



CAPÍTULO 8 – SISTEMAS DE POTÊNCIA A VAPOR

DISCIPLINA: TERMODINÂMICA II

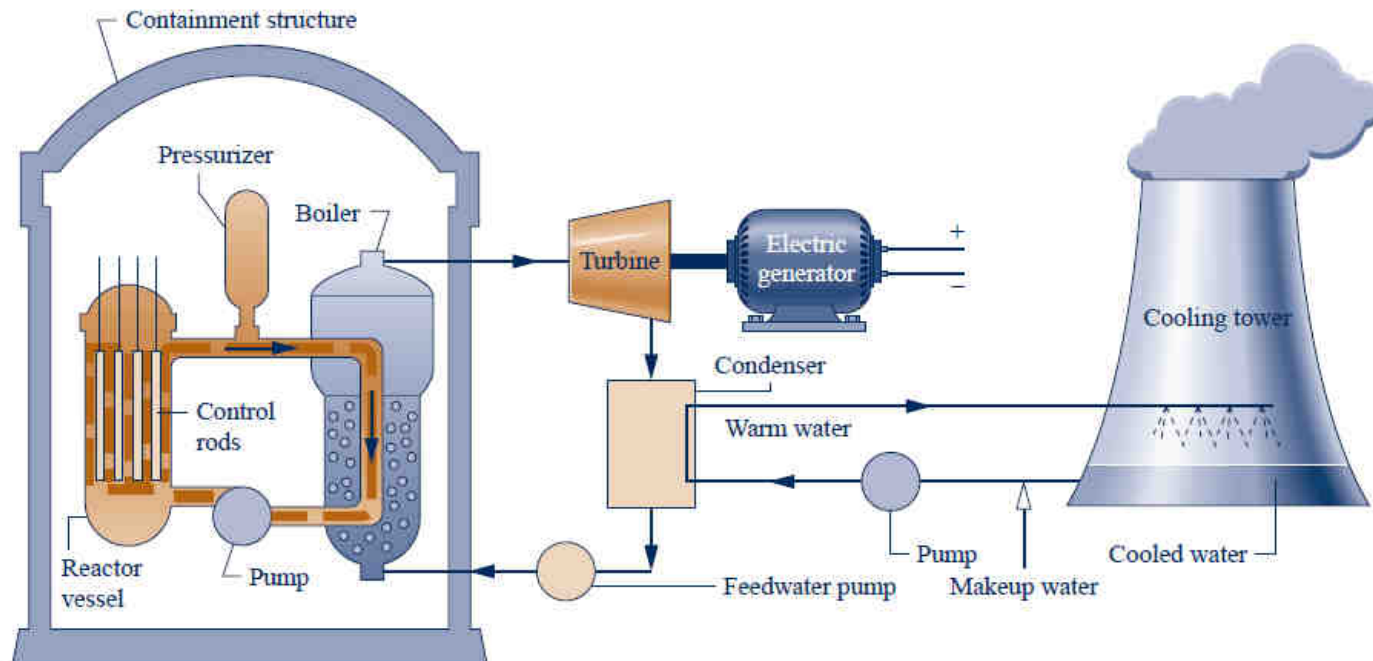
PROF. DR. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

INTRODUÇÃO À GERAÇÃO DE POTÊNCIA

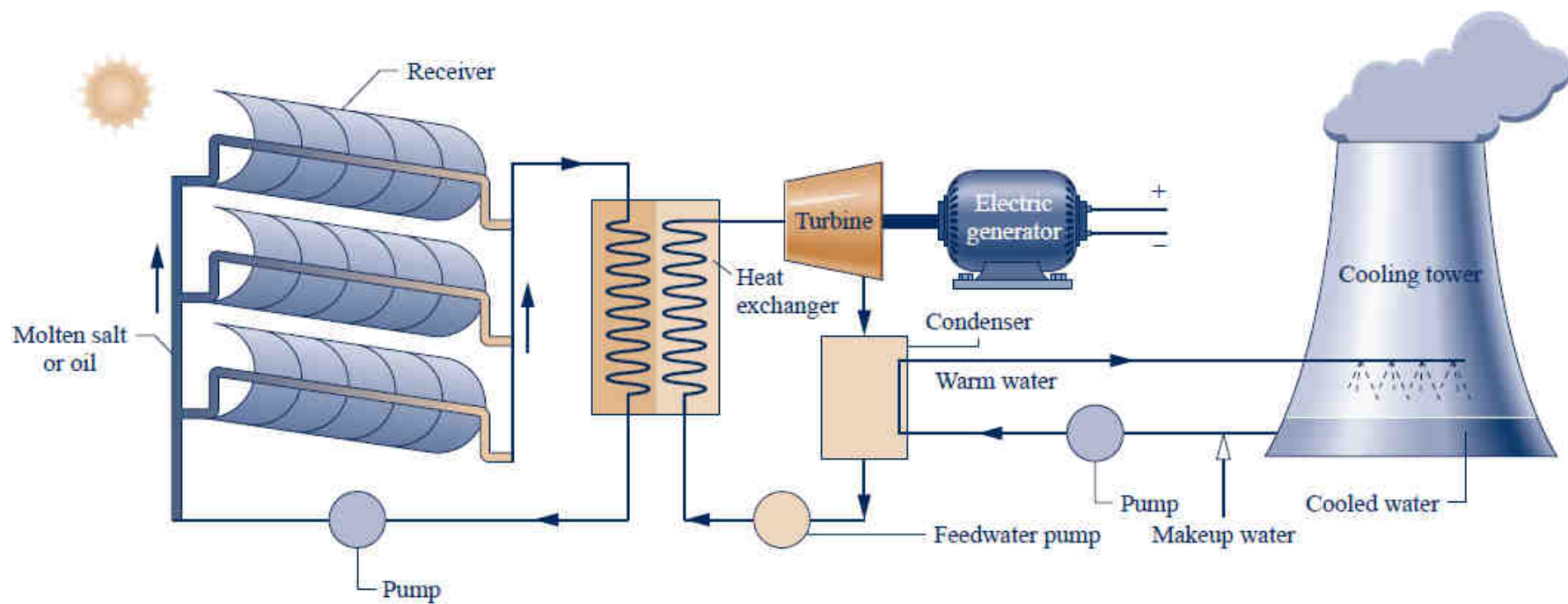
- Um desafio de engenharia é atender com responsabilidade às necessidades de energia a nível nacional e mundial.
- Esse desafio está relacionado a diminuição das fontes renováveis de energia, nos efeitos globais das mudanças climáticas e no crescimento populacional.
- Serão descritos alguns dos arranjos práticos empregados na produção de energia e ilustra-se como uma determinada planta de potência pode ser modelada termodinamicamente.
- Esse tópico diz respeito à produção de potência líquida a partir de um combustível fóssil (carvão mineral, petróleo e gás natural), nuclear ou de energia solar, na qual o fluido de trabalho é alternadamente vaporizado e condensado.
- Sugestão de leitura: páginas 334 a 339

8.1 – INTRODUÇÃO ÀS USINAS DE POTÊNCIA A VAPOR

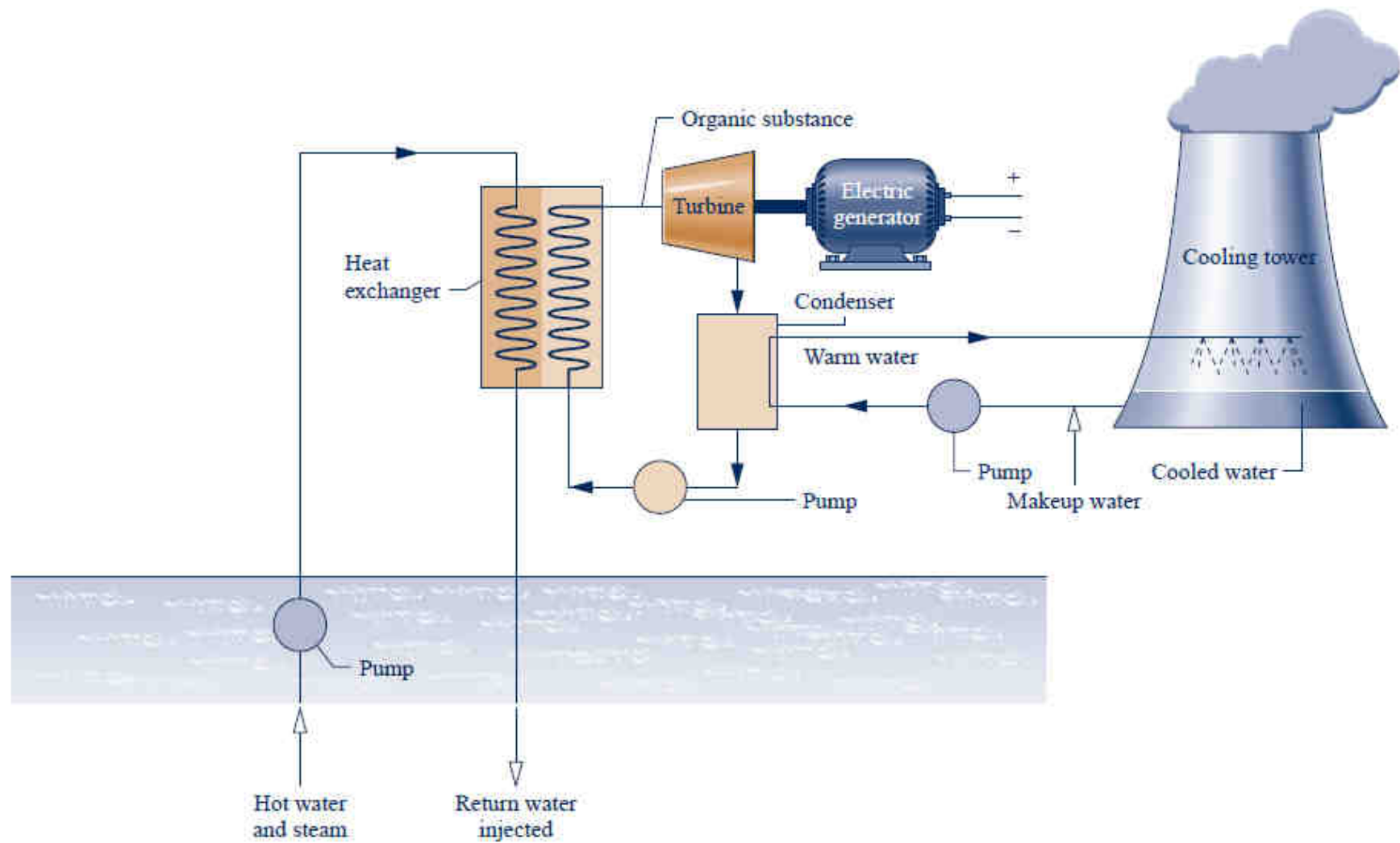
- Seis tipos de usinas usualmente são modeladas pelo ciclo Rankine: carvão, combustível nuclear, derivados do petróleo, biomassa, geotérmica, energia solar. O ciclo Rankine é o modelo básico para essas usinas.



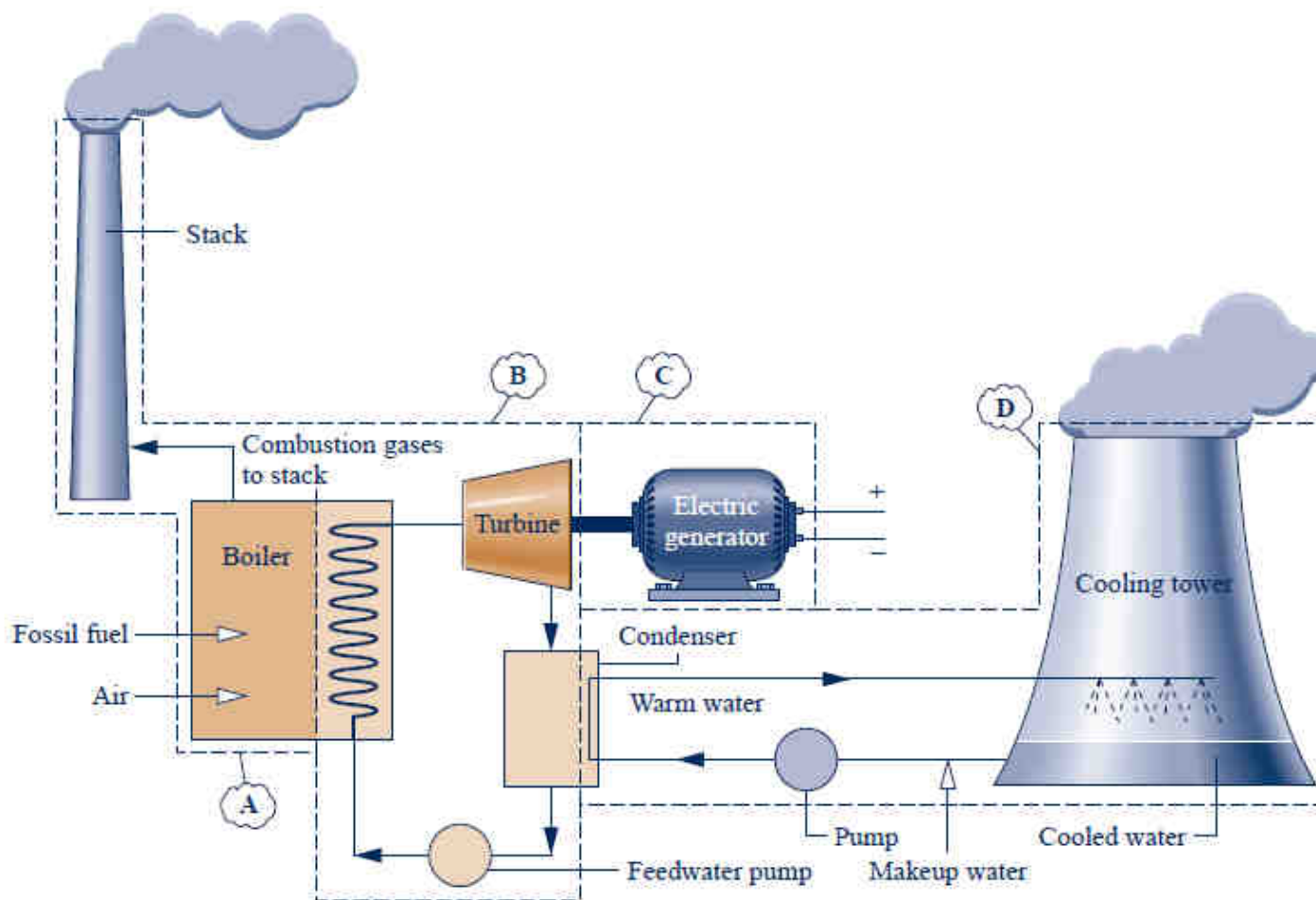
PLANTA DE POTÊNCIA A VAPOR ACIONADA POR REATOR NUCLEAR



PLANTA DE POTÊNCIA A VAPOR MOVIDA A ENERGIA TÉRMICA SOLAR



PLANTA DE POTÊNCIA A VAPOR GEOTÉRMICA



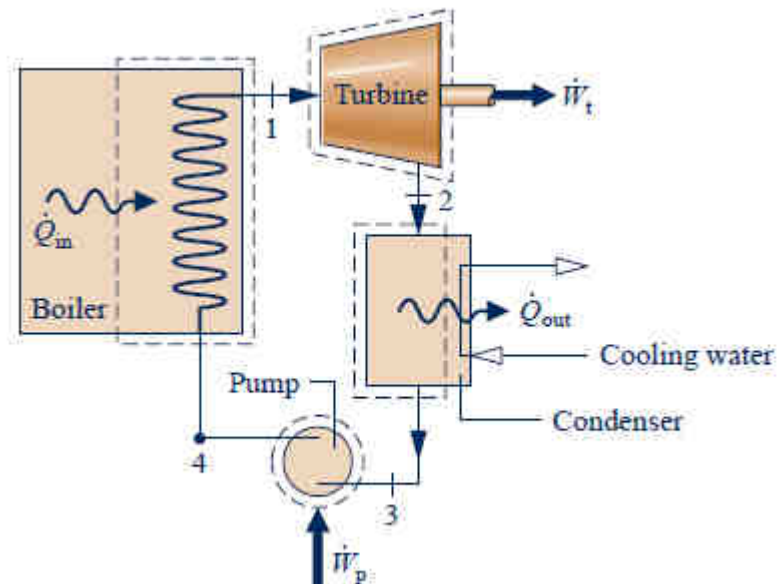
PLANTA DE POTÊNCIA A VAPOR MOVIDA A COMBUSTÍVEL FÓSSIL

- **SUBSISTEMA A:** Fornecimento de energia necessário para vaporizar a água que passa através da caldeira.
- **SUBSISTEMA B:** Produção de potência líquida.
- **SUBSISTEMA C:** Conversão de energia mecânica em energia elétrica.
- **SUBSISTEMA D:** Circuito da água de arrefecimento.

8.2 – CICLO RANKINE

- Ciclo termodinâmico que modela o subsistema B.
- O subsistema B pode ser vista em termos de **equipamentos individuais** ou de forma global como um **ciclo termodinâmico**.
- Para o ciclo termodinâmico, o **trabalho líquido produzido** por unidade de massa do fluido de trabalho deve ser igual ao **calor líquido adicionado** ao ciclo.

- A segunda lei estabelece que a eficiência térmica de um ciclo de potência seja inferior a 100%.
- Desprezando a transferência de calor para as vizinhanças, desprezando variações de energia cinética e potencial e considerando operação em regime permanente, os balanços de massa e de energia para cada volume de controle do subsistema A fornecem que:



$$\begin{aligned}\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} &= h_1 - h_2 \\ \frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}} &= h_2 - h_3 \\ \frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} &= h_4 - h_3 \\ \frac{\dot{Q}_{ent}}{\dot{m}} &= h_1 - h_4\end{aligned}$$

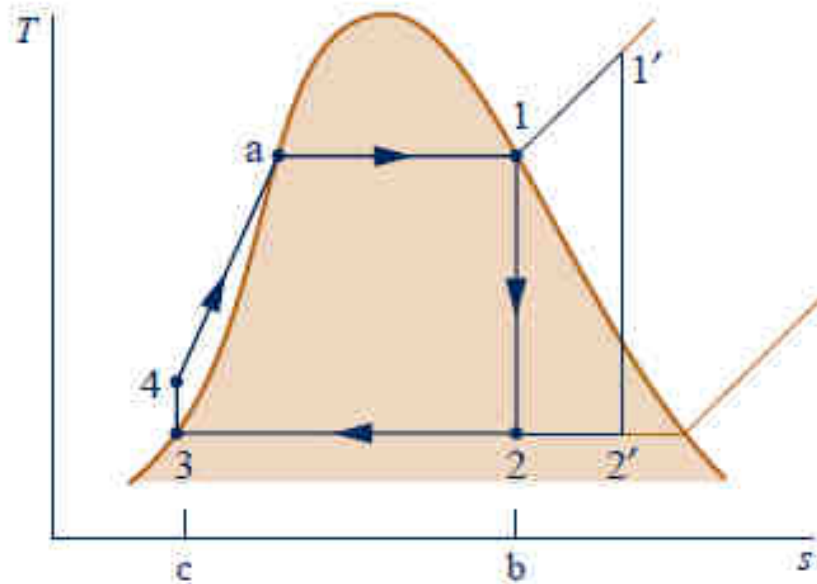
- **EFICIÊNCIA TÉRMICA:** mede o percentual através do qual a energia é fornecida ao fluido de trabalho passando através da caldeira é convertida em trabalho líquido disponível.

$$\eta = \frac{\dot{W}_t / \dot{m} - \dot{W}_b / \dot{m}}{\dot{Q}_{ent} / \dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} = 1 - \left(\frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \right)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{ent} / \dot{m} - \dot{Q}_{sai} / \dot{m}}{\dot{Q}_{ent} / \dot{m}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{sai} / \dot{m}}{\dot{Q}_{ent} / \dot{m}} = 1 - \left(\frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \right)$$

- **RAZÃO DE TRABALHO REVERSO:** razão entre o trabalho entregue a bomba e o trabalho desenvolvido pela turbina.

$$bwr = \frac{\dot{W}_b / \dot{m}}{\dot{W}_t / \dot{m}} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)}$$



CICLO DE RANKINE IDEAL

Expressão alternativa para o trabalho da bomba ideal:

$$\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} \right)_s \approx v_3(p_4 - p_3)$$

PROCESSO 1-2: expansão isoentrópica do fluido de trabalho através da turbina de vapor saturado até a pressão do condensador.

PROCESSO 2-3: transferência de calor do fluido de trabalho à medida que ele esco a pressão constante através do condensador com líquido saturado no estado 3.

PROCESSO 3-4: compressão isoentrópica na bomba até o estado 4 na região de líquido comprimido.

PROCESSO 4-1: transferência de calor para o fluido de trabalho à medida que ele esco a pressão constante através da caldeira para completar o ciclo.

EFEITOS DAS PRESSÕES DA CALDEIRA E DO CONDENSADOR

- Transferência de calor para o fluido de trabalho por unidade de massa que escoia através da caldeira:

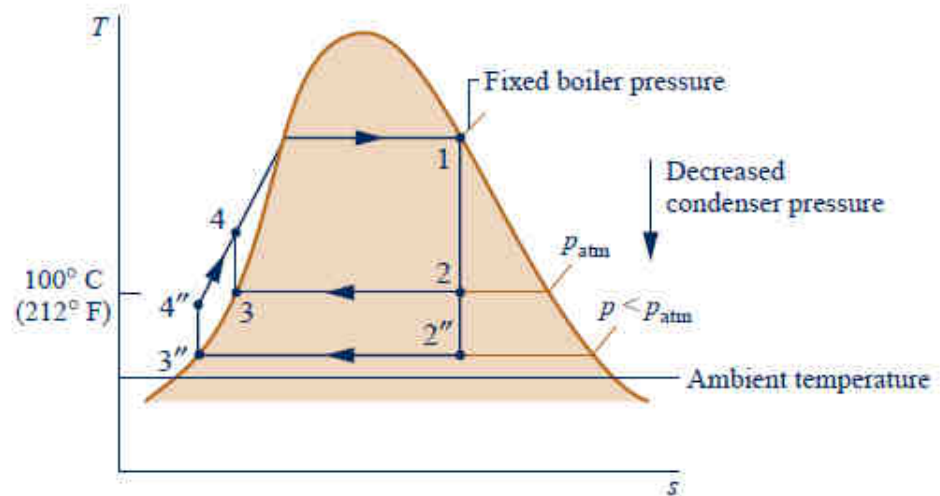
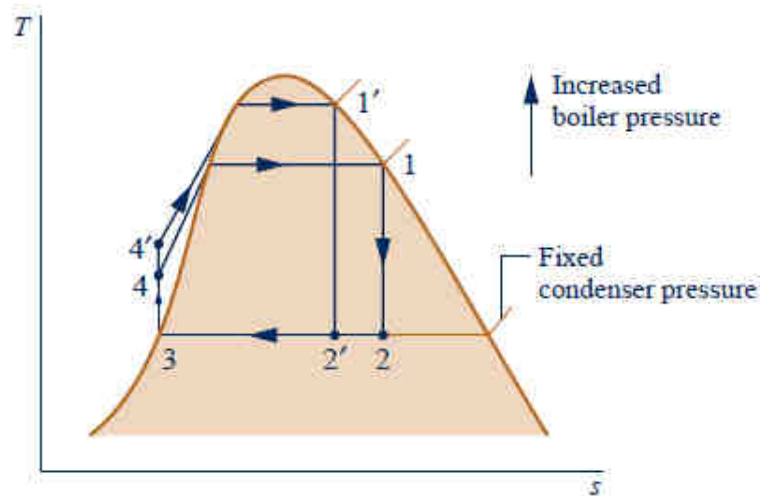
$$\frac{\dot{Q}_{ent}}{\dot{m}} = \int_4^1 T ds = \text{área } 1-b-c-4-a-1 = \bar{T}_{ent}(s_1 - s_4)$$

- Transferência de calor do fluido de trabalho por unidade de massa que passa escoia do condensador:

$$\frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}} = \int_2^3 T ds = \text{área } 2-b-c-3-2 = T_{sai}(s_2 - s_3) = T_{sai}(s_1 - s_4)$$

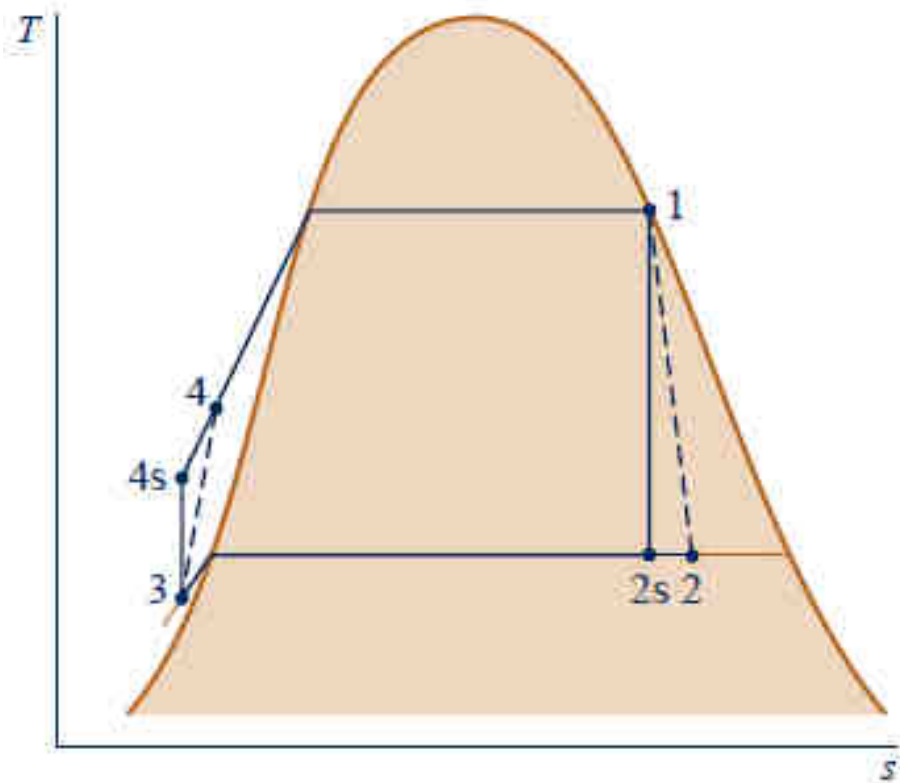
- Eficiência térmica: $\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{sai}/\dot{m}}{\dot{Q}_{ent}/\dot{m}} = 1 - \frac{T_{sai}}{\bar{T}_{ent}}$

- η aumenta com o aumento de $\bar{T}_{ent}$ e/ou com a diminuição de T_{sai} .



- No primeiro caso, com o aumento da pressão na caldeira, mantendo a pressão no condensador constante, a temperatura média de adição de calor aumenta e dessa forma a eficiência térmica aumenta.
- No segundo caso, com a diminuição da pressão no condensador, mantendo a pressão na caldeira constante, a temperatura de rejeição de calor diminui e dessa forma a eficiência térmica aumenta.
- Observa-se uma **redução do título na saída da turbina**.

IRREVERSIBILIDADES E PERDAS PRINCIPAIS



TURBINA

$$\eta_t = \frac{(\dot{W}_t/\dot{m})}{(\dot{W}_t/\dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

BOMBA

$$\eta_b = \frac{(\dot{W}_b/\dot{m})_s}{(\dot{W}_b/\dot{m})} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

OUTROS DESVIOS DAS IDEALIZAÇÕES

- Processo de **combustão** na caldeira, na qual ocorre transferência de calor dos produtos quentes de combustão para o fluido de trabalho do ciclo.
- **Transferência de energia para a água de arrefecimento** quando o fluido de trabalho condensa.
- **Transferência de calor perdido** das superfícies externas dos componentes da instalação.
- **Queda de pressão** (perda de carga) no escoamento na caldeira, condensador e tubos que conectam os componentes.
- Efeitos adicionais de **atrito** no interior de cada equipamento do ciclo.