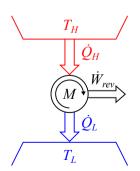
# 5 Desigualdade de Clausius

Corolário da 2ª Lei

#### a) Motor reversível

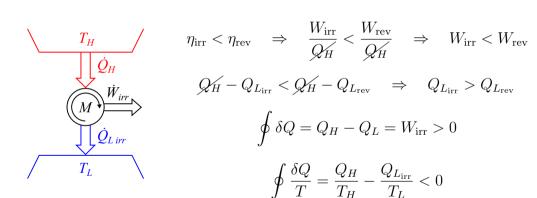


$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L = W_{\text{rev}} > 0$$

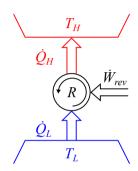
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

#### b) Motor irreversível

Assumindo o mesmo  $Q_H$  do motor reversível.



#### c) Refrigerador reversível



$$\oint \delta Q = -Q_H + Q_L = -W_{\text{rev}} < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

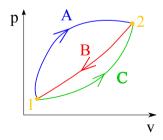
#### d) Refrigerador irreversível

Assumindo o mesmo  $Q_L$  do refrigerador reversível.

Assim, para todos os ciclos:

$$\boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0} \quad \left\{ \begin{array}{l} = 0, \quad \text{p/ m\'aquinas revers\'iveis} \\ < 0, \quad \text{p/ m\'aquinas irrevers\'iveis} \end{array} \right.$$

# 6 Entropia



A, B e C processos reversíveis

Ciclo I: vai de 1 a 2 por A e volta por B:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1}^{2} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{A} + \int_{2}^{1} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{B}$$
 (1)

Ciclo II: vai de 1 a 2 por C e volta por B:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_{1}^{2} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{C} + \int_{2}^{1} \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{B}$$
 (2)

Fazendo (1)–(2): 
$$\int_{1}^{2} \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{A} = \int_{1}^{2} \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{C}$$

 $\therefore \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \text{ \'e constante para todos os processos reversíveis} \rightarrow \text{\'e função dos estados inicial e final} \rightarrow \text{propriedade termodinâmica}$ 

#### Definição de entropia

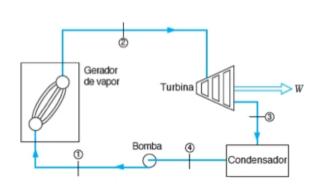
$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{rev}} \quad \Rightarrow \quad S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{rev}}$$

- Valor tabelado
- $[s] = kJ/(kg \cdot K)$
- Valores dados em relação a um estado de referência arbitrário\*
- Na saturação:  $s = (1 x)s_l + xs_v = s_l + xs_{lv}$
- A entropia de um líquido comprimido pode ser aproximada pela do líquido saturado à mesma temperatura.

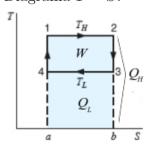
<sup>\*</sup>Comentar sobre 3<sup>a</sup> Lei

# 7 Variação de entropia em processos reversíveis

#### Motor de Carnot



### Diagrama T - S:



•  $1-2 \rightarrow \text{isotérmico reversível}$ 

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_H}{T_H} > 0$$

•  $2-3 \rightarrow adiabático reversível$ 

$$\delta Q = 0 \quad \Rightarrow \quad S_3 - S_2 = \int_0^3 \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{processo isentrópico}$$

•  $3-4 \rightarrow \text{isotérmico reversível}$ 

$$S_4 - S_3 = \int_0^4 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_L} \int_0^4 \delta Q = -\frac{Q_L}{T_L} < 0$$

• 4–1 → adiabático reversível

$$\delta Q = 0 \quad \Rightarrow \quad S_1 - S_4 = \int_4^1 \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{processo isentrópico}$$

Desempenho:  $\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$ 

$$Q_H = T_H(S_2 - S_1) \quad \Rightarrow \quad \text{área sob a curva}$$

$$|Q_L| = T_L(S_3 - S_4)$$
  $W = Q_H - Q_L =$ área 1234 no ciclo

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{\text{área } 1234}{\text{área } 12ba}$$

## Refrigerador de Carnot

$$\beta = \frac{Q_L}{W} = \frac{\text{área } 12ba}{\text{área } 1234}$$

$$\beta_{BC} = \frac{Q_H}{W} = \frac{\text{área } 43ba}{\text{área } 1234}$$

†‡

 <sup>†</sup>Como aumentar  $\eta$  e  $\beta$ 

<sup>&</sup>lt;sup>‡</sup>Integral só é válida para processos reversíveis.

## Exercício 3

Um conjunto cilindro-pistão contém 1 kg de amônia que está, inicialmente, a 50 °C e 1 MPa. Determine o trabalho realizado e o calor transferido quando o fluido é expandido:

- a) De modo isotérmico e reversível até que a pressão atinja 100 kPa.
- b) De modo isobárico e reversível até que a temperatura atinja 140 °C.
- c) Num processo adiabático reversível, até que a temperatura atinja  $-10\,^{\circ}\text{C}$ .