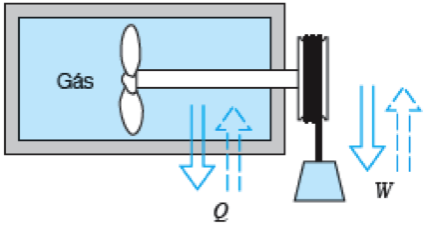
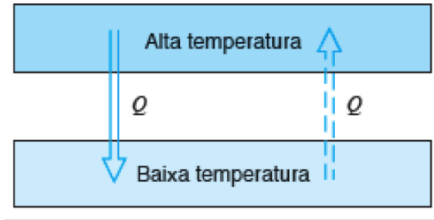
A 2ª Lei da Termodinâmica

Motivação:





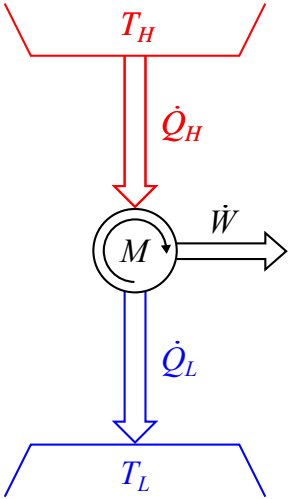
- **1ª Lei:** conservação da energia, ${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$
- **2ª Lei:** sentido no qual a transferência de energia ocorre de forma espontânea

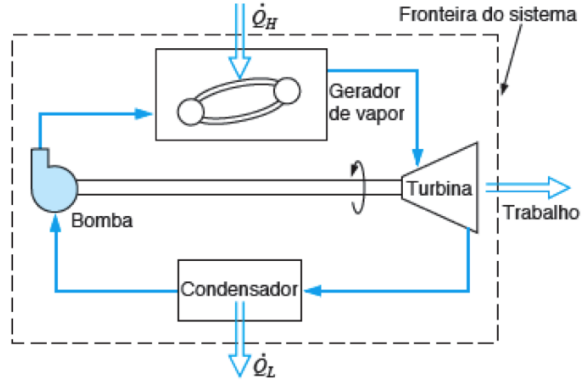
1 Motores térmicos e refrigeradores

- Motores e refrigeradores são utilizados na formulação da 2ª Lei para ciclos.

- Eles operam entre *reservatórios térmicos*, que são fontes ou sorvedouros de calor que não apresentam variação apreciável de temperatura mesmo com transferência de calor

1.1 Motor térmico (ou máquina térmica)

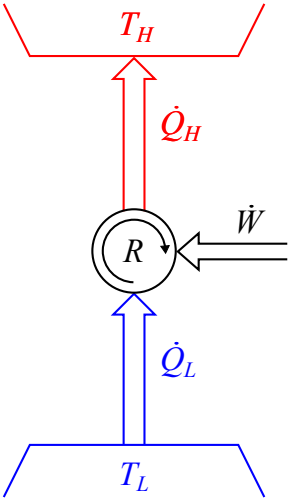


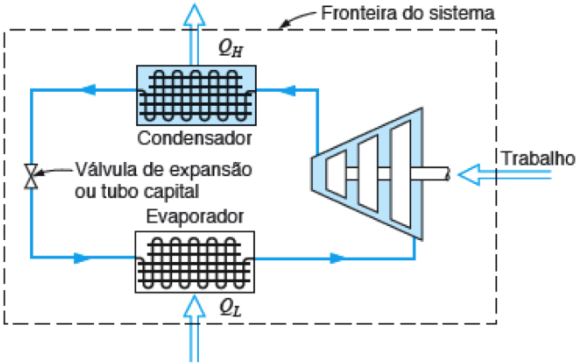


Rendimento: $\eta = \dfrac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \dfrac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \dfrac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$

* Comentar sobre sinais

1.2 Refrigerador e bomba de calor





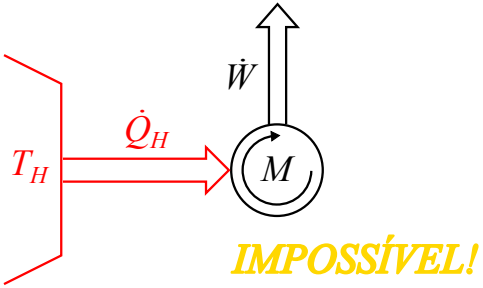
Coeficiente de desempenho : $\beta = \dfrac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \dfrac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}$

para bomba de calor : $\beta' = \dfrac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}$

2 Enunciados da 2ª Lei

2.1 Kevin–Planck

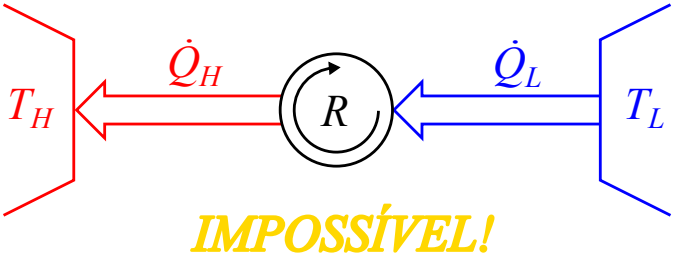
"É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da realização de trabalho sobre o meio e troca de calor com um único reservatório térmico."



$(\eta < 100\%)$

2.2 Clausius

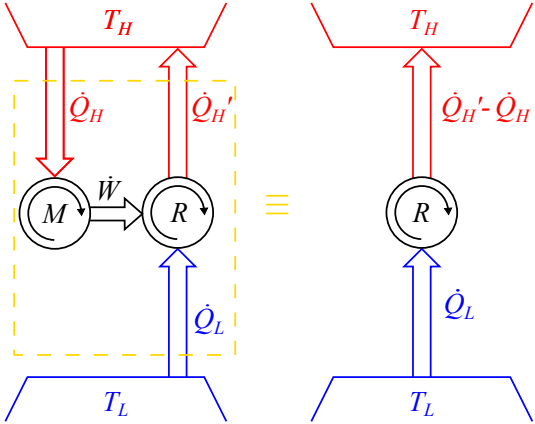
"É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente."



$(\beta < \infty)$

2.3 Equivalência entre os dois enunciados

Violação de K–P implica na violação de C



A demonstração de que a violação de C implica na violação de K–P pode ser encontrada nos livros texto.

3 Processo reversível

Processo que, tendo ocorrido, pode ser invertido sem deixar vestígios no sistema ou no meio.

É um processo ideal, cuja definição é necessária para determinar o limite máximo teórico da eficiência de um ciclo.

Em processos irreversíveis sempre há perda de energia útil.

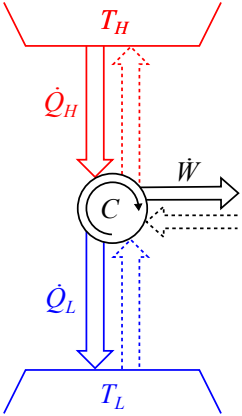
Fatores que tornam um processo irreversível:

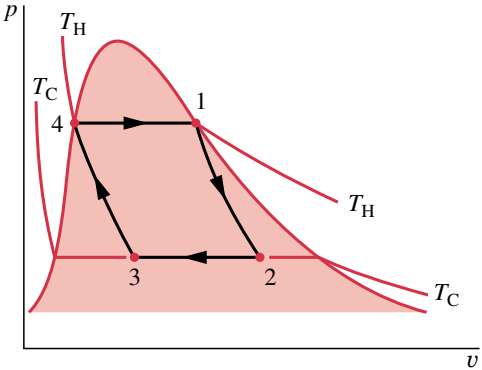
- Atrito
- Expansão não resistida
- Mistura de substâncias
- Troca de calor com ΔT finito

Processos onde as irreversibilidades acontecem somente na vizinhança do sistema são chamados de *internamente reversíveis*.

4 Ciclo de Carnot

É um ciclo composto de processos reversíveis. Portanto, o ciclo pode ser revertido.





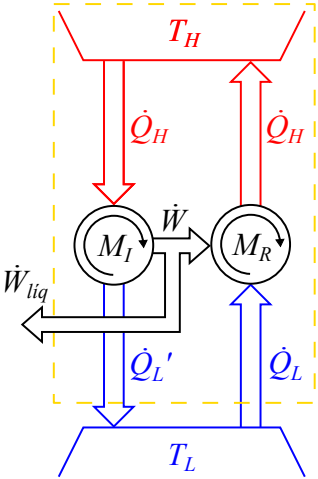
Todos os processos são <u>reversíveis</u>:

- $4-1 \quad \Rightarrow \quad$ troca isotérmica
- $1-2 \quad \Rightarrow \quad$ expansão adiabática
- $2-3 \quad \Rightarrow \quad$ troca isotérmica
- $3-4 \quad \Rightarrow \quad$ compressão adiabática

4.1 Teoremas relativos ao rendimento do ciclo de Carnot

Teorema 1. *É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que seja mais eficiente do que um motor reversível operando entre os mesmos reservatórios.*

Demonstração. Considere dois motores, M_I (irreversível) e M_R (reversível), que trocam o mesmo $\dot{Q}_H$. Considerando a hipótese de que $\eta_I > \eta_R$:



$$\frac{\dot{W}_I}{\dot{Q}_H} > \frac{\dot{W}_R}{\dot{Q}_H} \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_I > \dot{W}_R$$

Este arranjo violaria a 2ª Lei (K–P)

$$\therefore \quad \eta_I \leq \eta_R$$

□

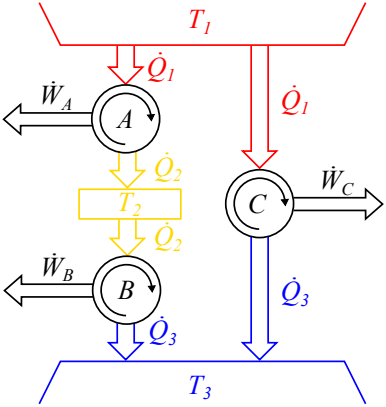
Teorema 2. *Todos os motores que operam segundo um ciclo de Carnot entre dois reservatórios térmicos dados apresentam o mesmo rendimento.*

Demonstração. Mesma ideia usada na prova anterior. Considere dois motores reversíveis, M_{R1} e M_{R2}, que trocam o mesmo $\dot{Q}_H$. Conclui-se que $\eta_{R1} \leq \eta_{R2}$. Mas como os dois são reversíveis, pode-se trocar os papéis chegando a $\eta_{R2} \leq \eta_{R1}$. Assim, conclui-se que $\eta_{R1} = \eta_{R2}$. $\square$

4.2 Eficiência de um ciclo de Carnot

Independe da substância de trabalho, depende somente das temperaturas dos reservatórios térmicos.

Vamos considerar 3 motores reversíveis A, B e C.



$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 1 - \psi(T_L, T_H)$$

Aplicando aos três ciclos (A, B e C):

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \psi(T_1, T_2), \qquad \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_3} = \psi(T_2, T_3)$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_3} = \psi(T_1, T_3)$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} \times \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_3} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_3} \quad \Rightarrow \quad \psi(T_1, T_2) \times \psi(T_2, T_3) = \psi(T_1, T_3)$$

$$\psi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \underbrace{=}_{\text{Kelvin}} \frac{T_1}{T_2}$$

Assim: $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \dfrac{T_L}{T_H}$

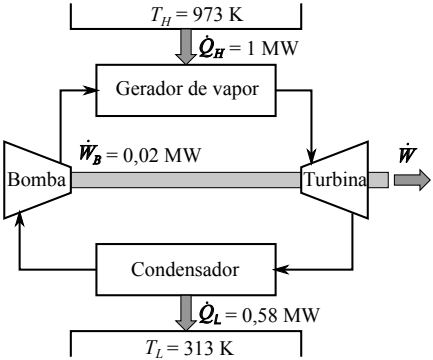
Refrigerador de Carnot: $\beta_{\text{Carnot}} = \dfrac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \dfrac{T_L}{T_H - T_L}$

Para qualquer máquina de Carnot: $\dfrac{T_L}{T_H} = \dfrac{Q_L}{Q_H}$

Exercício 1

A taxa de transferência de calor na caldeira de uma central de potência é 1 MW e o calor é transferido para a água numa temperatura constante

e igual a 700 °C. A temperatura no condensador é 40 °C, a taxa de transferência de calor no condensador é 0,58 MW e a potência consumida na bomba é 0,02 MW. Calcule, nestas condições, a eficiência térmica do ciclo. Admitindo a mesma potência consumida na bomba e a mesma transferência de calor na caldeira, qual seria a potência desenvolvida na turbina se a central operasse segundo um ciclo de Carnot?



Exercício 2

Uma jarra com 4 litros de leite a 25 °C é colocada num refrigerador de Carnot e é então resfriada a 5 °C. A temperatura do reservatório de alta temperatura do refrigerador é igual a 45 °C e as propriedades do leite podem ser consideradas iguais às da água líquida. Determine o calor transferido do leite e também o trabalho necessário para acionar o refrigerador neste processo. Qual o coeficiente de desempenho deste refrigerador?