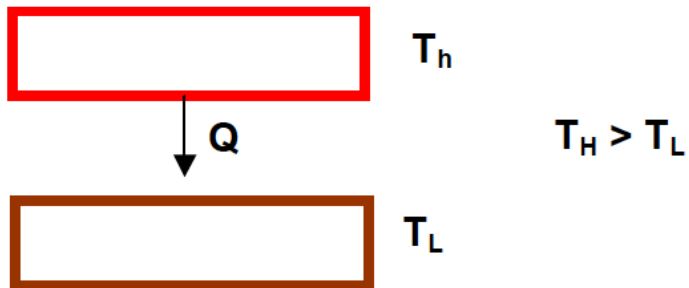
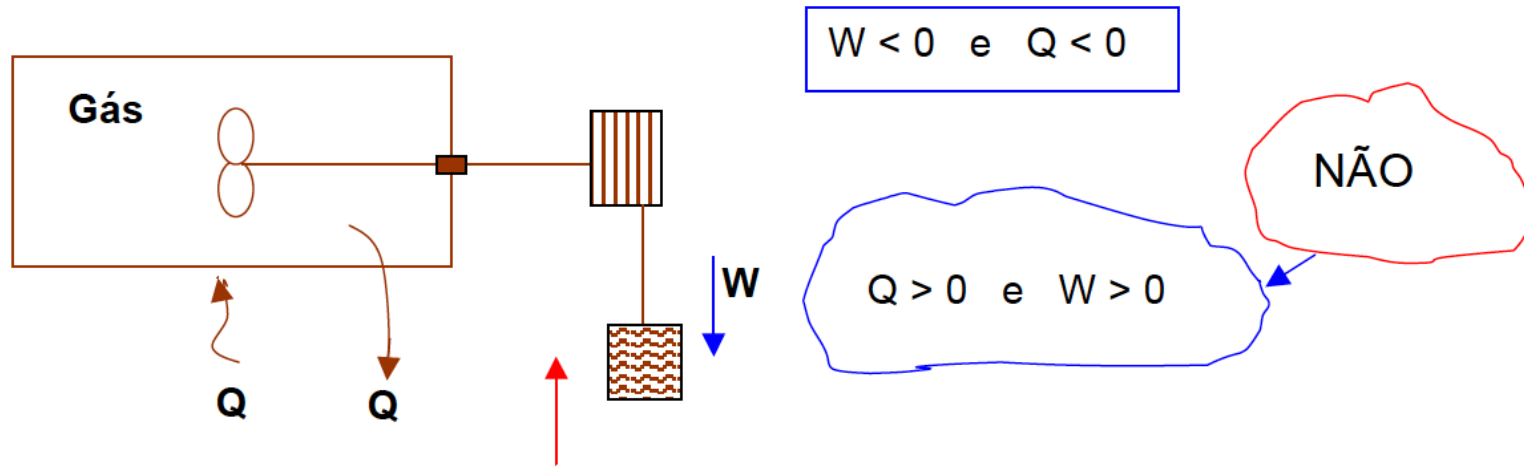
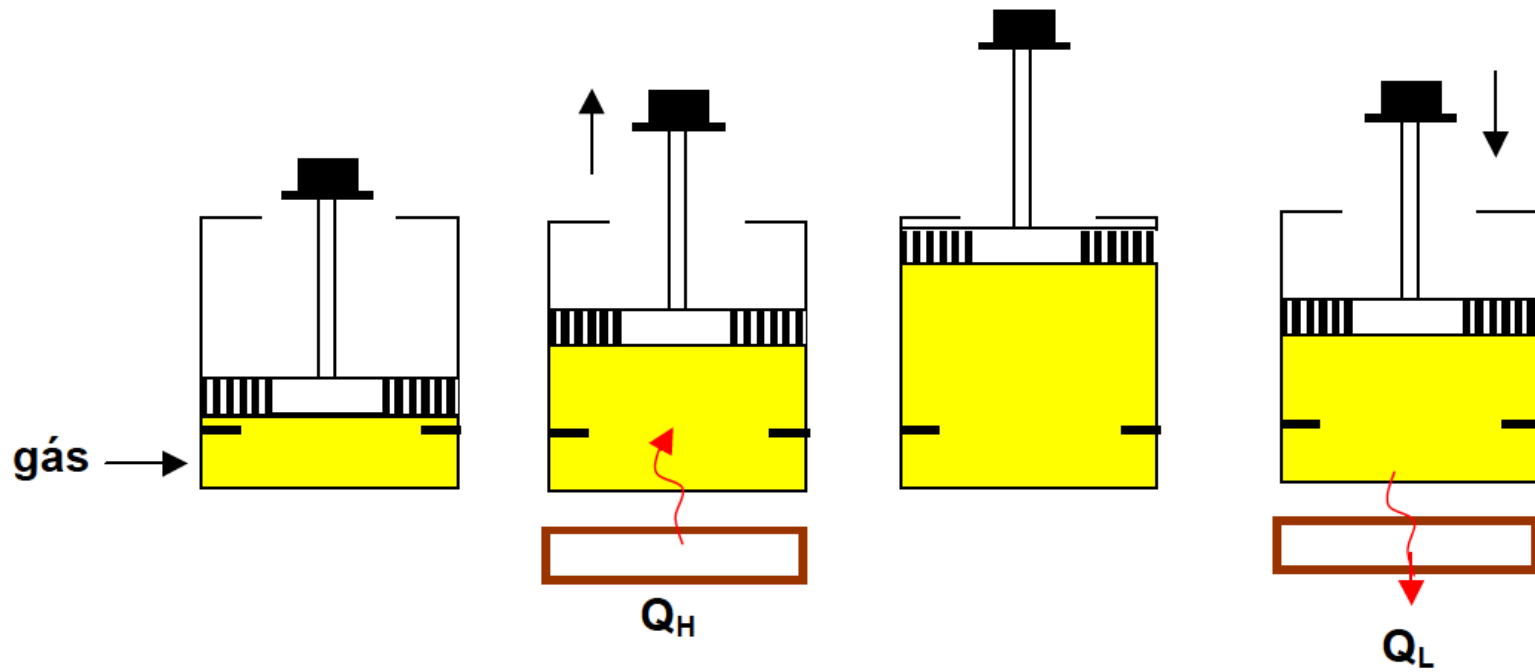


2ª Lei da Termodinâmica

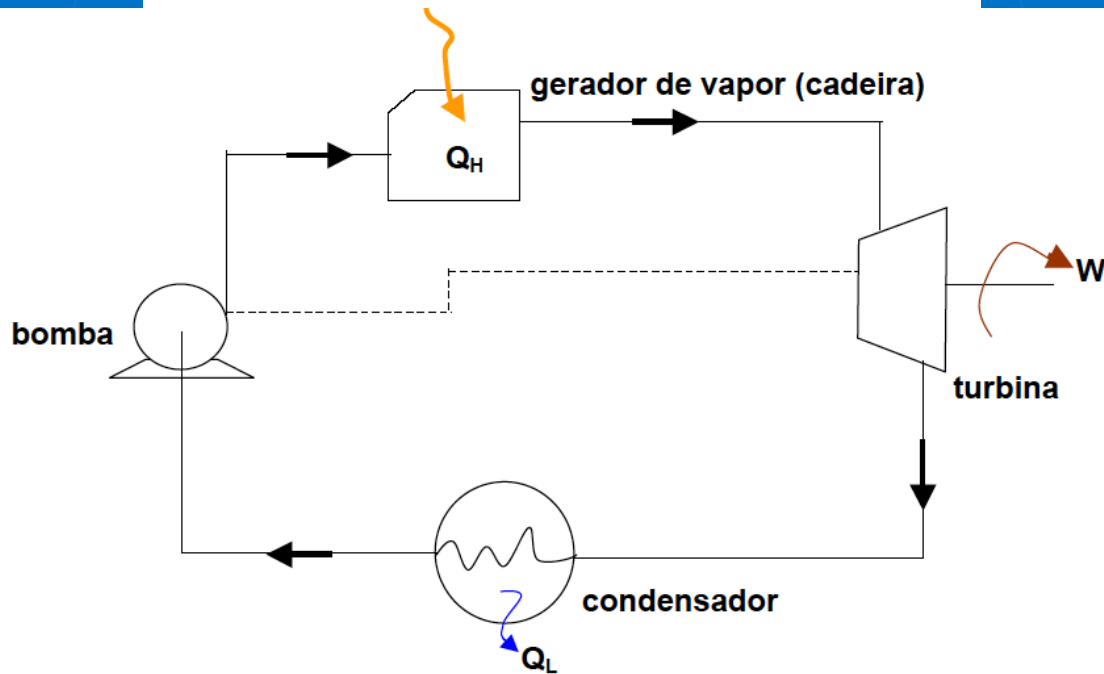
Motores Térmicos e Refrigeradores



Motores Térmicos



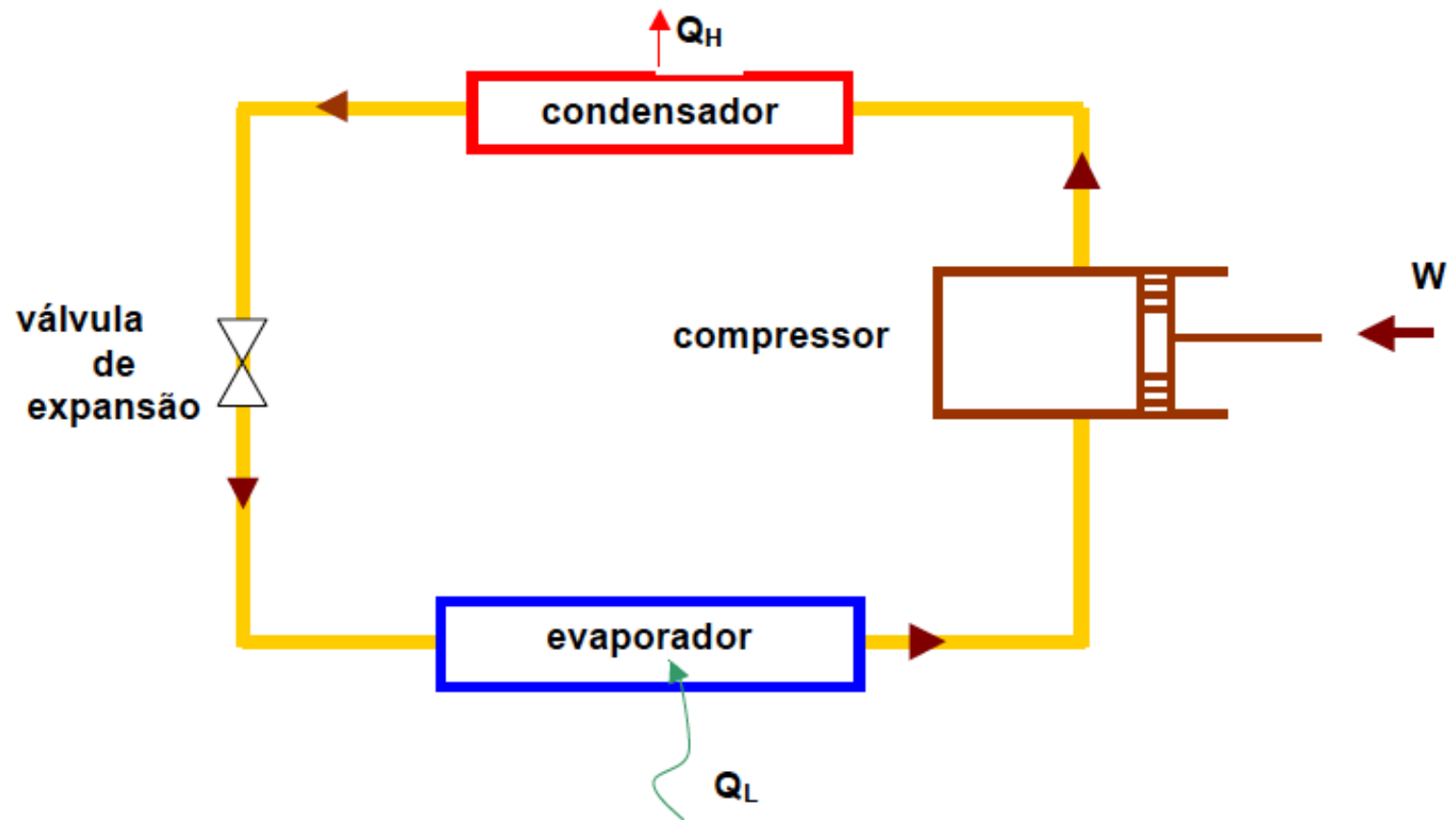
Motores Térmicos



$$W = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

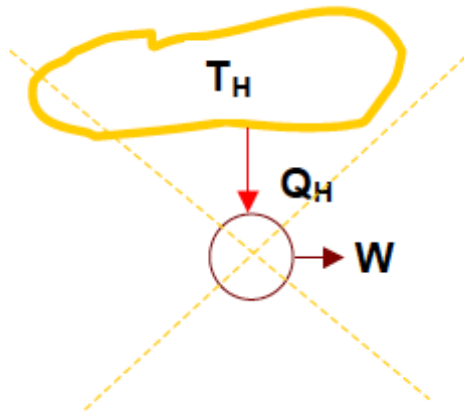
Ciclo de Refrigeração



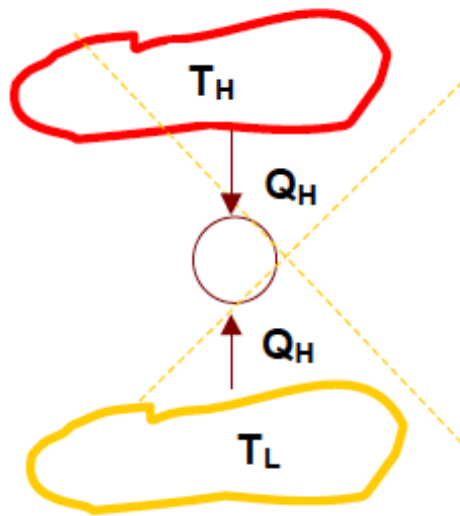
coeficiente de eficácia $\equiv \beta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$
(COP)

ENUNCIADOS DA 2ª LEI DA TERMODINÂMICA

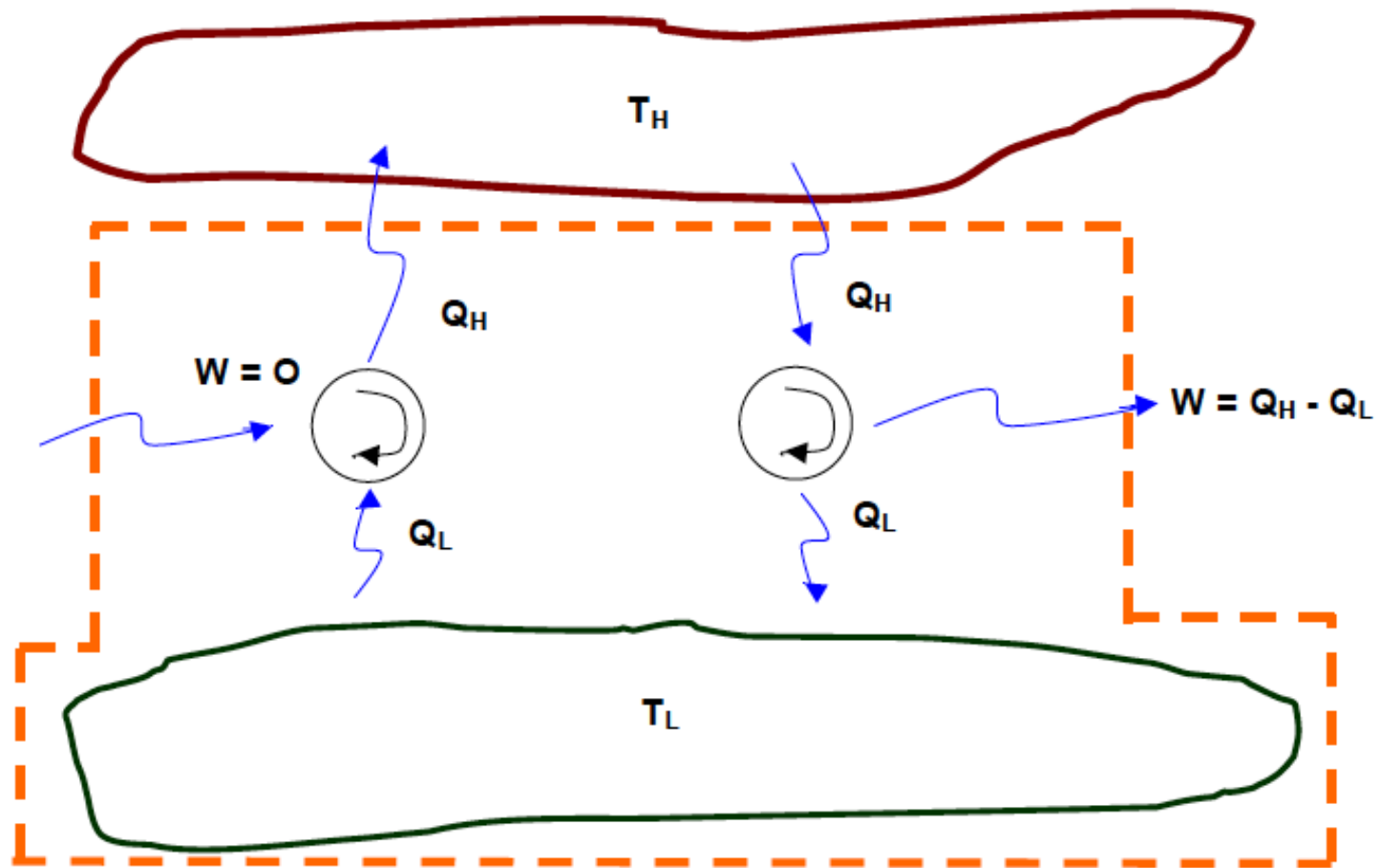
- a) Kelvin-Planck: É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de uma massa e troca de calor com um único reservatório térmico.



- b) Clausius: É impossível construir um dispositivo que opere ciclicamente e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo a T_L para um corpo a T_H com $T_H > T_L$.



Os dois enunciados são equivalentes



N Clausius

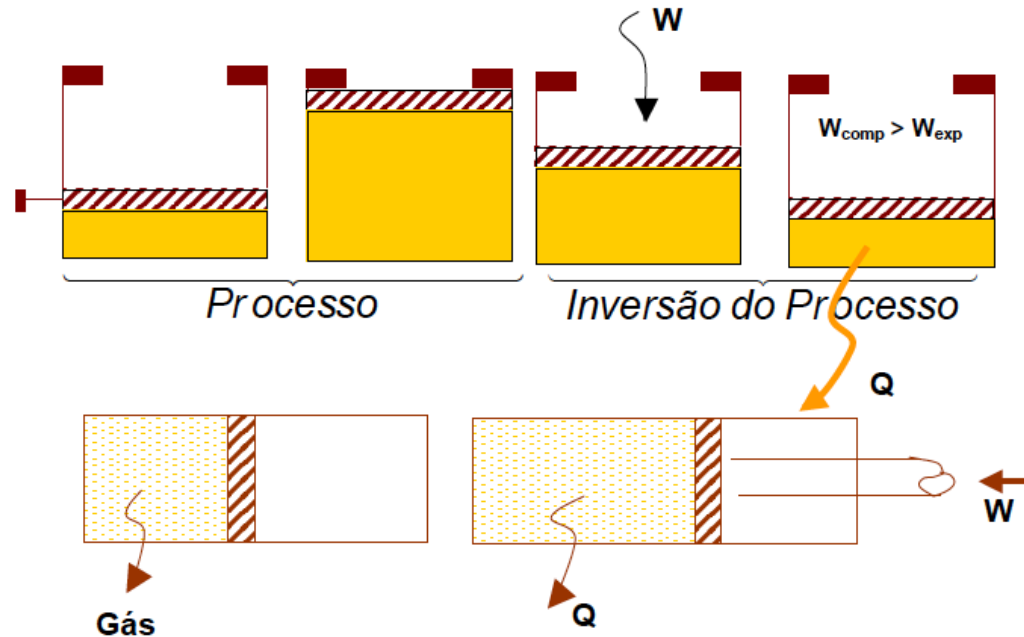


N Kelvin-Planck

Processo Reversível

Qual max η ?

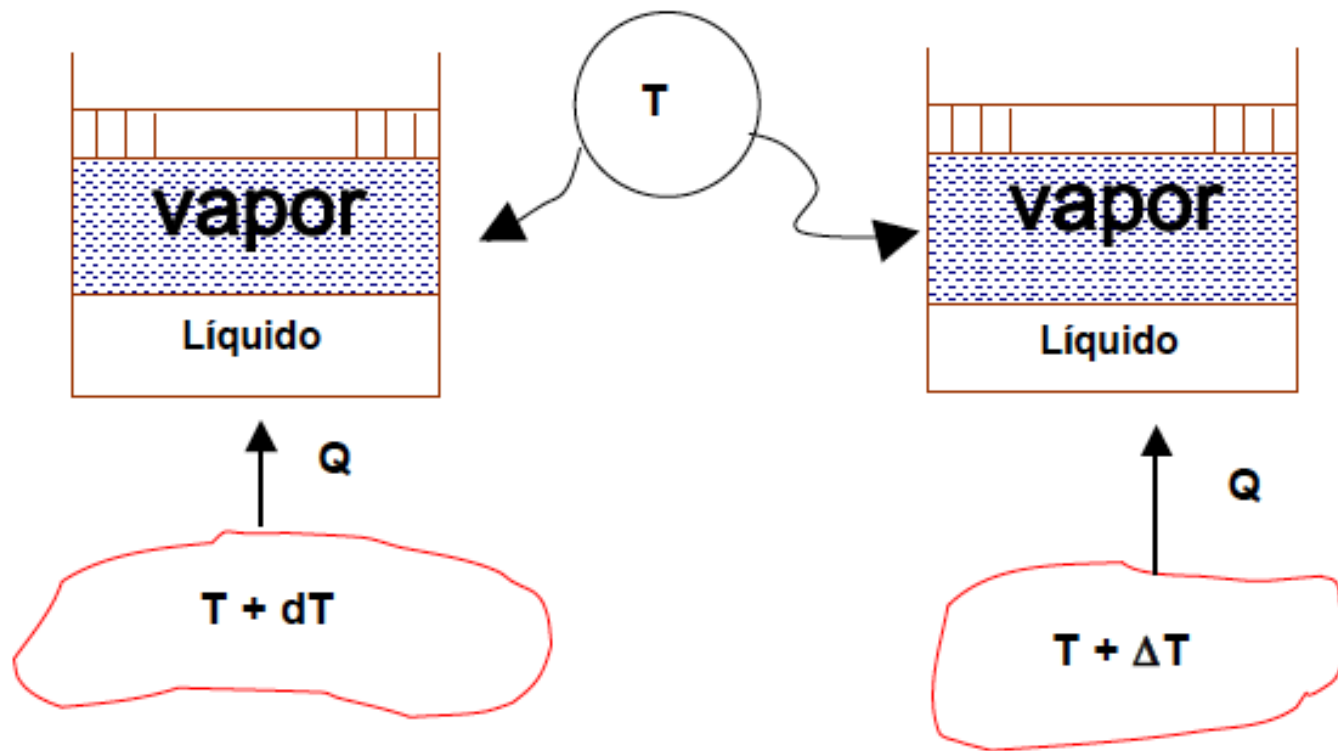
Processo Reversível = Processo que tendo ocorrido pode ser invertido sem deixar “vestígios” no sistema e no meio.



Irreversibilidades:

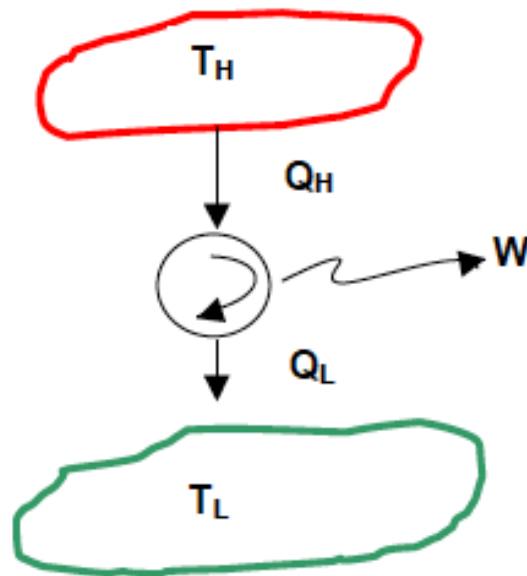
- atrito
- expansão não resistida
- transferência de calor com ΔT finito
- mistura de substâncias diferentes
- combustão

Processo interna e externamente reversível



Ciclo de Carnot

Qual o ciclo de maior rendimento?



$$\eta_{\max} = ?$$

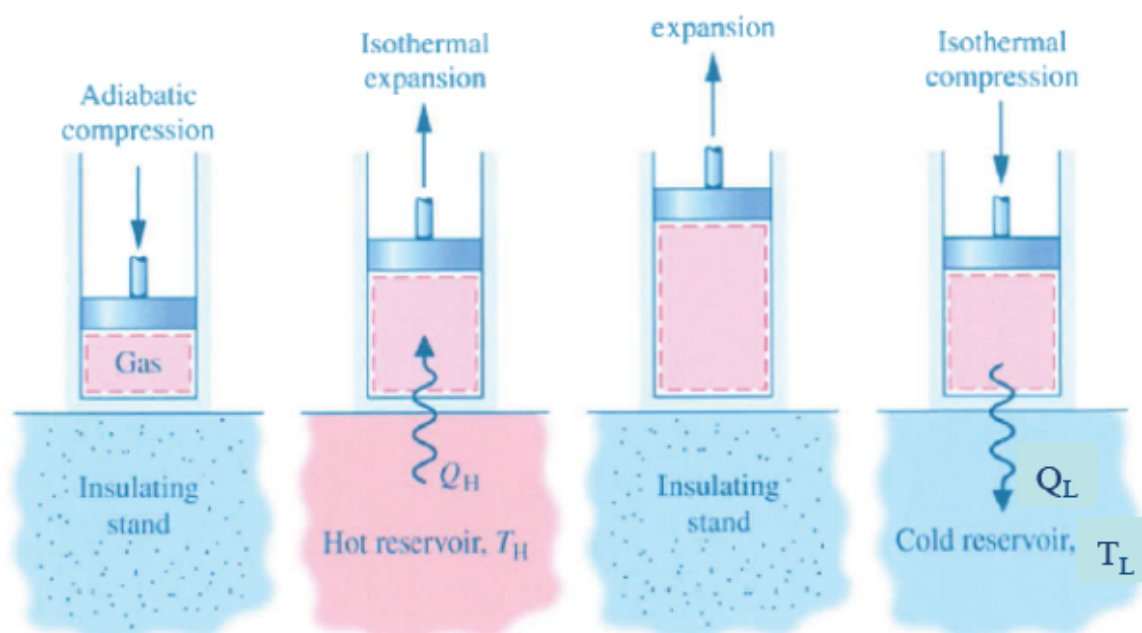
CICLO DE CARNOT

Processo 1-2: troca de calor isotérmica a T_H (Q_H)

Processo 2-3: expansão adiabática até T_L

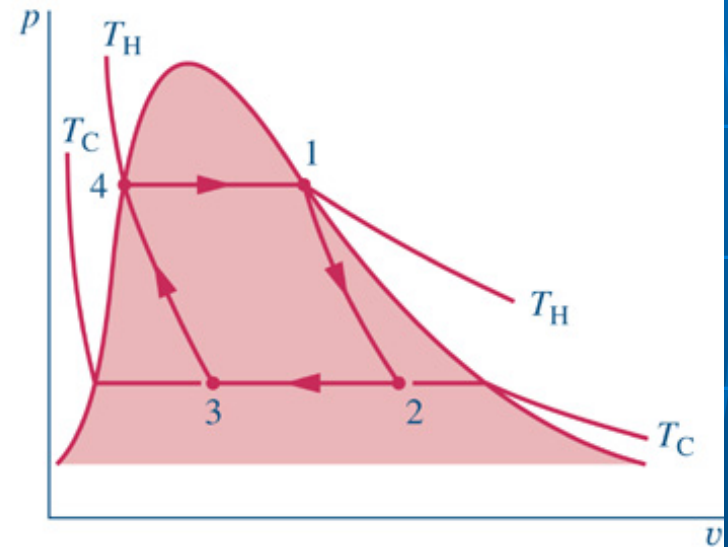
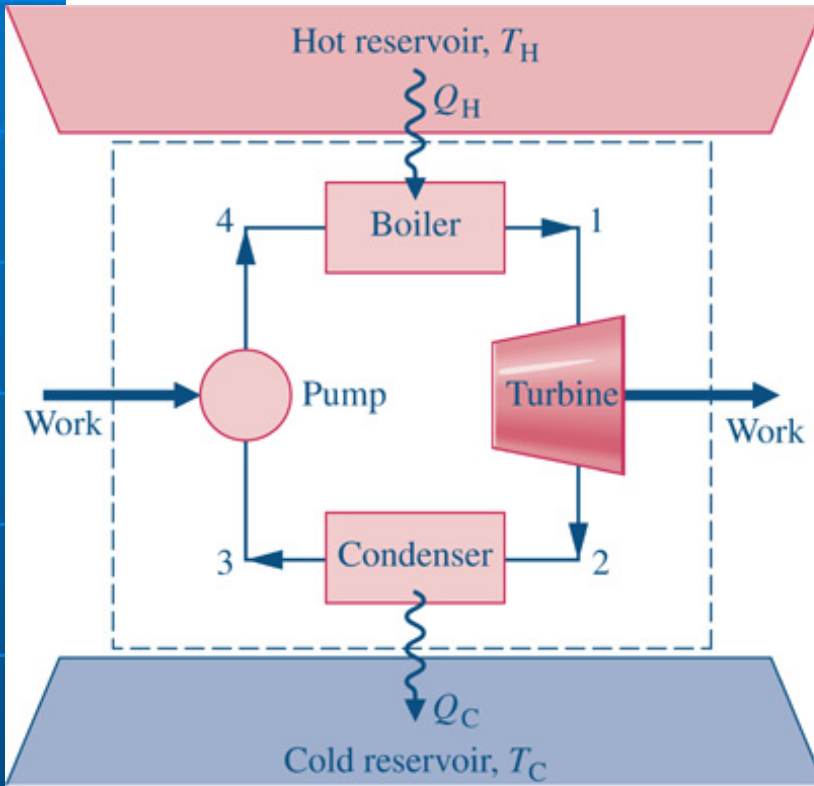
Processo 3-4: troca de calor isotérmica a T_L (Q_L)

Processo 4-1: compressão adiabática até T_H



Processo 4-1 Processo 1-2 Processo 2-3 Processo 3-4

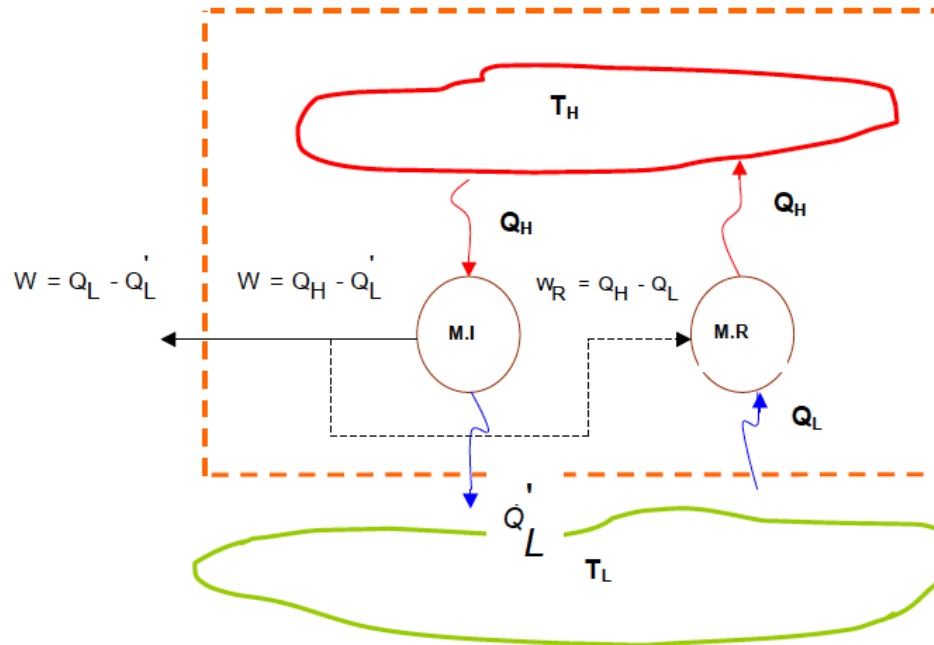
Ciclo de Carnot a vapor



$$\eta_{\text{t\u00e9rmico}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Teoremas sobre o rendimento do ciclo de Carnot

1. É impossível construir um M.T. que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que apresente um “ η ” maior que o “ η ” de um M.T. reversível.

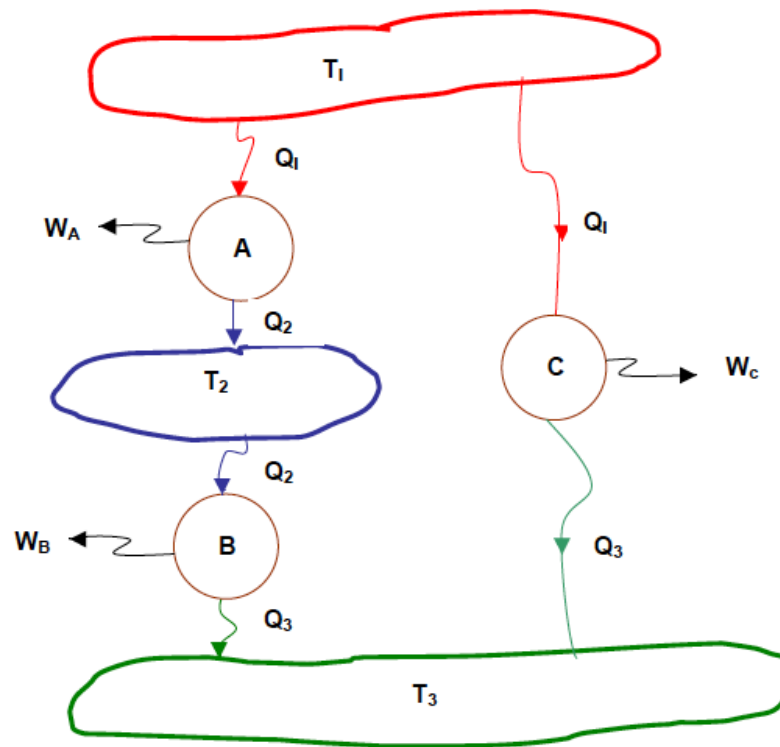


2. Todos os motores que operam segundo um ciclo de Carnot, entre T_H e T_L dados, apresentam o mesmo η .

$$\eta = f(T_H, T_L)$$

Escala Termodinâmica de Temperatura

η_{carnot} independente da substância de trabalho



$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = \varphi(T_L, T_H), \varphi \text{ é relação funcional}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \varphi(T_1, T_2); \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \varphi(T_2, T_3); \quad \frac{Q_1}{Q_3} = \varphi(T_1, T_3)$$

$$\text{como } \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1 Q_2}{Q_2 Q_3} = \varphi(T_1, T_3) = \underbrace{\varphi(T_2, T_3) \cdot \varphi(T_1, T_2)}_{\text{função só de } T_1, T_3}$$

$$\therefore \varphi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad \text{e} \quad \varphi(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

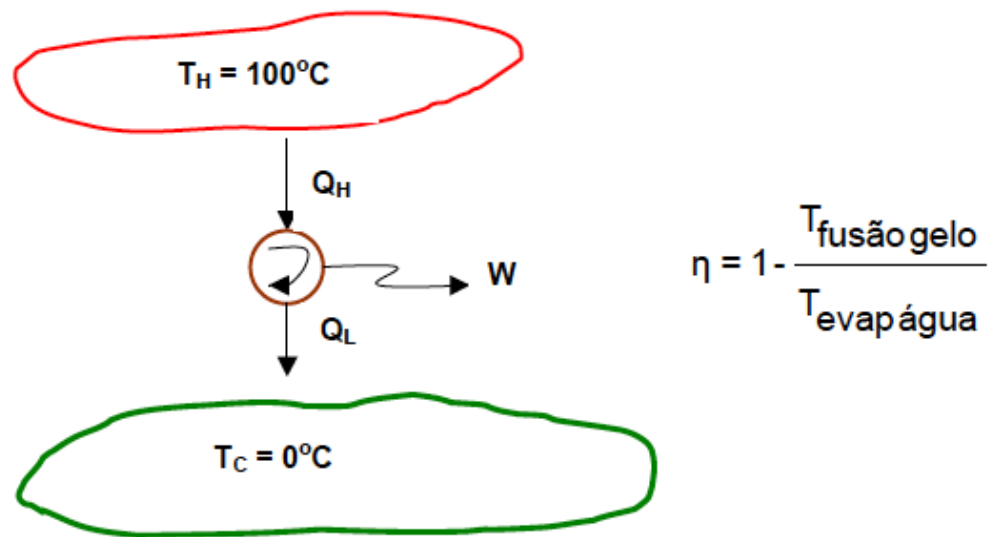
$$\therefore \frac{Q_1}{Q_3} = \varphi(T_1, T_3) = \frac{f(T_1)}{f(T_3)} \rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{f(T_H)}{f(T_L)}$$

Relação proposta por Lord Kelvin:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

assim: $\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

Exemplo



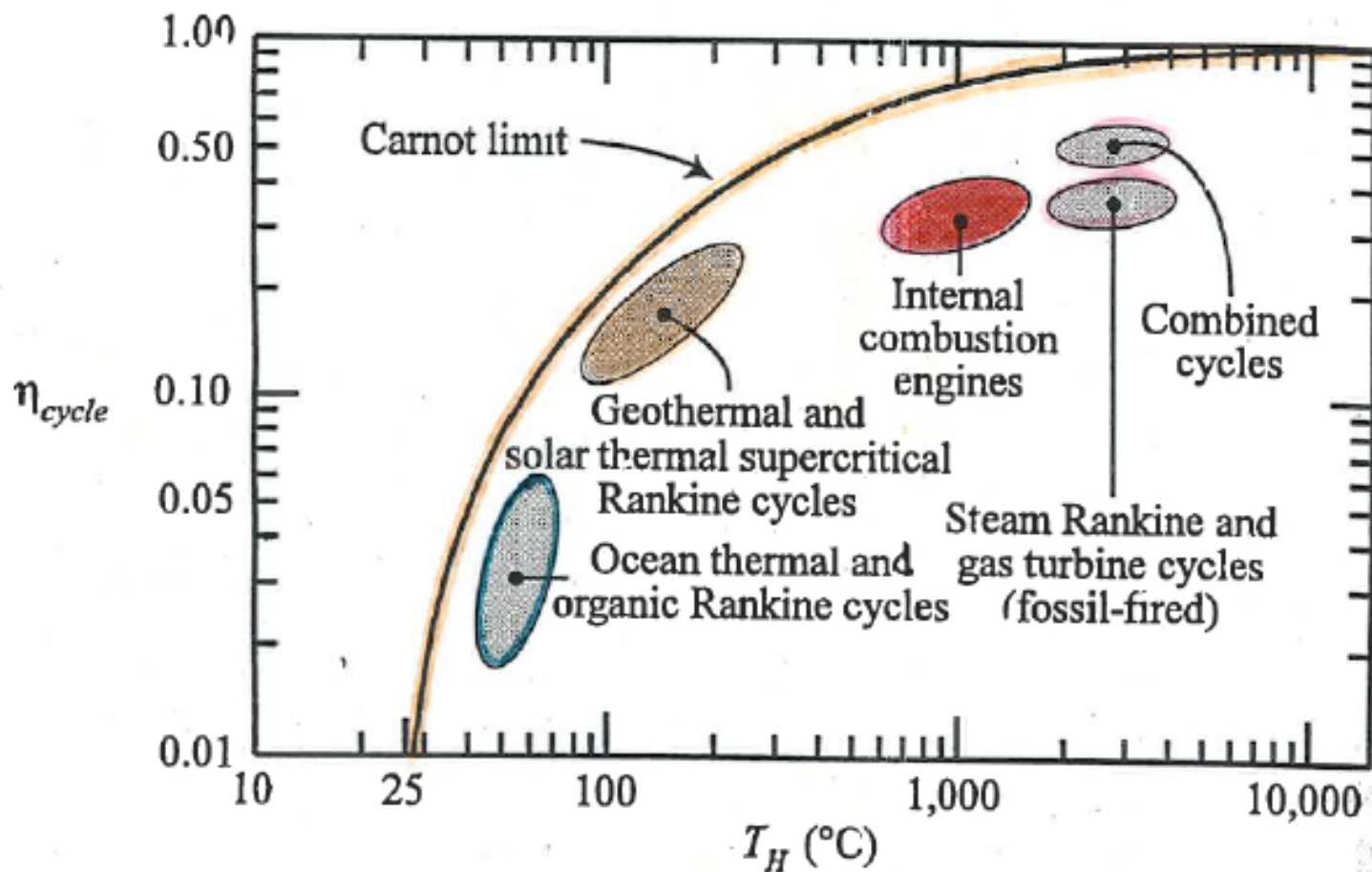
$$\eta = 0,2680 \rightarrow \frac{T_L}{T_H} = 0,7320$$

$$T_H - T_L = 100 \text{ (grandeza do grau na escala Celsius)}$$

$$T_H = 373,15 \text{ K} \text{ e } T_L = 273,15 \text{ K}$$

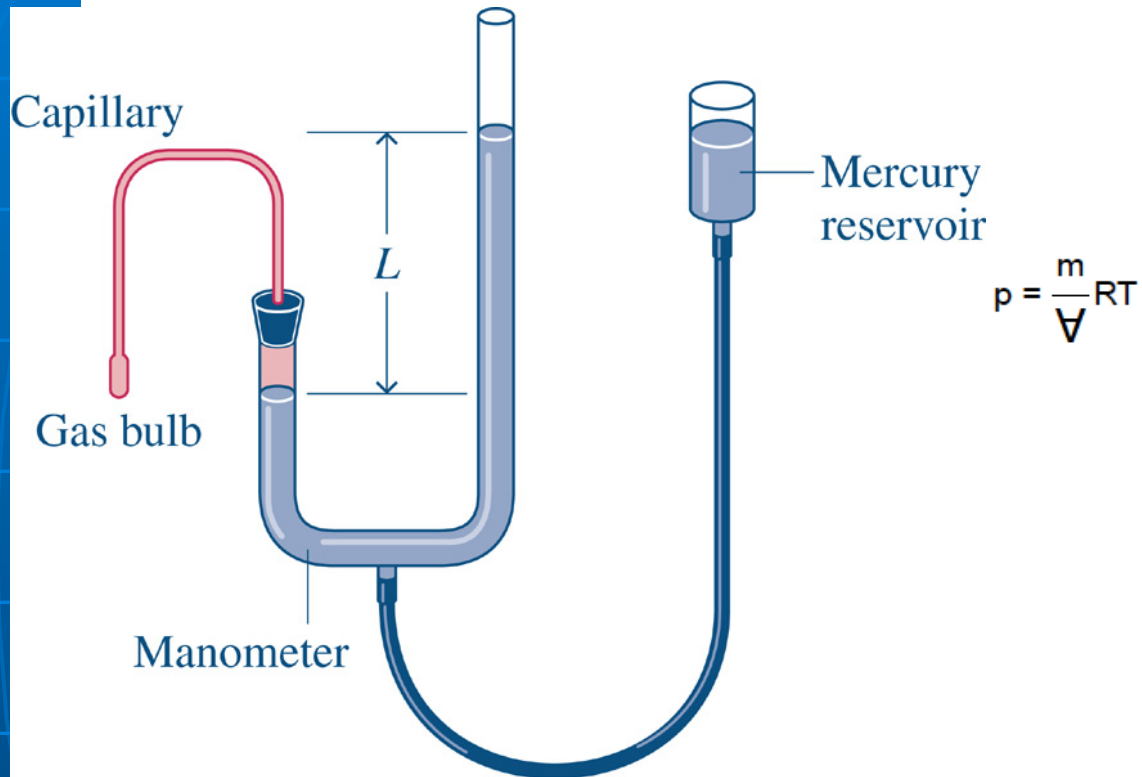
$$T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 = T(\text{K})$$

RENDIMENTOS TÍPICOS DE MÁQUINAS TÉRMICAS



Escala de Temperatura de Gás Perfeito

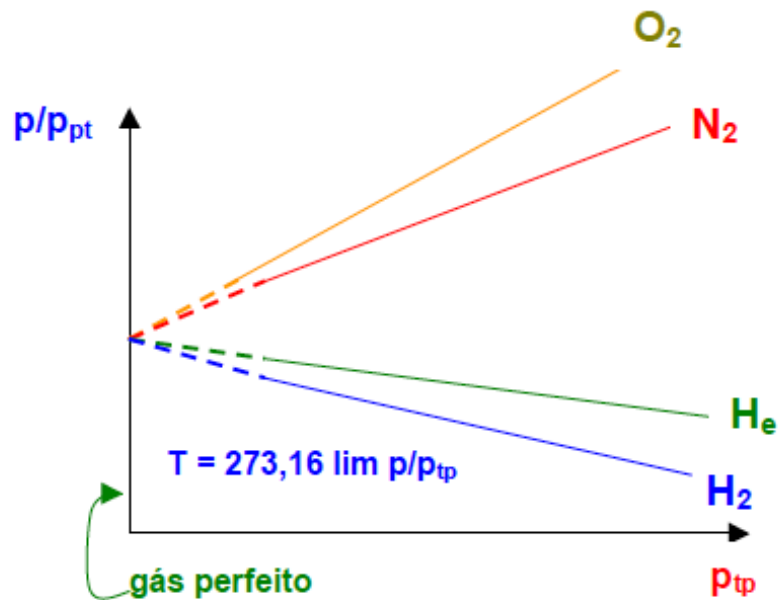
Termômetro de Gás ($V = \text{cte}$)



$$T = \alpha p \quad \text{com} \quad \alpha = \frac{273,16}{p_{pt}}$$

$$T = 273,16 \left(\frac{p}{p_{pt}} \right)$$

p: depende da massa de gás no bulbo



$$\frac{q_H}{q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad \eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Carnot c/ gás perfeito

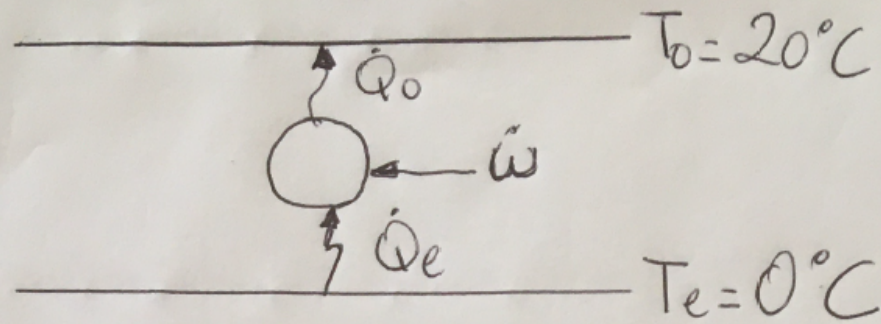
2ª Lista de Exercícios

1. Um refrigerador operando em regime permanente com coeficiente de performance de 2,5 remove 2,22 kW do compartimento de um freezer a 0°C. Determine a potência consumida pelo refrigerador, supondo que o ambiente esteja a 20°C, compare-a com aquela requerida por um refrigerador reversível operando nas mesmas condições.

2. Um ciclo de potência reversível consome Q_H de um reservatório térmico a T_H , rejeitando Q_L , para um reservatório T_L . O trabalho produzido por este ciclo é usado para acionar uma bomba de calor reversível que remove Q_c de um reservatório a T_c e rejeita Q_p para um reservatório a T_p .
 - a. Desenvolver uma expressão para a relação Q_p/Q_H em termos das temperaturas dos quatro reservatórios.
 - b. Qual deve ser a relação entre essas temperaturas para que $Q_p/Q_H > 1$.

3. Uma bomba de calor deve ser utilizada para aquecer uma residência no inverno e depois, operando em condição reversa, resfriá-la no verão. A temperatura interna da residência deve ser mantida a 20 °C no inverno e 25 °C no verão. A transferência de calor, através das paredes e do teto, é estimada em 2400 kJ por hora e por grau de diferença de temperatura entre o meio interno e externo da residência. Pede-se:
 - a) a potência mínima necessária para acionar a bomba de calor no inverno se a temperatura externa for 0 °C;
 - b) a máxima temperatura externa no verão, se a potência de acionamento for a mesma do inverno, para manter a temperatura interna a 25 °C.

①



$$COP_c = \frac{T_e}{T_0 - T_e} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}} = \frac{273,15K}{20K} = 13,66$$

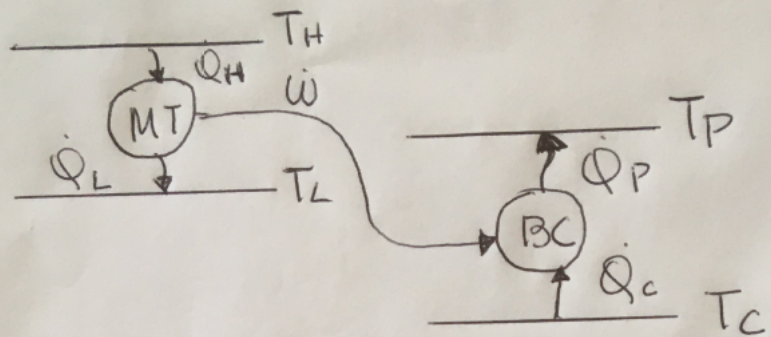
$$COP_{real} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{real}} \rightarrow \dot{W}_{real} = \frac{\dot{Q}_e}{COP_{real}}$$

$$\dot{W}_{real} = \frac{2,22 \text{ kW}}{2,5} = 0,89 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_c = 0,16 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_c / \dot{W}_{real} = 0,18$$

2



$$\dot{W} = \dot{Q}_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \leftarrow \eta_c = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$$

$$\dot{Q}_P = \beta_c \dot{W} \leftarrow \beta_c = \frac{T_P}{T_P - T_C} \leftarrow \frac{\dot{Q}_P}{\dot{W}}$$

$$\dot{Q}_P = \dot{W} \frac{T_P}{T_P - T_C} = \frac{T_P}{T_P - T_C} \left(\frac{T_H - T_L}{T_H}\right) \dot{Q}_H$$

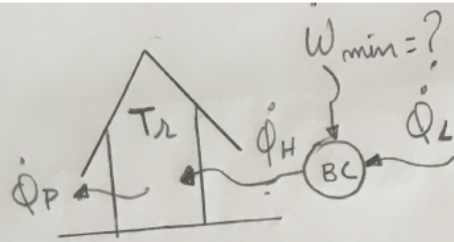
$$\frac{\dot{Q}_P}{\dot{Q}_H} = \left(\frac{T_P}{T_H}\right) \left(\frac{T_H - T_L}{T_P - T_C}\right)$$

$$\text{Como } T_P/T_H < 1 \Rightarrow \frac{T_H - T_L}{T_P - T_C} > \frac{T_H}{T_P}$$

$$1 - \frac{T_L}{T_H} > 1 - \frac{T_C}{T_P} \rightarrow \frac{T_L}{T_H} < \frac{T_C}{T_P}$$

$$\text{Considerando: } \left. \begin{array}{l} T_H = 200^\circ\text{C} \\ T_L = T_P = 30^\circ\text{C} \\ T_C = -30^\circ\text{C} \end{array} \right\} \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_C} = 0,687$$

3



Inverno
T₀

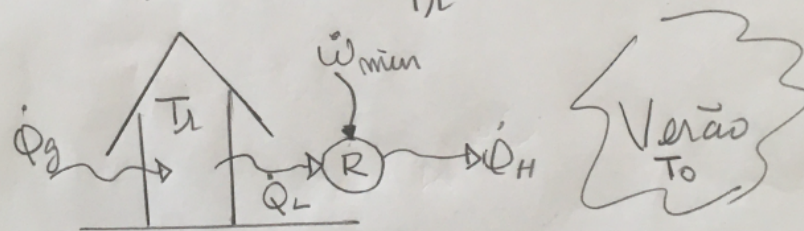
$$T_L = 20^\circ\text{C}; T_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_P = \alpha (T_L - T_0) \text{ com } \alpha = 2400 \text{ kJ/hK}$$

1.ª Lei para residência $\dot{Q}_P = \dot{Q}_H$ (em módulo)

$$\beta_{BC} = \frac{T_L}{T_L - T_0} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{min}} \rightarrow \dot{W}_{min} = \dot{Q}_P \left(\frac{T_L - T_0}{T_L} \right)$$

$$\dot{W}_{min} = \alpha \frac{(T_L - T_0)^2}{T_L} = 0,91 \text{ kW}$$



Verão
T₀

$$T_L = 25^\circ\text{C}; (T_0)_{max} = ?$$

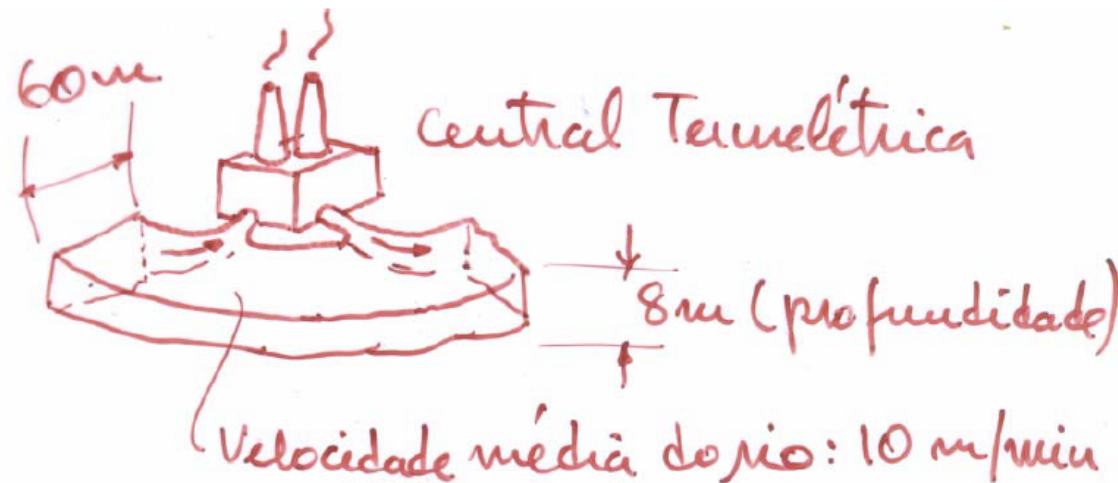
$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_g = \alpha (T_0 - T_L)$$

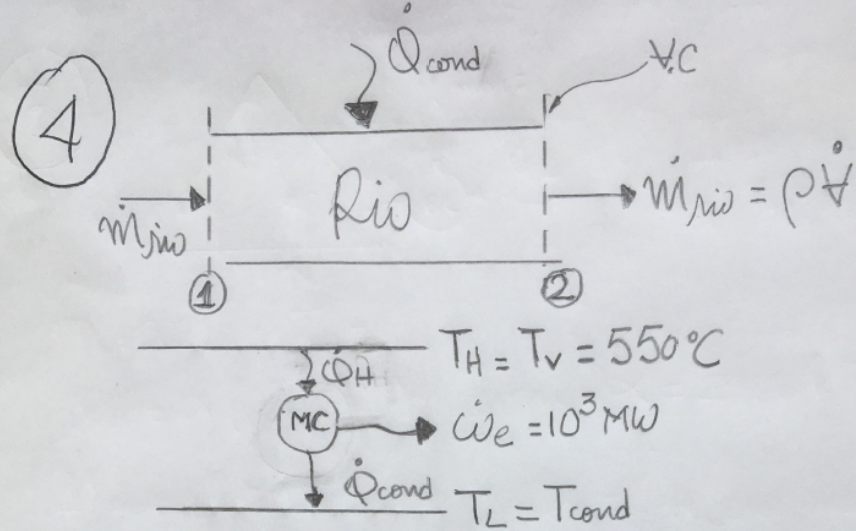
$$\beta_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{min}} = \frac{T_L}{T_0 - T_L} \rightarrow \frac{\alpha (T_0 - T_L)}{\dot{W}_{min}} = \frac{T_L}{(T_0 - T_L)}$$

$$T_0 = T_L + \left(\frac{T_L \dot{W}_{min}}{\alpha} \right)^{1/2} = 318,32 \text{ K}$$

$$T_0 = 45,17^\circ\text{C}$$

4. Propõe-se construir uma central termelétrica com capacidade de geração de 1000 MW e empregando vapor de água como fluido de trabalho. Os condensadores da usina devem ser resfriados com água de um rio, como mostrado abaixo. A temperatura máxima do vapor d'água será de 550°C e a pressão nos condensadores será de 10kPa . Como consultor de engenharia, você é solicitado a estimar o aumento da temperatura da água do rio, entre montante e jusante da central termelétrica. Qual é sua estimativa?





$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3 ; \dot{V} = 60 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} \cdot \frac{10 \text{ m}}{60 \text{ s}}$$

$$\dot{V} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p / p_{cond} = 10 \text{ kPa} \rightarrow T_{cond} = 45,85^\circ\text{C}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = \frac{T_v - T_{cond}}{T_v} = 0,612$$

$$\rightarrow \eta = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_{cond} + \dot{W}_e} \rightarrow \dot{Q}_{cond} = \dot{W}_e \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)$$

Como $\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{riv} c \Delta T$ pois

$$\Delta h = c \Delta T \text{ (água do rio)}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 63,4 \text{ MW}$$

$$* c = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\Delta T = 1,9^\circ\text{C}$$