



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

## Aula 12 – Ciclos de vapor

**Carlos A. Santos Silva**

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

[carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt](mailto:carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt)



# Sumário

- Revisão de conceitos
- Ciclos a vapor
- Ciclo de Rankine
- Otimização do ciclo de Rankine

# REVISÃO DE CONCEITOS

# Entalpia (Aula 5)

- Quantidade de energia que é possível remover de um sistema sob a forma de calor e trabalho

$$H = U + PV$$

$$h = u + Pv$$

# 1ª Lei da Termodinâmica para sistemas abertos (Aula 6)

- Para sistemas abertos, o balanço de energia é dado pela expressão

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) - \sum \dot{m}_{in} \left( h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right)$$

- *Desprezando a variação de energia cinética e potencial e assumindo regime estacionário temos*

$$\dot{q} - \dot{w} = \dot{m} (h_{out} - h_{in}) \text{ (J/s)}$$

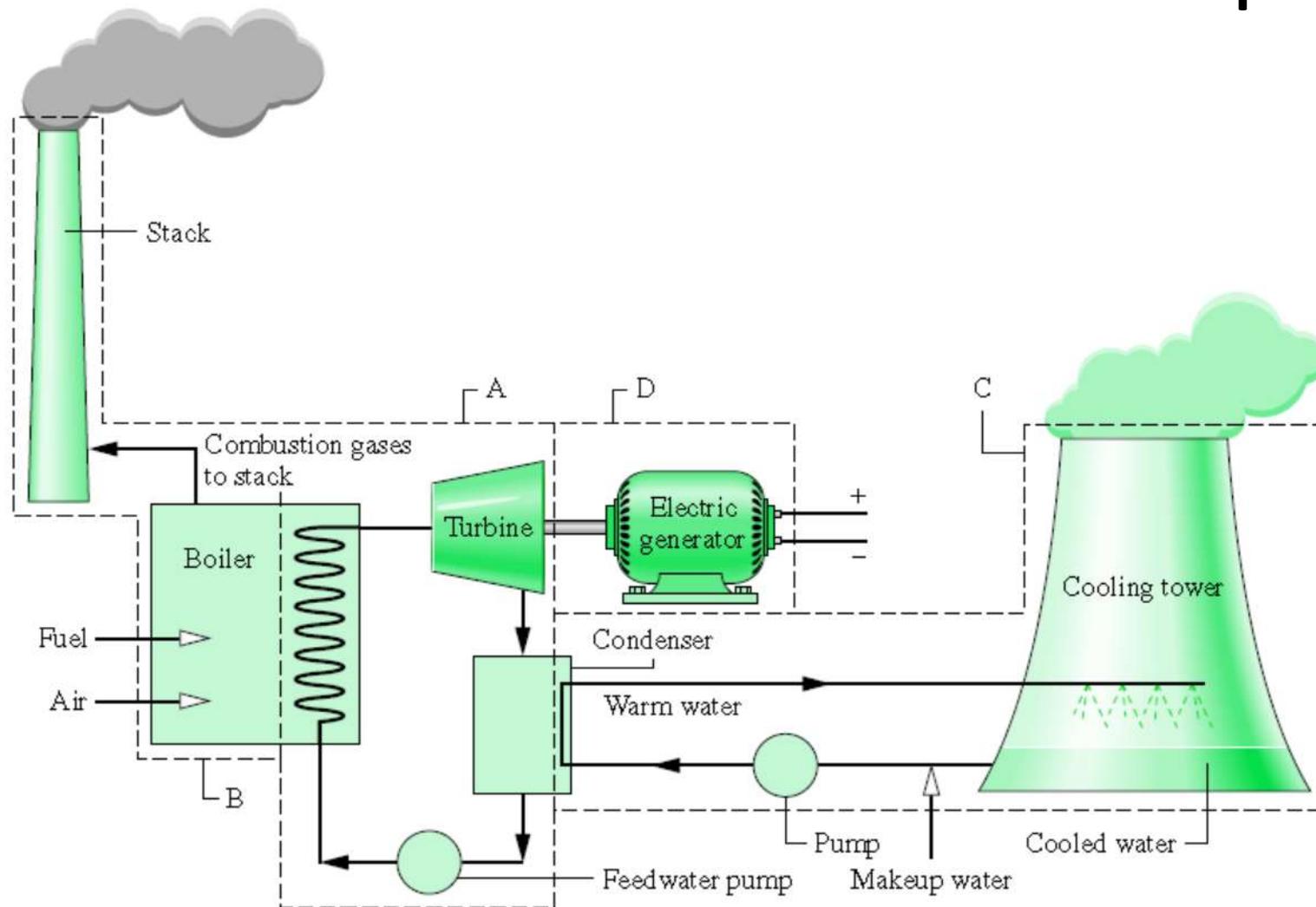
$$q - w = h_{out} - h_{in} \text{ (J/kg)}$$

# CICLO A VAPOR

# Definição

- Ciclo termodinâmico onde o fluido de trabalho é evaporado e condensado alternadamente
  - É um ciclo de máquina térmica (produz trabalho)
  - Utilizado nas centrais de geração de eletricidade
    - Carvão, Fuel, Geotérmico, Nuclear
  - Em geral, o fluido de trabalho é água

# Central eléctrica com ciclo de vapor



# Componentes

- Máquina Térmica (A) – converte calor em trabalho
- Caldeira (B) – fornecer energia para evaporar a água
  - Em geral é através do fornecimento de calor pela queima de combustível
  - Corresponde ao Reservatório Quente!
- Sistema de arrefecimento (C) – retira energia para condensar a água
  - Corresponde ao Reservatório Frio!
  - Pode ser um recurso natural (rio, mar) ou uma torre de arrefecimento
- Gerador (D) – produz eletricidade para a rede

# Centrais com ciclo de vapor em Portugal



[Pego \(Carvão, 576MW\)](#)



[Sines \(Carvão, 1180 MW\)](#)



[São Miguel \(Geotérmica, 24 MW\)](#)



[Setúbal \(Fuel, 946 MW\)](#)

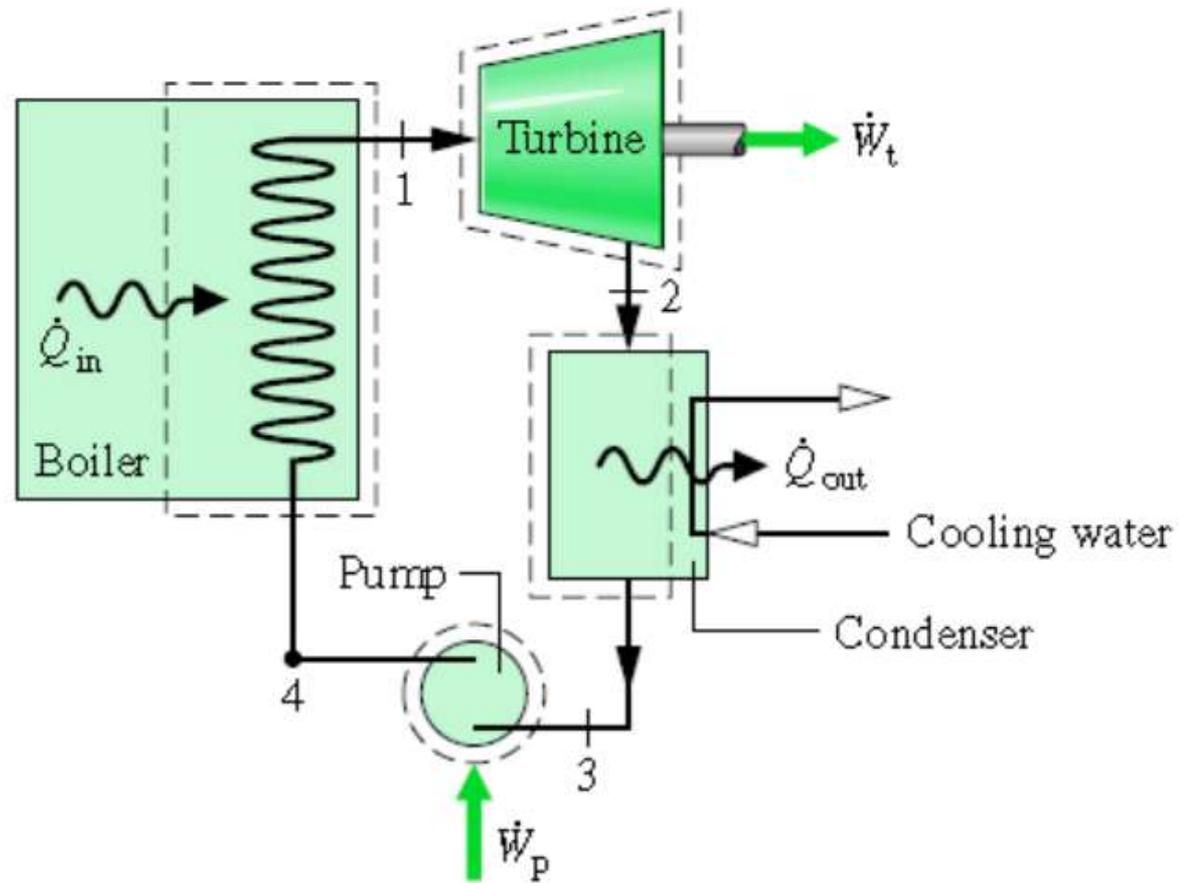
# CICLO DE RANKINE



*William Rankine*

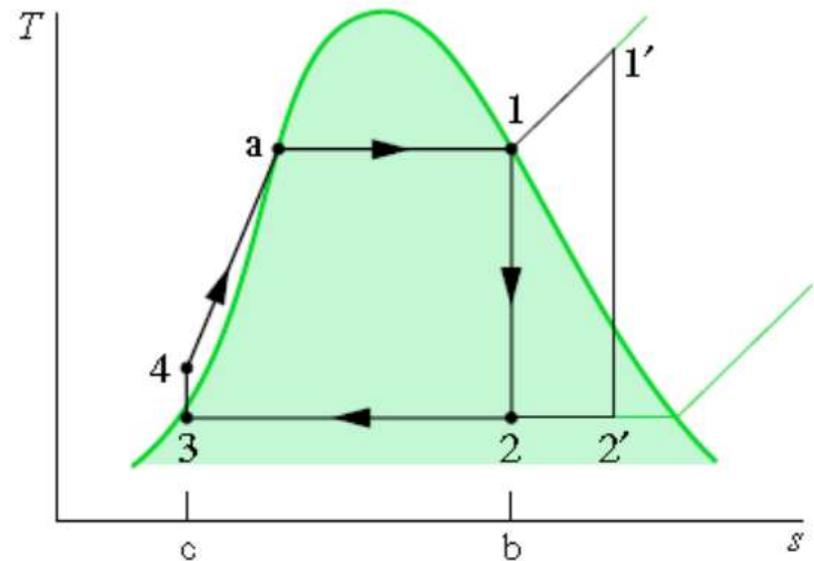
# Componentes do ciclo de Rankine

- Bomba
- Evaporador
- Turbina
- Condensador



# Ciclo de Rankine ideal

- $1 \rightarrow 2$ : expansão isentrópica
- $2 \rightarrow 3$ : perda de calor
- $3 \rightarrow 4$ : compressão isentrópica
- $4 \rightarrow 1$ : absorção de calor



# Turbina (1→2)

- À saída do evaporador, a água está no estado de vapor saturado a alta pressão
- O vapor é expandido na turbina
  - Produz trabalho
  - Desprezam-se as perdas de calor
  - Desprezam-se a variação de energia cinética e potencial
- À saída da turbina, a água em mudança de fase, entra no condensador a baixa pressão

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \xleftrightarrow[\dot{Q}=0]{\dot{W}} \frac{\dot{W}}{\dot{m}} \approx h_1 - h_2$$

# Condensador (2→3)

- A água em mudança de fase, a baixa pressão, entra no condensador e perde calor para o sistema de arrefecimento (torre de arrefecimento, rio, etc)
  - Não há trocas de trabalho
  - Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial  $\frac{Q_{out}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \xleftrightarrow{W=0} \frac{Q_{out}}{\dot{m}} \approx h_3 - h_2$
- Ao deixar o condensador, a água está no estado líquido saturado
- Considera-se que se faz sempre em mudança de fase, logo a pressão e temperatura constantes

# Bomba (3→4)

- Água no estado líquido saturado que sai do condensador a baixa pressão é bombeada a alta pressão para o evaporador (caldeira)

– É consumido trabalho

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \xleftrightarrow{\dot{Q}=0} \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

– Desprezam-se as perdas de calor com o exterior

– Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial

– Se considerarmos que o processo é internamente reversível

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} \approx v_3(p_4 - p_3)$$

# Evaporador (4→1)

- A água a alta pressão é evaporada do estado líquido até vapor saturado através do calor recebido na caldeira
  - Não há trocas de trabalho
  - Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial
- Aqui, parte do processo será em mudança de fase, mas não todo o processo (logo temperatura e pressão varia)

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \xleftrightarrow{W=0} \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} \approx h_1 - h_4$$

# Rendimento

- Rendimento máximo (Carnot)

$$\eta_{max} = \frac{W_{ciclo}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \iff \eta < 100\% \quad \eta_{max} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

- Rendimento do ciclo de Rankine

$$\eta = \frac{W_{1 \rightarrow 2} / \dot{m} - W_{3 \rightarrow 4} / \dot{m}}{Q_{4 \rightarrow 1} / \dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

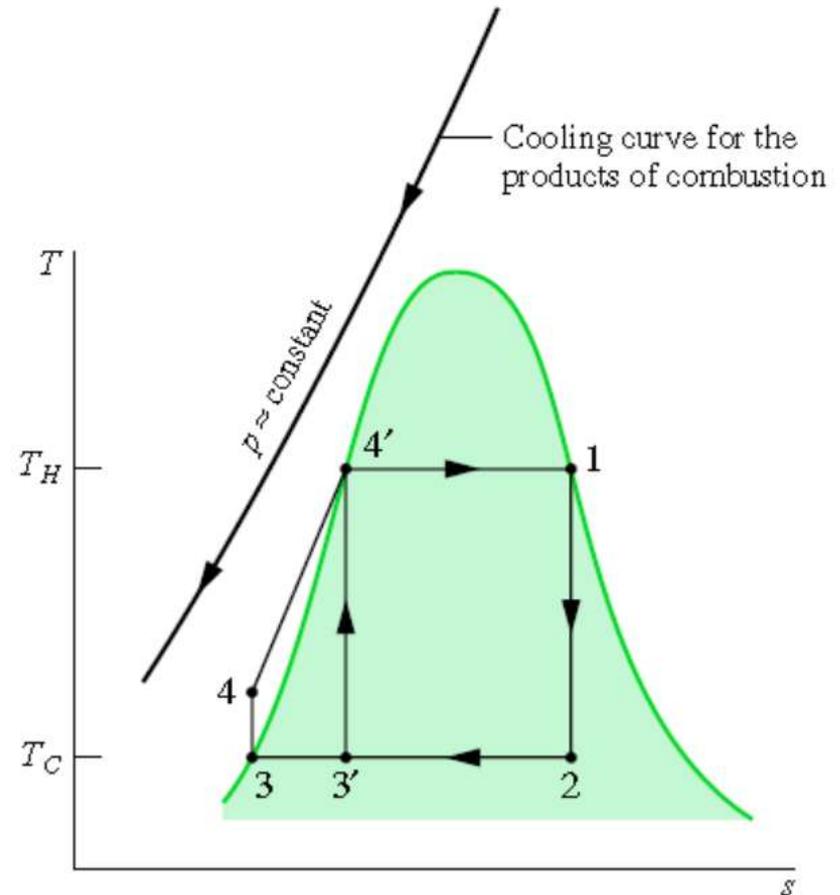
- Como num ciclo  $Q=W$   $\eta = \frac{Q_{4 \rightarrow 1} / \dot{m} - Q_{2 \rightarrow 3} / \dot{m}}{Q_{4 \rightarrow 1} / \dot{m}} = 1 - \frac{Q_{2 \rightarrow 3} / \dot{m}}{Q_{4 \rightarrow 1} / \dot{m}} = 1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

# Comparação com o ciclo de Carnot

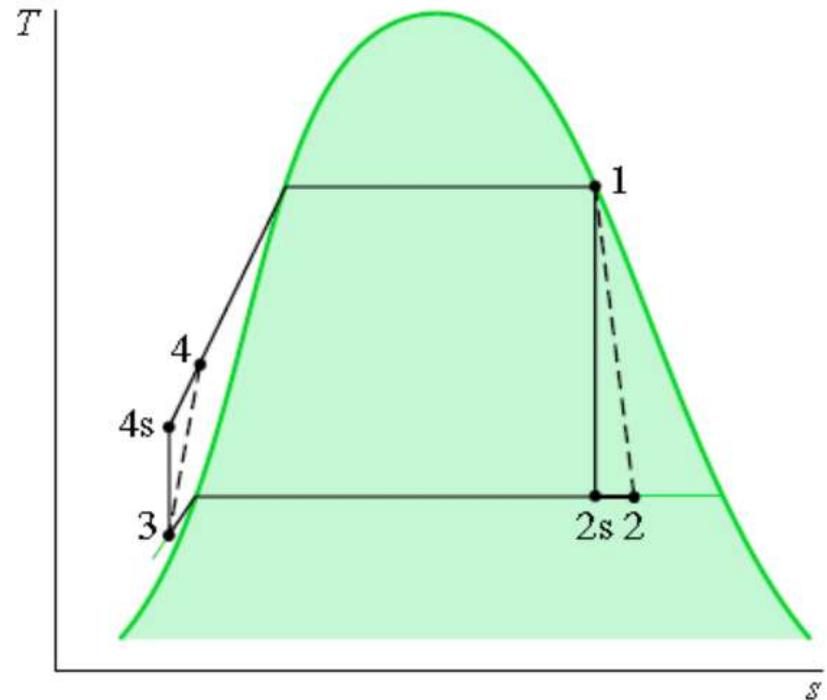
- O rendimento ideal do ciclo de Rankine é inferior ao de Carnot, porque a temperatura média da fonte quente é inferior no caso do ciclo de Rankine em relação ao ciclo de Carnot

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} > 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} = \eta_{ideal}$$



# Principais irreversibilidades internas

- A compressão na bomba e a expansão na turbina não são processos internamente reversíveis
  - Na prática, as expansões e compressões adiabáticas implicam o aumento de entropia



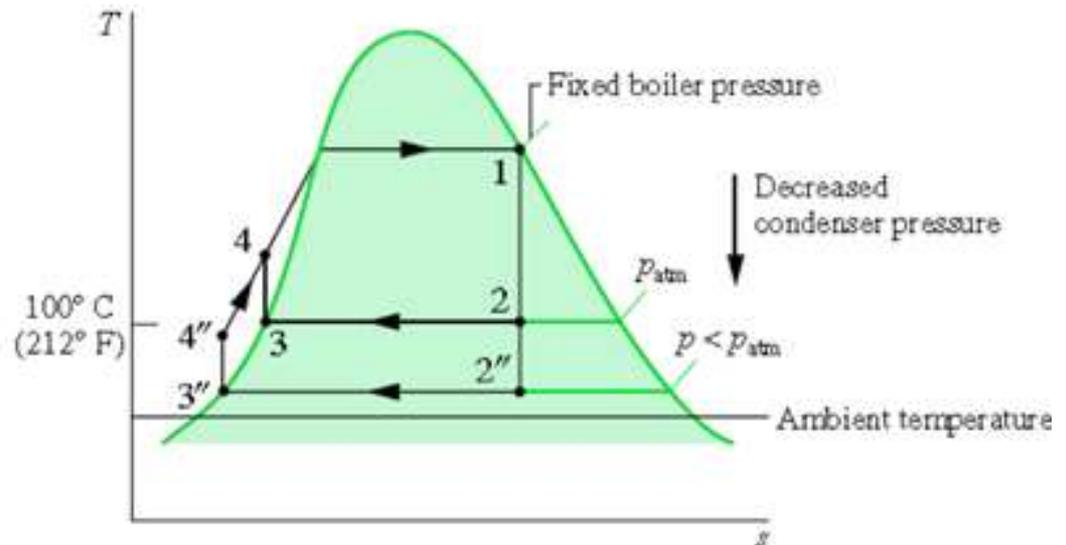
# OTIMIZAÇÃO



# Baixar a pressão à entrada do condensador

- Baixar a pressão à entrada do condensador vai diminuir a temperatura saída
  - Rendimento aumenta

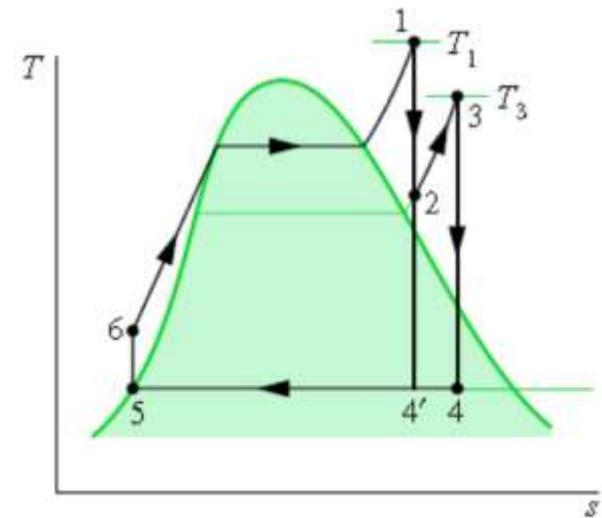
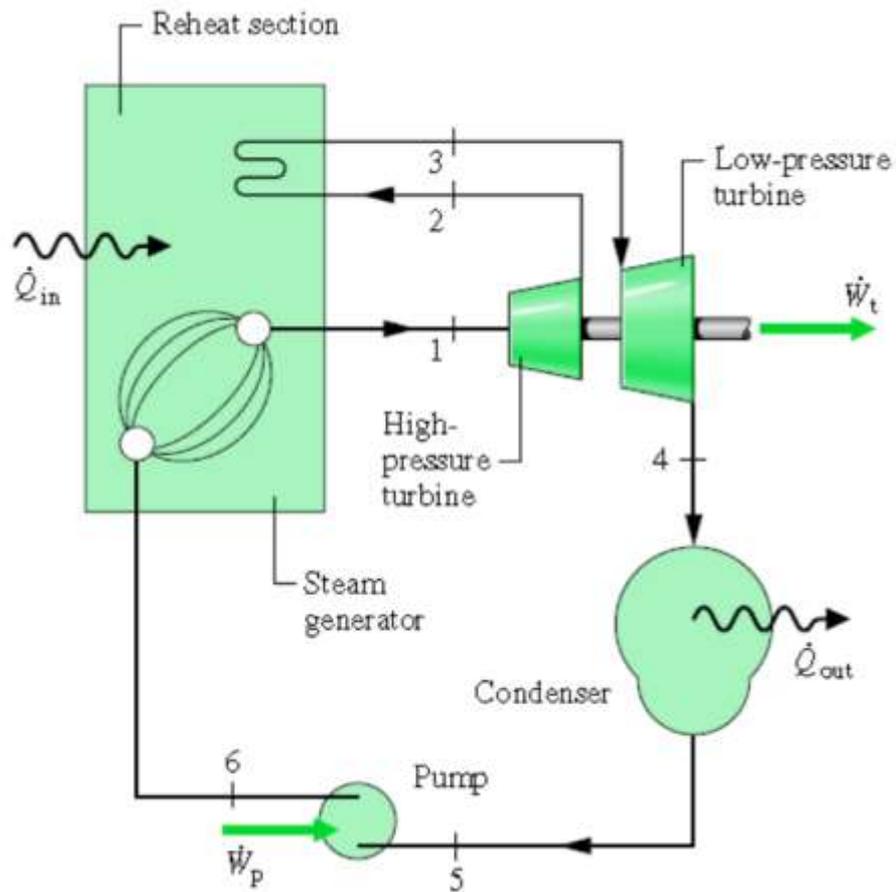
$$\eta = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$



# Ciclo com sobreaquecimento e reaquecimento

- Sobreaquecimento
  - Evaporar a água para além do estado de vapor saturado
  - Em vez de uma caldeira, temos um gerador de vapor
  - À saída da turbina, o título da mistura é maior, o que evita problemas na turbina
- Reaquecimento
  - A expansão na turbina é feita em duas etapas
  - No final da primeira etapa, o vapor volta ao gerador de vapor e é sobreaquecido novamente
  - À saída da turbina podemos ter vapor sobreaquecido

# Ciclo com sobreaquecimento e reaquecimento



# Ciclo com regeneração

- Regeneração
  - Aproveitar parte do vapor sobreaquecido e mistura-lo com a água já comprimida de forma ter liquido sobreaquecido que é comprimido outra vez
  - Evita que a evaporação da água seja feita toda sob a forma de trocas de calor, diminuindo assim a energia de entrada necessária
    - Contudo, o trabalho gerado na turbina é menor e o trabalho das bombas pode ser maior

# Ciclo com regeneração

