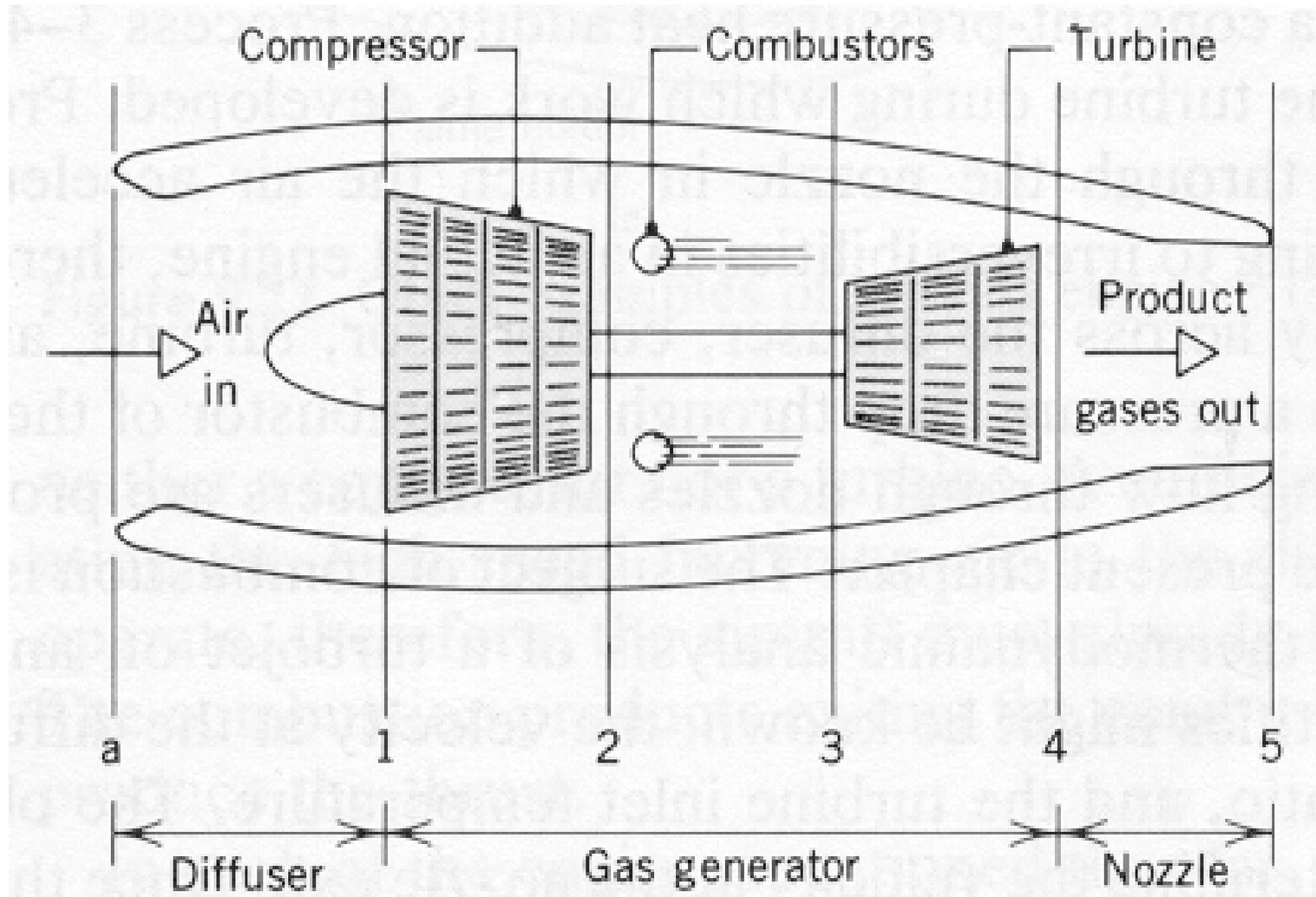


Ciclo Brayton

- Outro ciclo de ar frio
- Utilizado em modelos de turbojatos.



Ciclo Brayton



Proposto por George Brayton em 1870!

http://www.pwc.ca/en_markets/demonstration.html

Outras aplicações do ciclo Brayton

- Geração de potência elétrica: o uso de turbinas a gás é muito eficiente
- Engenharia naval (grandes embarcações)

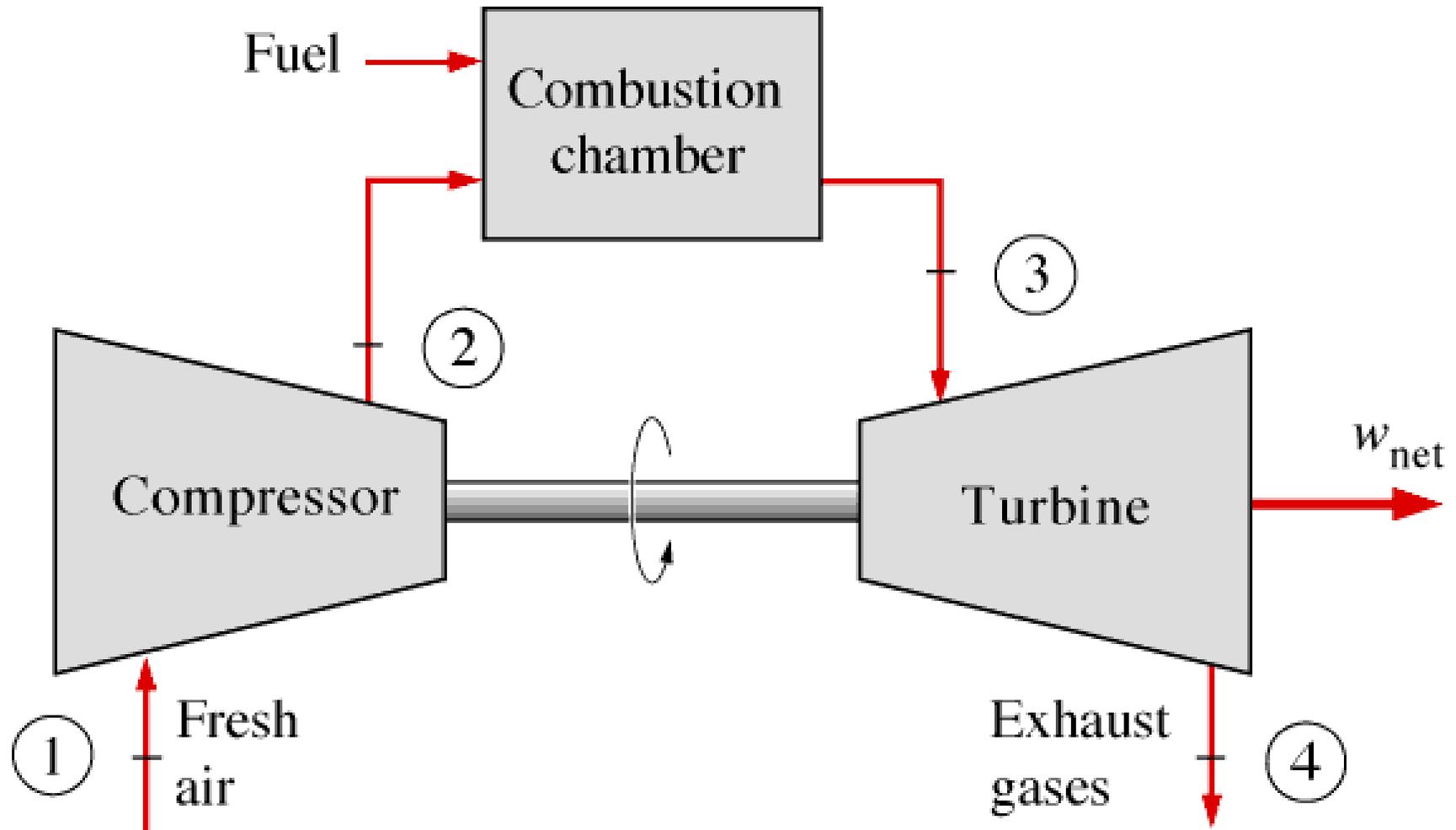
Ciclo padrão a ar

- Modelo simplificado para análise
- Assume que fluido de trabalho passa por ciclo termodinâmico
- Evita-se complexidade da combustão

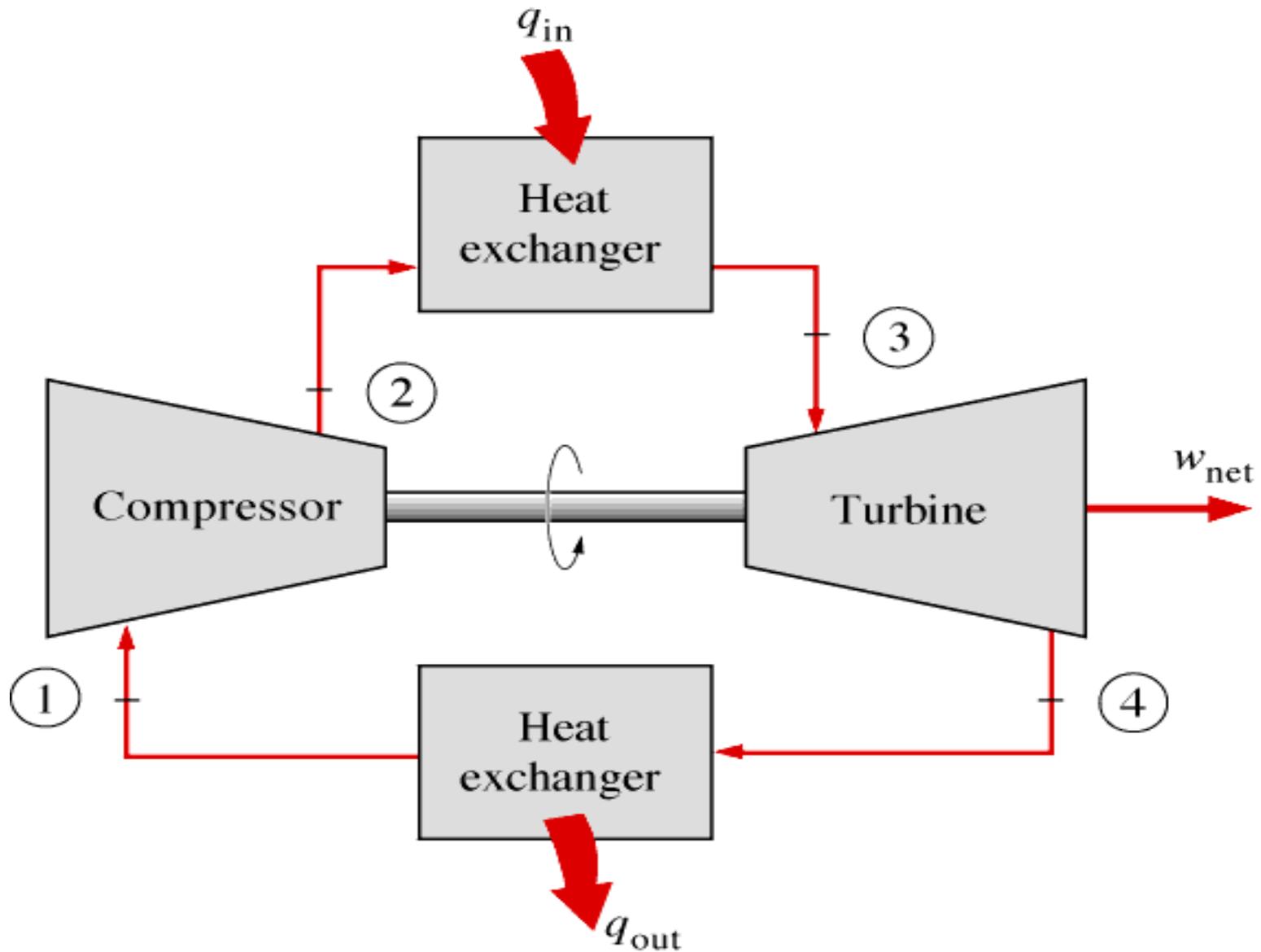
Ciclo padrão a ar

- Características:
 - Ar é fluido de trabalho para todo o ciclo
 - Considerado gás ideal
 - Não há entrada e saída de ar
 - Ar segue circuito fechado
 - Combustão é substituída por aquecimento proveniente de fonte externa
 - Exaustão do ar é substituída por um resfriamento rápido
 - Todos os processos são internamente reversíveis
 - Calor especif. Ar = cte

Um ciclo aberto com turbina a gás



Um ciclo fechado com turbina a gás



Ciclo Brayton

- **Modelo para aplicações de turbinas a gás**
- **4 processos internamente reversíveis:**
 - **Compressão isentrópica**
 - **Adição de calor a pressão constante**
 - **Expansão isentrópica**
 - **Rejeição de calor a pressão constante**

Diagramas P-v e T-s para um ciclo Brayton ideal

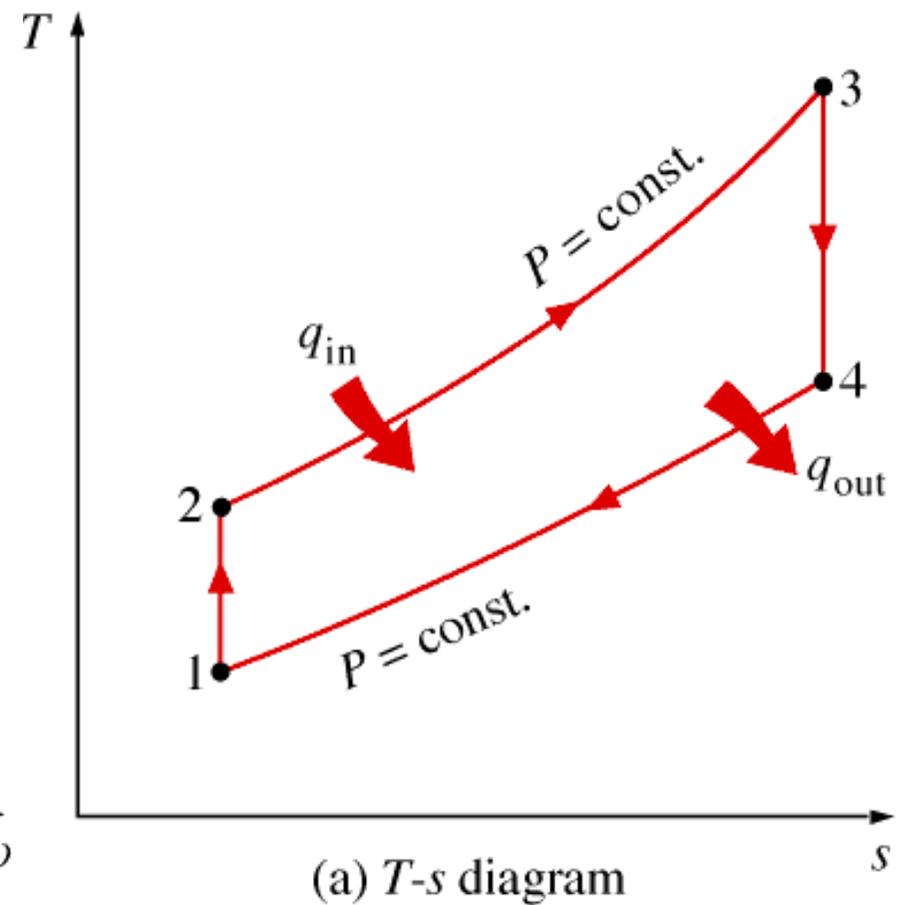
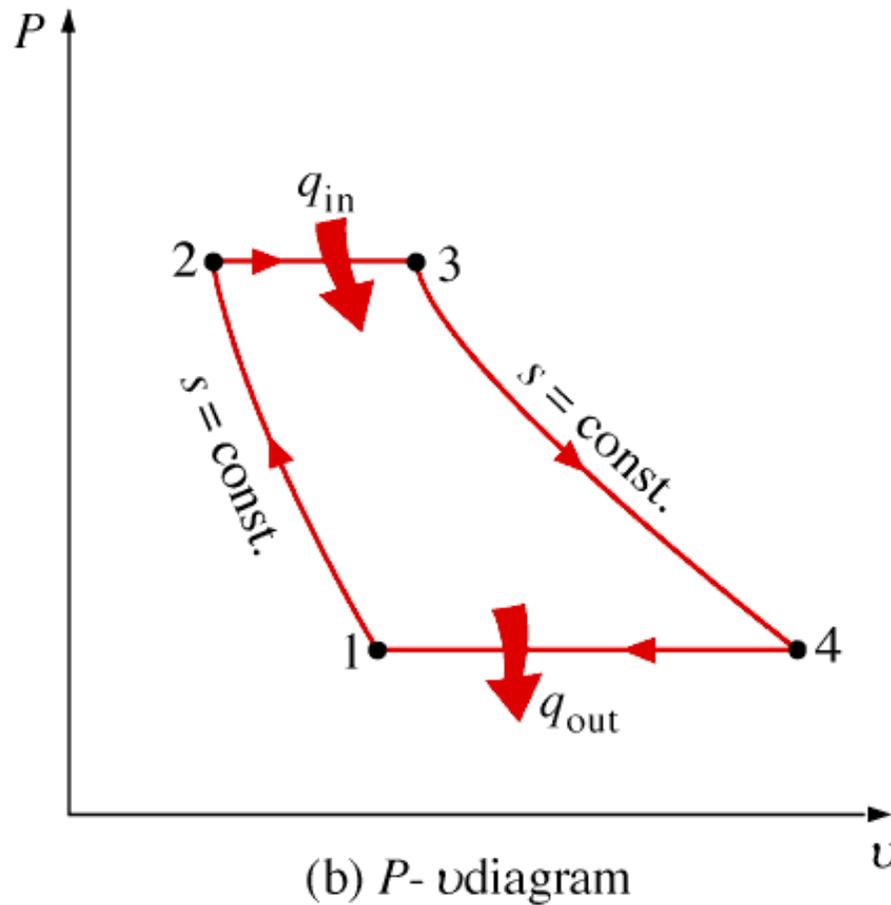
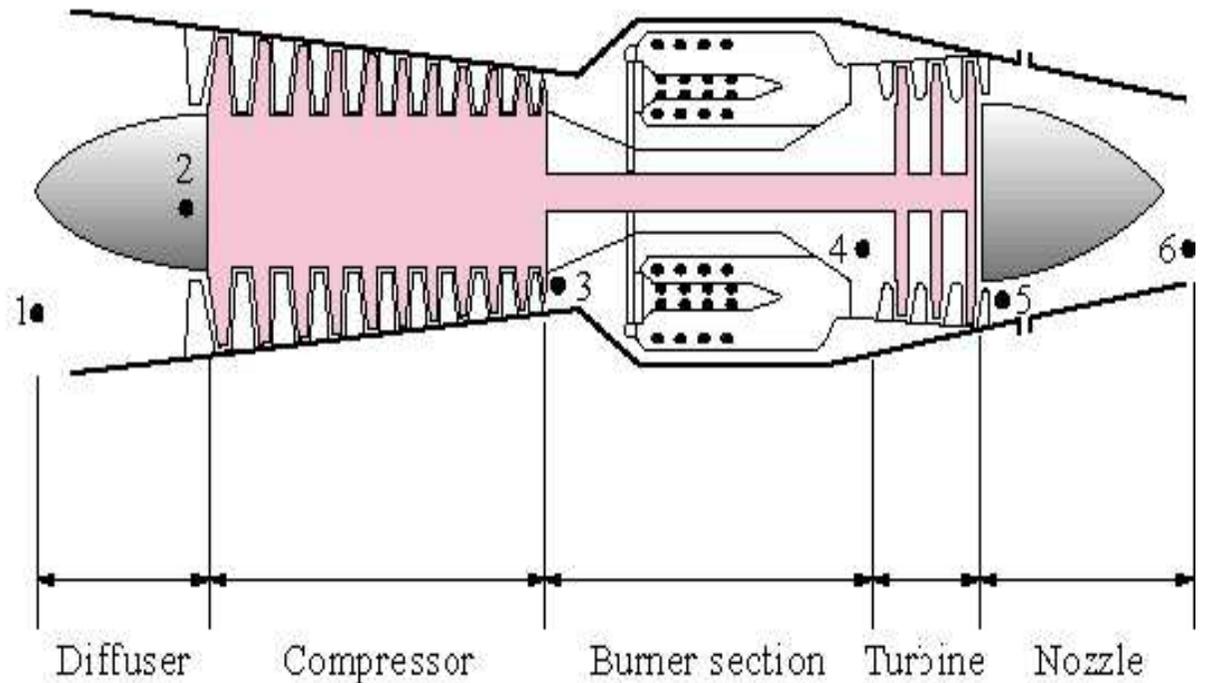
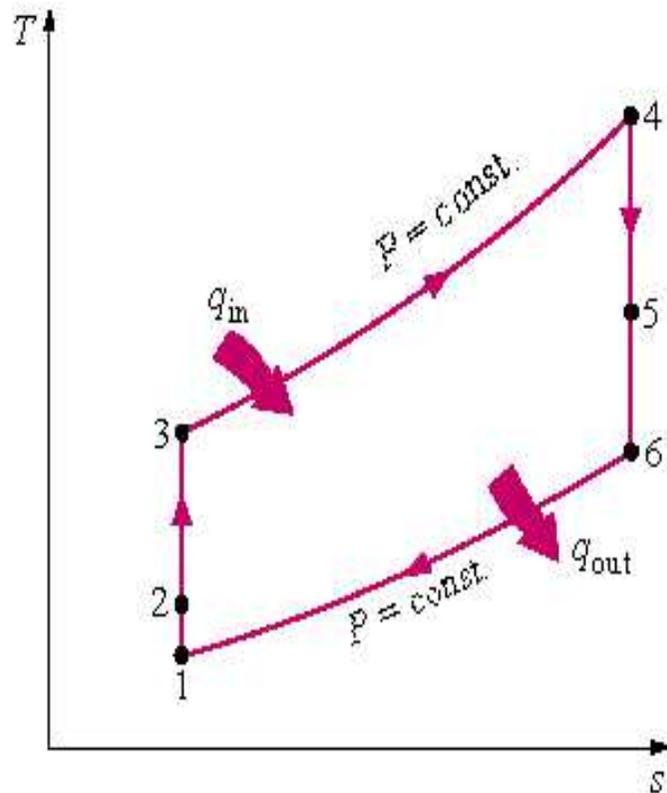


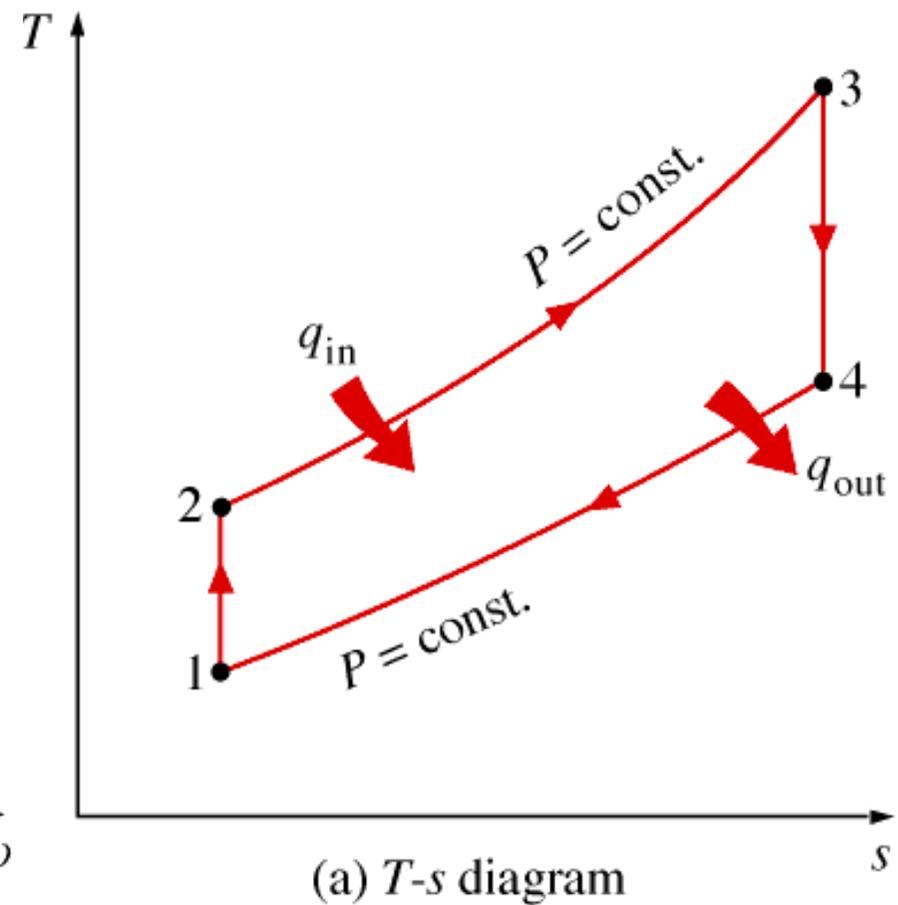
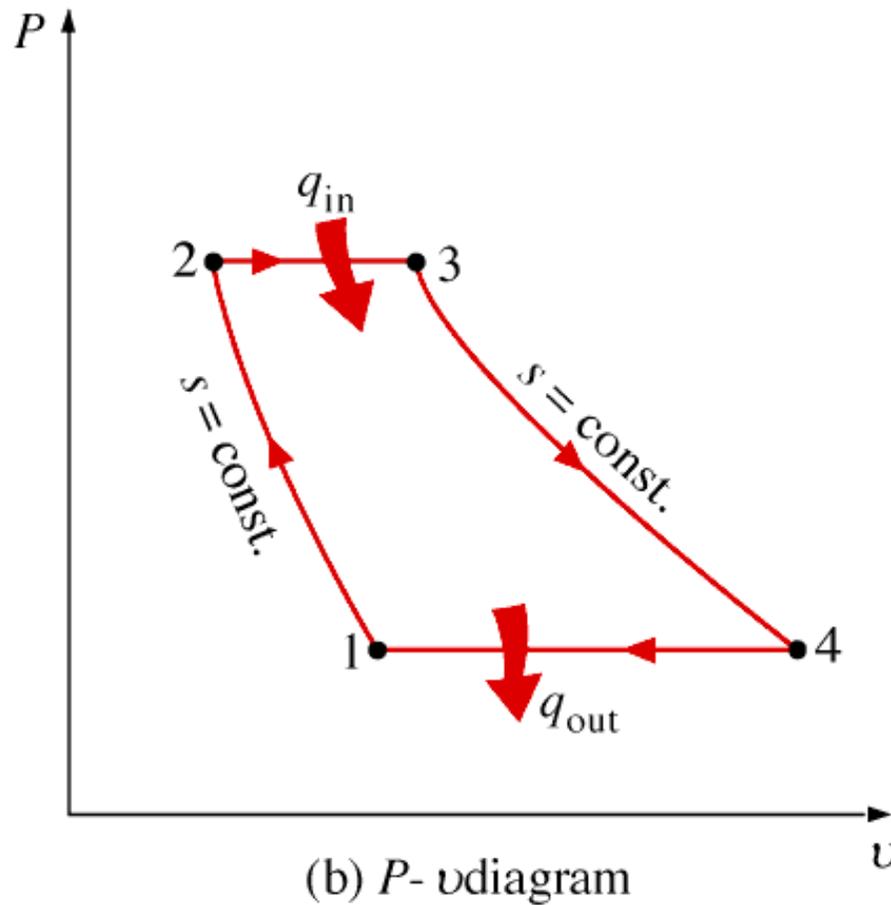
Diagrama T-s para o ciclo ideal de um turbojato



Ciclo Brayton

- **1 a 2** compressão isentrópica em um compressor
- **2 a 3** adição de calor a pressão constante
- **3 a 4** expansão isentrópica em uma turbina
- **4 a 1** rejeição de calor a pressão constante

Diagramas P-v e T-s para um ciclo Brayton ideal



Ciclo Brayton

- O ciclo Brayton opera entre 2 linhas de pressão constante (isobáricas), logo a razão das pressões é importante
- A razão das pressões não é a taxa de compressão
- Diferente de motores alternativos:
 - O Ar não permanece no mesmo lugar
 - O Ar circula
 - Ao se analisar cada componente => volume de controle

Processos

- Para análise “Ar Frio” e considerando $\Delta KE = \Delta PE = 0$

$$\frac{-W_{comp}}{m} = \frac{{}_1W_2}{m} = -\Delta h = c_p (T_1 - T_2)$$

$$\frac{Q_{ent}}{m} = \frac{{}_2Q_3}{m} = \Delta h = c_p (T_3 - T_2)$$

$$\frac{W_{turb}}{m} = \frac{{}_3W_4}{m} = -\Delta h = c_p (T_3 - T_4)$$

$$\frac{-Q_{sai}}{m} = \frac{{}_4Q_1}{m} = \Delta h = c_p (T_1 - T_4)$$

Processos

Na compressão e na expansão: $s = \text{cte}$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} ; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

E define-se

$$r_p = \text{pressure ratio} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

Eficiência térmica

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_c}{\dot{Q}_{ent}} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1 \left(T_4/T_1 - 1 \right)}{T_2 \left(T_3/T_2 - 1 \right)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Ciclo Brayton

- O importante aqui é a razão entre as pressões
- A razão entre as pressões é apenas... uma razão entre as pressões
- A taxa de compressão é uma taxa de volumes (ciclo Otto).

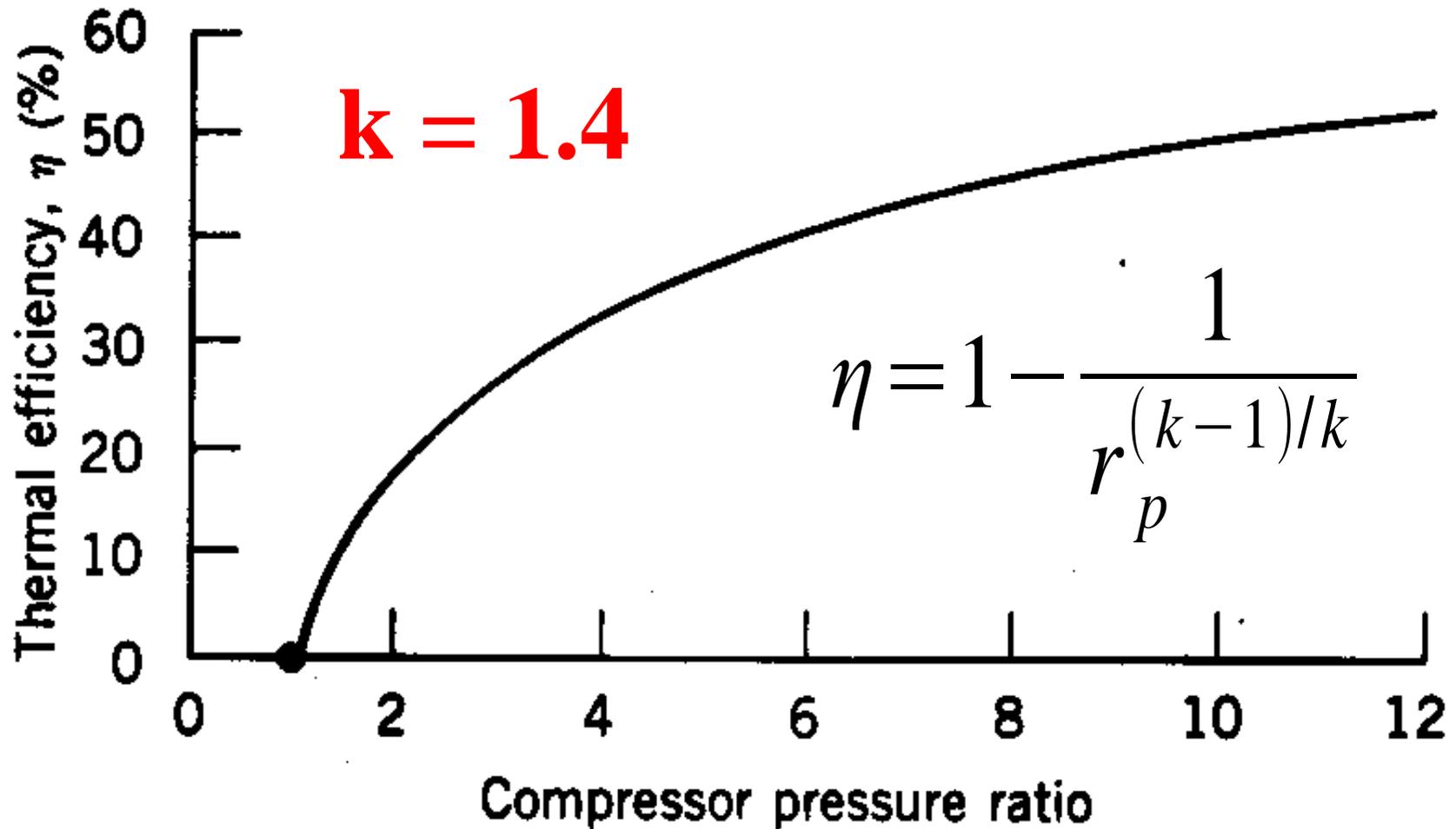
Eficiência térmica do ciclo Brayton

- Com a hipótese de ar frio:

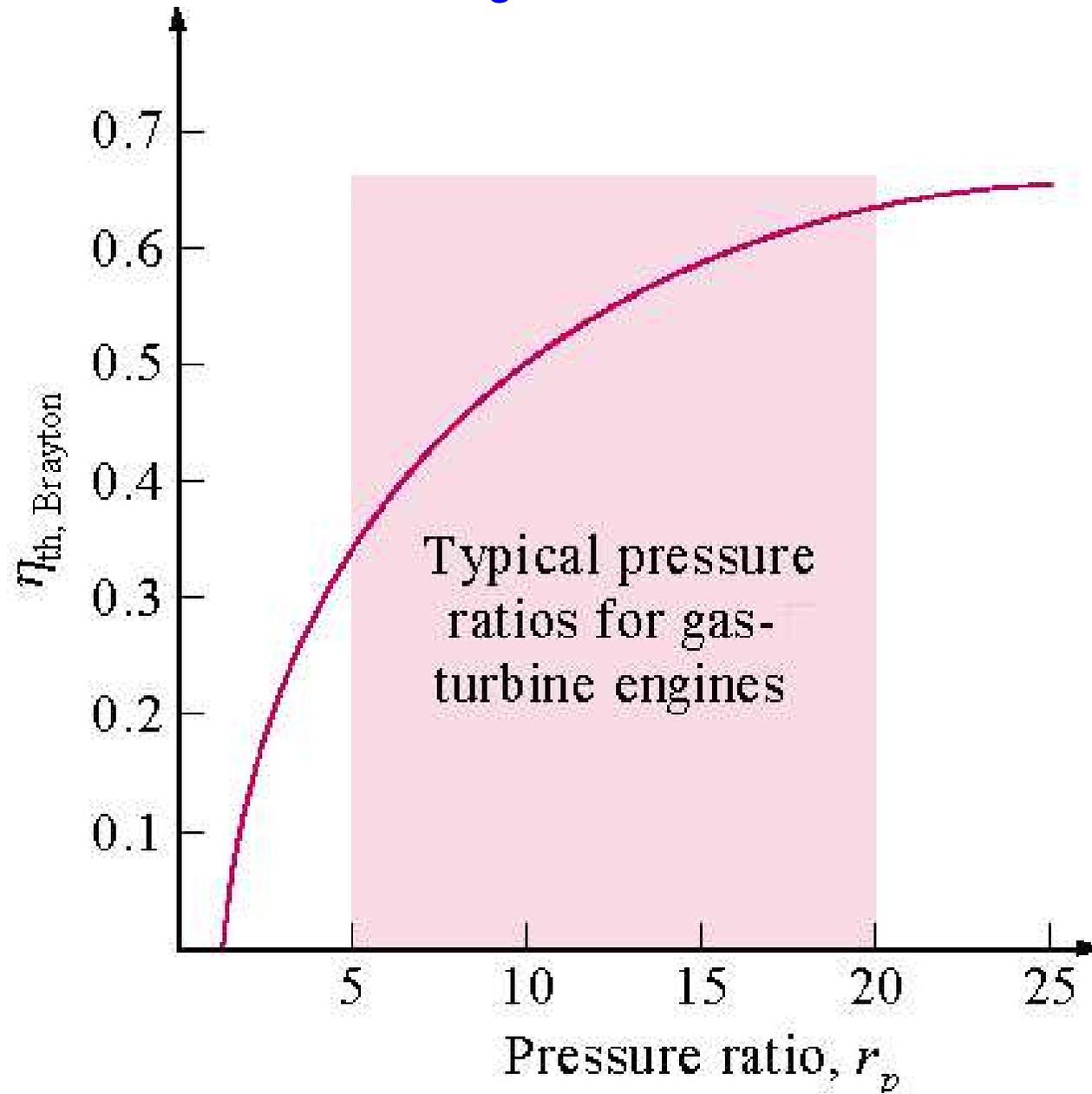
$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

onde $r_p = P_{max}/P_{min}$ é a razão de pressões e k é a razão de calores específicos. A eficiência térmica de um ciclo Brayton simples aumenta com a razão da pressões

Ciclo Brayton

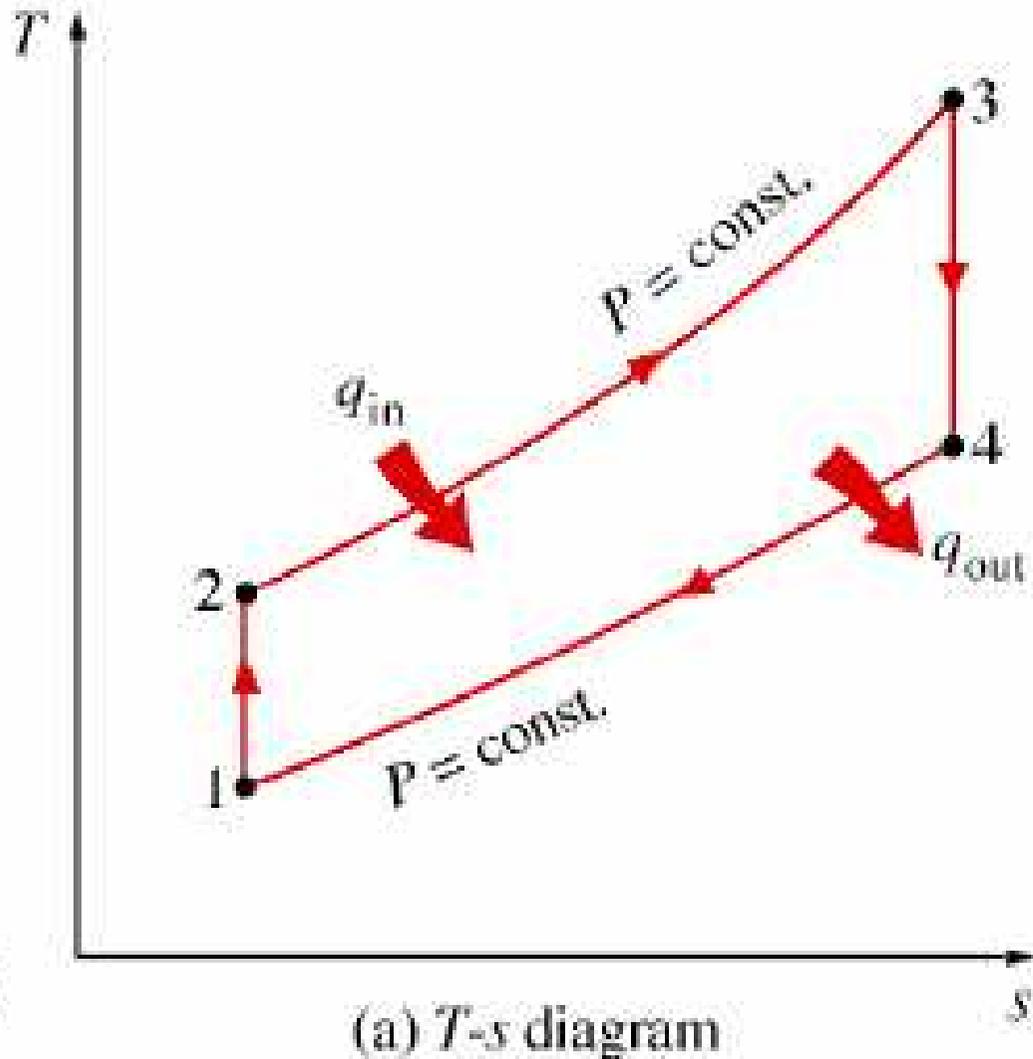


Eficiência térmica de um ciclo Brayton ideal



Rendimento Máximo -> Rendimento de Carnot

$$\eta_{\text{máx}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{373}{1273} = 0,71$$



Ciclo Brayton

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

Conhecer Pressões

OBS: útil nos cálculos

- Razão entre as pressões

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_s = \frac{P_{r_2}}{P_{r_1}}$$

- e

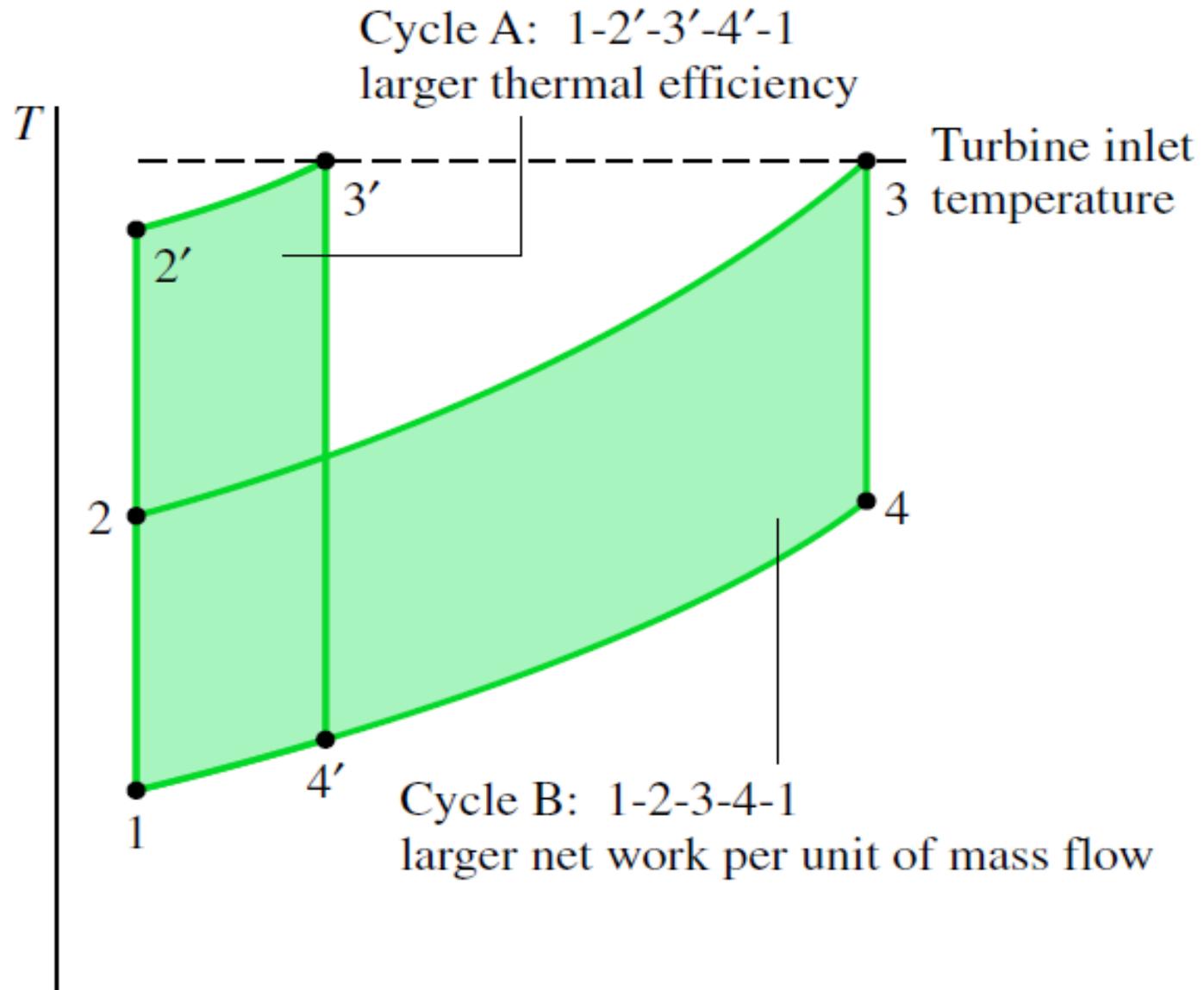
$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)_s = \frac{P_{r_3}}{P_{r_4}} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_r = \exp [s^o(T) / R]$$

Eficiências: comparativo

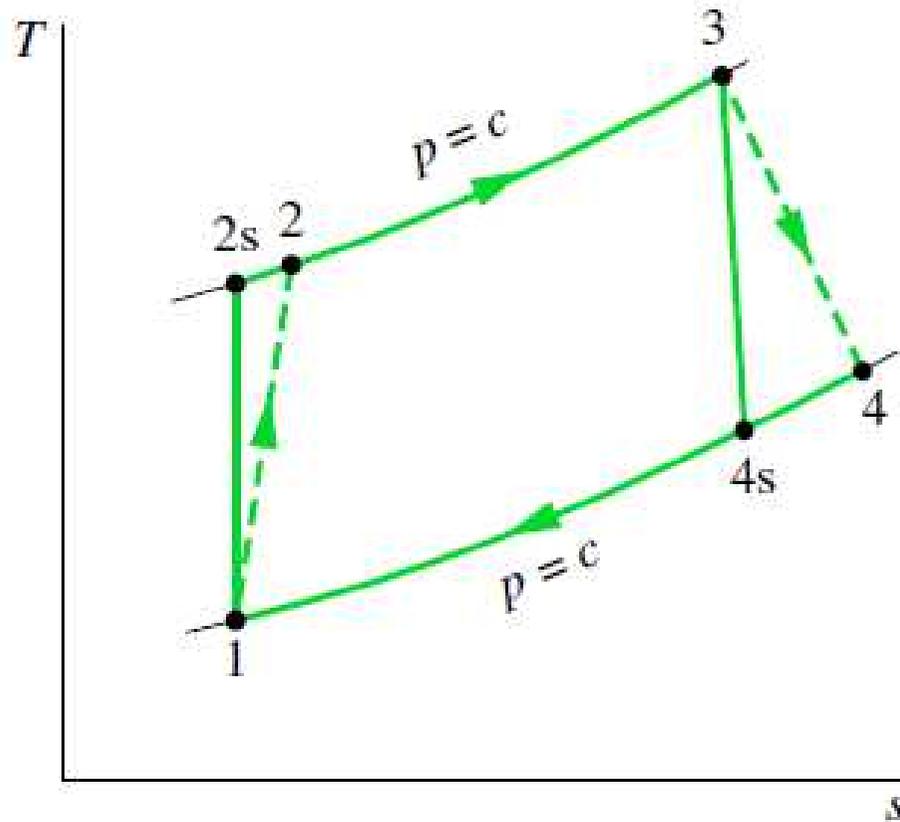
- Existe limite para T_{\max} ($T_3 = 1700\text{K}$)

– materiais



Efeitos das irreversibilidades

- Potência da turbina diminui
- Potência do compressor aumenta



Efeitos das irreversibilidades

- Eficiência isentrópica da Turbina

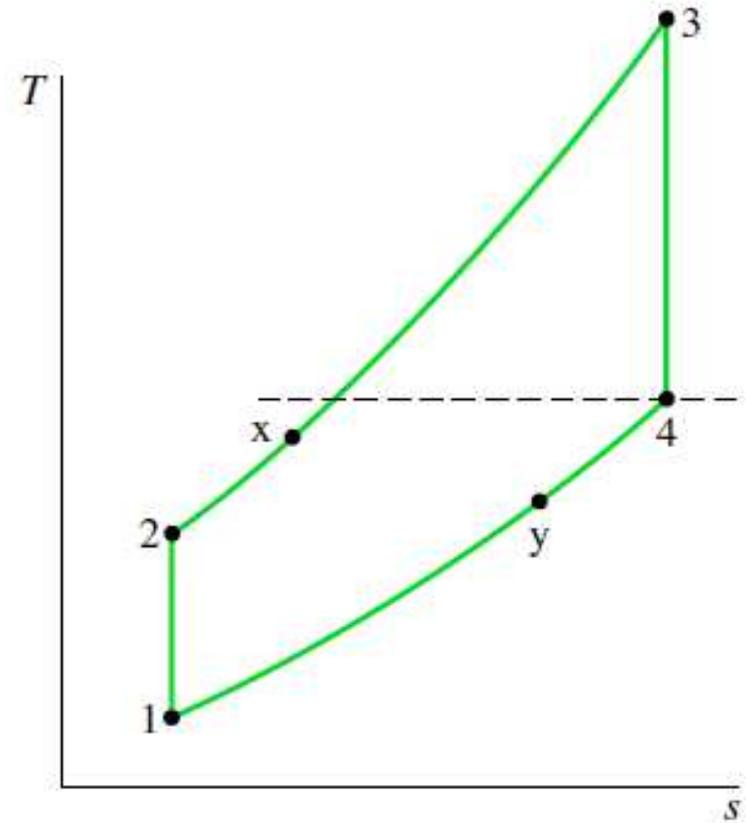
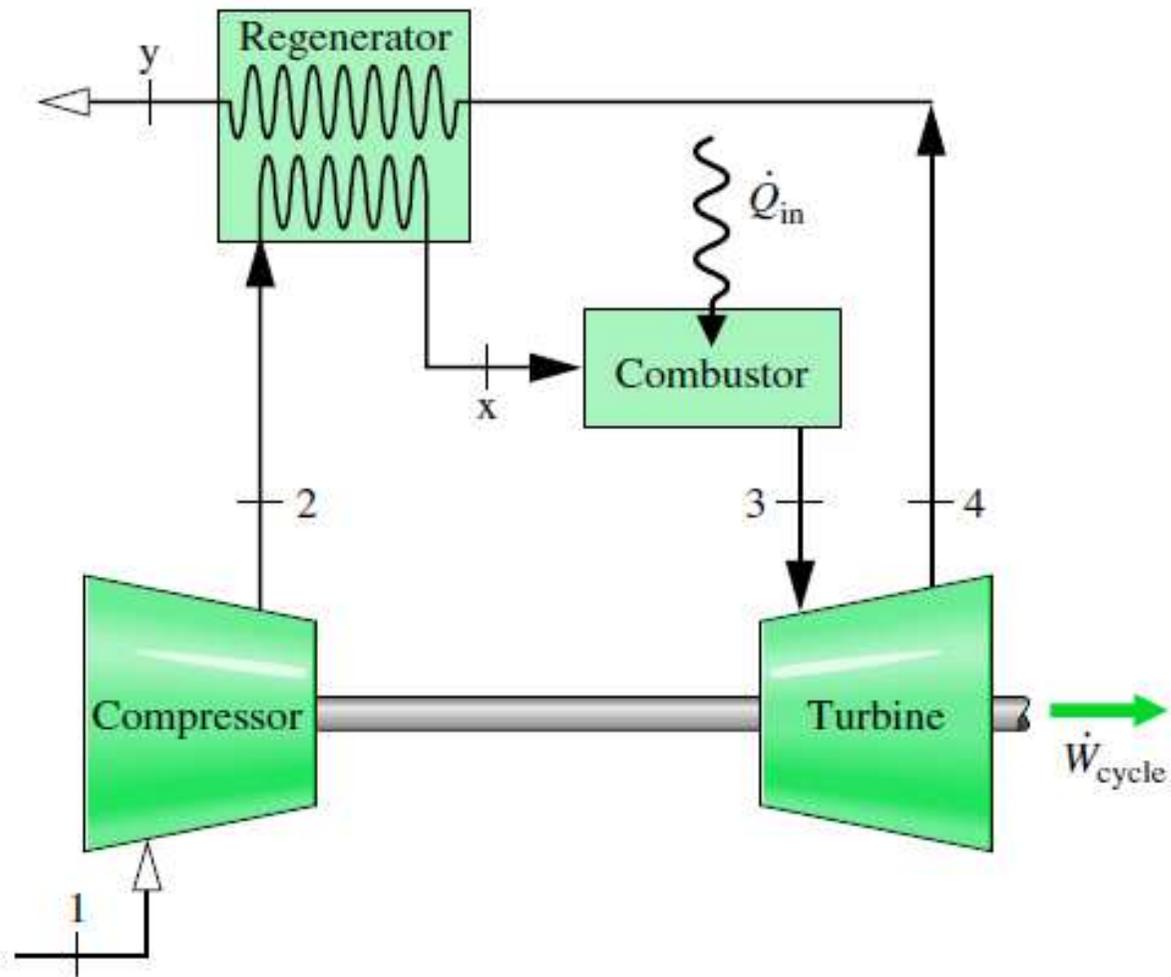
$$\eta_t = \frac{\dot{W}_t / \dot{m}}{(\dot{W}_t / \dot{m})_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4_s}}$$

- Eficiência isentrópica do compressor

$$\eta_c = \frac{(\dot{W}_c / \dot{m})_s}{\dot{W}_c / \dot{m}} = \frac{h_{2_s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

- Em geral, elas estão entre 80% e 90%

Ciclo Brayton regenerativo



Ciclo Brayton regenerativo com resfriamento intermediário e reaquecimento

