



Termodinâmica e Estrutura da Matéria

Aula 13 – Ciclos de gás

Carlos A. Santos Silva

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt



Sumário

- Revisão de conceitos
- Ciclos de gás
- Ciclo de Brayton
- Otimização do ciclo de Brayton

REVISÃO DE CONCEITOS

Entropia para gases perfeitos (Aula 9)

- Considerando que C_v e C_p constantes

$$\Delta s = \bar{C}_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$$\Delta s = \bar{C}_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

- Para C_v e C_p reais

$$\Delta s = s_2 - s_1 - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

Processos isentrópicos com ar (1)

- Para processos isentrópicos

$$0 = s_2 - s_1 - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$$s_2(T_2) = s_1(T_1) + R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$s_2(T_2) = s_1(T_1) + R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$p_2 = p_1 \exp \left(\frac{s_2(T_2) - s_1(T_1)}{R} \right)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\exp[(s_2(T_2)/R)]}{\exp[(s_1(T_1)/R)]}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}, s_1 = s_2 \text{ com ar}$$

Processos isentrópicos com ar (2)

- Para processos isentrópicos

$$0 = \bar{c}_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$$0 = \bar{c}_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [kJ/(kg K)]}$$

- Sabendo que para gases ideais

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad c_v = \frac{R}{k-1} \quad c_p = \frac{kR}{k-1}$$

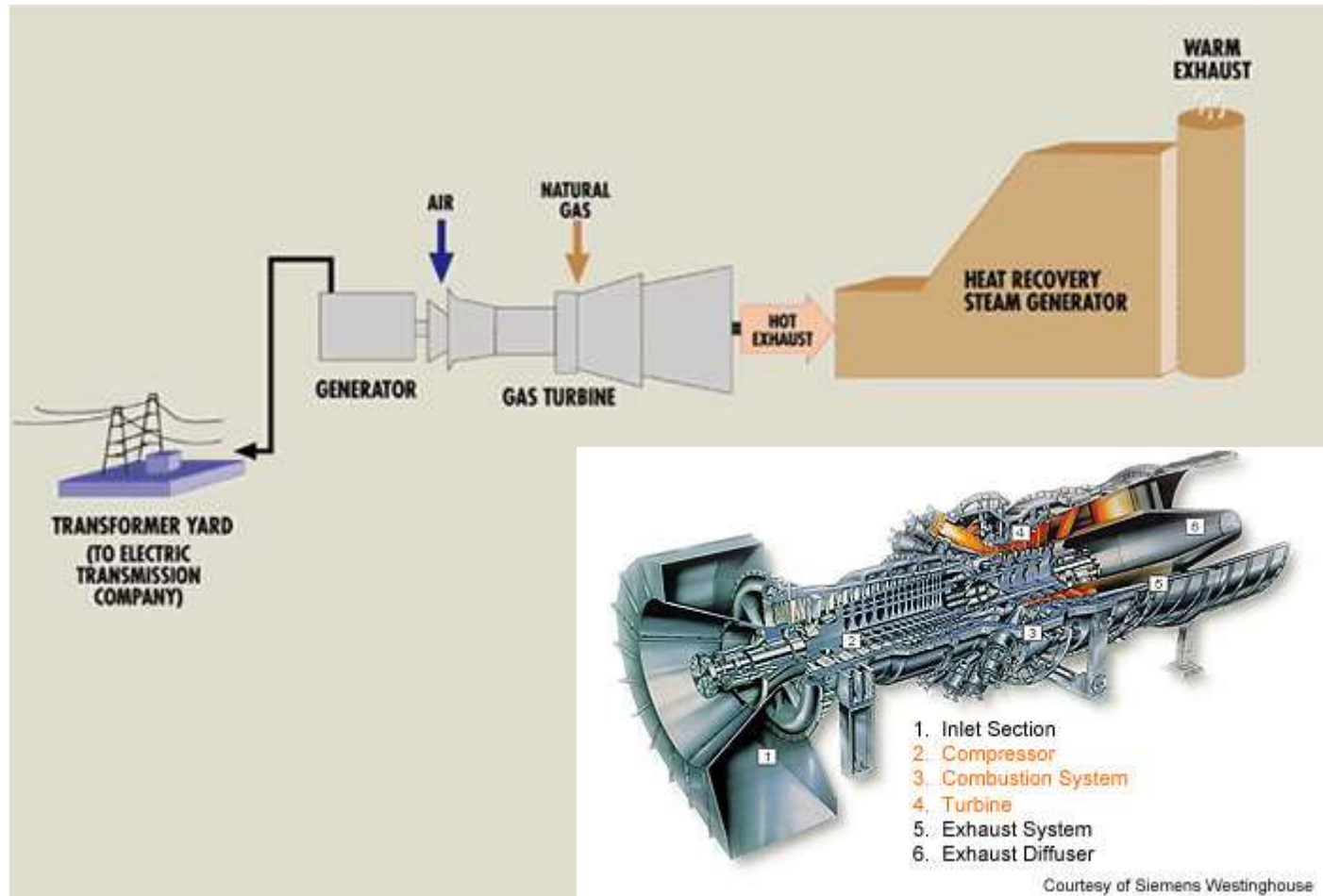
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, s_1 = s_2 \text{ e } k \text{ constante}$$

CICLO DE GÁS

Definição

- Ciclo termodinâmico onde o fluido de trabalho é sempre gás
 - Ciclos com turbinas a gás
 - Centrais de geração de energia elétrica
 - *Aviões, Navios, Comboios, Carros*
 - Motores de combustão interna
 - *Otto, Diesel, Stirling*

Central elétrica com ciclo de gás



Componentes

- Ciclo – converte calor em trabalho
- Câmara de combustão – fornecer energia para aquecer o gás
- Sistema de aproveitamento de calor - retira calor aos gases de combustão
 - Aplicações industriais (**co-geração**)
 - Geração de electricidade (**ciclo combinado** com ciclo de vapor)
- Gerador – produz electricidade para a rede

Centrais com ciclo de gás em Portugal



Tapada do Outeiro (Gás Natural, 990 MW)



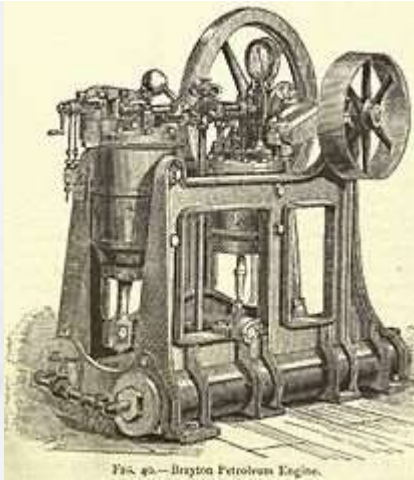
Lares (Ciclo Combinado, 862MW)



Carregado (Fuel+Gás, 710MW)



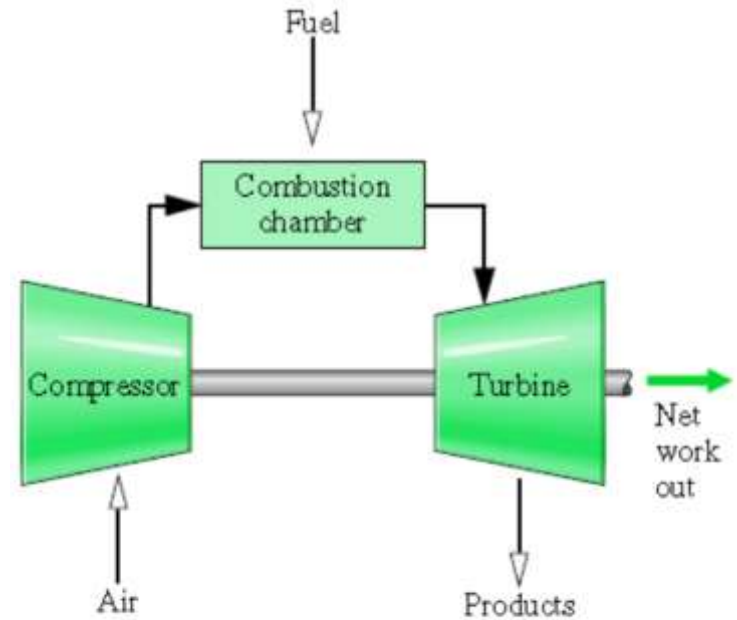
Ribatejo (Ciclo Combinado, 1176MW)



CICLO DE BRAYTON

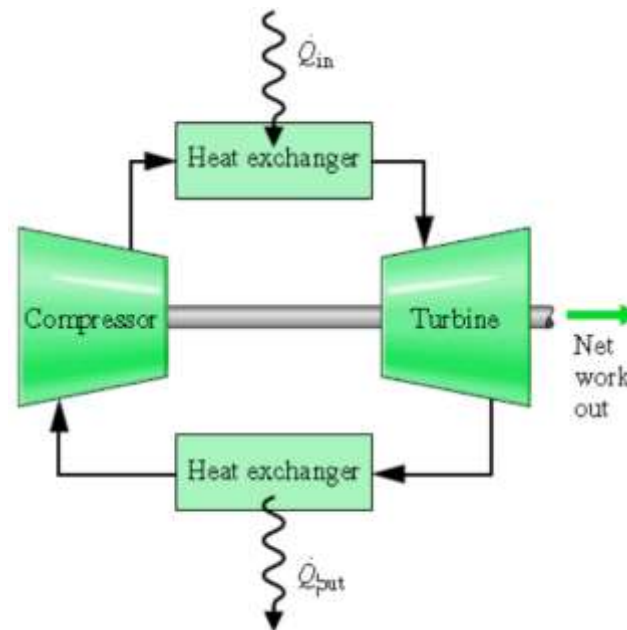
Componentes do ciclo de Brayton

- Compressor
- Câmara de Combustão
- Turbina



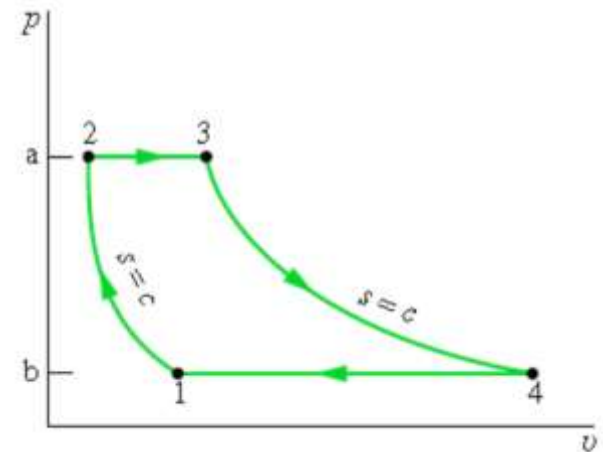
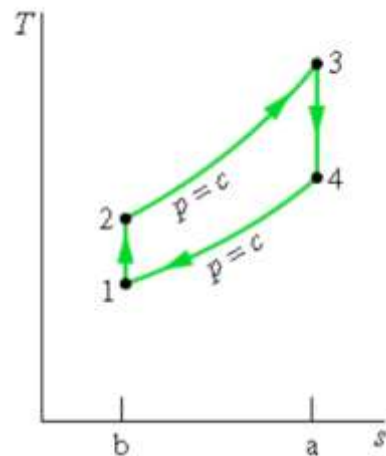
Ciclo de Brayton

- Em geral é um ciclo aberto
- Pode ser modelado como um ciclo fechado
 - Utilizando a análise Ar-padrão (ar como gás ideal)



Ciclo de Brayton ideal

- 1→2: compressão isentrópica
- 2→3: absorção de calor a pressão constante
- 3→4: expansão isentrópica
- 4→1: perda de calor a pressão constante



Compressor (1→2)

- Ar (em geral a pressão e temperatura atmosférica) é comprimido

- É consumido trabalho

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

- Desprezam-se as perdas de calor com o exterior

- Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial

O trabalho requerido por um compressor para elevar o ar para uma determinada pressão comparado com uma bomba para elevar a água à mesma pressão é substancialmente superior (de 40% do trabalho da turbina para 1% respectivamente)

Câmara de Combustão (2→3)

- O ar comprimido e a temperatura superior entra na câmara de combustão onde é adicionado calor
 - Não há trocas de trabalho
 - Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \xleftrightarrow{W=0} \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} \approx h_3 - h_2$$

Turbina (3→4)

- Ar a alta pressão e alta temperatura é expandido na turbina

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

- Produz trabalho
 - Desprezam-se as perdas de calor
 - Desprezam-se a variação de energia cinética e potencial
- À saída da turbina, o ar está a baixa pressão (em geral atmosférica) e a temperatura é maior do que a temperatura inicial

Rejeição de calor (4→1)

- O ar a uma temperatura superior à atmosférica pode ser utilizado para outras aplicações

- Não há trocas de trabalho $\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_4 - h_1 \xleftrightarrow{W=0} \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} \approx h_4 - h_1$

- Desprezam-se as variações de energia cinética e potencial

- O ar no final ao ser libertado para atmosfera pode ainda ser a temperaturas superiores à atmosférica

Análise Ar-Padrão

- Na prática, o gás do ciclo é uma mistura de ar atmosférico com os gases da combustão de ar com gás natural (Nox, CO)
 - Dadas as concentrações, podemos assumir que é apenas ar
- Em virtude das altas pressões e altas temperaturas que se estabelecem, podemos assumir ainda que
 - Ar é um gás perfeito

Relações Ar-padrão

- Compressor

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_{r4}}{p_{r3}}$$

- Turbina

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_{r4}}{p_{r3}} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

- Câmara de combustão

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} \approx h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$$

- Rejeição de calor

Rendimento

- Rendimento do ciclo de Brayton

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

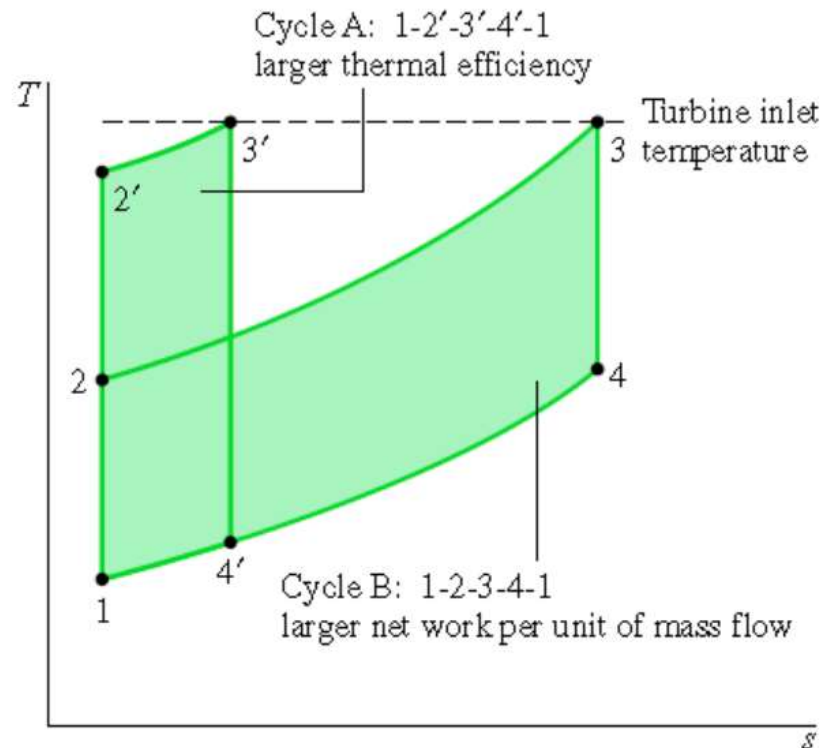
$$\eta = \frac{C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \xleftrightarrow{\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}} \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

O rendimento depende da taxa de compressão do ciclo e do calor específico do gás

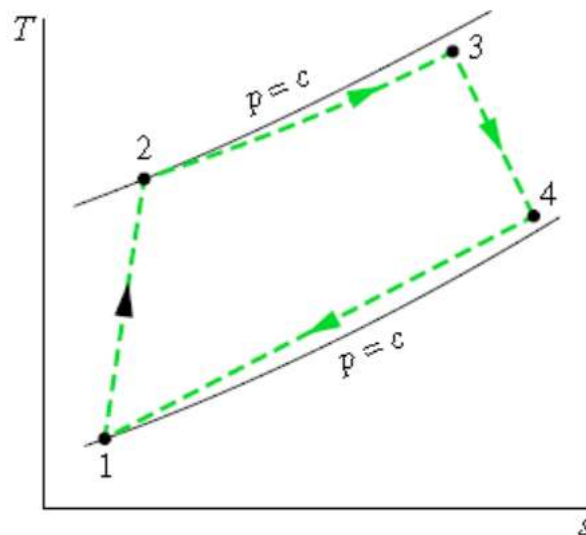
Rendimento

- Para as mesmas temperaturas de funcionamento, o rendimento é superior se a taxa de compressão for maior
- Contudo, isso pode ser compensado com a utilização de um caudal de ar maior
 - Isto é importante na utilização de turbinas em veículos

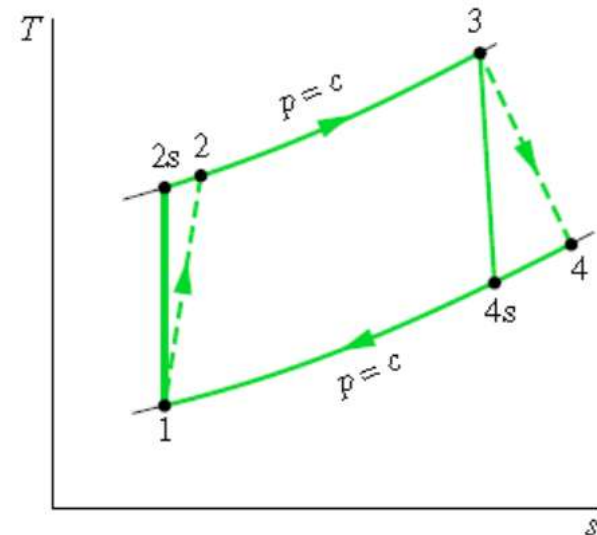


Principais irreversibilidades internas

- A compressão na bomba e a expansão na turbina não são processos internamente reversíveis
- A pressão na câmara de combustão também não é constante
 - Esta é a irreversibilidade mais importante neste tipo de ciclos



(a)



(b)

OTIMIZAÇÃO

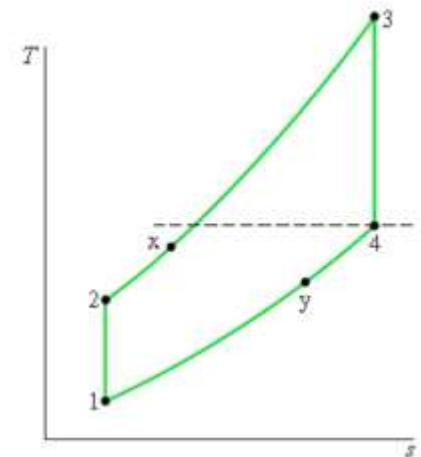
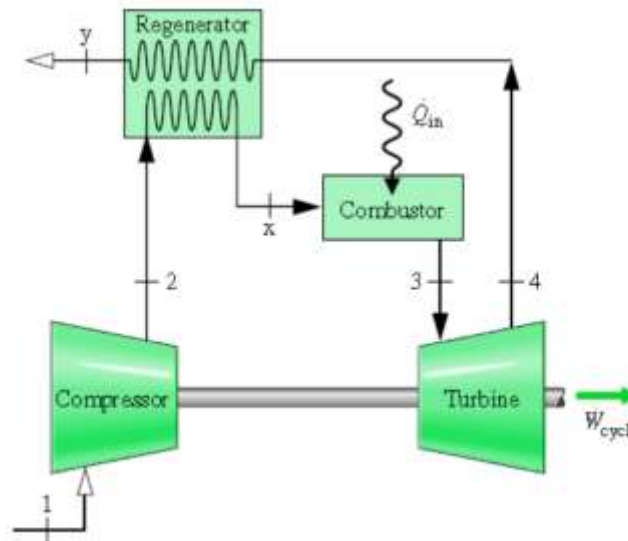
Ciclo com regeneração

- Regeneração

- Aproveitar o facto de os gases à saída da turbina serem superiores à pressão atmosférica e reaproveitá-los para pré-aquecer o ar à entrada da câmara de combustão, poupando combustível

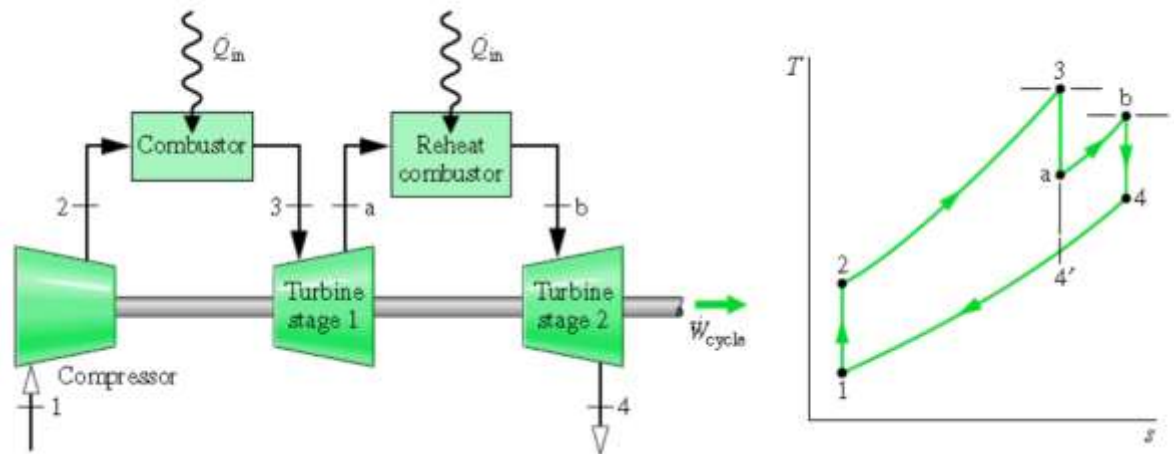
$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} \approx h_3 - h_x$$

$$\eta_{regenerador} = \frac{(h_x - h_2)}{(h_4 - h_2)}$$



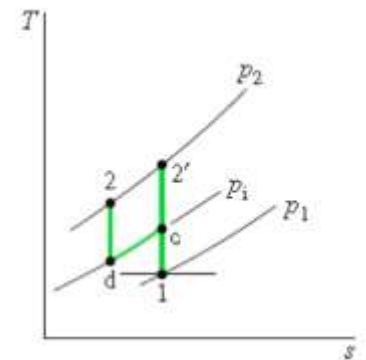
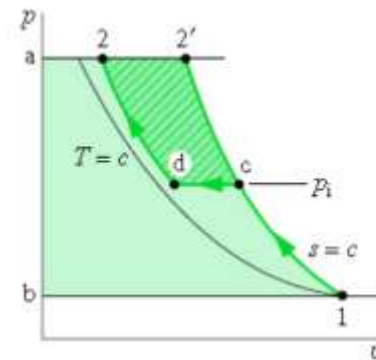
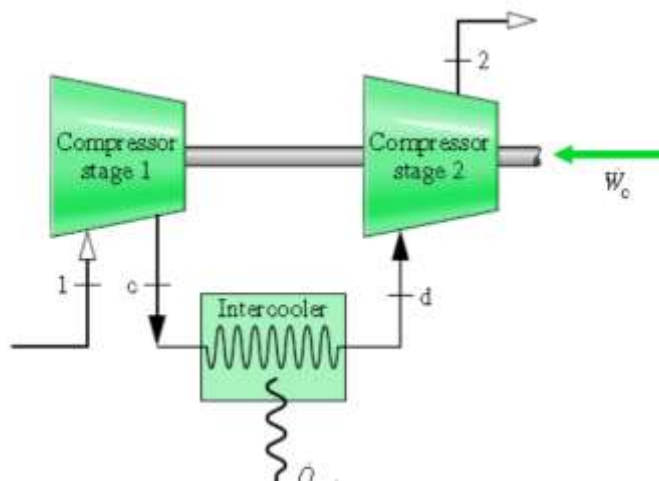
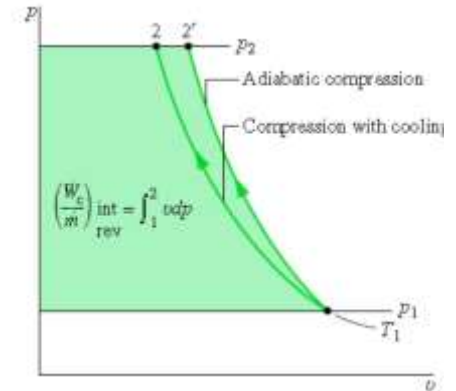
Ciclo com reaquecimento

- Reaquecimento
 - A expansão na turbina é feita em duas etapas
 - No final da primeira etapa, o vapor volta à câmara de combustão e é aquecido novamente

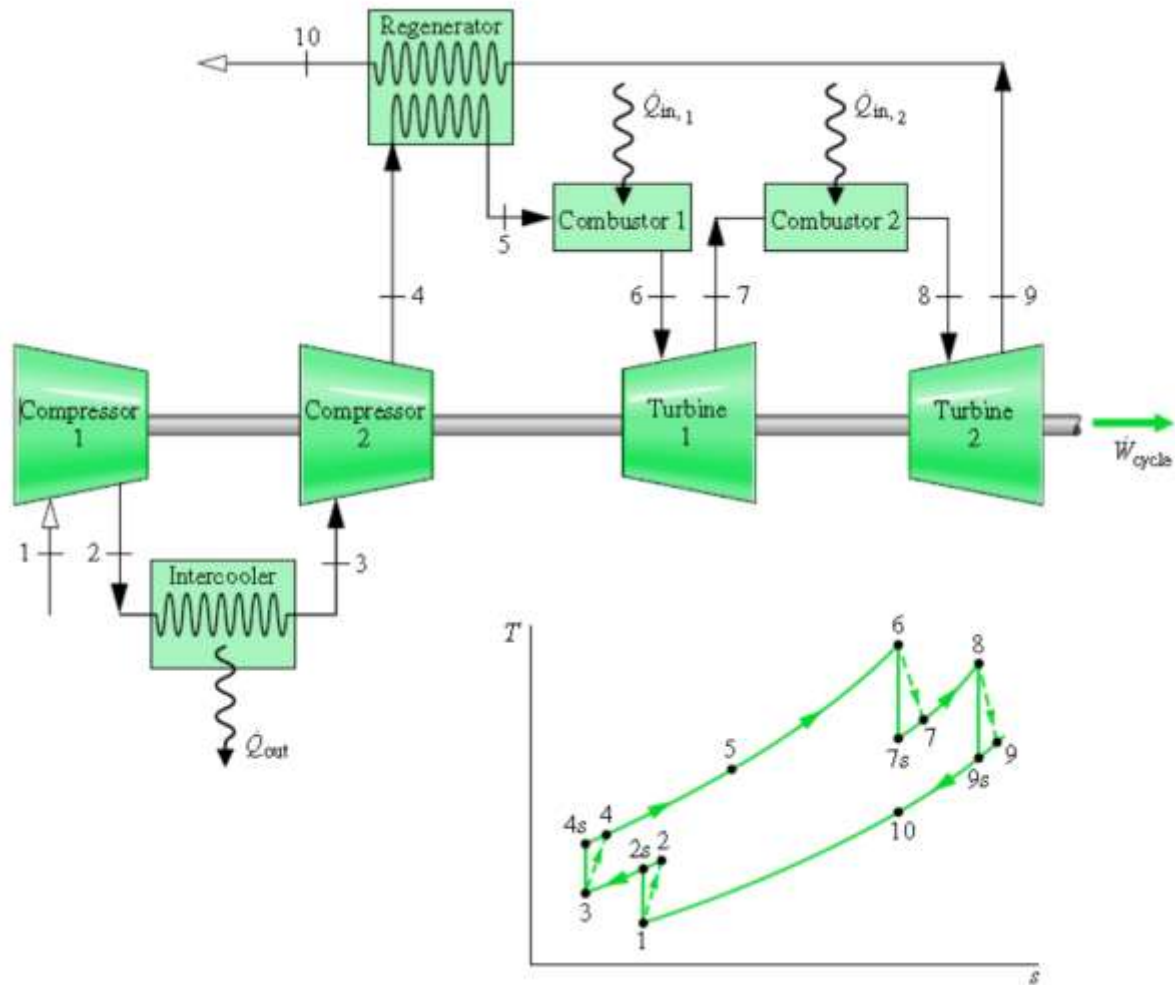


Ciclo com intercooling

- Compressão com intercooling
 - O objectivo é reduzir o trabalho do compressor
 - Faz-se a compressão por etapas, arrefecendo o gás entre as etapas de compressão



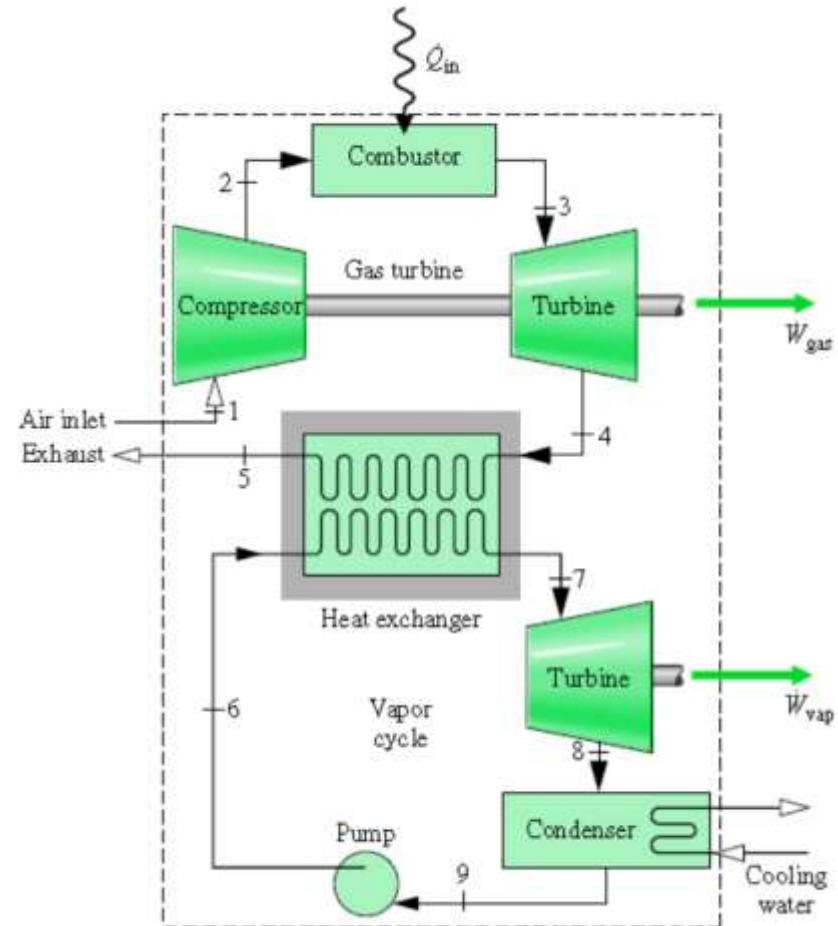
Reaquecimento, intercooling e regeneração



CICLO COMBINADO

Ciclo Combinado

- Os gases quentes à saída da turbina podem ser utilizados para gerar vapor
 - Podemos utilizar um ciclo de Rankine em que o gerador de vapor é substituído por um permutador à saída dos gases da turbina de gás



$$\eta = \frac{W_{Brayton} + W_{Rankine}}{Q_{in}}$$