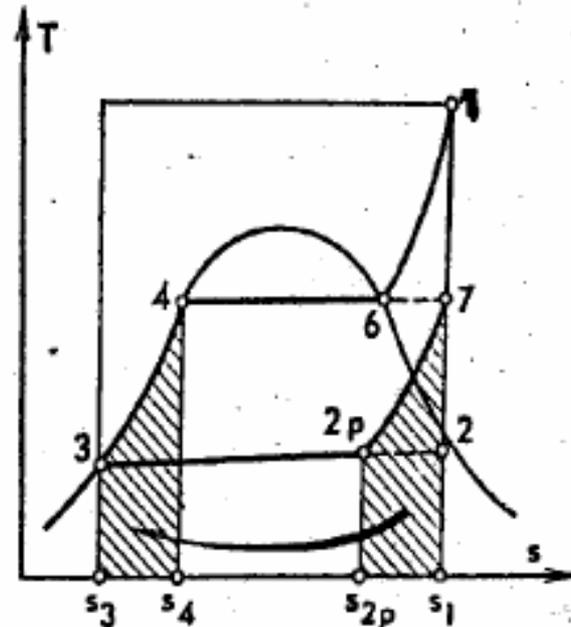
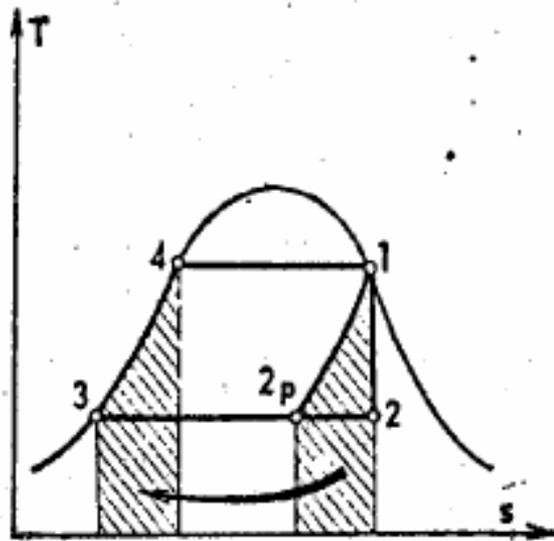
$$\eta = [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] / [(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)]$$

(desprezando a bomba)

# ALTERAÇÕES NO RENDIMENTO DO CICLO







## Ciclo Rankine com Regeneração

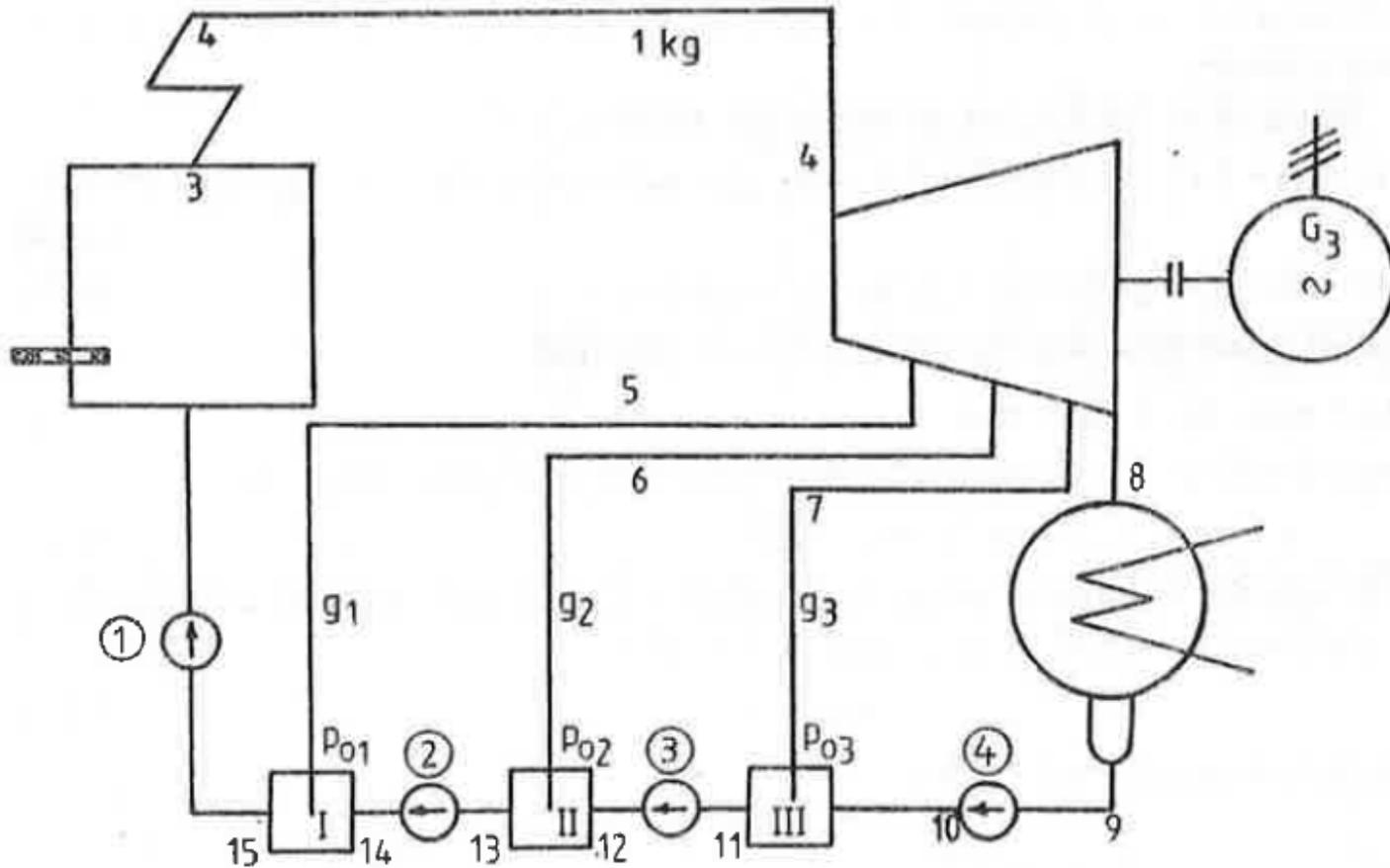
$$\eta_{\text{regeneração}} = 1 - [T_2(s_{2p} - s_3) / (h_1 - h_4)]$$





# **CONFIGURAÇÕES DE CICLOS REGENERATIVOS**

# Ciclo regenerativo de contato direto





a) Sistema com Aquecedores de Contato Direto

$$W_t = (h_4 - h_5) + (1 - g_1)(h_5 - h_6) + (1 - g_1 - g_2)(h_6 - h_7) + (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_7 - h_8)$$

$$W_b = v_a(p_1 - p_0) + (1 - g_1)v_a(p_{01} - p_{02}) + (1 - g_1 - g_2)v_a(p_{02} - p_{03}) + (1 - g_1 - g_2 - g_3)v_a(p_{03} - p_{04})$$

$$q_c = h_4 - h_1$$

# Aquecedores

I

$$g_1(h_5 - h_{15}) = (1 - g_1)(h_{15} - h_{13})$$

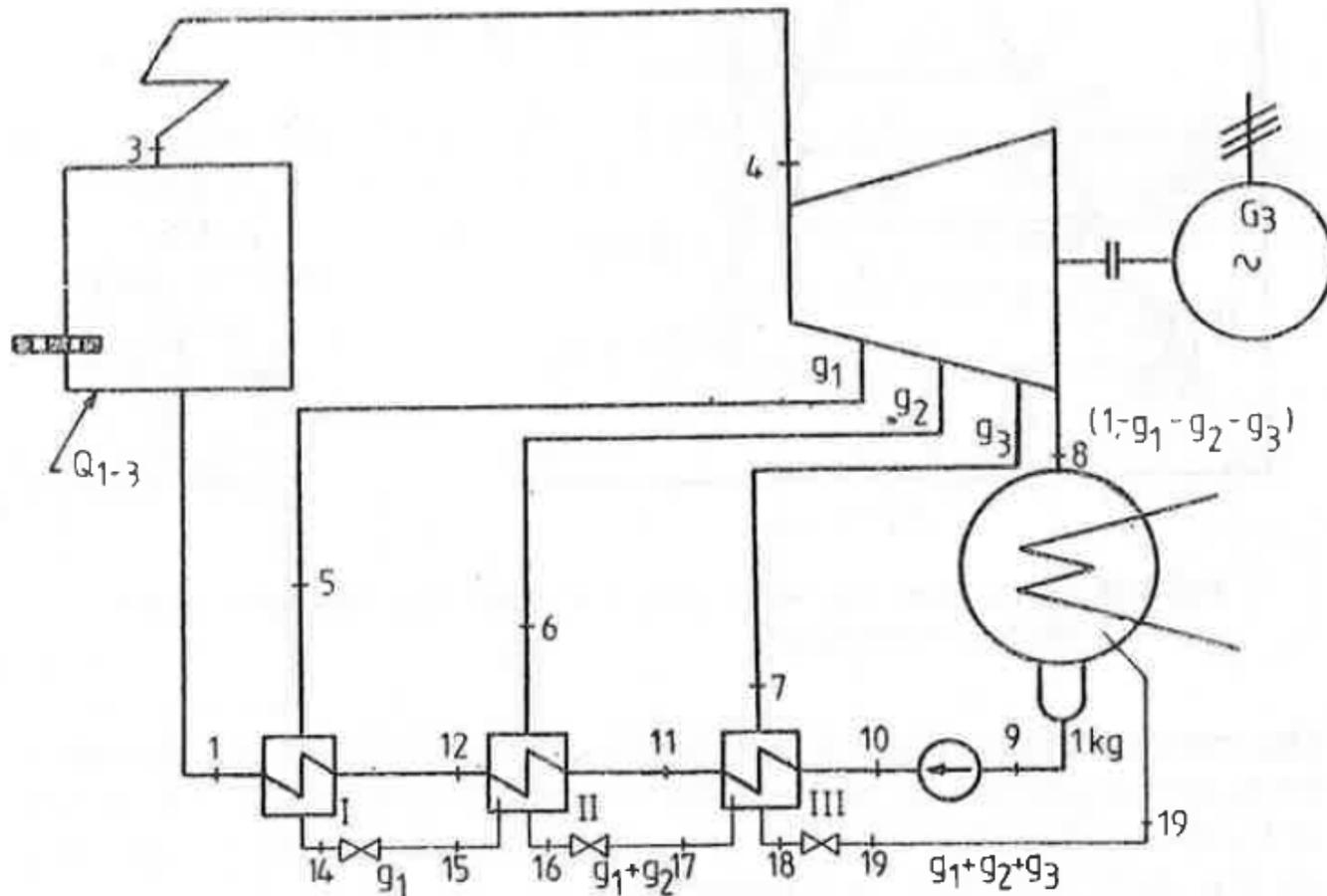
II

$$g_2(h_6 - h_{13}) = (1 - g_1 - g_2)(h_{13} - h_{11})$$

III

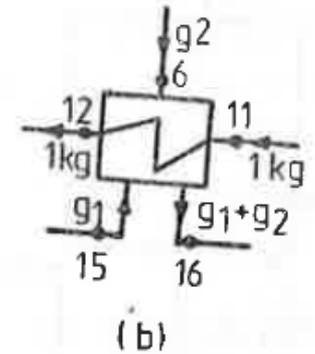
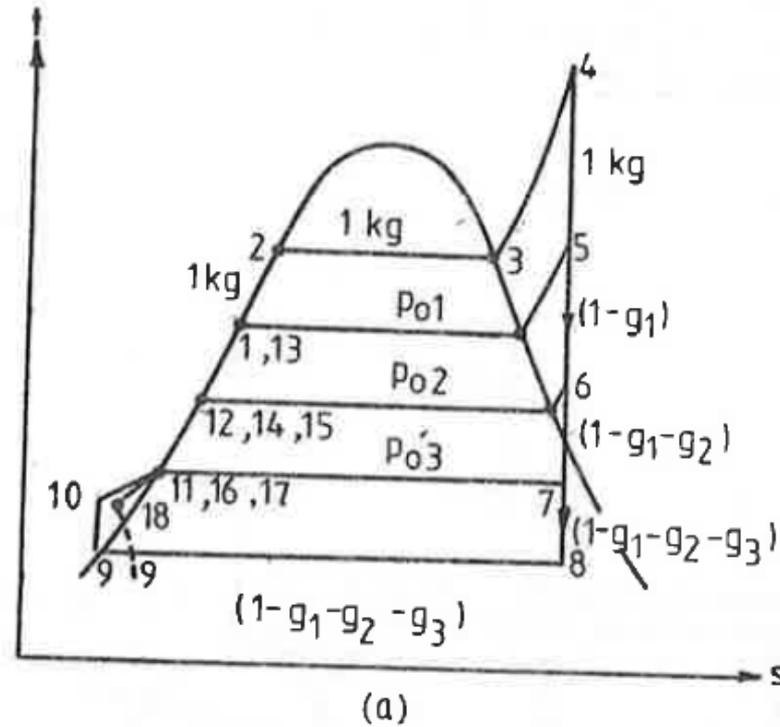
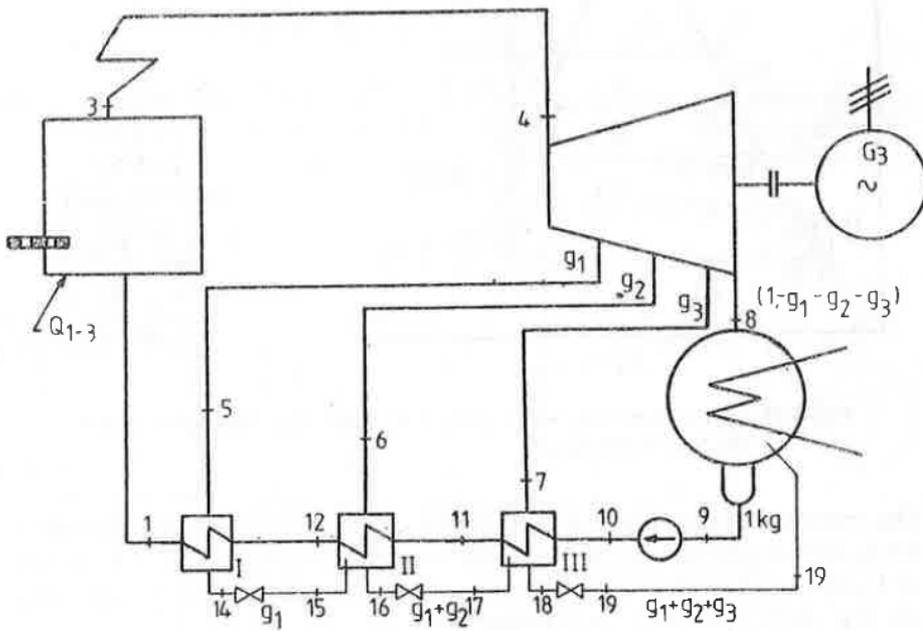
$$g_3(h_7 - h_{11}) = (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_{11} - h_9)$$

# Ciclo regenerativo com sistema de aquecimento em cascata



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

com  $g =$  fração mássica



## b) Sistema em Cascata

$$\omega_t = (h_4 - h_5) + (1 - g_1)(h_5 - h_6) + (1 - g_1 - g_2)(h_6 - h_7) + (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_7 - h_8)$$

$$q_c = h_4 - h_1 \quad \omega_B = (p_2 - p_1) v$$

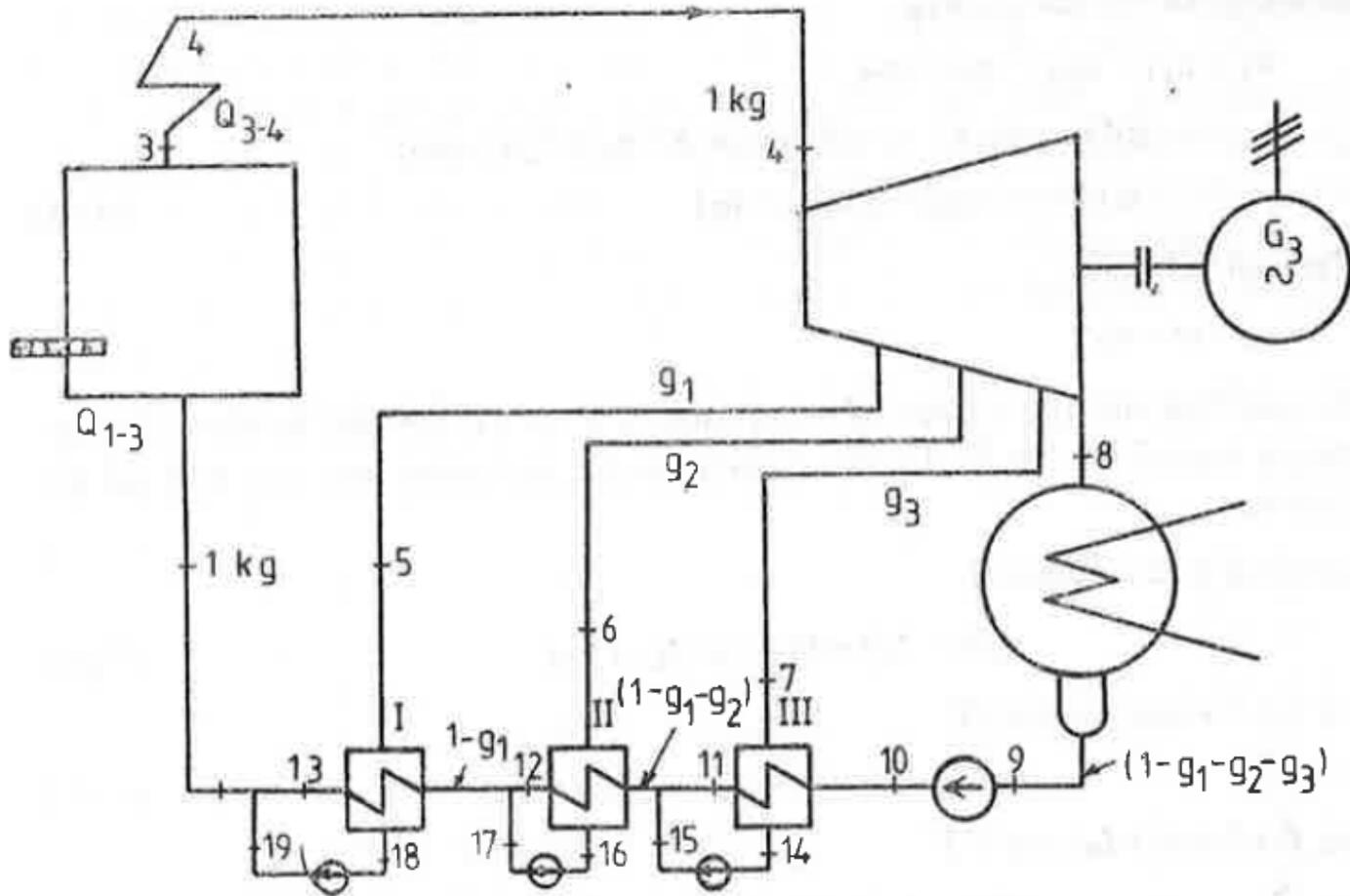
## Aquecedores de Água

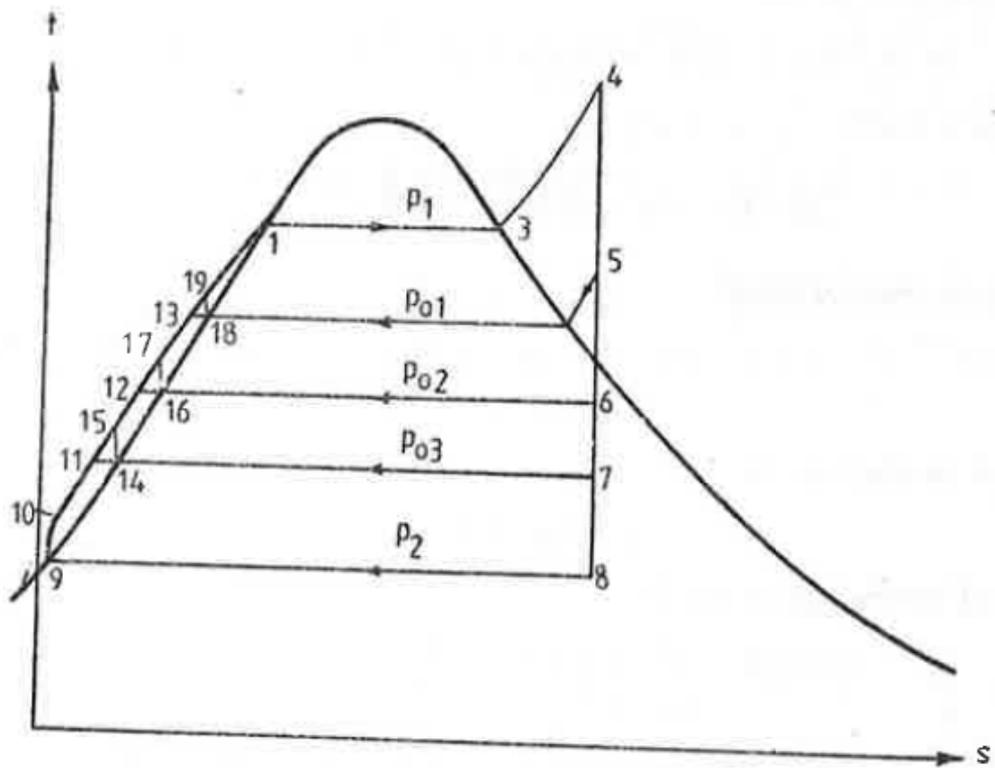
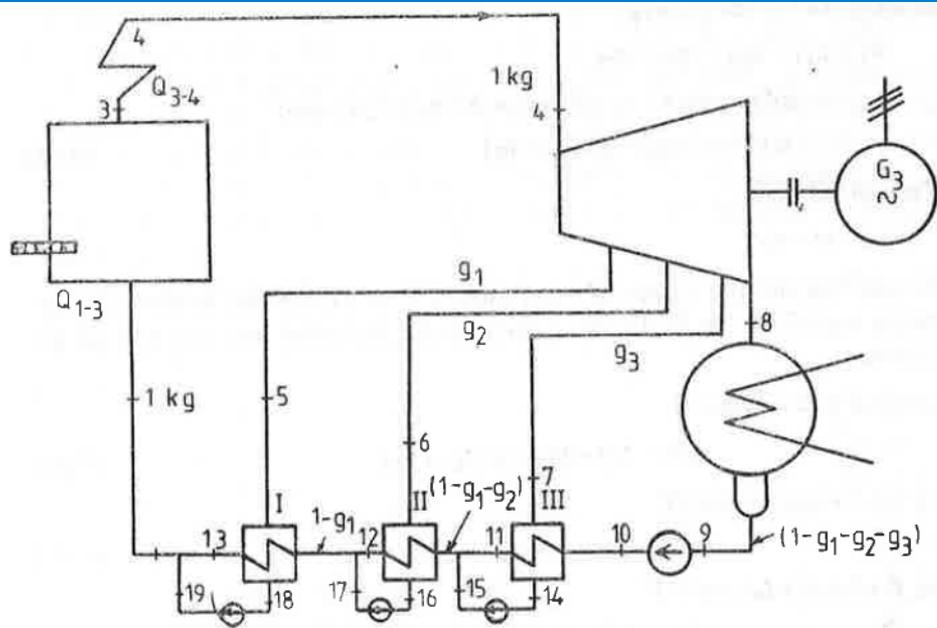
$$\text{I} \quad (h_1 - h_{12}) = g_1 (h_5 - h_{14})$$

$$\text{II} \quad g_2 h_6 + h_{11} + g_1 h_{15} = h_{12} + (g_1 + g_2) h_{16}$$

$$\text{III} \quad g_3 h_7 + h_{10} + (g_1 + g_2) h_{17} = h_{11} + (g_1 + g_2 + g_3) h_{18}$$

# Ciclo regenerativo com método de aquecimento com bomba de drenagem





c) Sistema com Bomba de Drenagem

$$\omega_t = (h_4 - h_5) + (1 - g_1)(h_5 - h_6) + (1 - g_1 - g_2)(h_6 - h_7) + (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_7 - h_8)$$

$$\omega_B = U_a \left[ g_1(p_1 - p_{01}) + g_2(p_1 - p_{02}) + g_3(p_1 - p_{03}) + (1 - g_1 - g_2 - g_3)(p_1 - p_2) \right]$$

### Aquecedores de Água

$$\text{I} \quad g_1(h_5 - h_{18}) = (1 - g_1)(h_{13} - h_{12})$$

$$\text{II} \quad g_2(h_6 - h_{16}) = (1 - g_1 - g_2)(h_{12} - h_{11})$$

$$\text{III} \quad g_3(h_7 - h_{14}) = (1 - g_1 - g_2 - g_3)(h_{11} - h_{10})$$

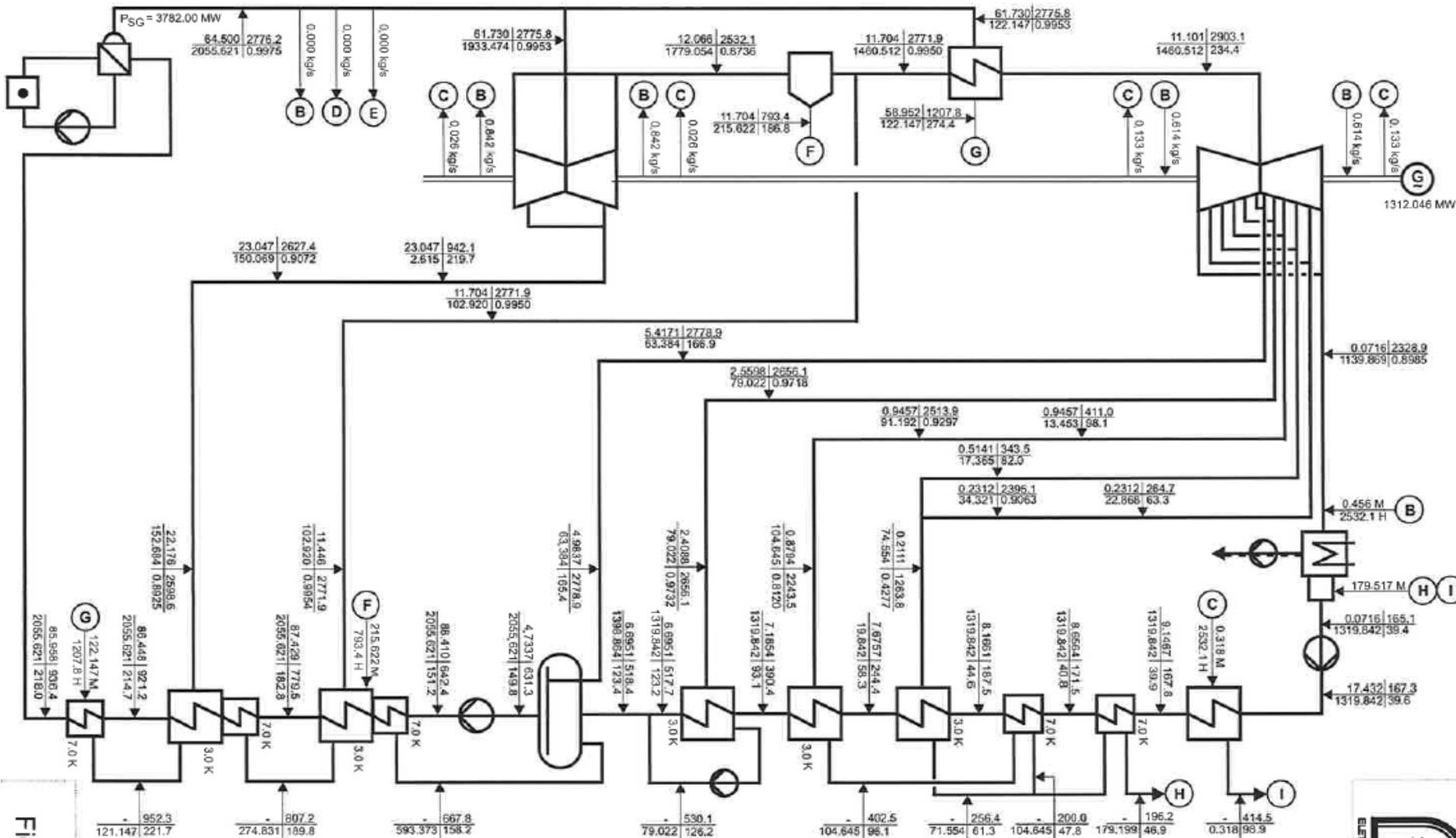


Fig. 5.1

M FLUXO DE MASSA kg/s  
 H ENTALPIA kJ / kg  
 BAR | kJ / kg  
 kg / s°C (x)

**DIAGRAMA DE BALANÇO TÉRMICO;**  
**POTÊNCIA DO REATOR 100 % = 3765.0 MW**

- (E) VAPOR DE APOIO PARA O TANQUE DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO
- (D) VAPOR DE APOIO PARA O PRAQUECEDOR DE AP AS





## CICLO COM PRESSÃO SUPERCRÍTICA

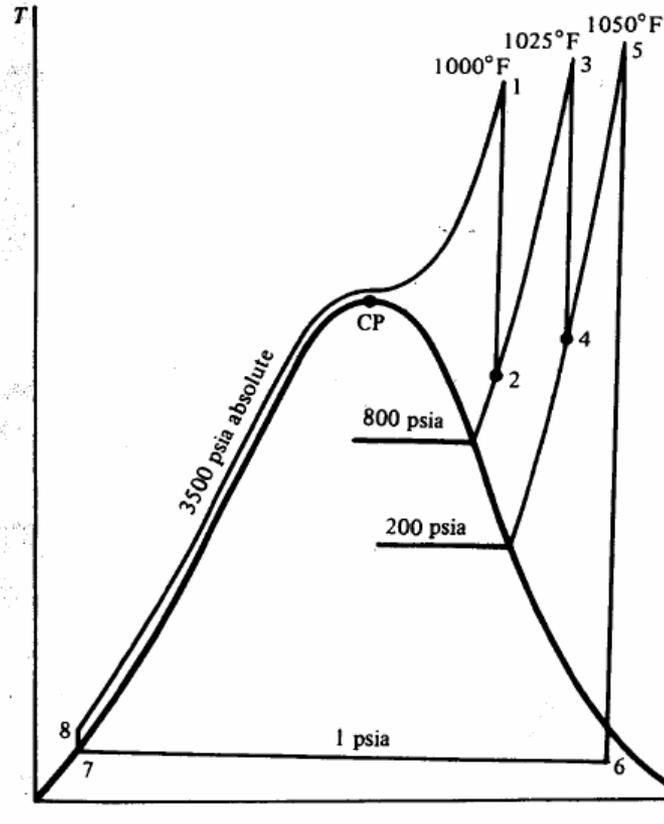


Diagrama T – s de um ciclo vapor supercrítico ideal com dois reaquecimentos.

## 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  $T_e = 15\text{ °C}$  e  $T_s = 35\text{ °C}$ .
- 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  $T = 535$  °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.