



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

## Aula 10 – Processos Termodinâmicos

**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

- Processos
  - Isotérmicos
  - isocóricos
  - isobáricos
  - adiabáticos
  - politrópicos
  - isentrópicos
- Ciclo de Carnot

# PROCESSOS TERMODINÂMICOS

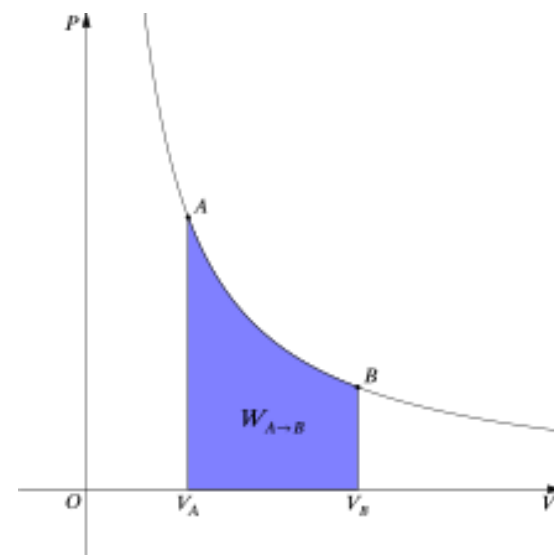
# Processo

- Mudança de um sistema de um estado para outro
- Para descrever um processo, é preciso especificar:
  - Estado inicial
  - Estado final
  - Estados intermédios (*caminho*)

# PROCESSOS ISOTÉRMICOS

# Processos isotérmicos (1)

- Processo que ocorre a temperatura constante (e.g. mudança de fase)
  - Existência de um reservatório térmico com o qual há uma troca de calor suficientemente devagar para que o sistema se ajuste à temperatura do reservatório sem se alterar
    - $\Delta T = 0$
    - $\Delta U = 0$



# Processos isotérmicos (2)

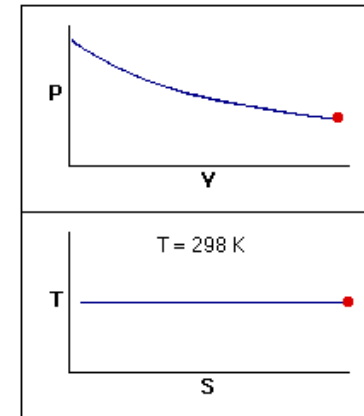
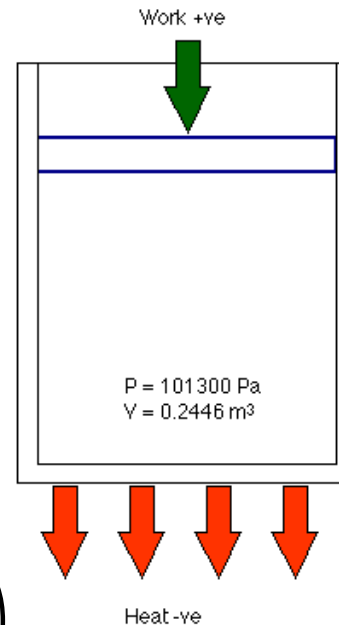
- Da 1ª lei da termodinâmica

$$Q - W = \Delta U \xleftrightarrow{\Delta U=0} Q = W$$

$$W = \int_1^2 P dV$$

- Se gás perfeito

$$W = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$



- 2ª lei da termodinâmica

$$T dS = dU + P dV \Leftrightarrow dS = \frac{P dV}{T} = nR \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

*Se  $W=0$ , expansão livre de um gás (processo irreversível)*

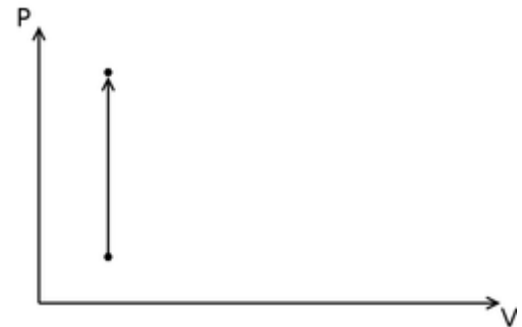
$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \xleftrightarrow{\text{int rev}} \Delta S = \frac{Q}{T}$$

# PROCESSOS ISOCÓRICOS



# Processos isocórico (1)

- Processo que ocorre a volume constante
  - Como a energia é transferida a volume constante, não há realização de trabalho
  - $\Delta V = 0$
  - $\Delta W = 0$
  - $\Delta U = Q$



# Processos isocóricos (2)

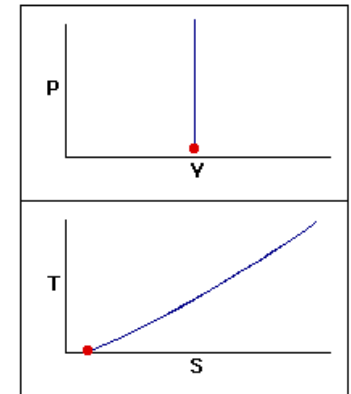
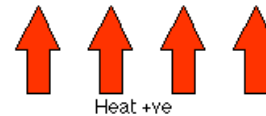
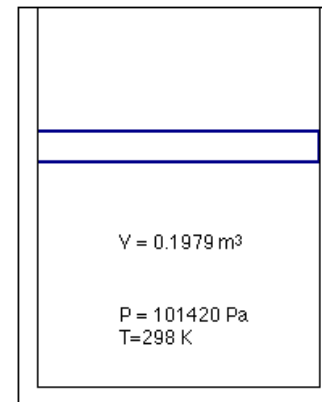
- Como vimos anteriormente

$$c_v = \left( \frac{\delta u}{\delta T} \right)_v$$

– Então

$$dU = mC_v dT$$

$$dU = Q = mC_v \Delta T$$



- Da 2ª lei da termodinâmica

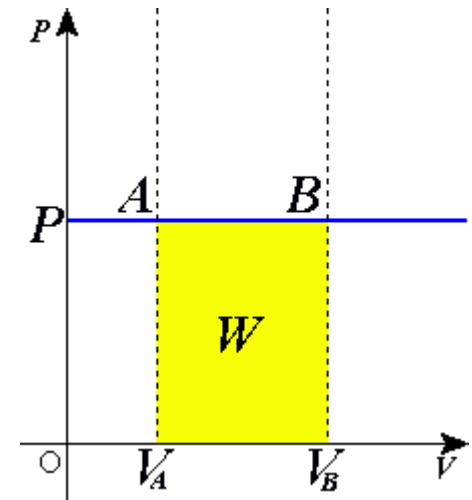
$$T dS = dU \Leftrightarrow dS = \frac{C_v dT}{T} = C_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$$

# PROCESSOS ISOBÁRICOS

# Processos isobárico (1)

- Processo que ocorre a pressão constante
  - Neste caso, varia não só o trabalho mas também a energia interna do sistema
  - Da 1ª lei da termodinâmica

$$\Delta U = Q - W$$



# Processos isobáricos (2)

- Como vimos anteriormente

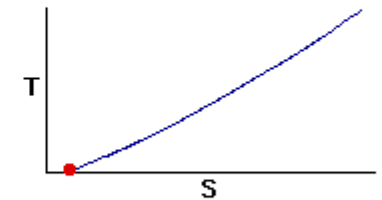
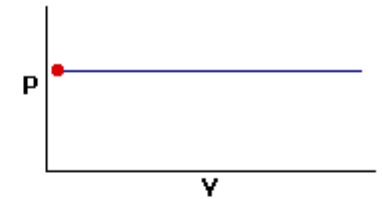
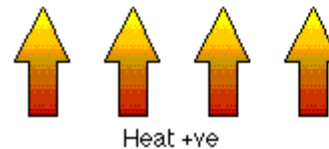
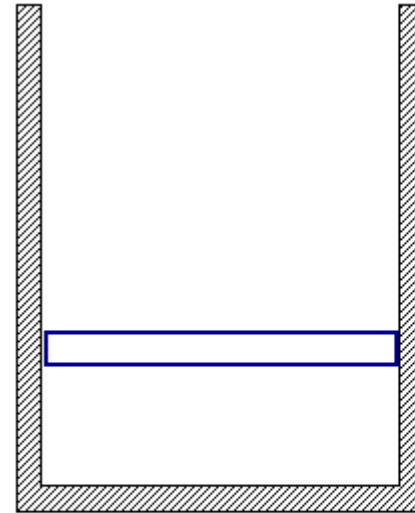
$$W = \int_1^2 P dV$$

$$Q = \Delta U + P\Delta v$$

$$Q = \Delta H$$

$$c_p = \left( \frac{\delta h}{\delta T} \right)_p$$

$$Q = mC_p\Delta T$$



P = 250000 Pa  
T = 298 K  
V = 0.0991 m<sup>3</sup>

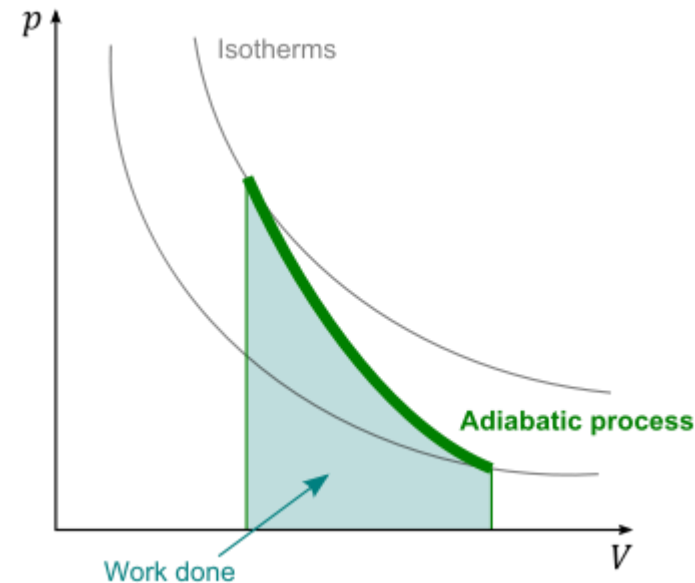
- Da 2ª lei da termodinâmica

$$dS = \frac{mC_p dT}{T} = mC_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$$

# PROCESSOS ADIABÁTICOS

# Processos adiabáticos (1)

- Processo que ocorre sem trocas de calor com o exterior
  - Ocorre quando a fronteira do sistema está isolada ou quando é feito a uma velocidade muito grande
  - $\Delta Q = 0$
  - $\Delta U = -W$



# Processos adiabáticos (2)

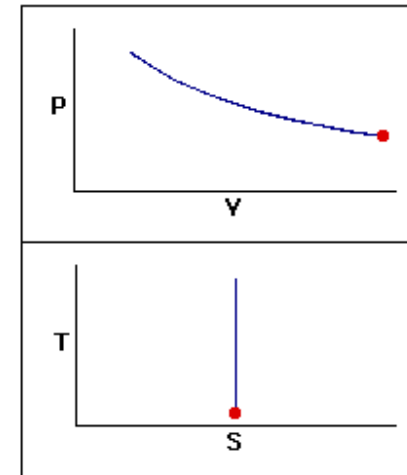
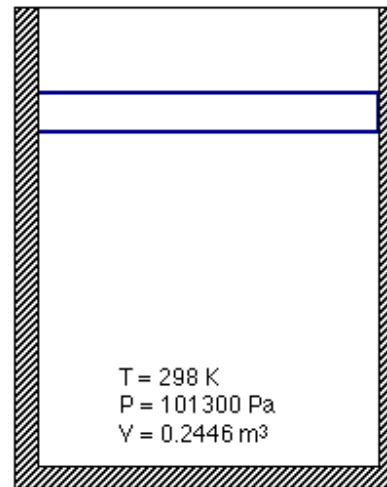
- Da 2ª lei da termodinâmica

- Processo reversível

$$dS = 0$$

- Processo irreversível

$$dQ < TdS$$





# PROCESSOS POLITRÓPICOS

# Definição

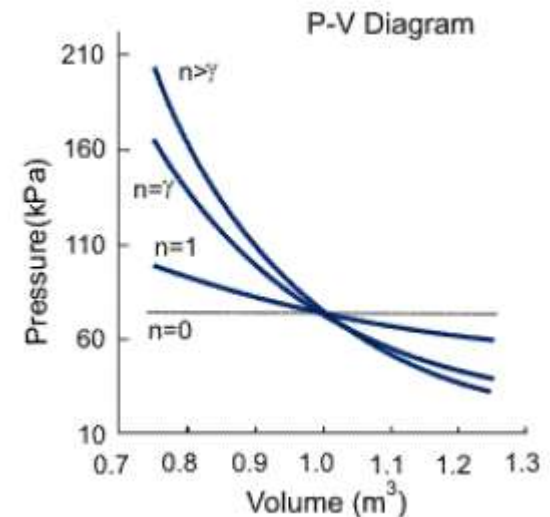
- Existem processos de expansão e compressão de gases reais em que a pressão e o volume podem ser descritos através da seguinte relação:

$$PV^n = C \Leftrightarrow P_1V_1^n = P_2V_2^n$$

- Assumimos que o processo é quasi-equilíbrio
- Para processos politrópicos de um gás perfeito:

$$W_b = \frac{mR_{gas}(T_2 - T_1)}{1 - n}, n \neq 1$$

- $n=1$  é equivalente a um processo isotérmico
- $n=0$  é um processo isobárico (pressão constante)



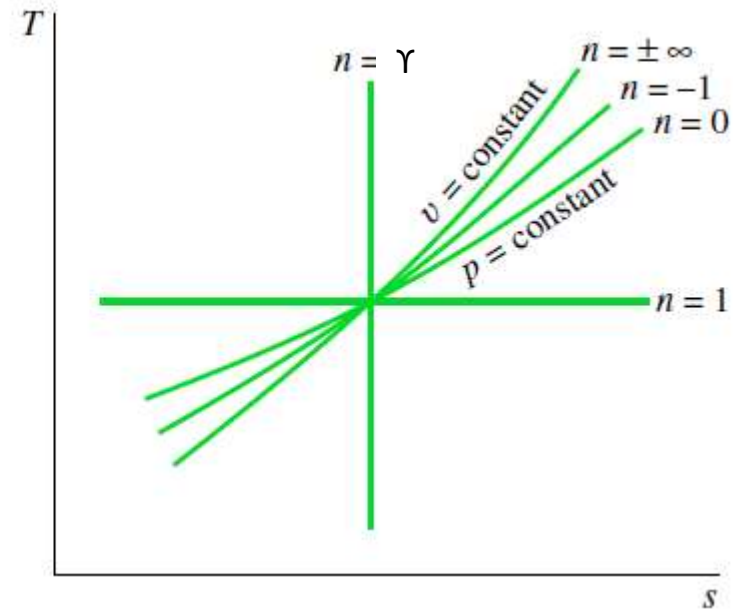
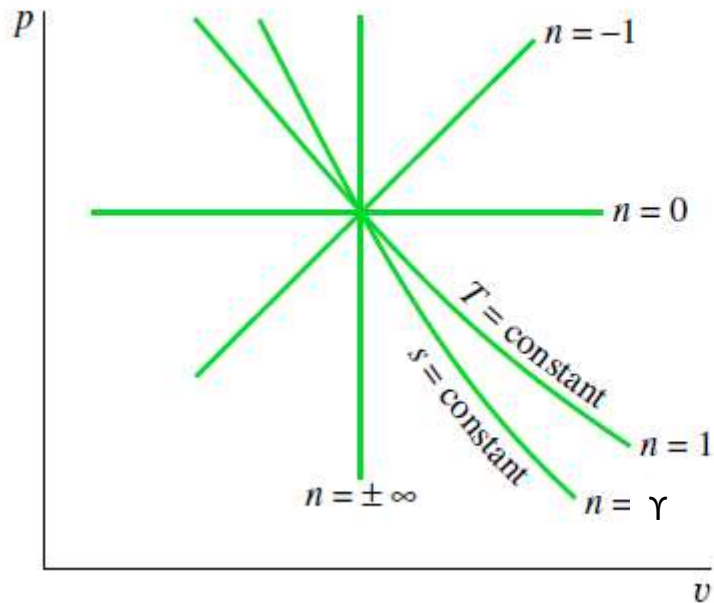
# Processos politr\u00f3picos (1)

- Processo revers\u00edvel onde se verifica que  $PV^n = C$

$n = 0$	$PV^0 = C$	Processo isob\u00e1rico
$n = 1$	$PV^1 = nRT$	Processo isot\u00e9rmico
$1 < n < \gamma$		Processo quasi-adiab\u00e1tico
$n = \gamma$	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	Processo adiab\u00e1tico
$n = \infty$		Processo isoc\u00f3rico

$$W = \int_1^2 PdV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{n - 1}, n \neq 1$$

# Processos politr\u00f3picos (2)

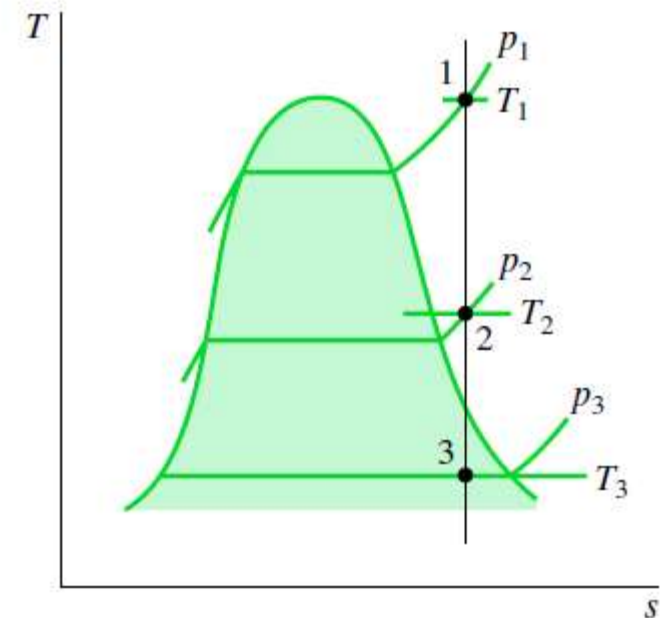


# PROCESSOS ISENTRÓPICOS

# Processos isentrópicos

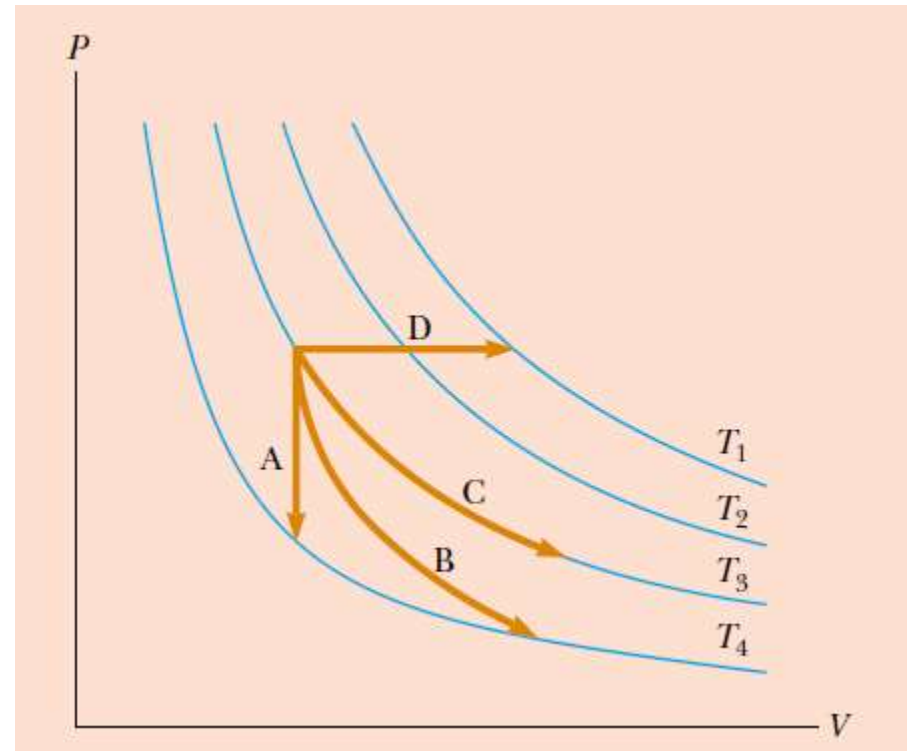
- Processos onde a entropia se mantém constante
  - Processos adiabáticos reversíveis

$$\Delta S=0$$



# Exemplos

- Classifique os processos:
  - A: isocórico
  - B: adiabático
  - C: isotérmico
  - D: isobárico



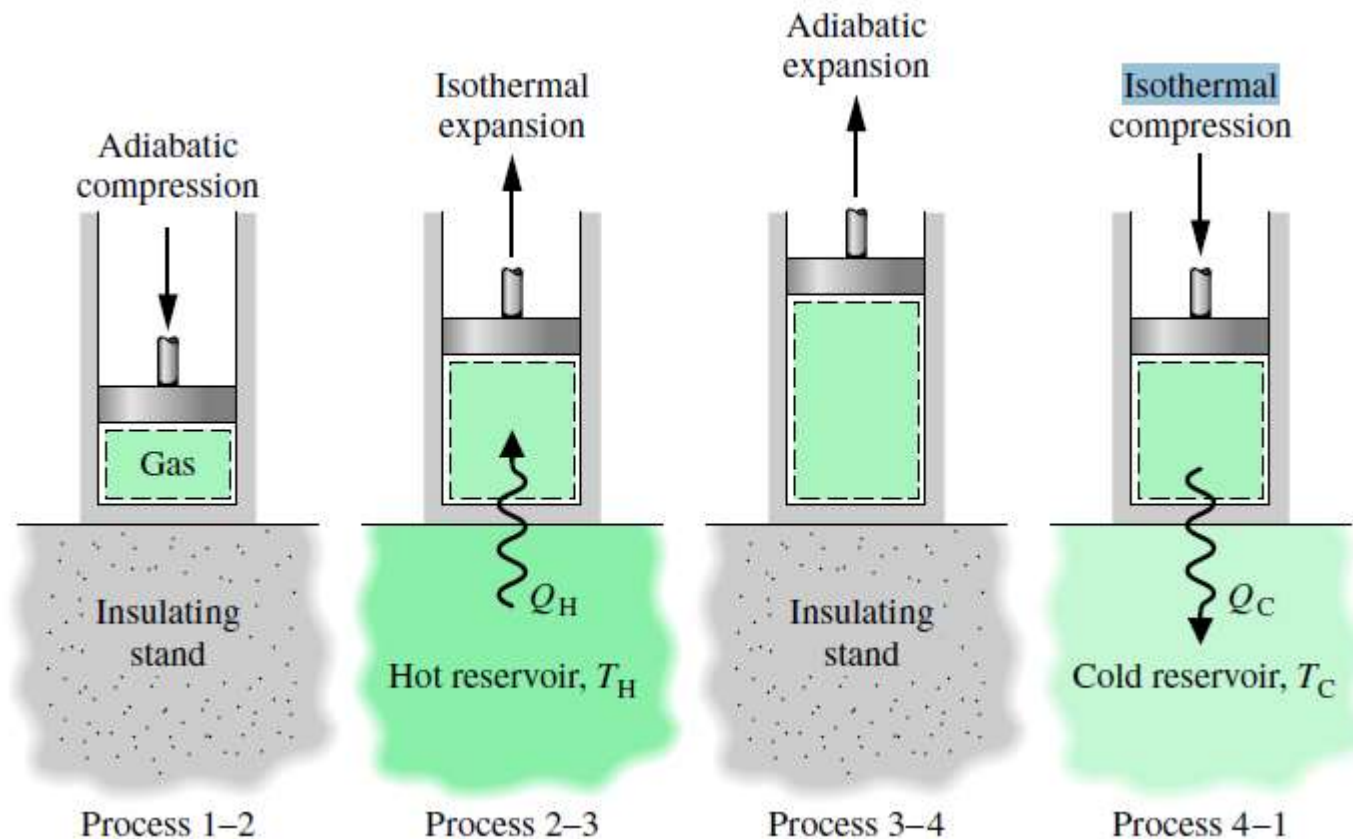
# CICLO CARNOT



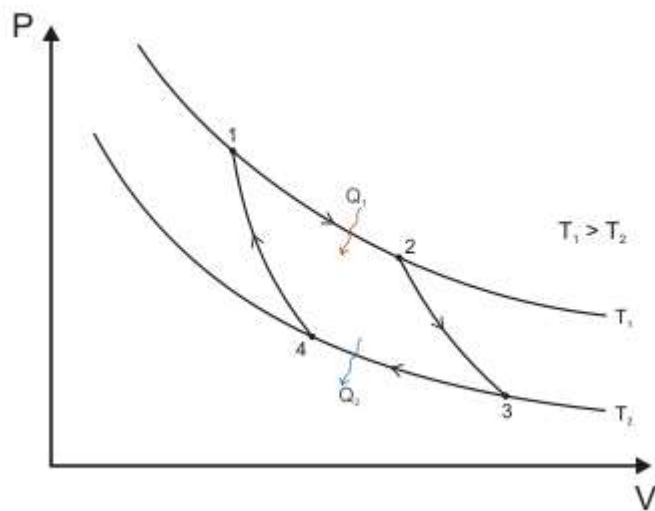
# Definição

- Ciclo termodinâmico ideal entre dois reservatórios térmicos composto por 4 processos reversíveis
  - 1→2 : expansão isotérmica após entrar em contacto com reservatório quente  $T_H$
  - 2→3 : Expansão adiabática até  $T_C$
  - 3→4 : Compressão isotérmica após entrar em contacto com reservatório frio  $T_C$
  - 4→1 : compressão adiabática de um gás perfeito até  $T_H$

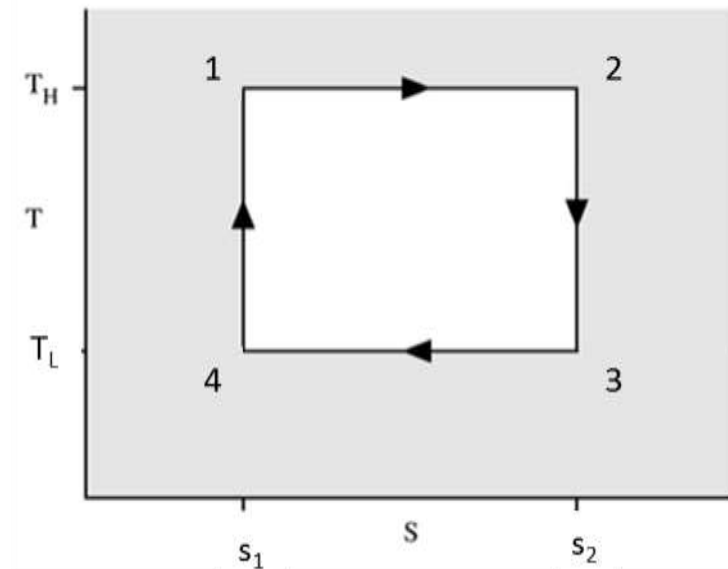
# Ciclo Carnot



# Representação nos diagramas



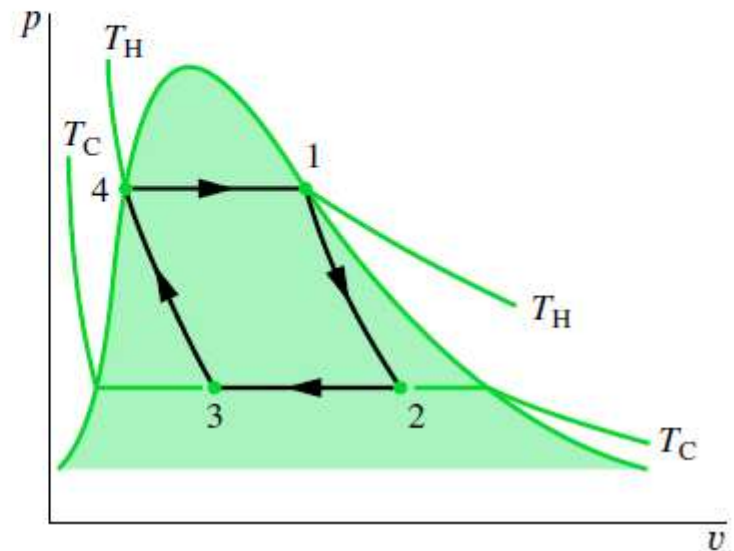
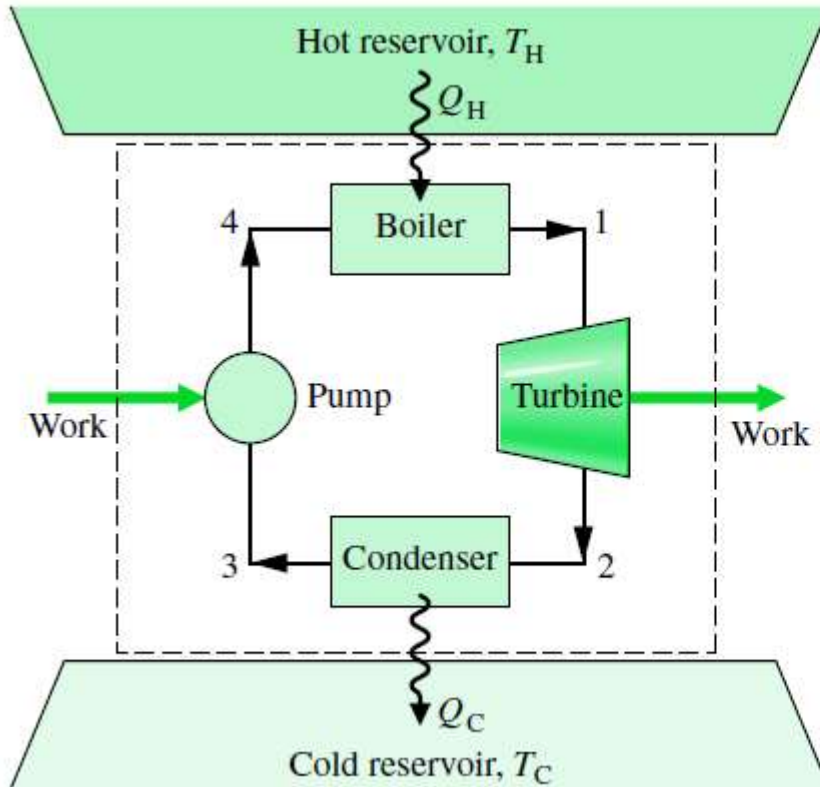
- 1→2 : Recebe Q
- 2→3 : Produz W
- 3→4 : Perde Q
- 4→1 : Consome W



# Considerações sobre o ciclo

- Máquina térmica
  - Ciclo no sentido horário
- Ciclo frigorífico / bomba de calor
  - Ciclo no sentido anti-horário
- Ciclo de eficiência máxima entre dois reservatórios

# Ciclo de Carnot a vapor



# Ciclo de Carnot de Bomba de Calor

