

# **ZEA0466** **TERMODINÂMICA**

## **CICLOS DE POTÊNCIA E DE REFRIGERAÇÃO**



# TRABALHO DE EIXO: PROCESSO REVERSÍVEL

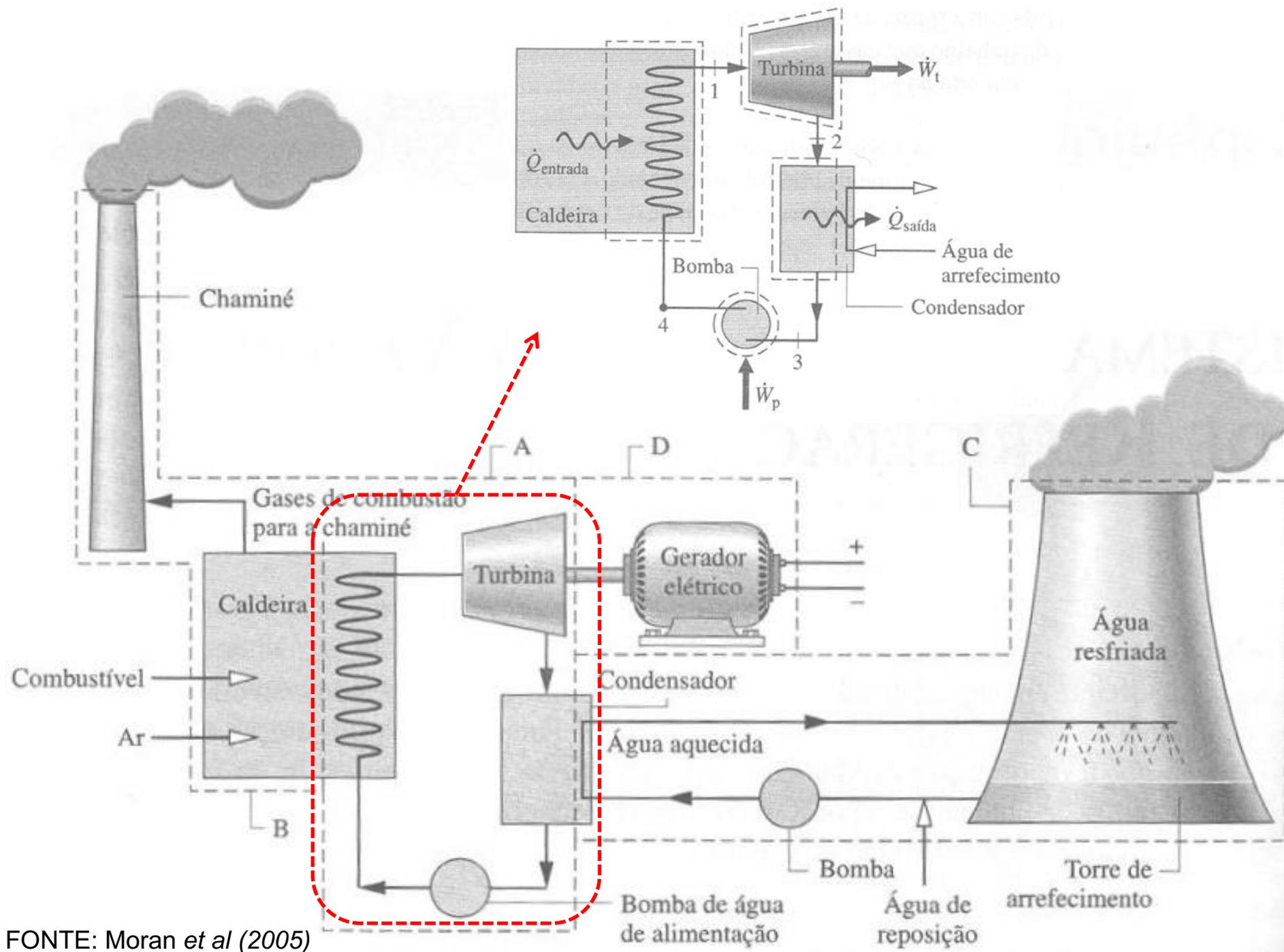
**Processo reversível ADIABÁTICO**  $\rightarrow s_{g,int} = 0$  e  $q_{vc} = 0$

- **2ª Lei da Termodinâmica:**  $s_{sai} = s_{entra}$
- **Relação entre propriedades:**  $h_{sai} - h_{entra} = \int_{entra}^{sai} v dP$
- **1ª Lei da Termodinâmica ( $\Delta e_{cin}$ ,  $\Delta e_{pot}$  desprezíveis):**  $w \cong - \int_{entra}^{sai} v dP$

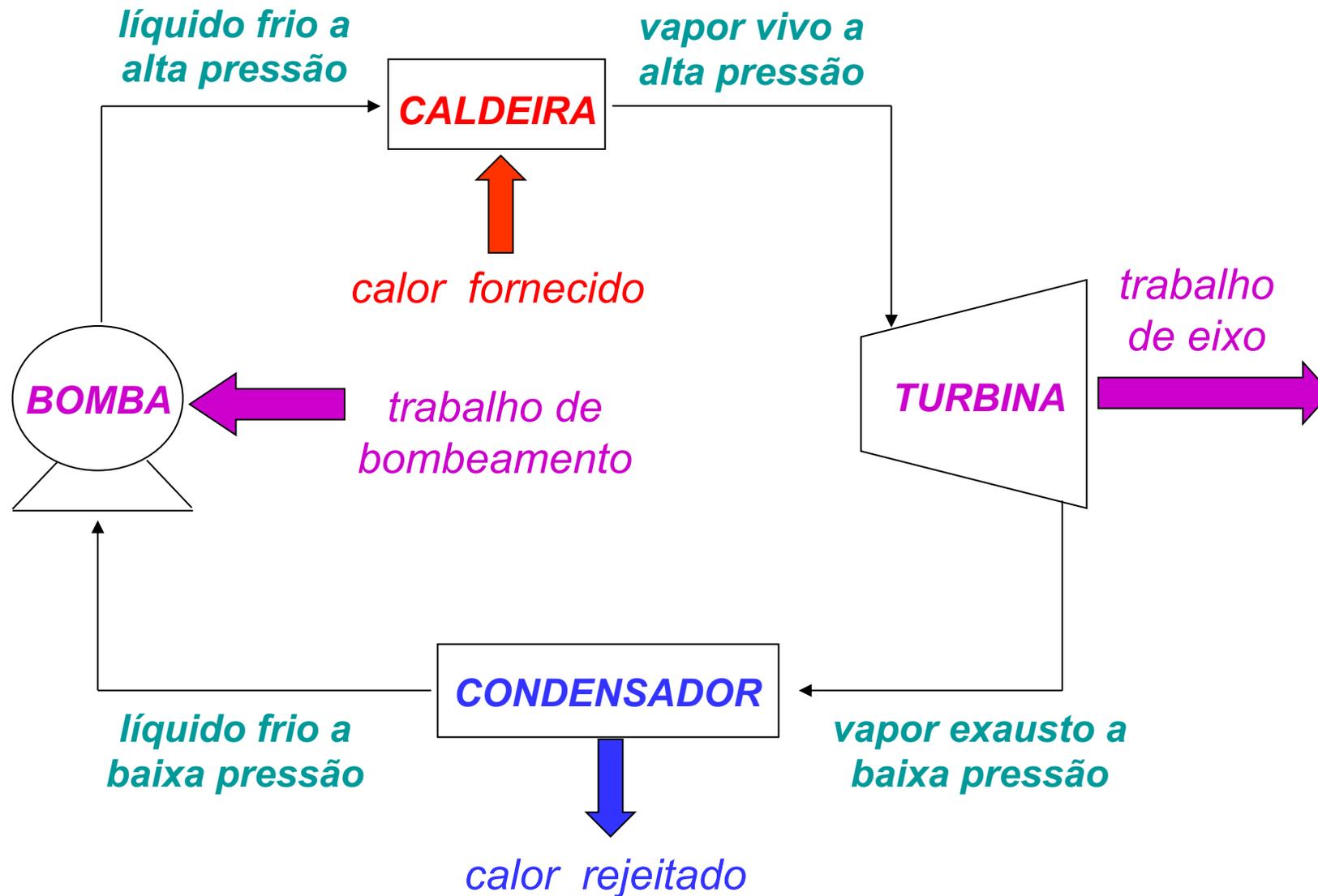
**Processo reversível ISOTÉRMICO**  $\rightarrow s_{g,int} = 0$  e  $T = const$

- **2ª Lei da Termodinâmica:**  $s_{sai} - s_{entra} = \frac{q_{vc}}{T} \Rightarrow q_{vc} = T(s_{sai} - s_{entra})$
- **Relação entre propriedades:**  $q - (h_{sai} - h_{entra}) = - \int_{entra}^{sai} v dP$
- **1ª Lei da Termodinâmica ( $\Delta e_{cin}$ ,  $\Delta e_{pot}$  desprezíveis):**  $w = - \int_{entra}^{sai} v dP$

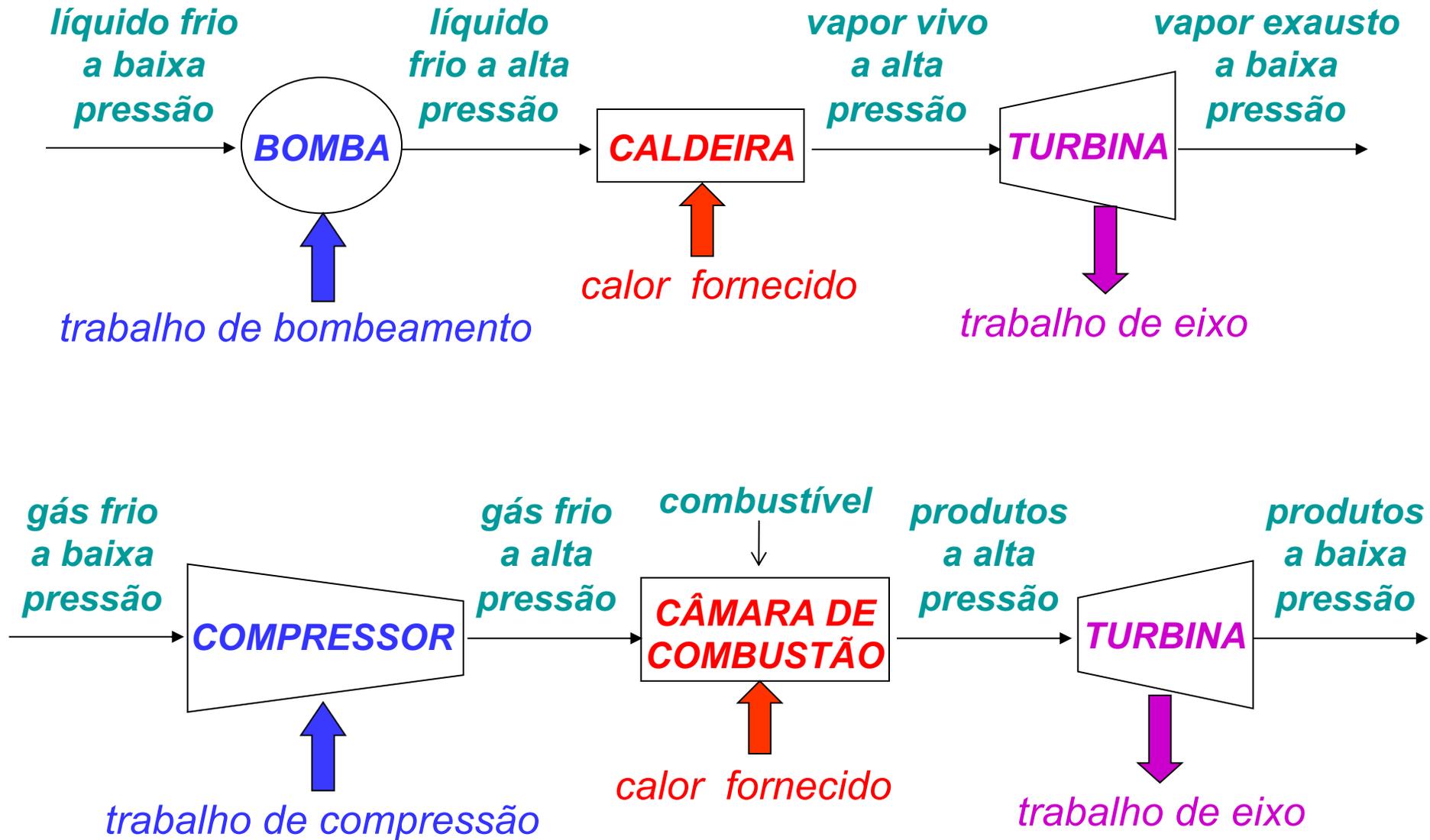
**OBS:** expansão / compressão  $\rightarrow w = \int_i^f P dv$



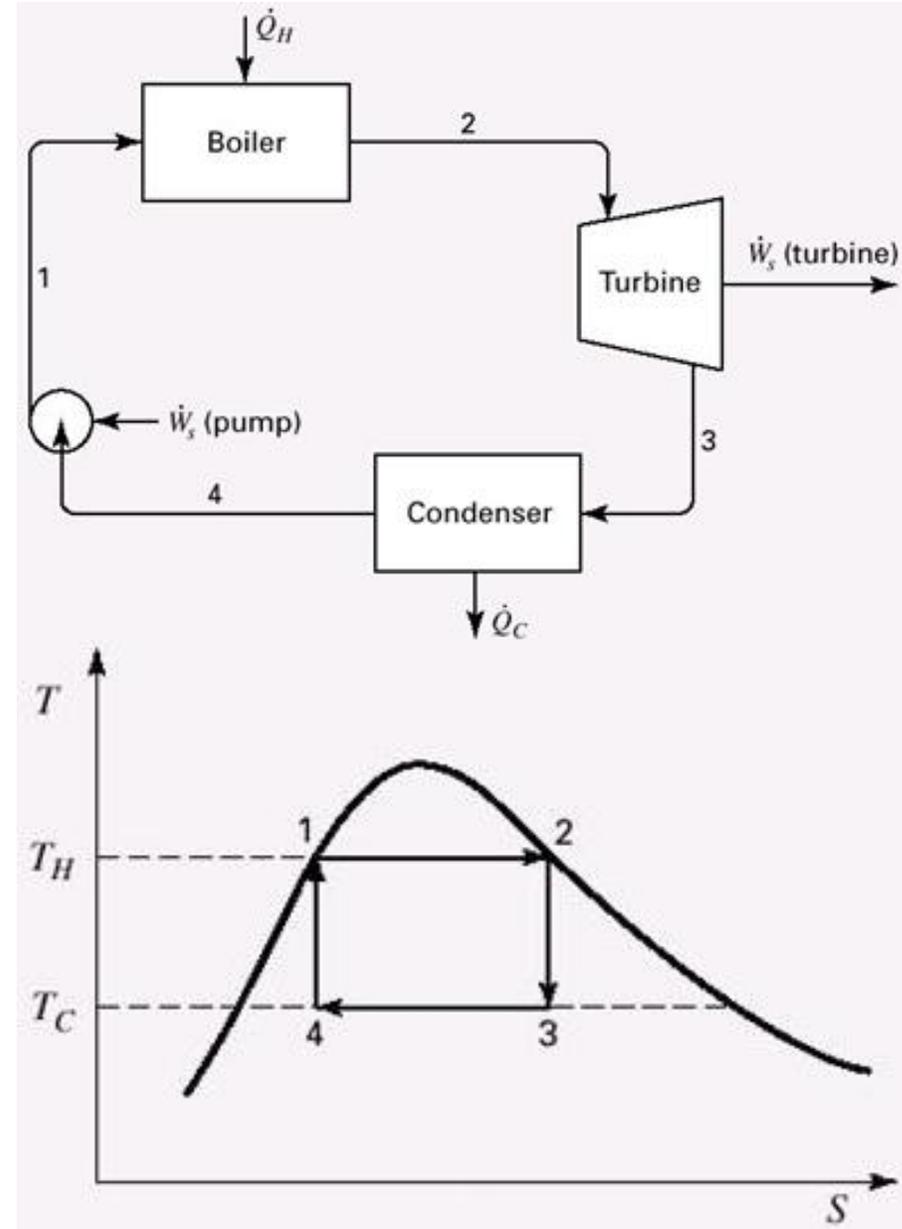
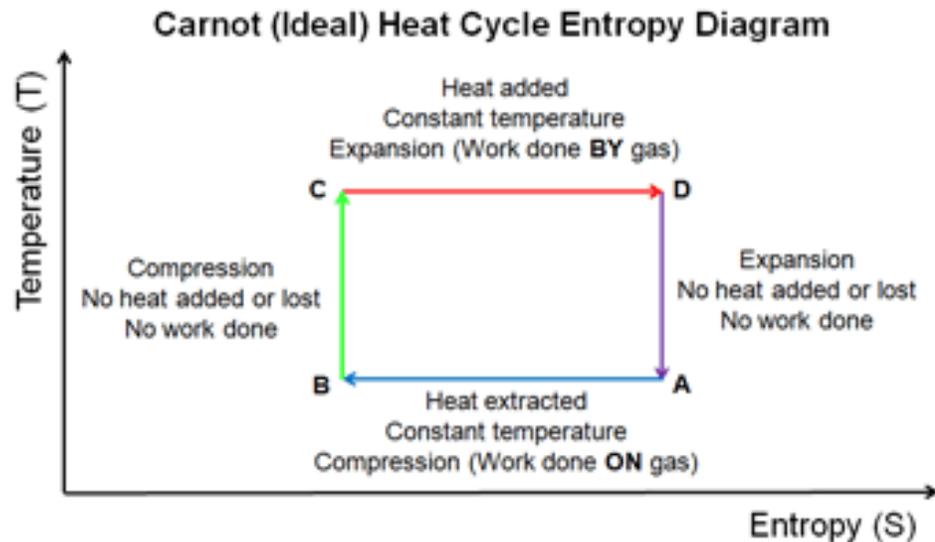
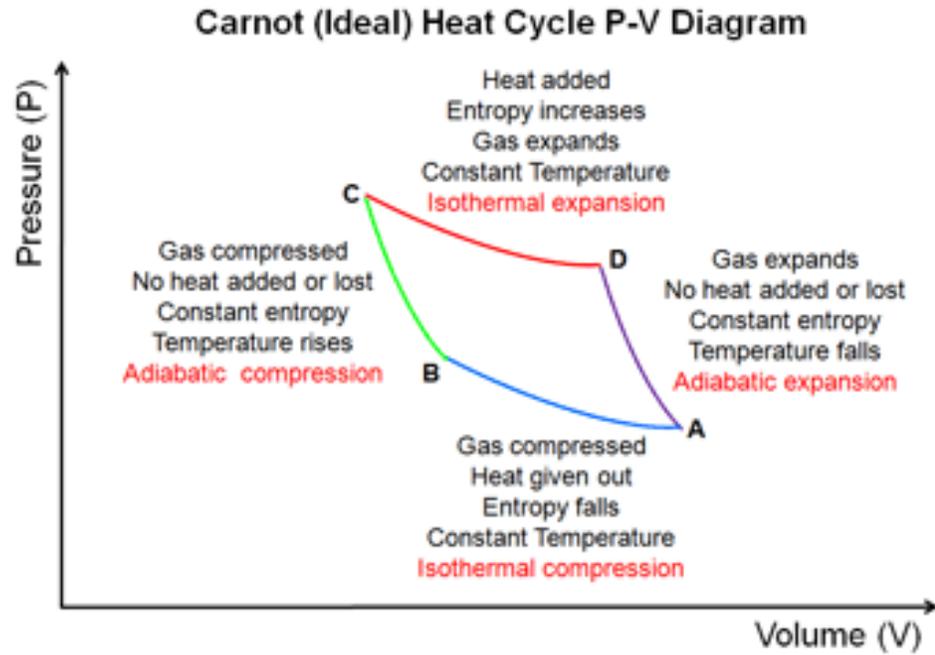
# FLUIDO OPERANTE EM CICLO FECHADO



# FLUIDO OPERANTE EM CICLO ABERTO



# REVISÃO: CICLO DE CARNOT (motor térmico)

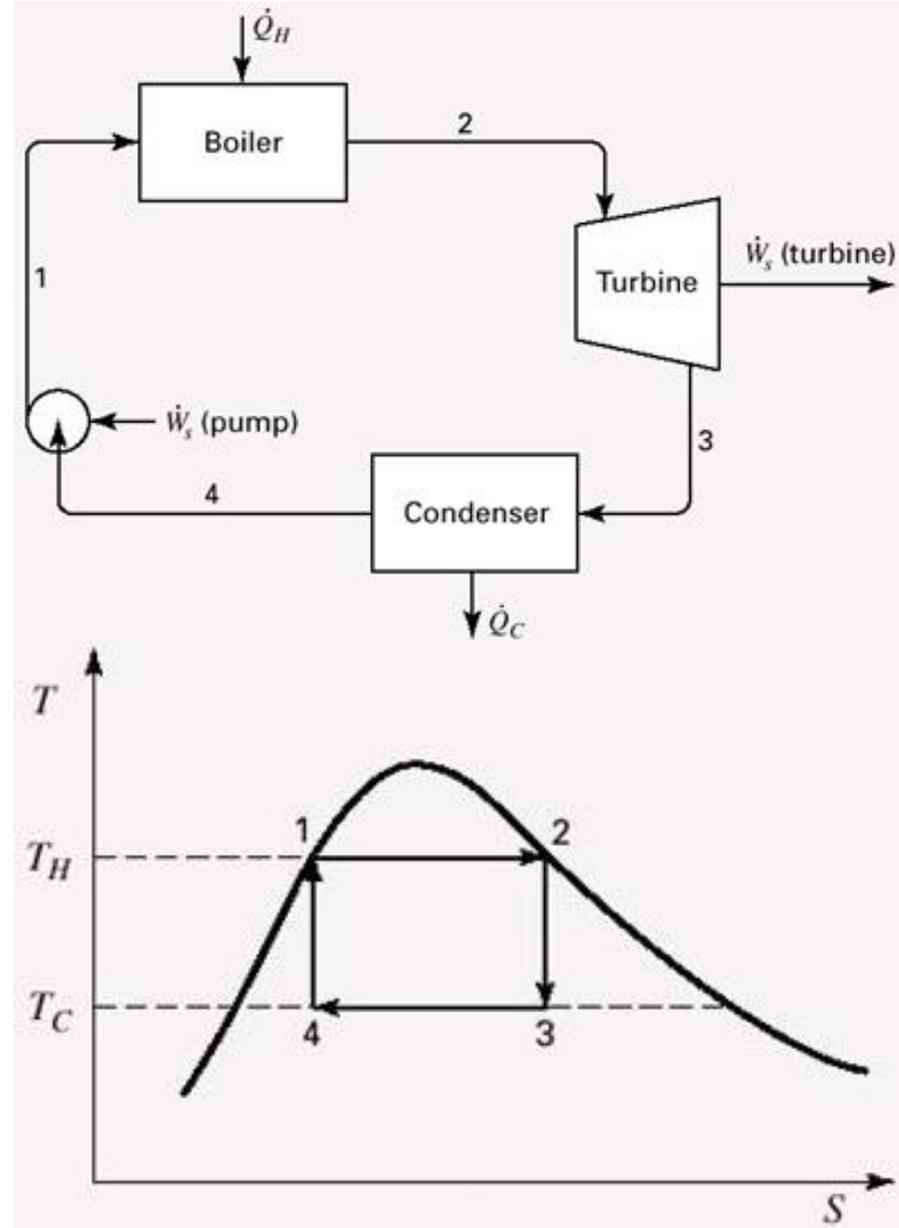


# CICLO DE CARNOT → IMPLEMENTAÇÃO

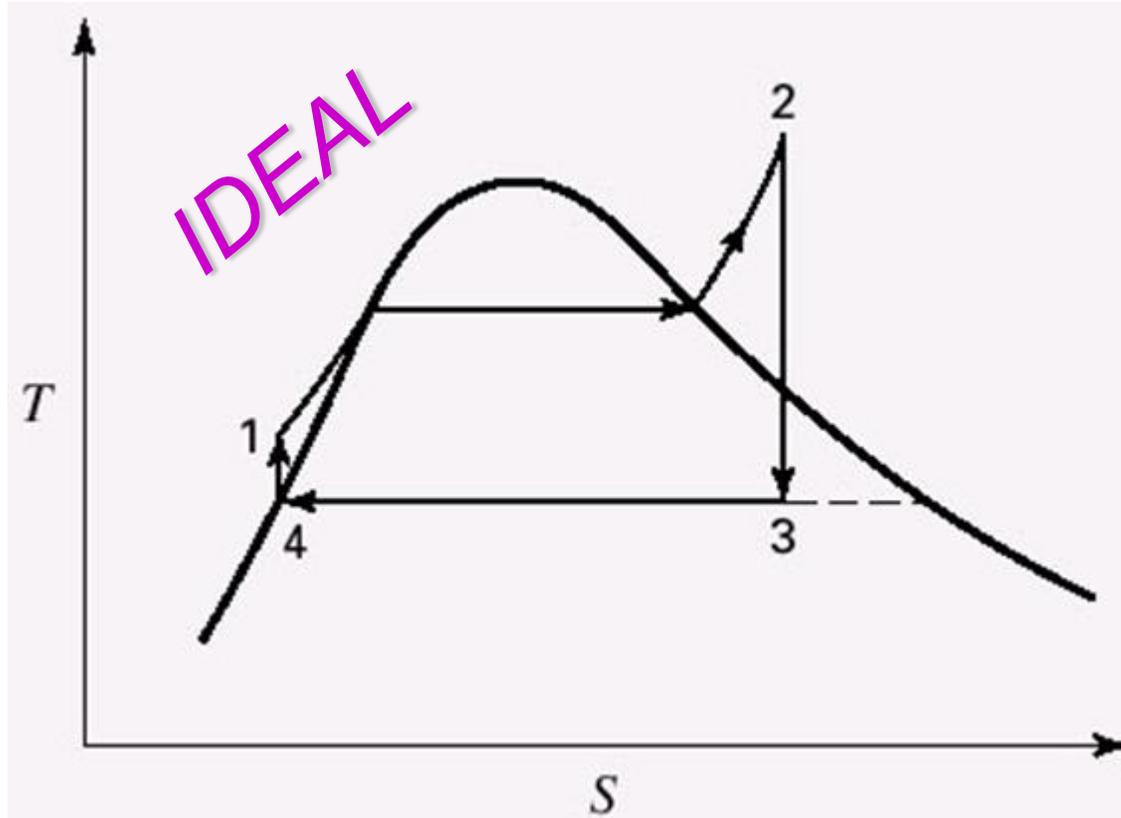
*Já que o ciclo de Carnot é o que leva ao maior rendimento (posto que elimina irreversibilidades), por que não é empregado na prática???*

**Duas razões principais:**

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



# CICLO RANKINE



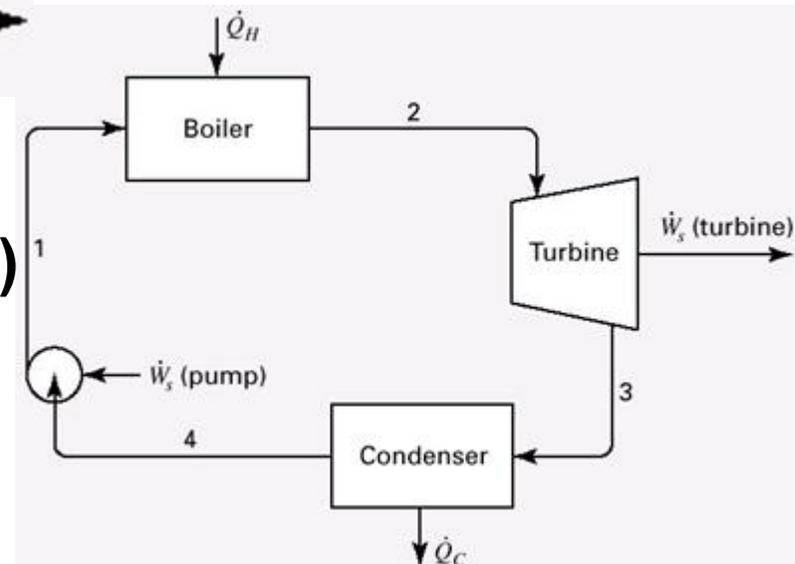
- **Aquecimento isobárico (1→2)**
- **Trabalho de eixo isentrópico (2→3)**
- **Condensação isobárica (3→4)**
- **Bombeamento isentrópico (4→1)**

**Eficiência térmica:**

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{w_{net}}{q_H}$$



$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_H} = \frac{w_t - w_b}{q_H}$$



# CICLO RANKINE → 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  $T_{\text{saturação}}$

# CICLO DE POTÊNCIA A AR → CICLO PADRÃO

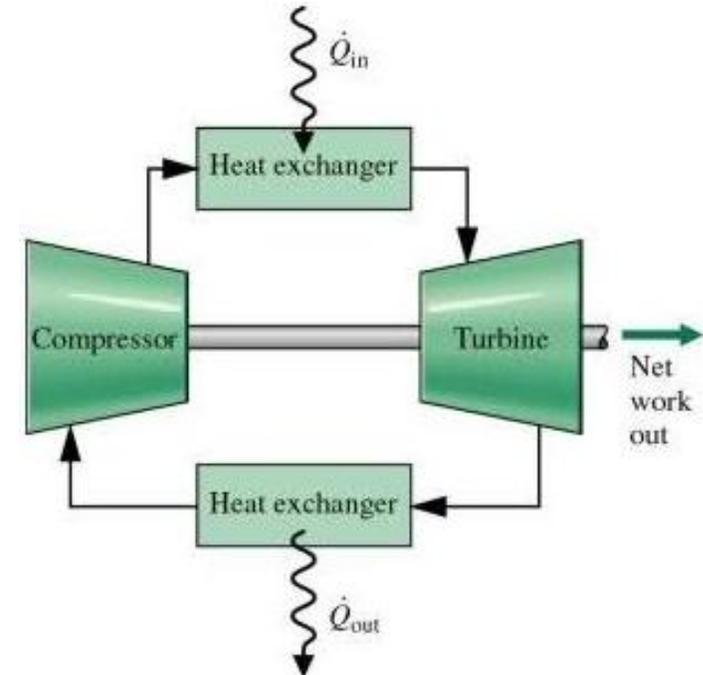
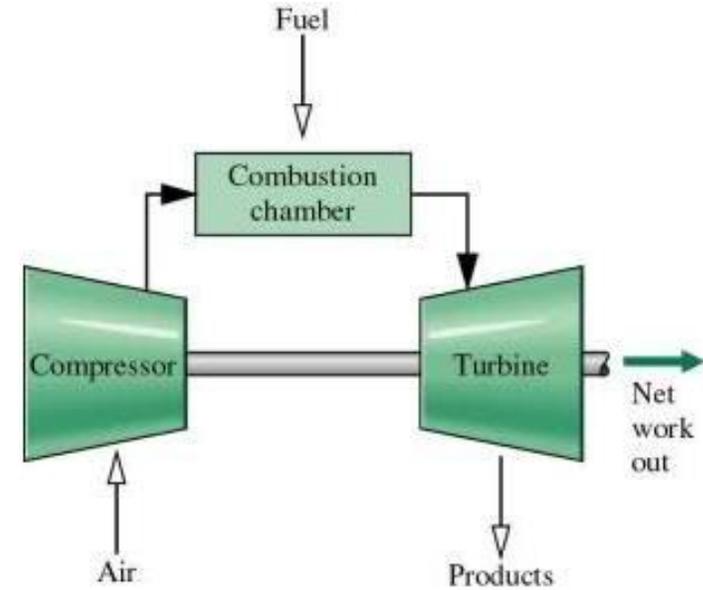
Motor de combustão interna



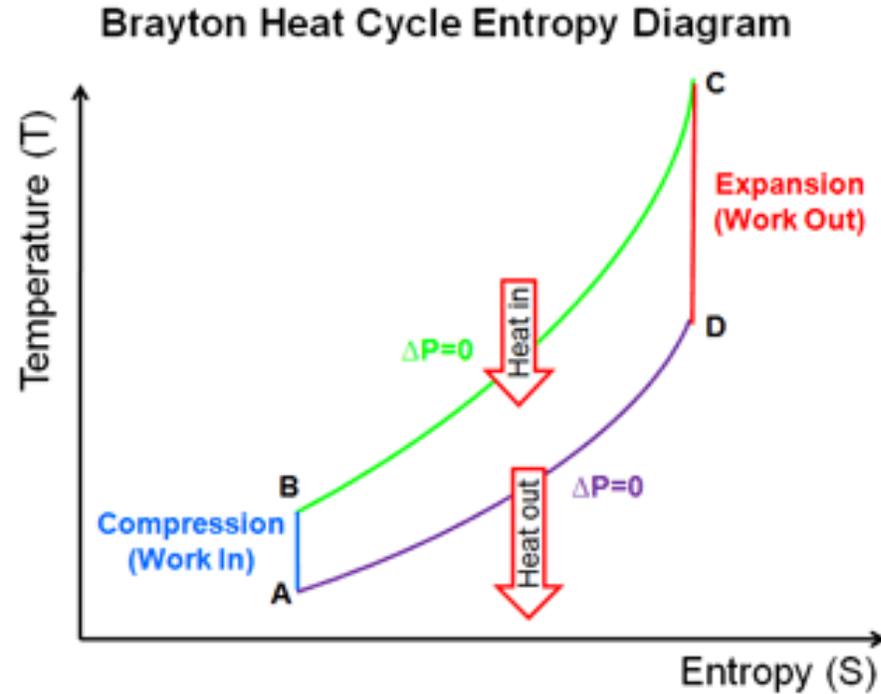
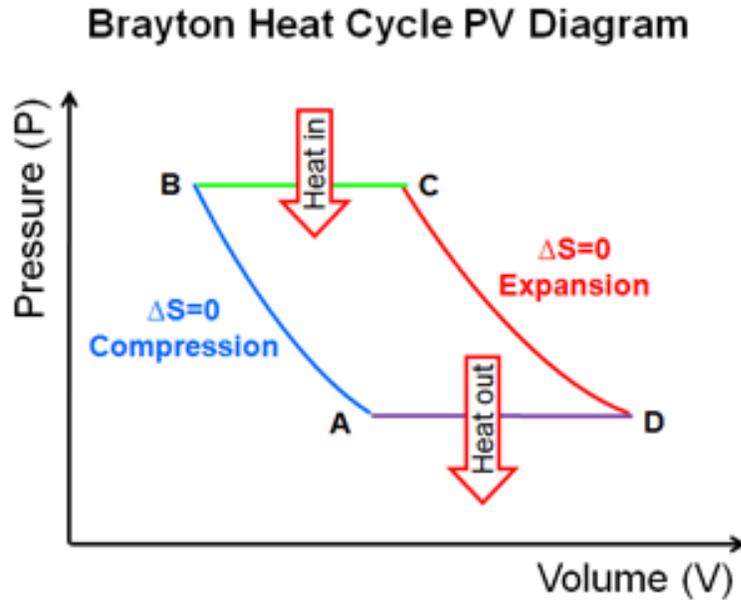
Mudança da composição do fluido

CICLO A AR PADRÃO → hipóteses:

- **Fluido operante:** massa fixa de ar (gás ideal) ao longo de todo o ciclo
- **Combustão:** substituída por uma troca de calor com RT quente ( $T_H$ )
- **Exaustão:** substituída por uma troca de calor com RT frio ( $T_L$ )
- **Processos:** internamente reversíveis
- **Complementar:** ar com  $c_p = \text{constante}$



# CICLO BRAYTON



## 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 → IRREVERSIBILIDADES

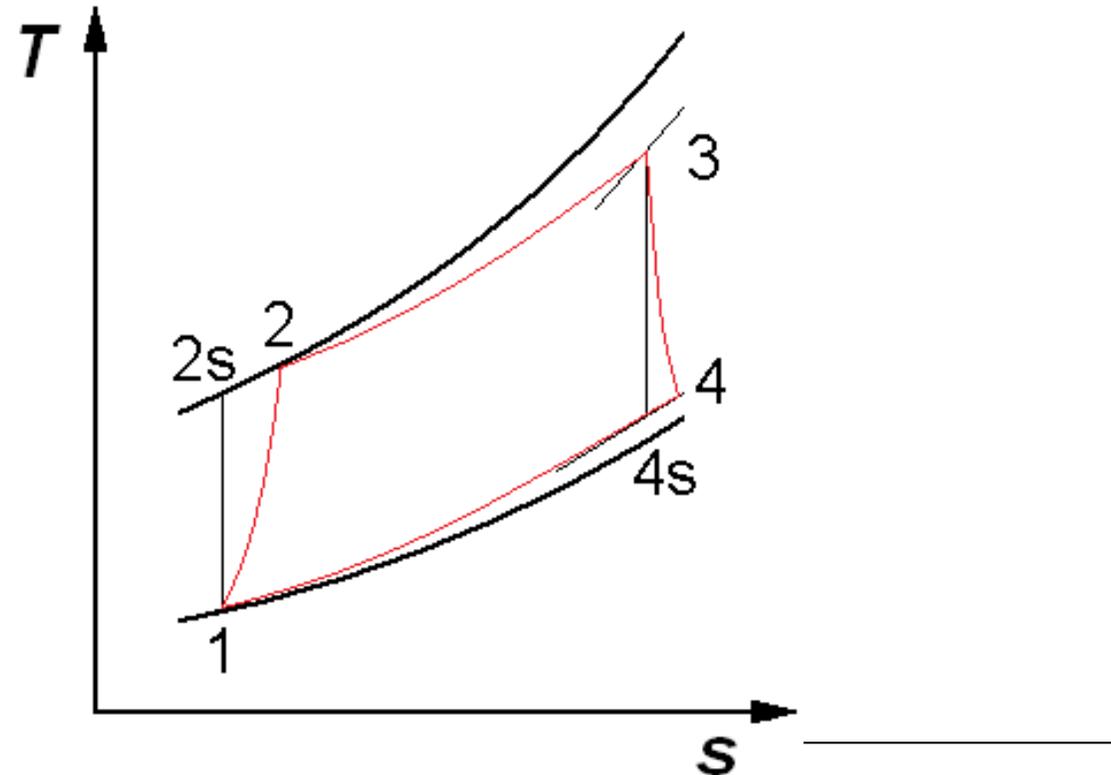
## Perdas associadas a:

- **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

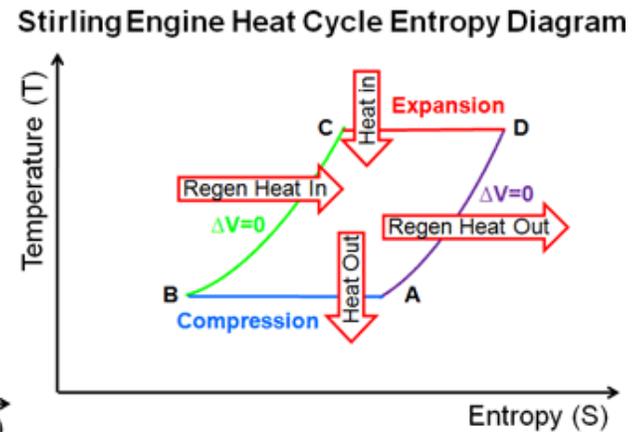
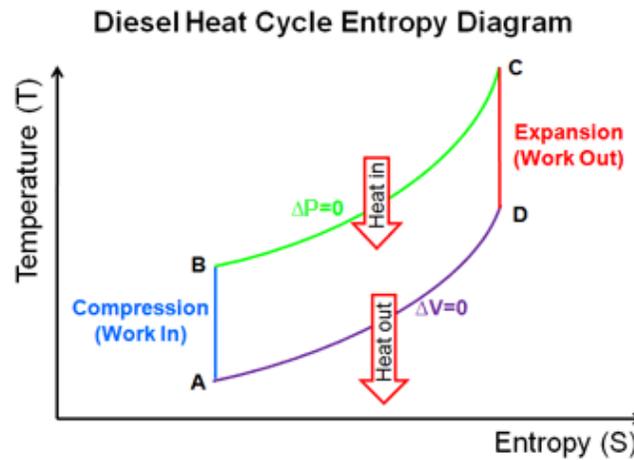
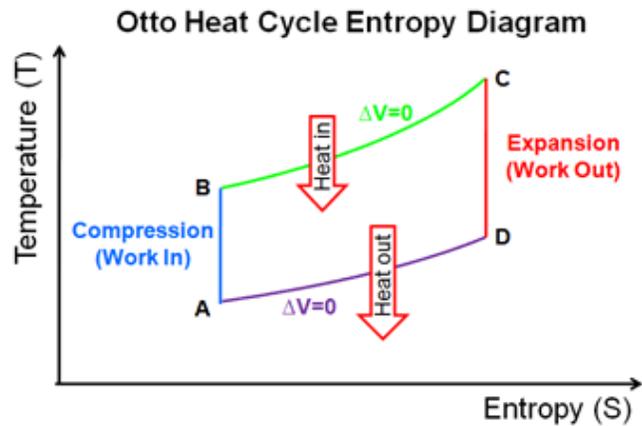
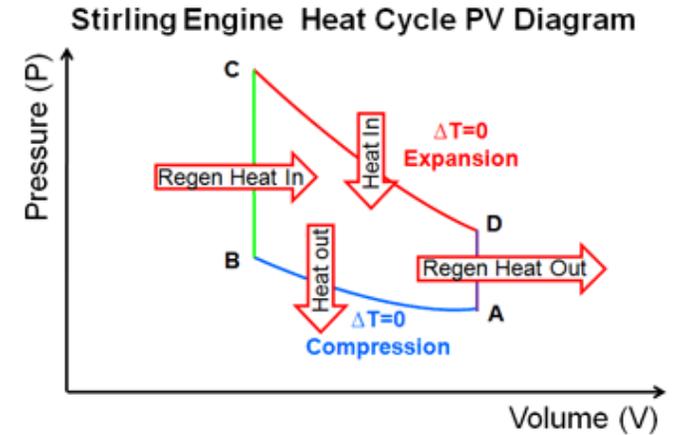
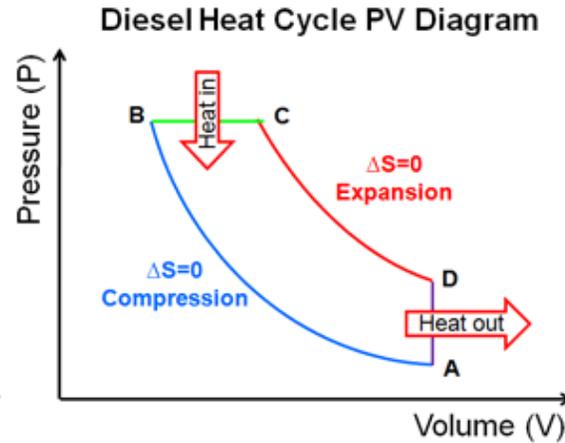
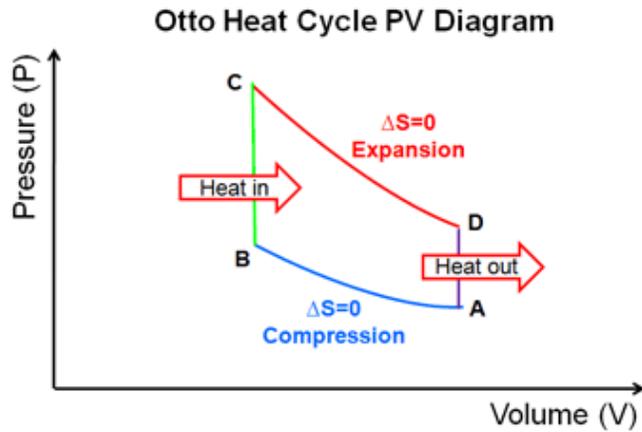
$$\eta_{\text{compr}} = \frac{w_{\text{isentr}}}{w_{\text{real}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

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

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

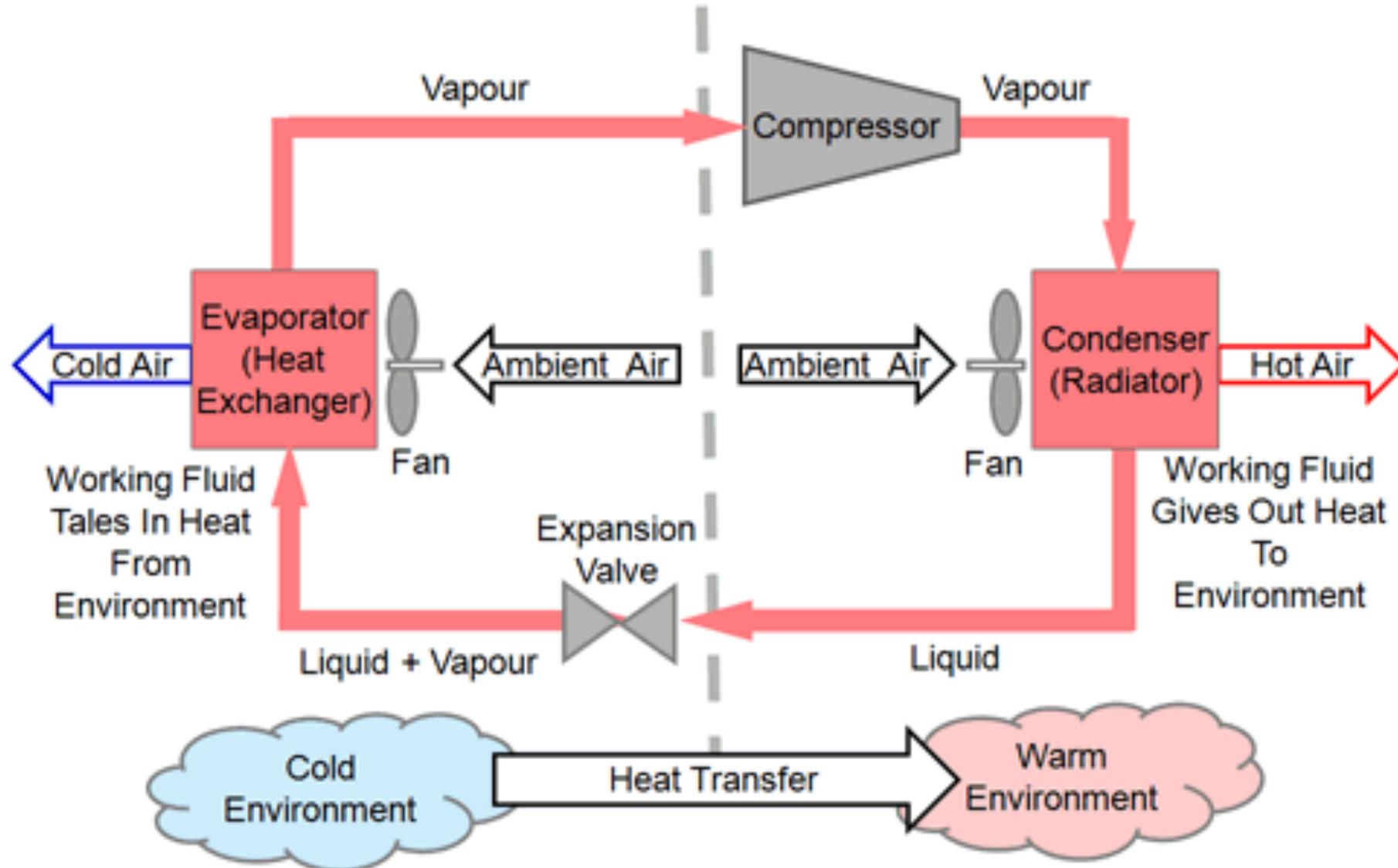


# DEMAIS CICLOS DE POTÊNCIA A AR

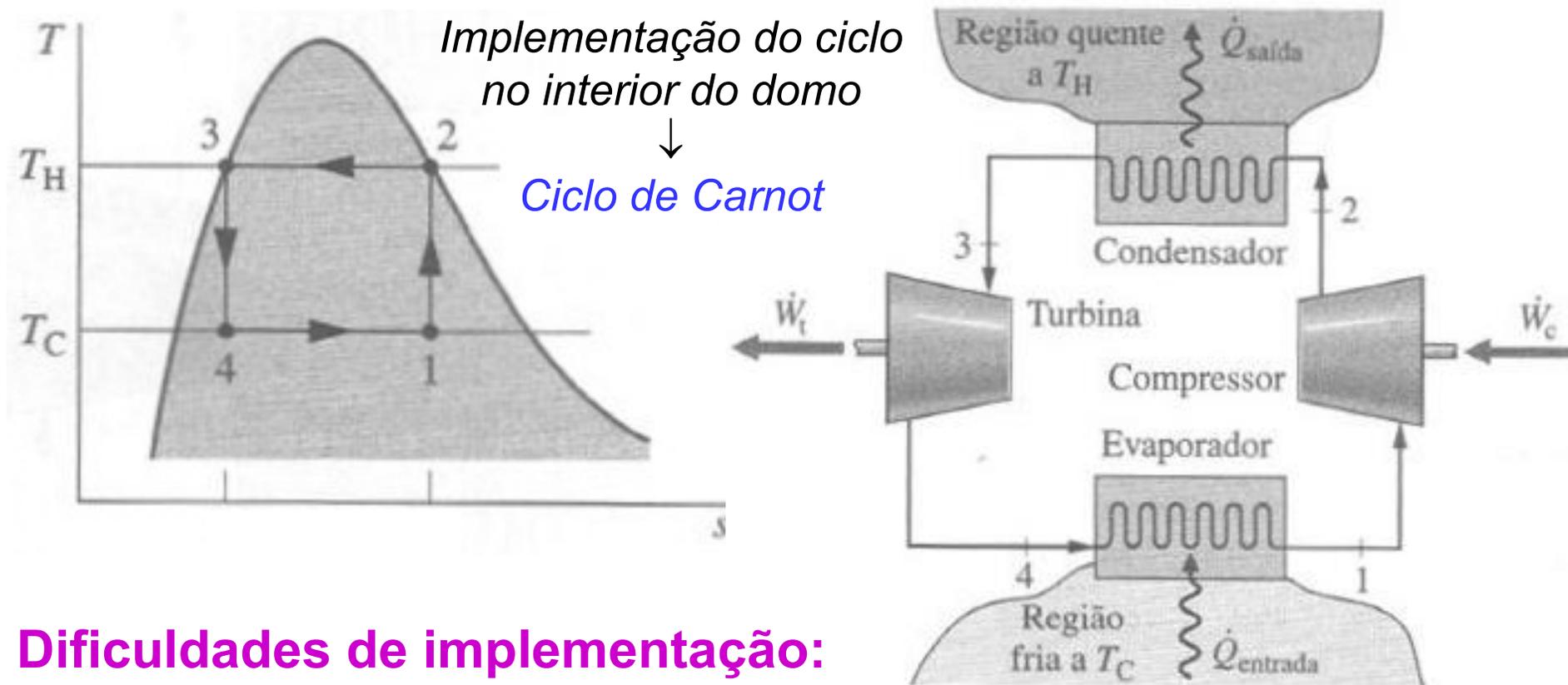


# CICLO DE REFRIGERAÇÃO / BOMBA DE CALOR

Refrigerator or Heat Pump Vapour Compression Cycle



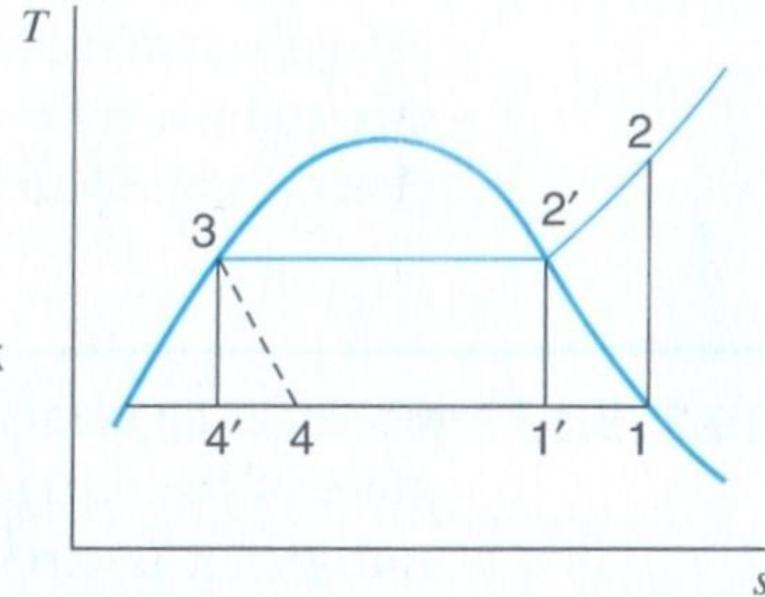
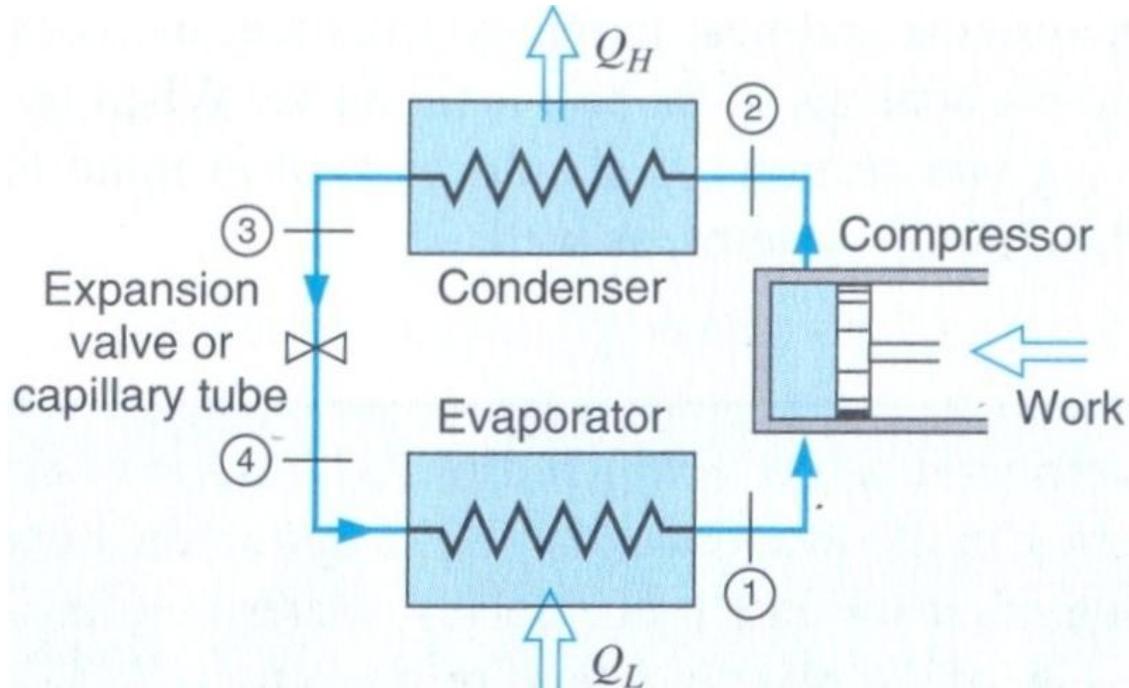
# CICLO DE REFRIGERAÇÃO / BOMBA DE CALOR



## Dificuldades de implementação:

- **Etapa 3-4: mistura L+V de baixo título → pouco trabalho (substituição da turbina por um dispositivo de expansão)**
- **Etapa 1-2: mistura L+V → dificuldades de compressão (conveniente lidar apenas c/ fase vapor → superaquecimento)**

# CICLO DE REFRIGERAÇÃO / BOMBA DE CALOR



## Ciclo de refrigeração ideal:

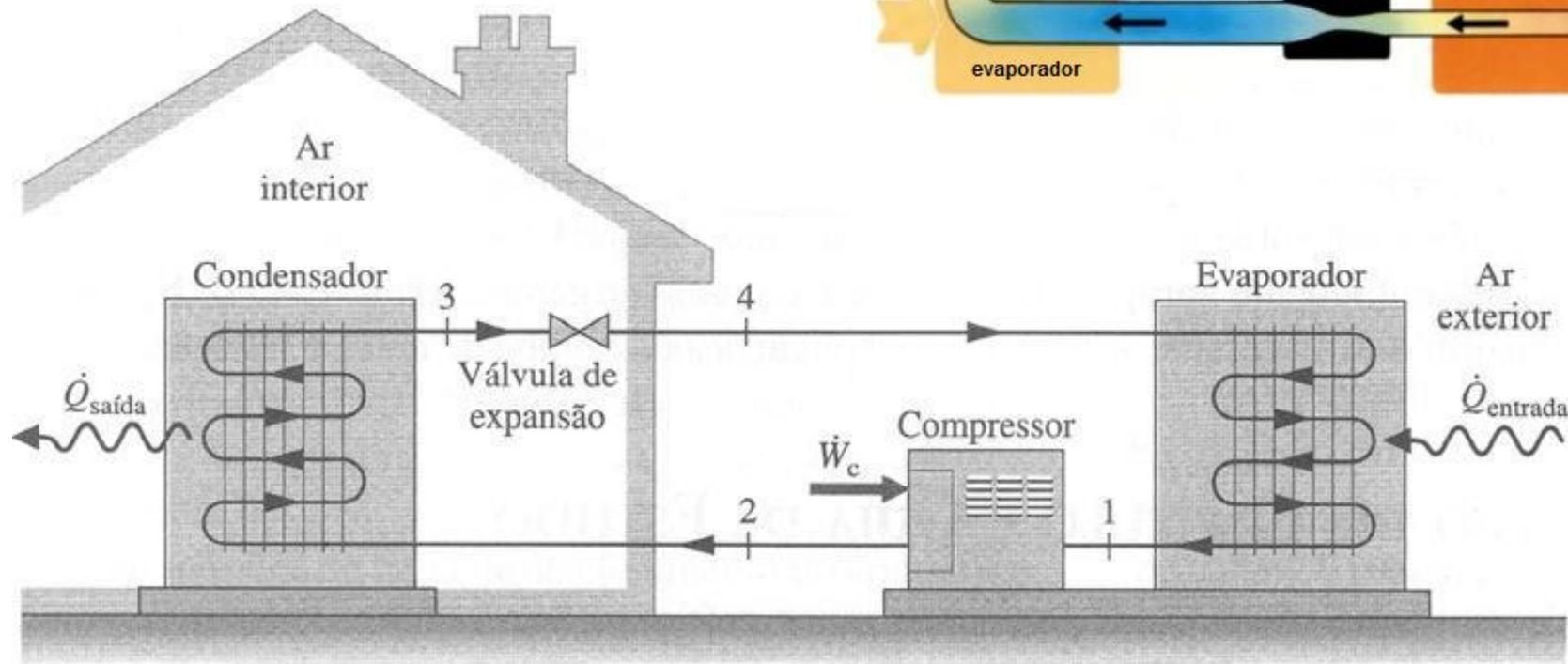
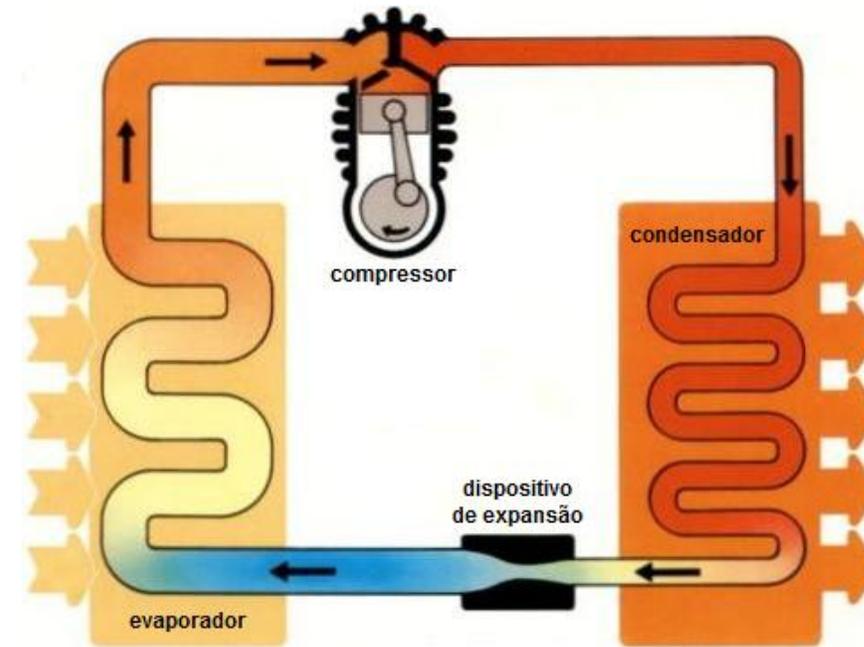
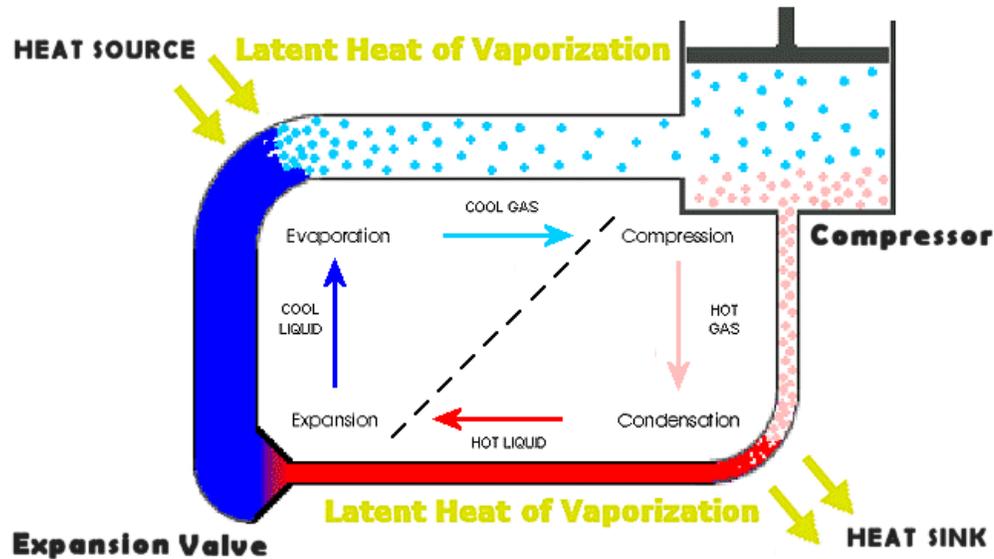
- Compressão isentrópica (1→2)
- Troca de calor isobárica (2→3)
- Expansão isentálpica (3→4)
- Troca de calor isobárica (4→1)

## Coefficiente de performance:

$$COP_{\text{refrig}} = \frac{q_L}{w_c}$$

$$COP_{\text{b.calor}} = \frac{q_H}{w_c}$$

# CICLO DE REFRIGERAÇÃO / BOMBA DE CALOR



# CICLO DE REFRIGERAÇÃO / BOMBA DE CALOR

Irreversibilidades associadas a:

- **Compressor** → transferência de calor para / a partir do meio
- **Condensador** → queda de pressão, temperatura < saturação
- **Tubulação** → queda de pressão, troca de calor com o meio
- **Evaporador** → queda de pressão, troca de calor com o meio

