

CAPÍTULO 6 - PRODUÇÃO DE POTÊNCIA A PARTIR DE CALOR.

6.1-Ciclos de potência a vapor.

6.2-Ciclo Carnot.

6.3-Ciclo Rankine: ideal e real. Eficiência

6.4-Tipos de Ciclos Rankine: com Reaquecimento e Regenerativo.

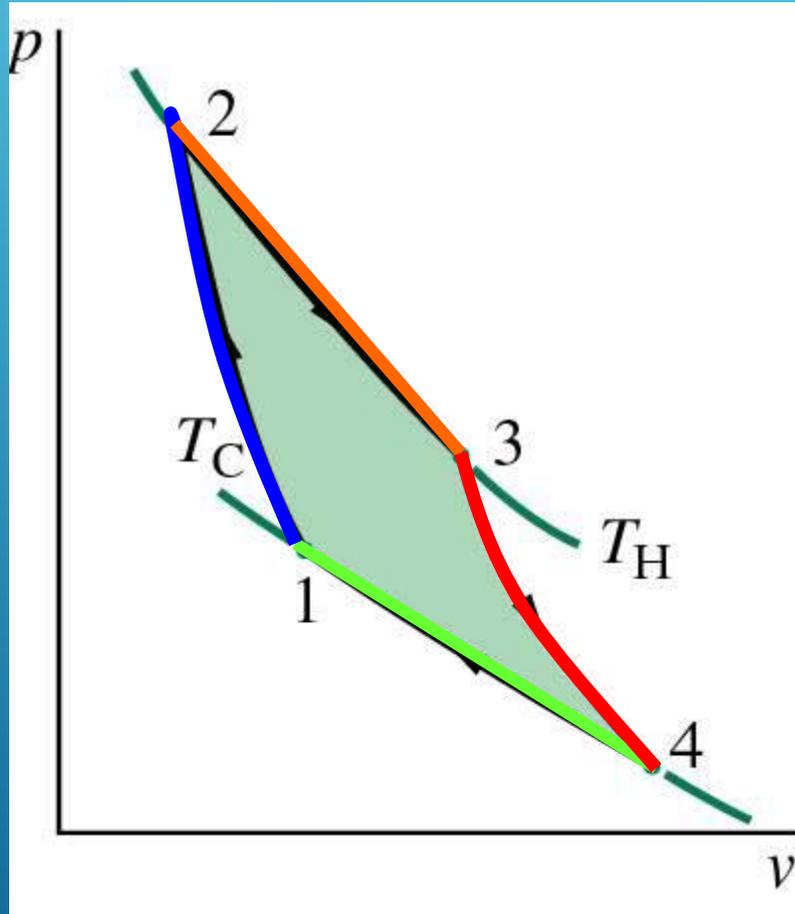
6.5-Ciclo Brayton: ideal e real. Eficiência

6.6-Ciclo combinado: Brayton-Rankine.

6.1-Ciclos de potência a vapor

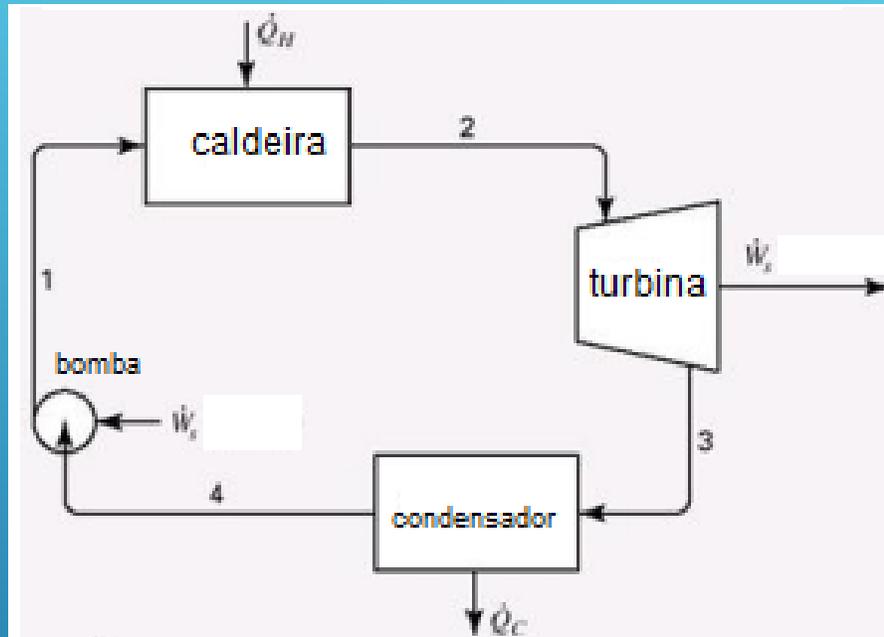
Algumas centrais de potência, como a central simples a vapor d'água, que já consideramos diversas vezes, operam segundo um ciclo. Isto é, o fluido de trabalho sofre uma série de processos e, finalmente, retorna ao seu estado inicial. Em outras centrais de potência, tais como o motor de combustão interna e a turbina a gás, o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico, ainda que o equipamento opere segundo um ciclo mecânico. Nesses casos, o fluido de trabalho, ao final do processo, apresenta uma composição química diferente ou está em um estado termodinâmico diferente do inicial.

6.2-Ciclo Carnot

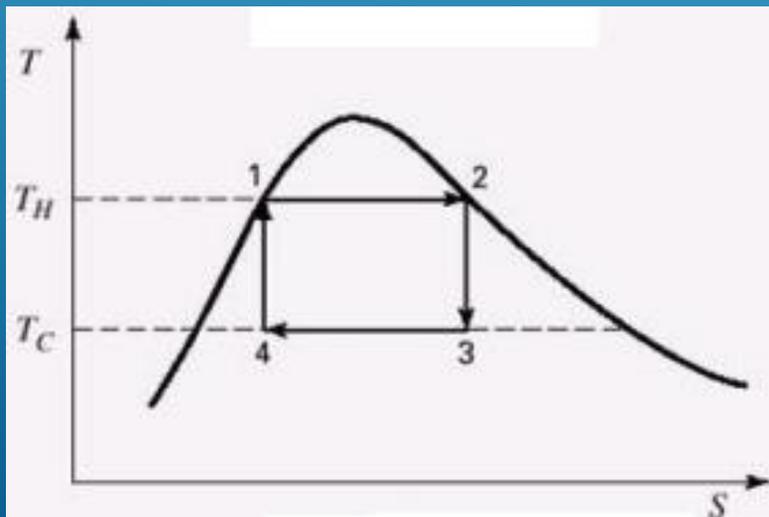


- 1-2: Compressão adiabática até 2, onde temperatura é T_h ;
- 2-3: Expansão isotérmica, recebendo energia do reservatório quente à T_h ;
- 3-4: Expansão adiabática até a temperatura cair para T_c ;
- 4-1: Compressão isotérmica, cedendo energia ao reservatório frio à T_c .

Ciclo Carnot



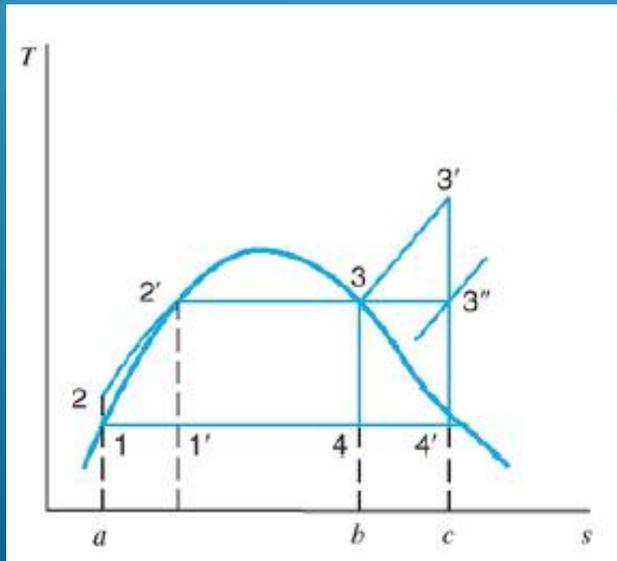
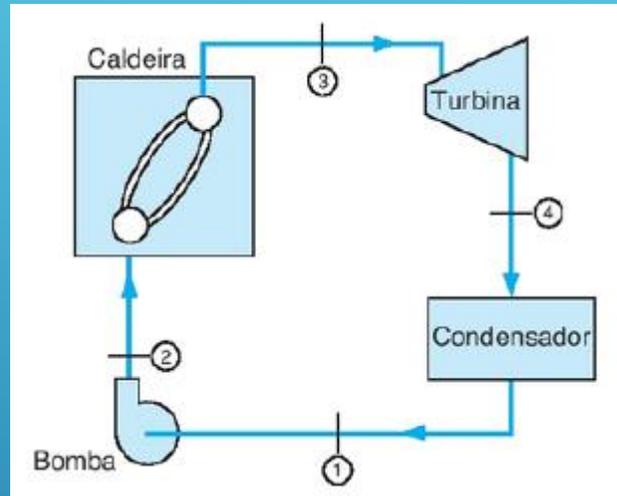
Já que o ciclo de Carnot é o que leva ao maior rendimento (posto que elimina irreversibilidades), por que não é empregado na prática???



Duas razões principais:

- Etapa 4-1: dificuldades para bombear mistura líquido-vapor
- Etapa 2-3: possibilidade de superaquecimento (visando a realização de trabalho)

► 6.3-Ciclo Rankine: ideal e real. Eficiência



$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{\text{área } 1-2-2'-3-4-1}{\text{área } a-2-2'-3-b-a} \quad (9.1)$$

Os quatro processos que compõem o ciclo são:

- 1-2:** Processo de bombeamento adiabático reversível na bomba.
- 2-3:** Transferência de calor a pressão constante na caldeira.
- 3-4:** Expansão adiabática reversível na turbina (ou em outra máquina motora, tal como a máquina a vapor).
- 4-1:** Transferência de calor a pressão constante no condensador.

Figura 9.3

Instalação motora simples a vapor que opera segundo um ciclo Rankine.

Ciclo Rankine: real

IRREVERSIBILIDADES

Perdas associadas à TUBULAÇÃO:

- Redução de pressão (perda de carga) devido ao atrito
- Transferência de calor à vizinhança

Perdas associadas à TURBINA:

- Irreversibilidades no escoamento do fluido
- Transferência de calor à vizinhança

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{isentr}}}$$

Perdas associadas à BOMBA:

- Irreversibilidades no escoamento do fluido
- Transferência de calor à vizinhança

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{W_{\text{isentr}}}{W_{\text{real}}}$$

Perdas associadas ao CONDESADOR:

- Resfriamento abaixo de $T_{\text{saturação}}$

6.4-Tipos de Ciclos Rankine: com Reaquecimento e Regenerativo

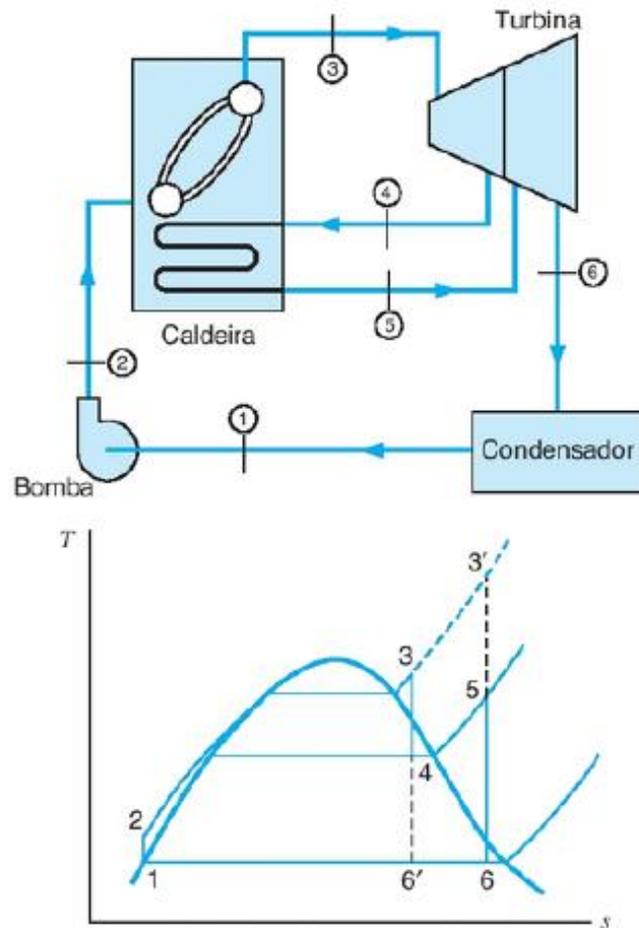


Figura 9.9
Ciclo ideal Rankine com reaquecimento.

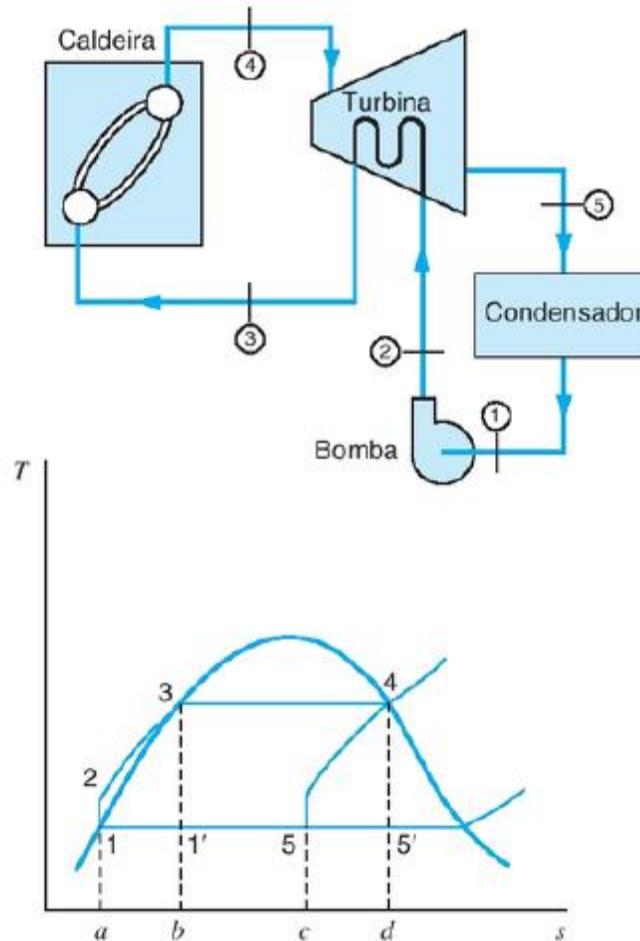


Figura 9.11
Ciclo regenerativo ideal.

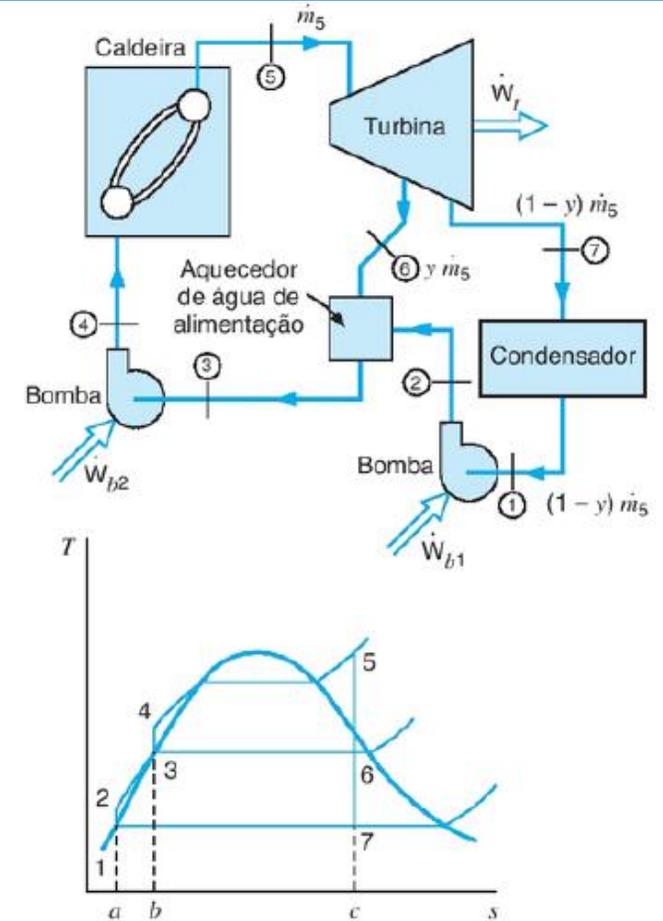
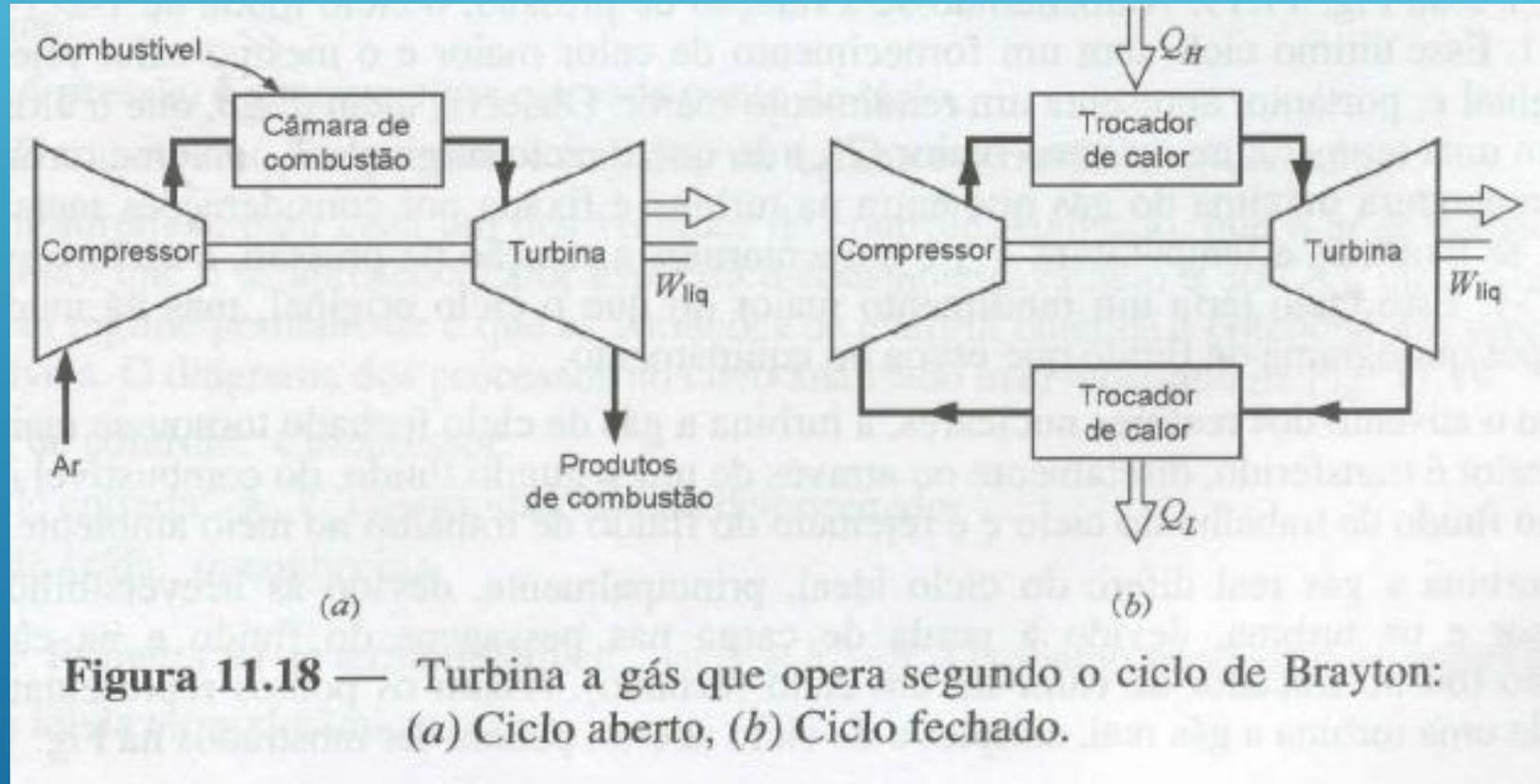


Figura 9.12
Ciclo regenerativo com aquecedor de água de alimentação de mistura.

6.6-Ciclo Brayton



6.6-Ciclo Brayton

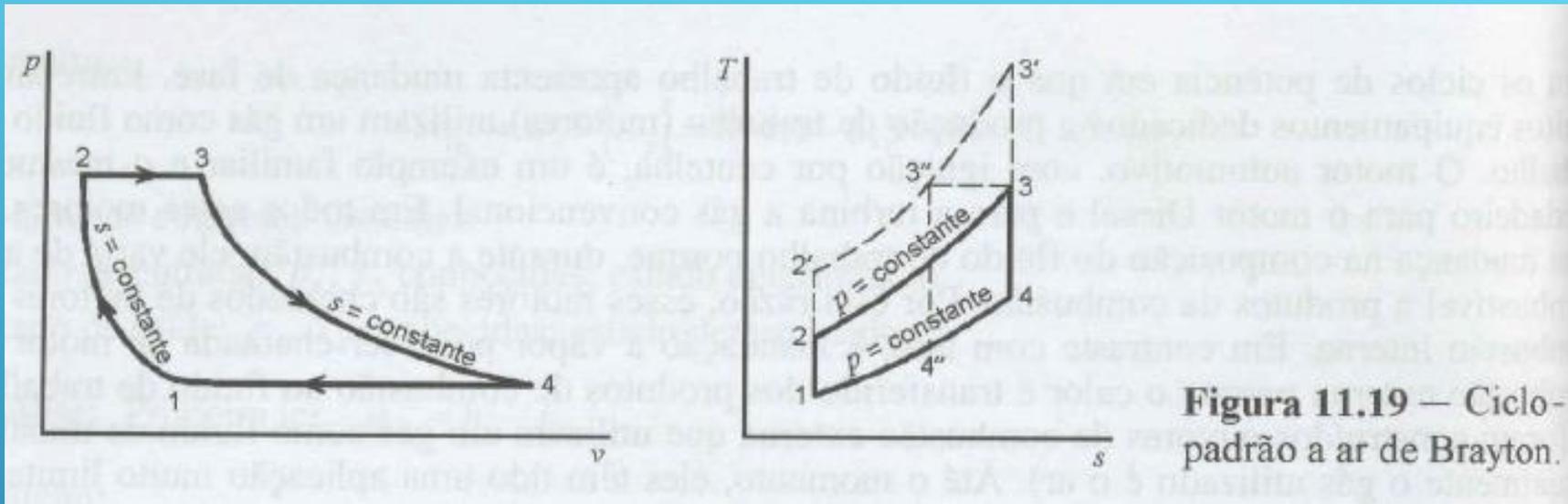
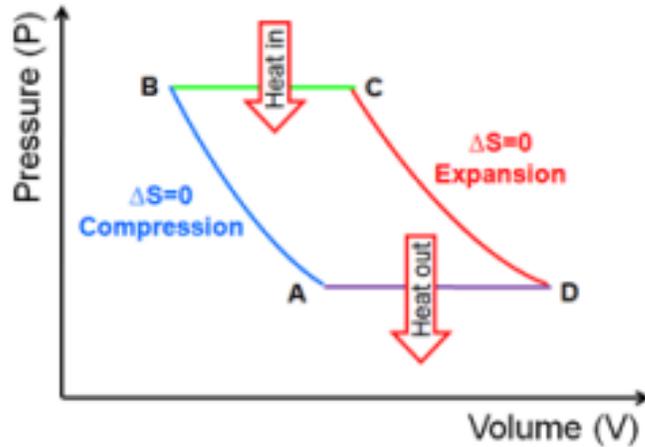


Figura 11.19 — Ciclo-padrão a ar de Brayton.

Denominamos este ciclo de Rankine quando o fluido de trabalho apresenta mudança de fase nos processos que ocorrem a pressão constante ciclo e de Brayton quando o fluido de trabalho não apresenta mudança de fase (o fluido sempre está na fase vapor). O ciclo-padrão a ar Brayton é o ciclo ideal para a turbina a gás simples.

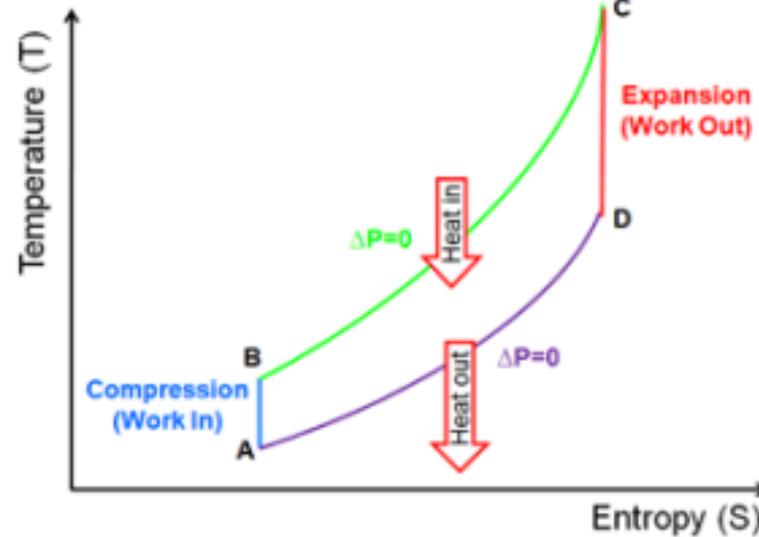
$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

6.6-Ciclo Brayton: ideal. Eficiência



CICLO BRAYTON IDEAL:

- **Compressão isentrópica (A→B)**
- **Aquecimento isobárico (B→C)**
- **Trabalho isentrópico (C→D)**
- **Resfriamento isobárico (D→A)**



Eficiência térmica:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{h_D - h_A}{h_C - h_B}$$

$$k = c_p / c_v \quad \downarrow \quad r_p = P_B / P_A$$

$$\eta_{th} = 1 - T_A / T_B = 1 - r_p^{(1-k)/k}$$

Ciclo Brayton: real

IRREVERSIBILIDADES

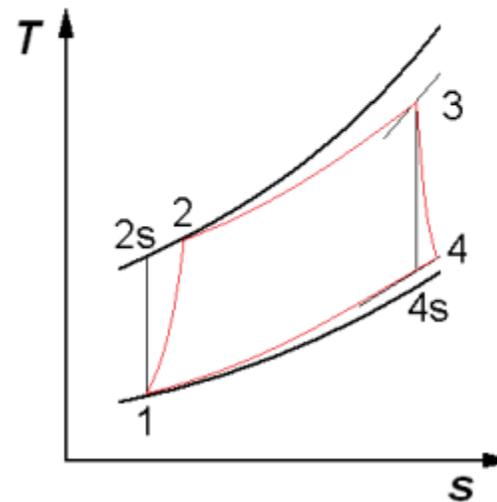
Perdas associadas a:

- **Tubulação** → queda de pressão, troca de calor c/ meio
- **Turbina** → escoamento não-ideal, troca de calor c/ meio
- **Compressor** → escoamento não-ideal, troca de calor c/ meio
- **Câmara combustão** → queda de pressão, troca de calor

$$\eta_{\text{compr}} = \frac{w_{\text{isentr}}}{w_{\text{real}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$P_3 = P_2 - \Delta P \quad , \quad P_1 = P_4 - \Delta P'$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{w_{\text{real}}}{w_{\text{isentr}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$



6.7-Ciclo combinado: Brayton-Rankine

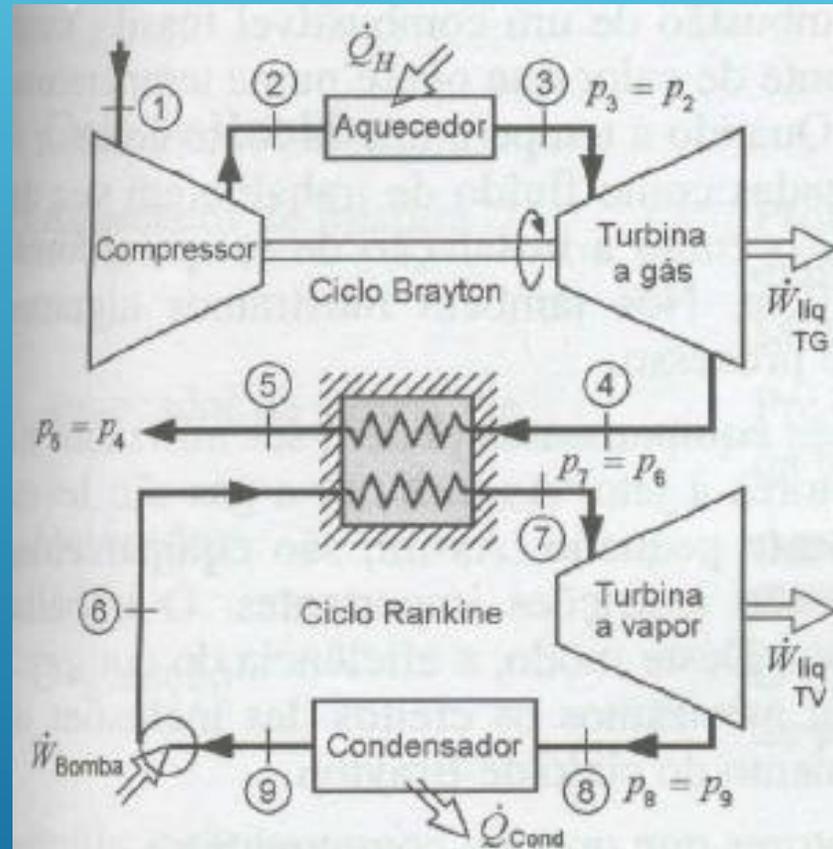


Figura 11.40 — Ciclo de potência combinado Brayton/Rankine.