

## A 2ª Lei da Termodinâmica

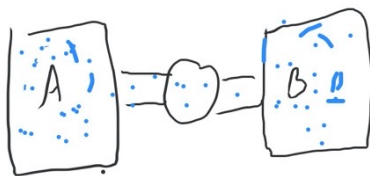
Lei 0 → Dois corpos em equilíbrio térmico tem a mesma temperatura

1ª Lei da Termodinâmica:  $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$   
 ↳ Conservação de energia      calor  $\Leftrightarrow$  trabalho mecânico

Reversibilidade  $\Leftrightarrow$  Irreversibilidade

Entropia → Informação

1



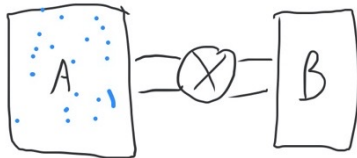
Expansão livre

$$\Delta Q = 0, \Delta U = 0, \Delta W = 0$$

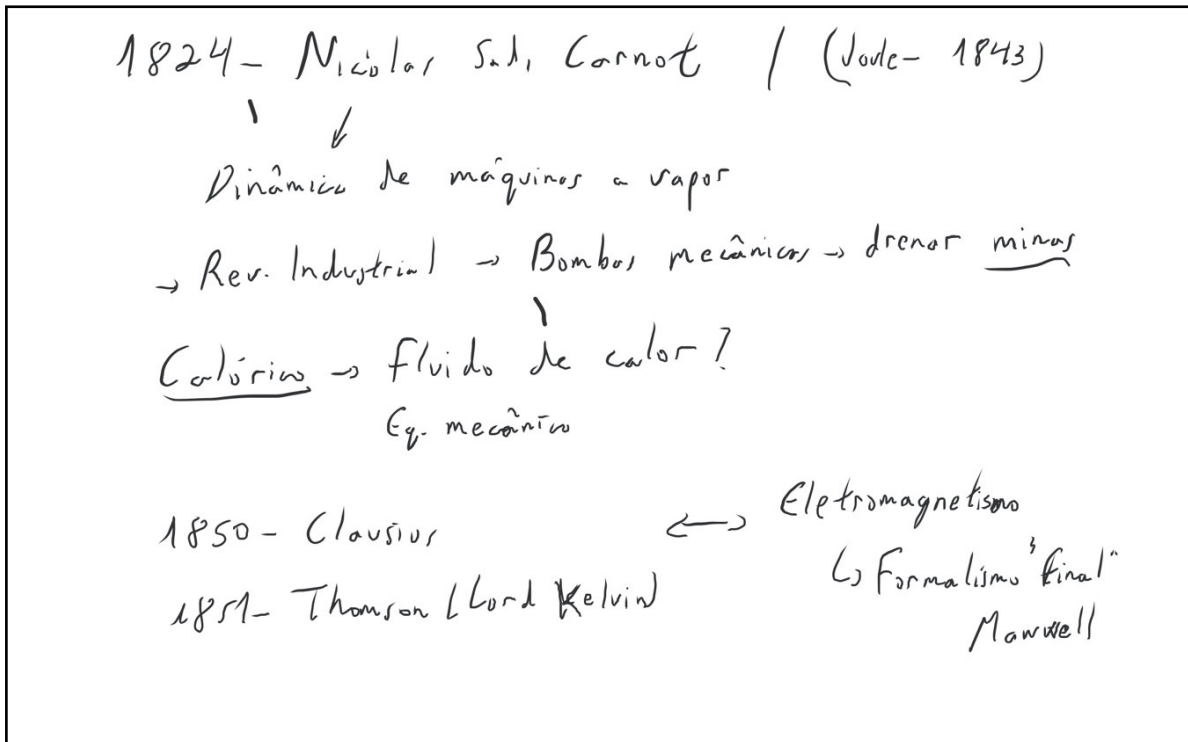
Não é cíclico



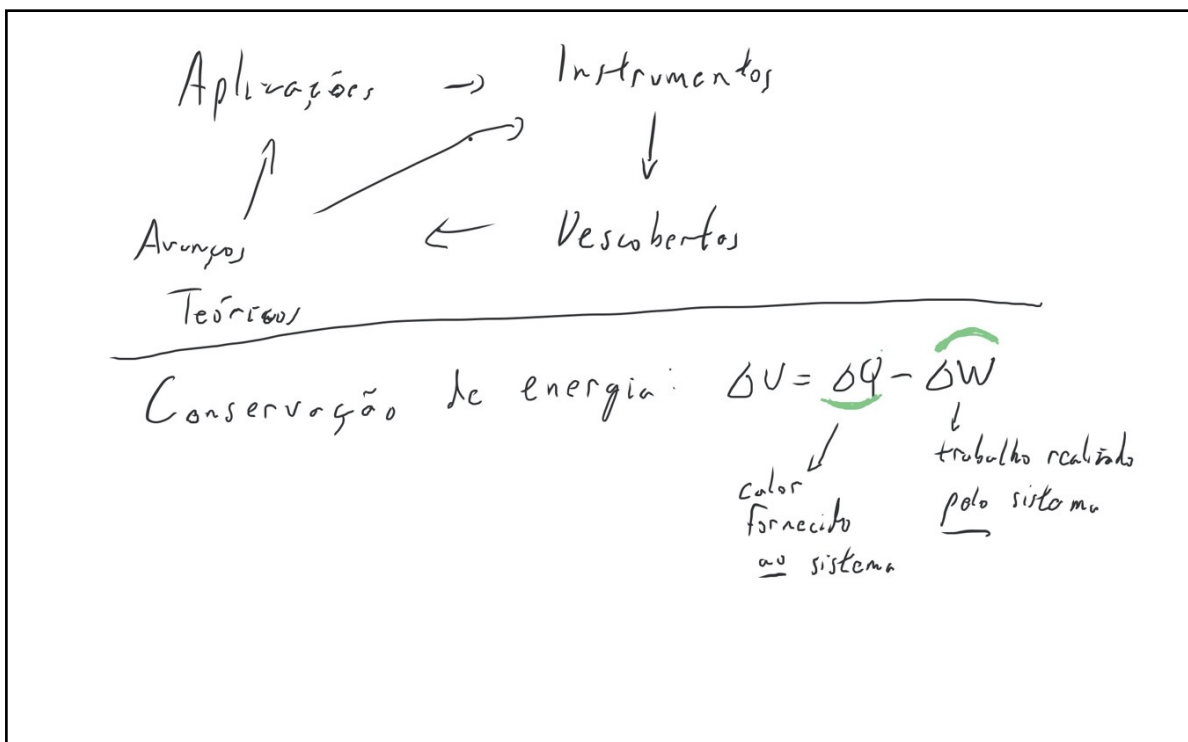
Reverter tem custo



2

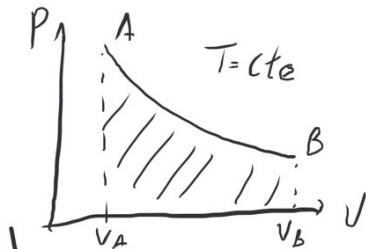


3




4

Reversibilidade  
Trabalho Isotérmico



$\Delta U(T) = 0$        $\Delta Q = \Delta W$



expansão isotérmica → todo calor  
vira trabalho


mas condições final  $\neq$   
condições inicial

5

Realizar mais trabalho → reiniciar o sistema, trazendo-o  
ao ponto A →  $(P_A, V_A)$

Construir um ciclo       $\Delta Q \rightarrow \Delta W$   
voltando à condições inicial

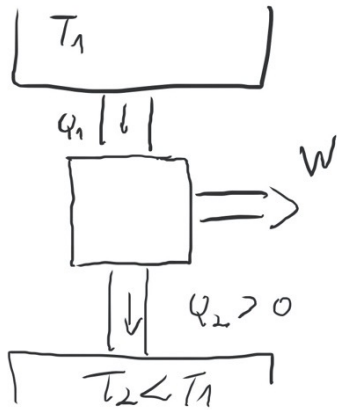
$\Delta W \rightarrow \Delta Q \rightarrow$  fácil



2ª lei da Termodinâmica: impossível realizar um processo  
cujo único efeito é remover calor de um reservatório e  
converter integralmente em trabalho

6

## Motor térmico



$$W = Q_1 - Q_2$$

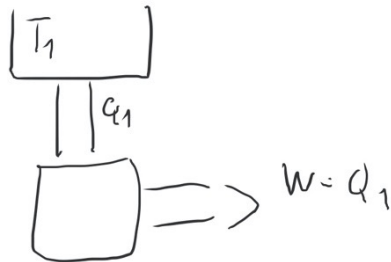
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{trabalho extraído}}{\text{calor fornecido}}$$

$$\eta < 1$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

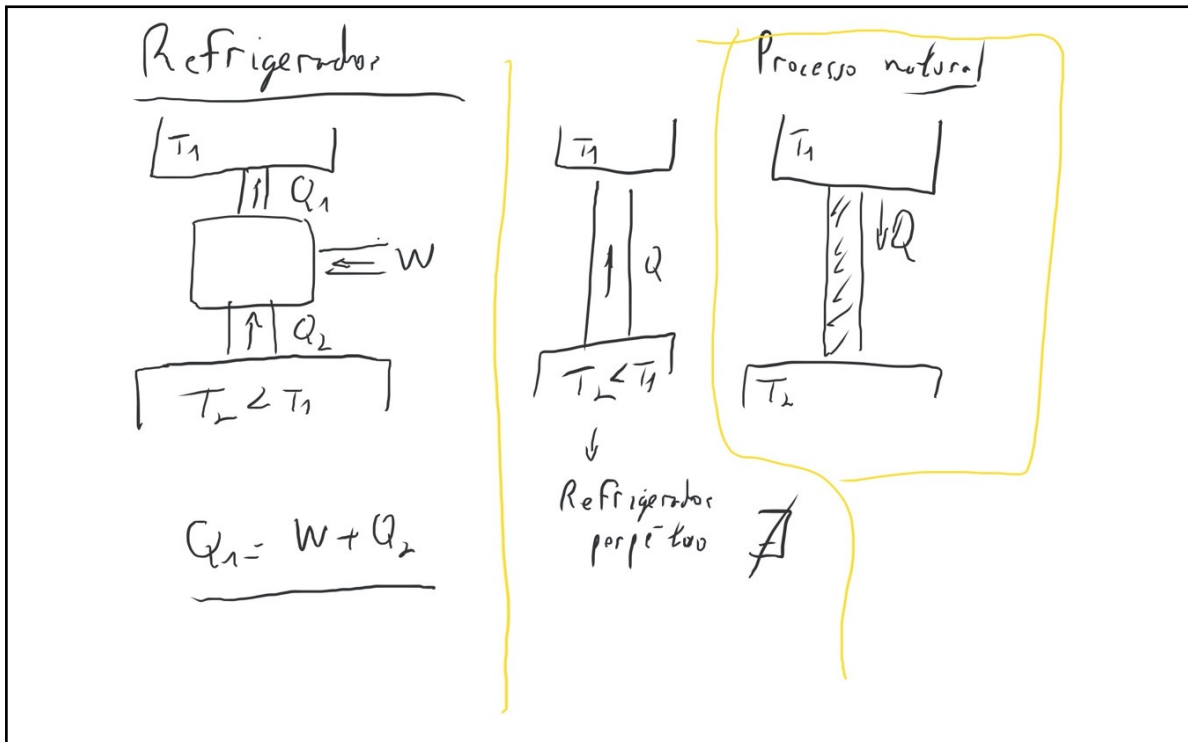
$$Q_2 > 0$$

7



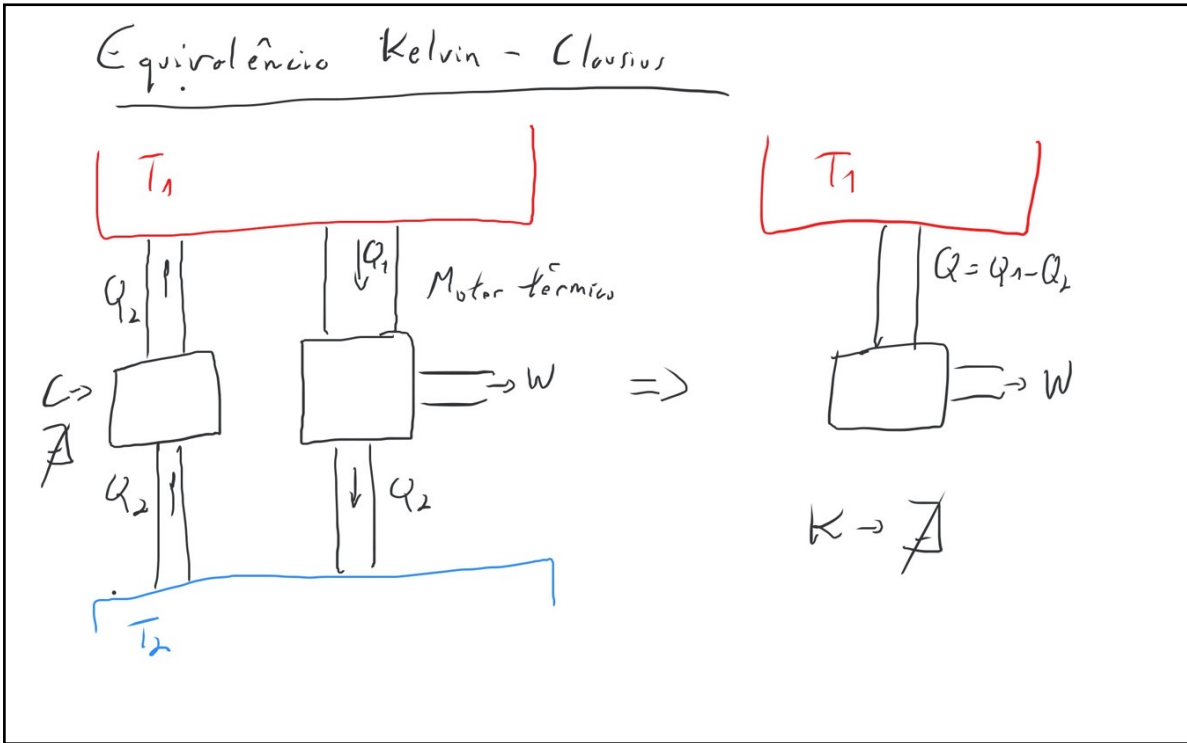
Moto perpétuo  
de 2º tipo

8

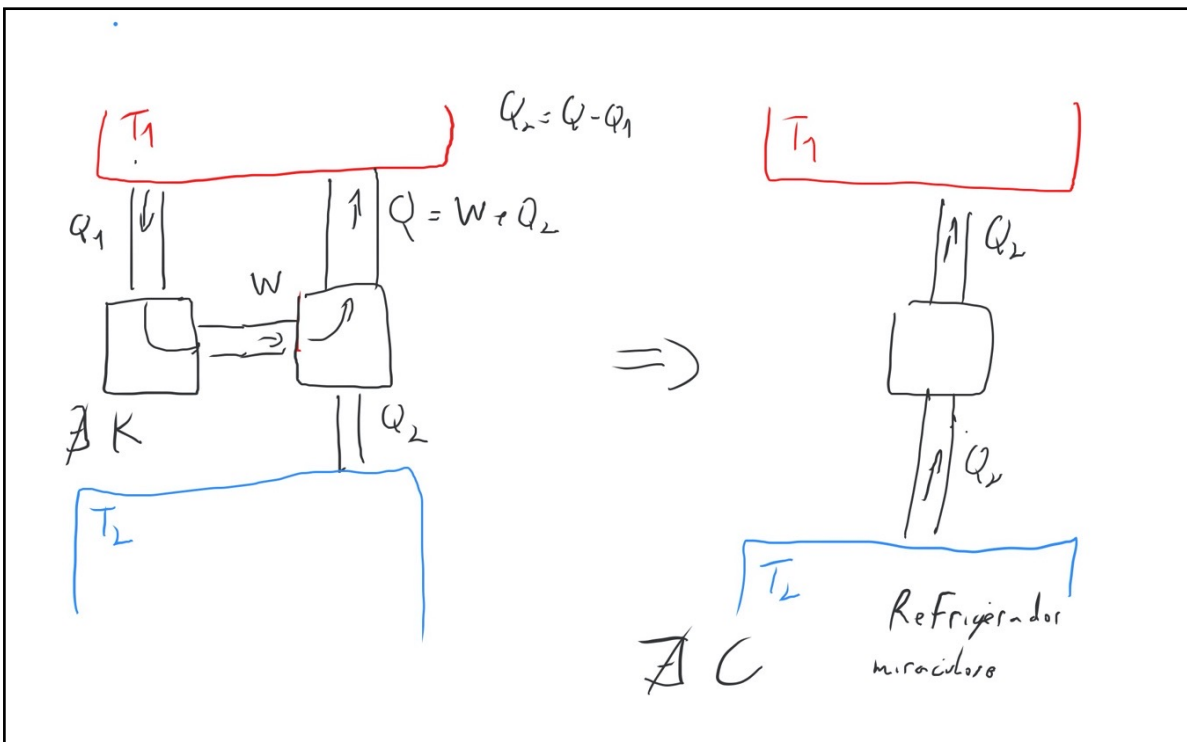


## 2ª lei da Termodinâmica Clausius

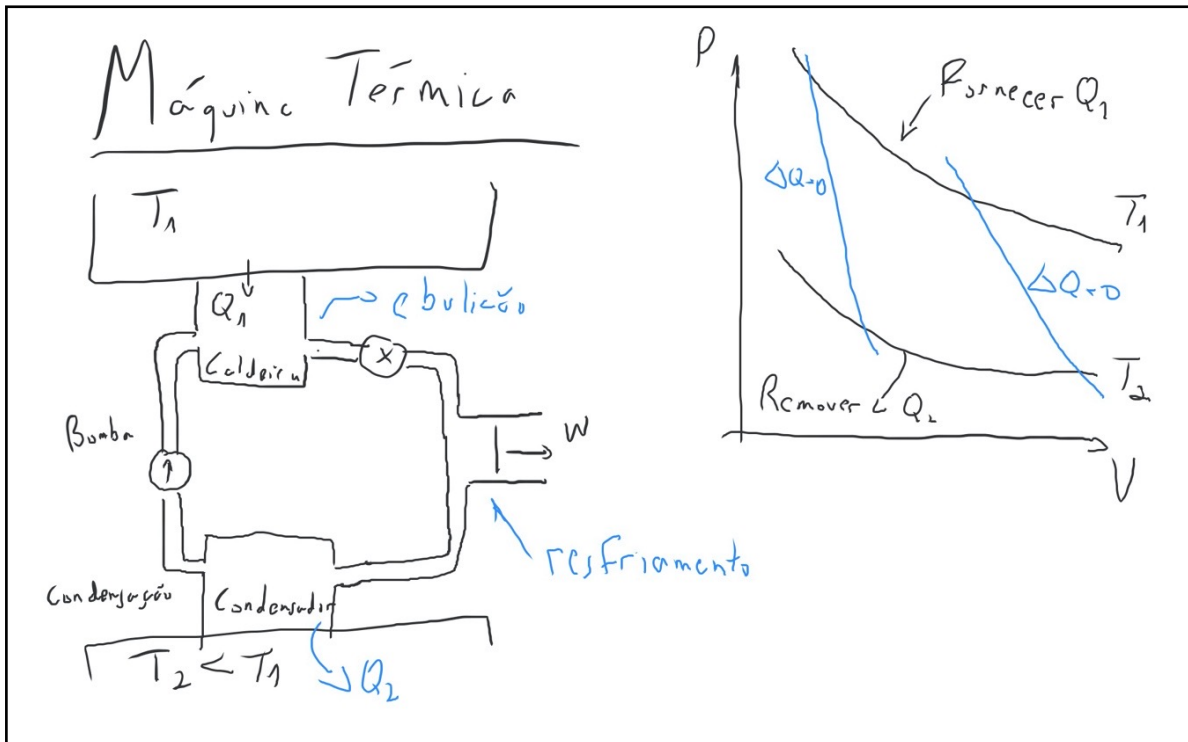
É impossível realizar um processo cujo único efeito é transferir calor do corpo frio para um corpo quente



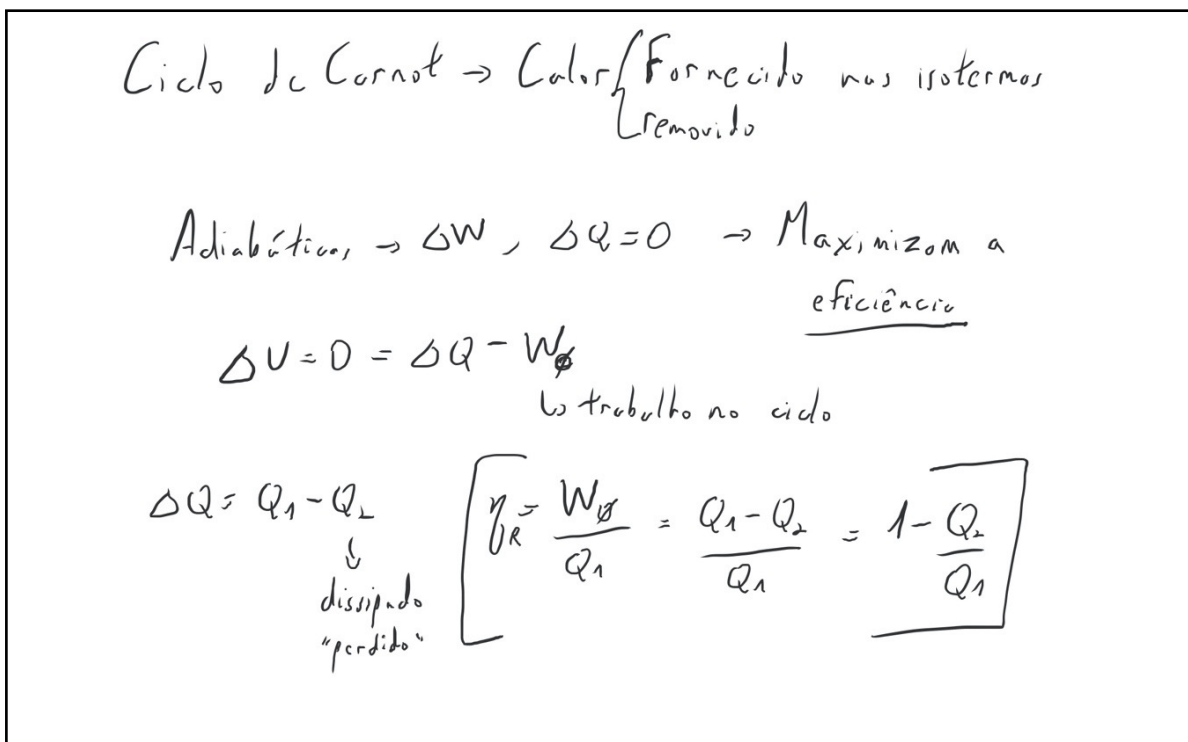
11



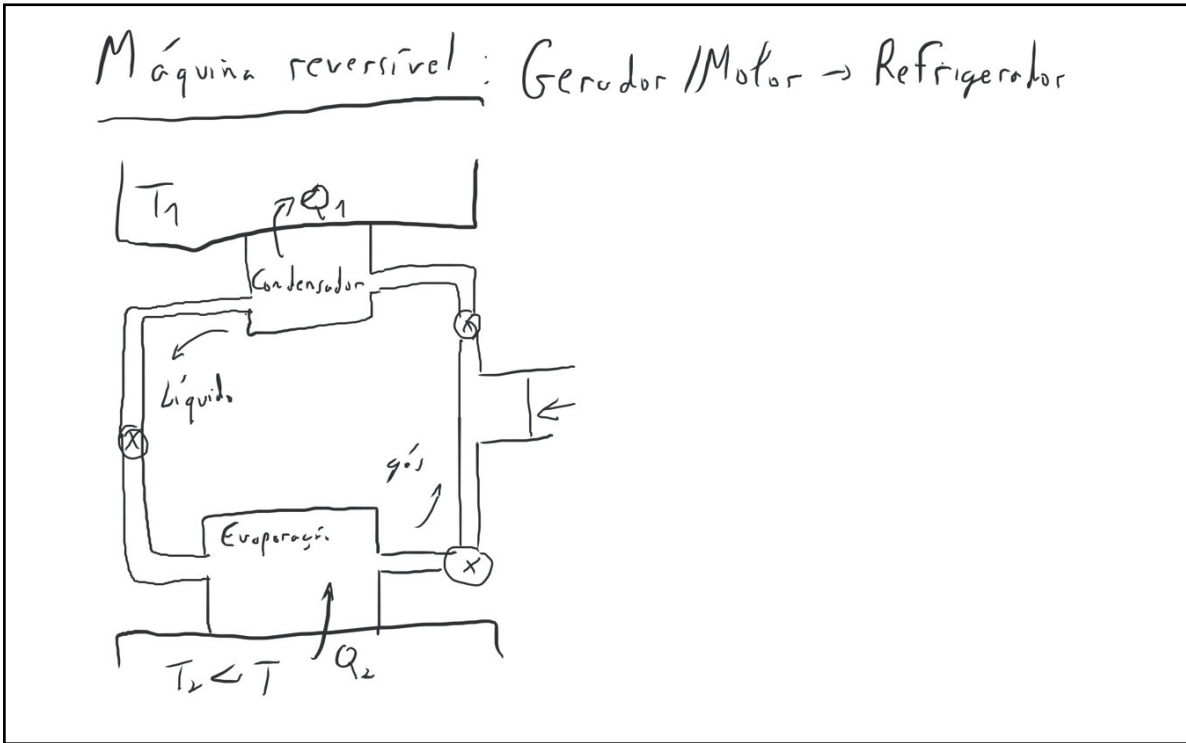
12



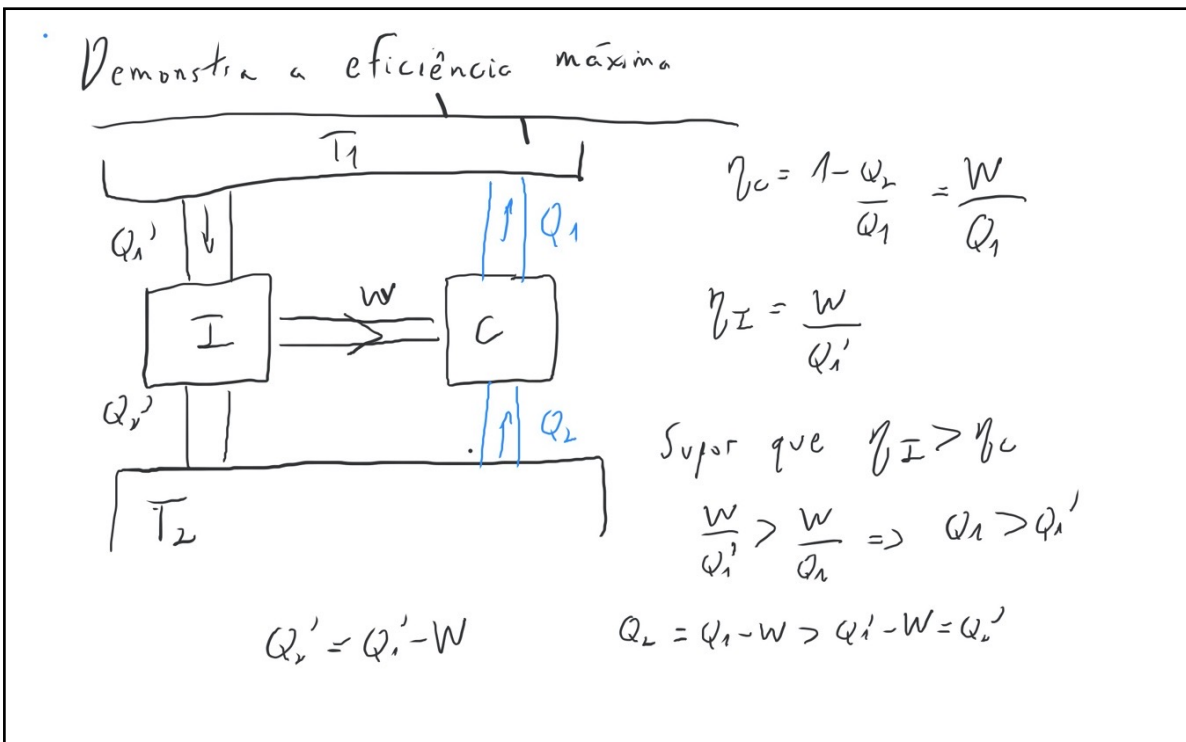
13



14



15



16



$\Delta Q_1 = Q_1 - Q_1' > 0$   
 $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_2' > 0$

$\cancel{A} \eta_I > \eta_c$  —

$\Rightarrow \eta_I \leq \eta_c$  (I)

Se Máquina I  $\rightarrow$  Processo de Carnot  $\rightarrow \boxed{\eta_I = \eta_c}$

$\eta_I \geq \eta_c$  (II)

Diagrama esquemático: À esquerda, uma máquina I operando entre dois reservatórios a temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ . Ela recebe calor  $Q_1$  do reservatório quente e realiza trabalho  $W$ . À direita, um processo equivalente onde o calor  $\Delta Q_2$  é transferido diretamente do reservatório quente para o reservatório frio, violando a segunda lei da termodinâmica (Clausius).

17

A eficiência depende dos detalhes da máquina?

Depende somente do processo isotérmico:  $Q_1, Q_2$

$W = Q_1 - Q_2$

$\Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$   $\nabla$  depende só da temperatura dos "reservatórios"

$f(T_1, T_2)?$

18

Ciclo  $a b c d \rightarrow$   
 $\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$

Ciclo  $c e f d$   
 $\frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3)$

Ciclo  $a b e f$   
 $\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$

Independente de  $T_3$   $\rightarrow$   $\frac{f(T_1, T_3)}{f(T_2, T_3)} = f(T_1, T_2) = \frac{f(T_1, T_3)}{f(T_2, T_3)} = \frac{F(T_1)}{F(T_2)}$

19

$F(T) \rightarrow$  monotonica  
 $\downarrow$   
 $F(\bar{\theta}) = \bar{\theta}$

$\frac{F(\bar{\theta}_1)}{F(\bar{\theta}_2)} = \frac{\bar{\theta}_1}{\bar{\theta}_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$

$\bar{\theta}_{ref} = \bar{\theta}_{tr} = 273,16 \text{ K (p.ex.)}$

$\eta_c = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\bar{\theta}_2}{\bar{\theta}_1} \rightarrow \bar{\theta}$  é uma escala arbitrária

20

Escolha do termômetro a gás  $\rightarrow$  V cte

$$Q_1 = n R T_1 \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) ; Q_2 = n R T_2 \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\ln(V_b/V_a)}{\ln(V_c/V_d)}$$

$P_b \cdot V_b^n = P_c \cdot V_c^n$   
 $(P_b \cdot V_b) V_b^{n-1} = (P_c \cdot V_c) V_c^{n-1}$   
 $n R T_1 V_b^{n-1} = n R T_2 V_c^{n-1}$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_b^{(n-1)}}{V_c^{(n-1)}} = \frac{V_c^{(n-1)}}{V_d^{(n-1)}}$$

$$\left(\frac{V_b}{V_a}\right)^{n-1} = \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{n-1} \Rightarrow \frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

21

$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow$  sistema de gás ideal  
 def. pelo term. a gás

$\sigma = T$   
 $\downarrow$   
 Carnot

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

22

Efficiência depende diretamente dos reservatórios,

Máquina a vapor:  $T_1 = 200^\circ\text{C}$ , Saída  $\rightarrow P = 1\text{atm}$ , Condensar  $\rightarrow T_2 = 100^\circ\text{C}$   
 $0^\circ\text{C} \rightarrow 273\text{K}$   $\downarrow$   $T_1 = 473\text{K}$   $\downarrow$   $T_2 = 373\text{K}$

$$\eta \leq \eta_c = 1 - \frac{373}{473} = 21\%$$

Ciclo Fechado  $T_2 \approx 30^\circ\text{C} = 303\text{K}$

$$\eta \leq \eta_c = 1 - \frac{303}{473} = 36\%$$

23

Turbina a vapor  $\rightarrow 50\% \rightarrow T_1 \uparrow$

$\hookrightarrow 400^\circ\text{C}$

Gasolina  $\rightarrow 25\%$

Diezel  $\rightarrow 40\%$

$$Q_2 \propto T_2$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$Q_2 = \left(\frac{Q_1}{T_1}\right) \cdot T_2$$

$\uparrow$   
 $> 0$

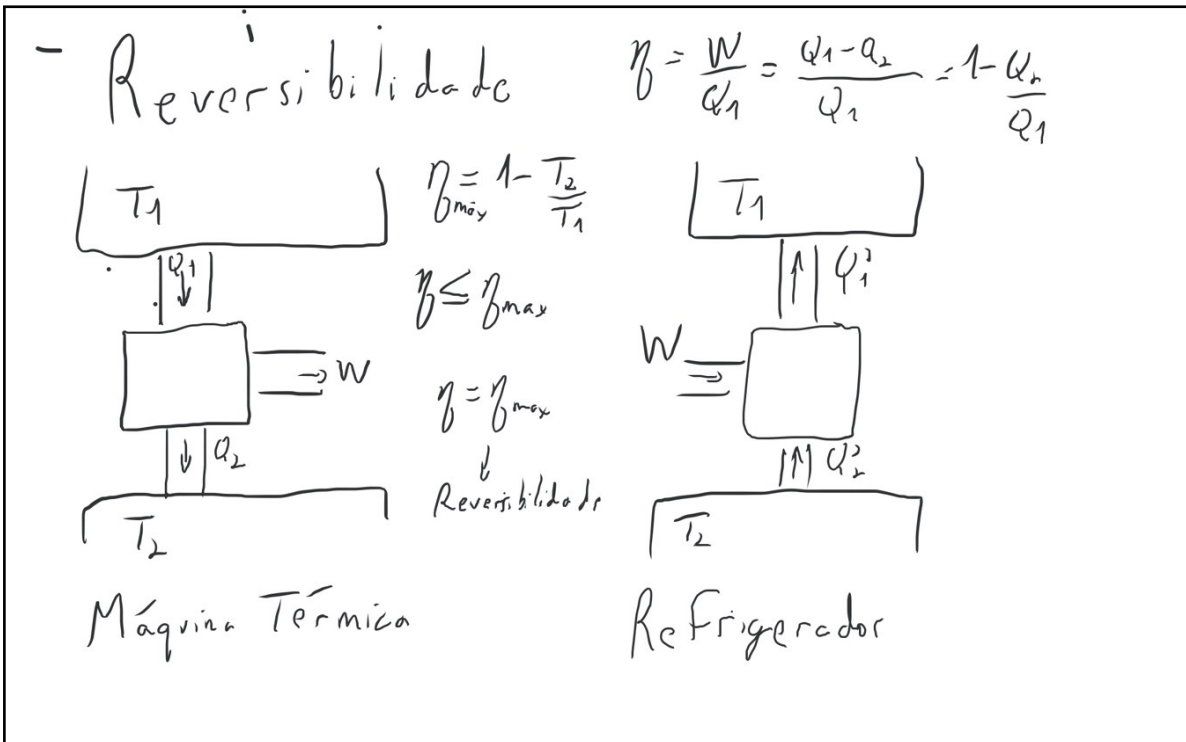
$$Q_2 \text{ positivo} \rightarrow T_2 > 0$$

$\downarrow$   
Lançar o  
calor no  
reservatório frio

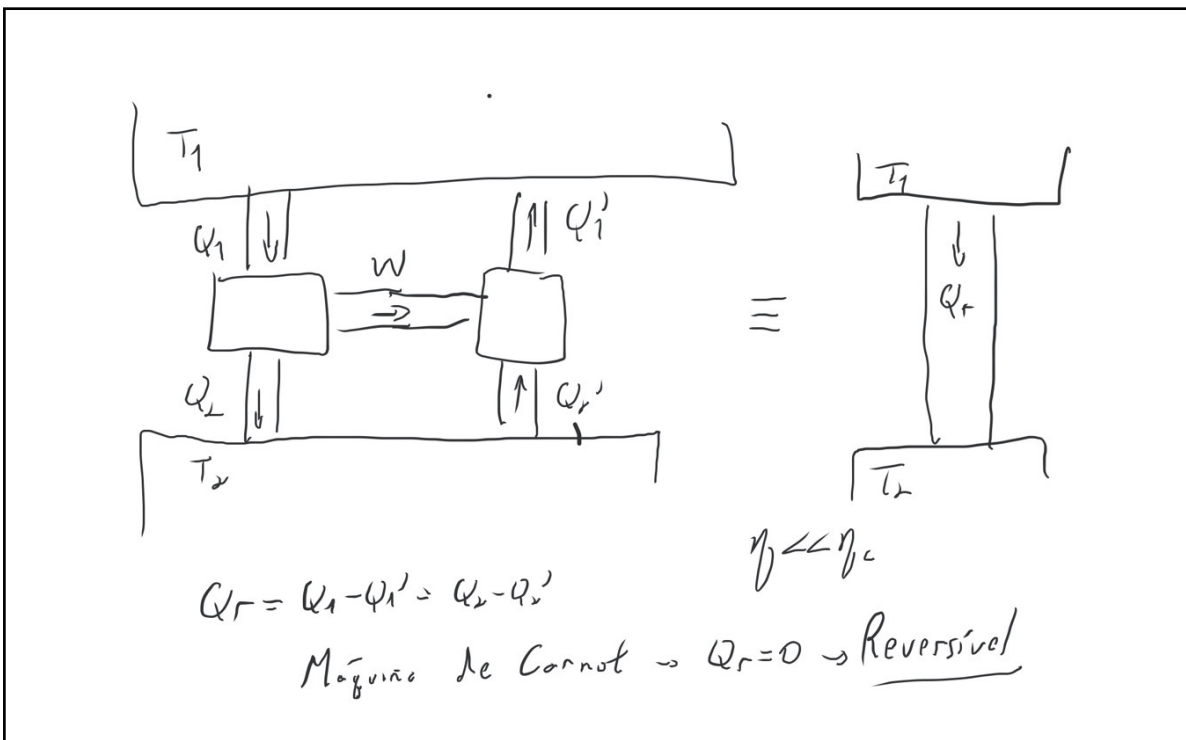
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

$$\Rightarrow \boxed{T_2 > 0\text{K}} \rightarrow \text{escala absoluta de temperatura}$$

24



25



26