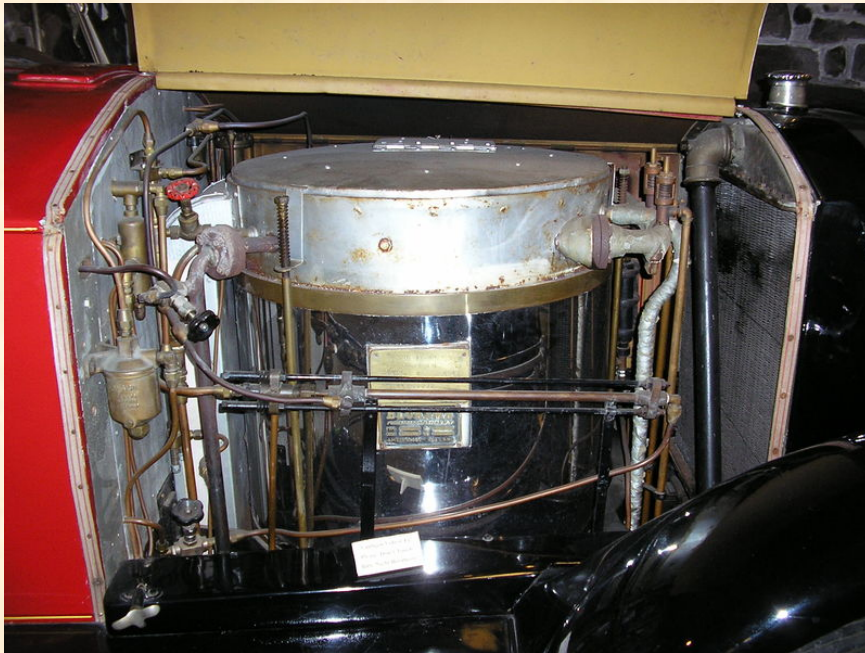


Aula 6

A 2ª lei da termodinâmica

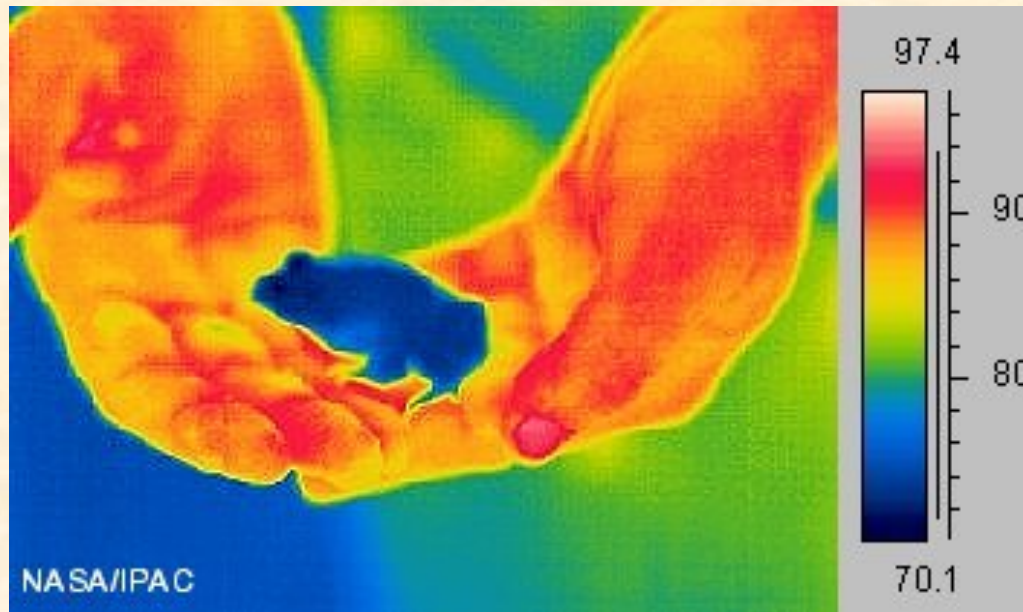
Física II UNICAMP 2012



http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_car

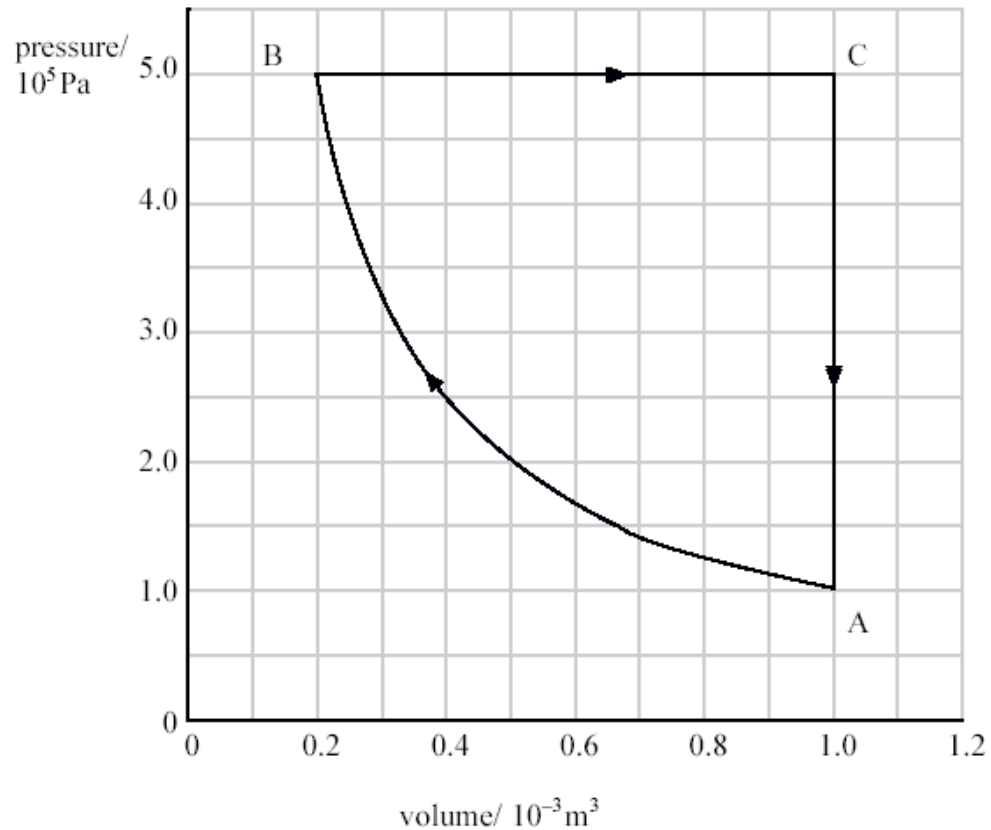
Caldeira de carro a vapor de 1924. Populares até a década de 1930, perderam prestígio com a popularização da partida elétrica de motores de combustão interna.

Imagens IV de animais



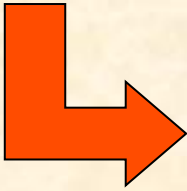
http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/image_galleries/ir_zoo/zoo.html

Revisão da aula passada

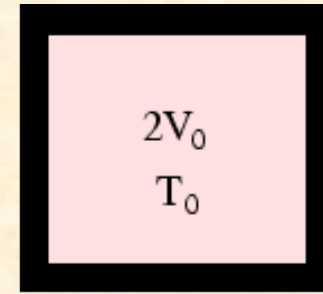
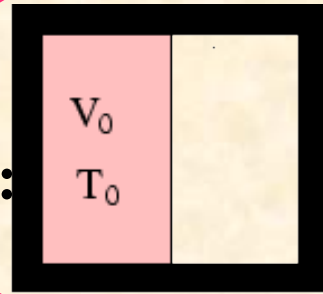


- O processo A → B é isotérmico?
- Em qual(is) processo(s) o sistema perde calor?

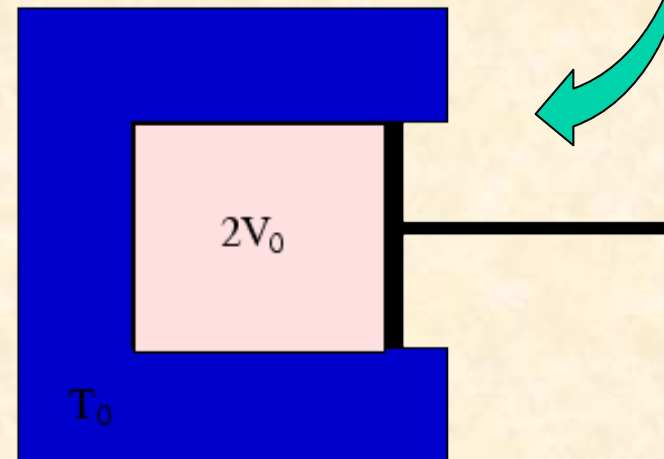
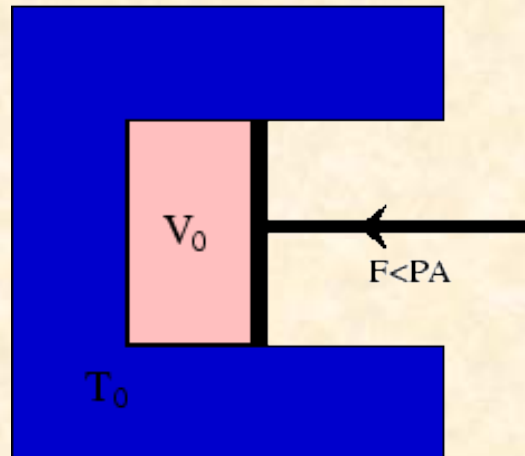
Expansão livre:
compare cuidadosamente os dois exemplos



Sistema isolado:



Sistema em contato térmico com o ambiente



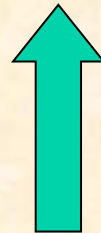
Estados finais iguais

- Na expansão livre: $\Delta E = 0$



- No segundo processo:

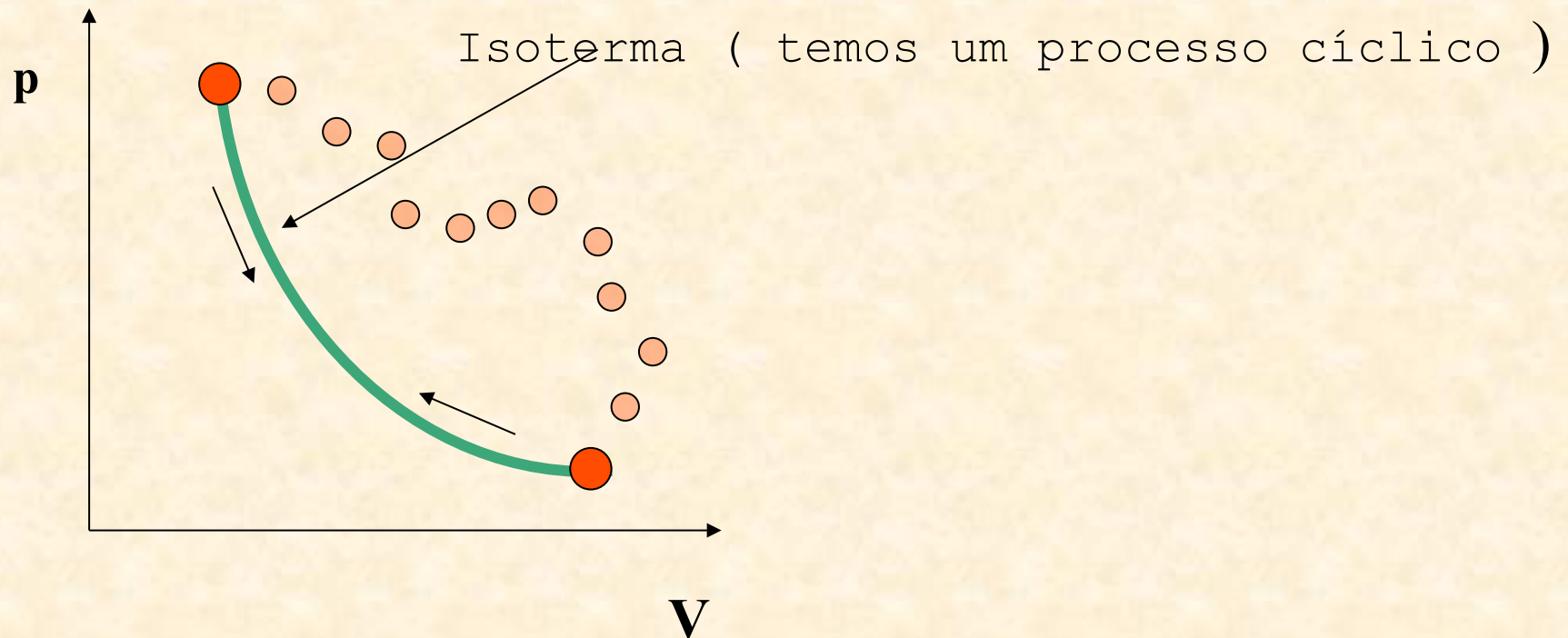
$$Q = \Delta E + W$$



Processo cíclico!

Diferença entre os dois processos

- A expansão livre é um processo irreversível
- O segundo processo é reversível



+ Experimentos virtuais:

Sistema reversível: é possível passear por uma linha $P \times V$

http://www.uwsp.edu/physastr/kmenning/flash/AF_2004.swf

Sistemas de expansão livre (irreversível)

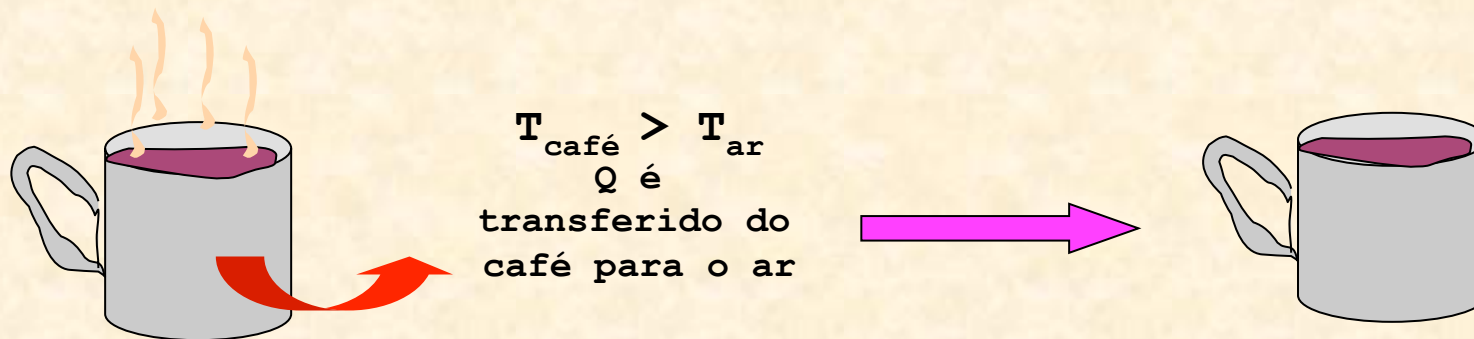
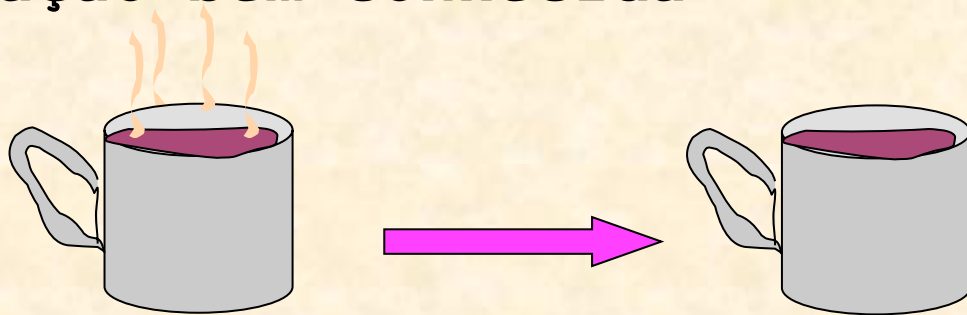
<http://phet.colorado.edu/en/simulation/reversible-reactions>

“Sutilezas” com C_p e C_v !

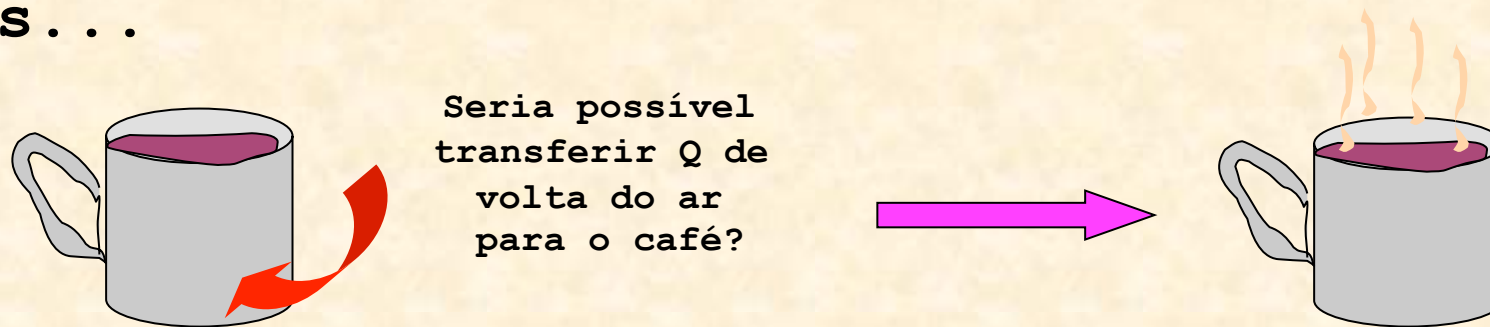
$$dQ = mc_v dT$$

$$dQ = mc_p dT$$

Uma situação bem conhecida

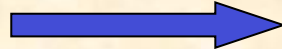
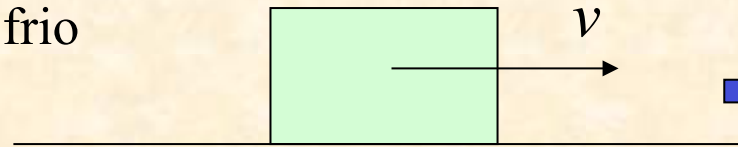


Mas...



Outra situação conhecida

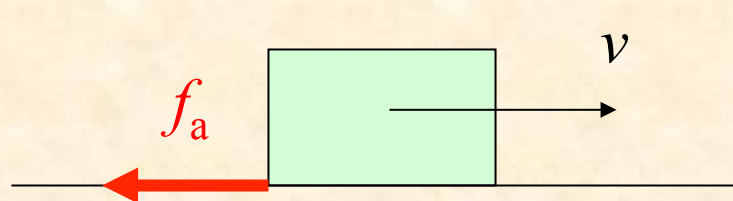
Corpo mais
frio



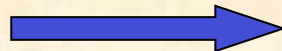
Corpo mais
quente



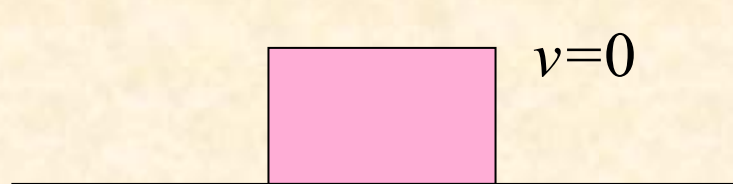
Explicação



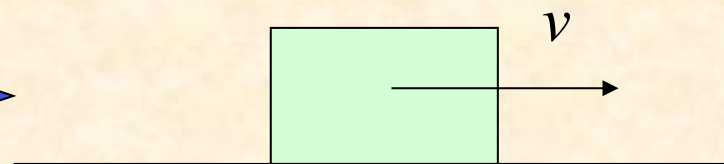
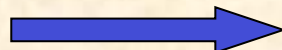
$$W_a = Q$$



Mas...



$$Q = W_c ?$$



Seria possível transformar todo o calor de volta em energia cinética?

- Os dois exemplos aqui mencionados, assim como outros tantos, seriam perfeitamente **viáveis pela 1ª lei da termodinâmica**. Nos dois casos há **conservação da energia!**
- O que faz com que estes eventos não sejam observados?
- Origem do problema: **maior eficiência das máquinas térmicas!**
- Irreversibilidade, a seta do tempo e...



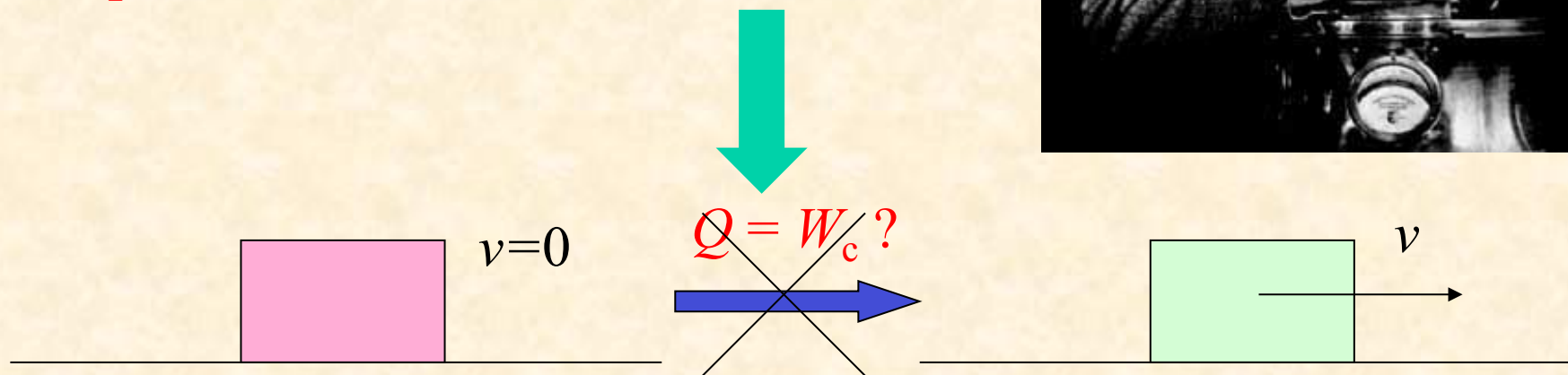
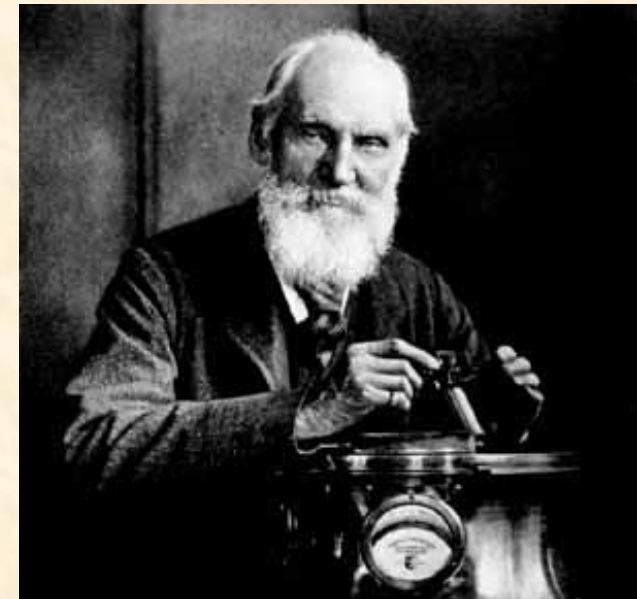
A segunda lei da Termodinâmica

A segunda lei da Termodinâmica

O enunciado de Kelvin (K)

http://en.wikipedia.org/wiki/William_Thomson,_1st_Baron_Kelvin

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.



A segunda lei da Termodinâmica

Convém notar que

- O enunciado de Kelvin **não implica** que não se possa transformar calor completamente em energia mecânica.

Na expansão isotérmica de um gás ideal tem-se

$$\Delta Q = \Delta W$$

mas o estado final do sistema não é o mesmo que o inicial pois há **variação da pressão** do gás.

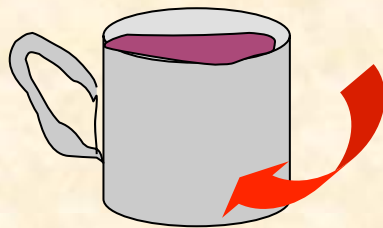
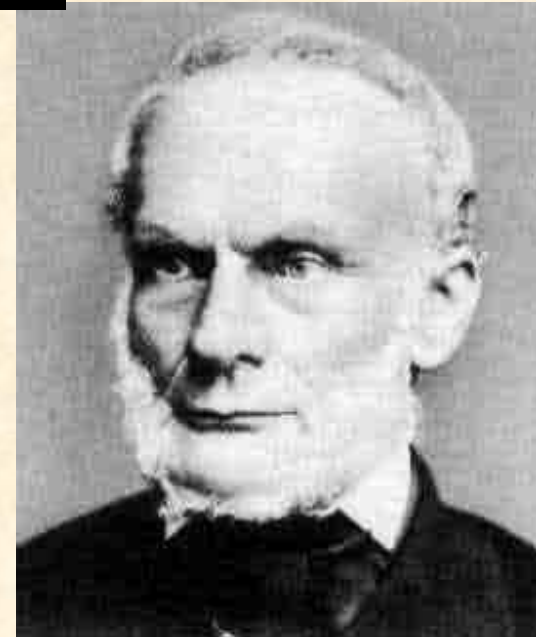
Para termos uma **máquina térmica** precisamos de sistemas que operem em **ciclos**. A completa transformação de calor em trabalho não é o **único efeito**.

A segunda lei da Termodinâmica

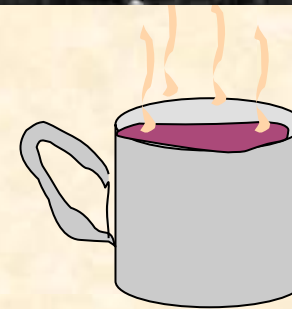
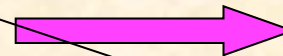
O enunciado de Clausius (C)

http://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.



~~Seria possível transferir Q de volta do ar para o café?~~



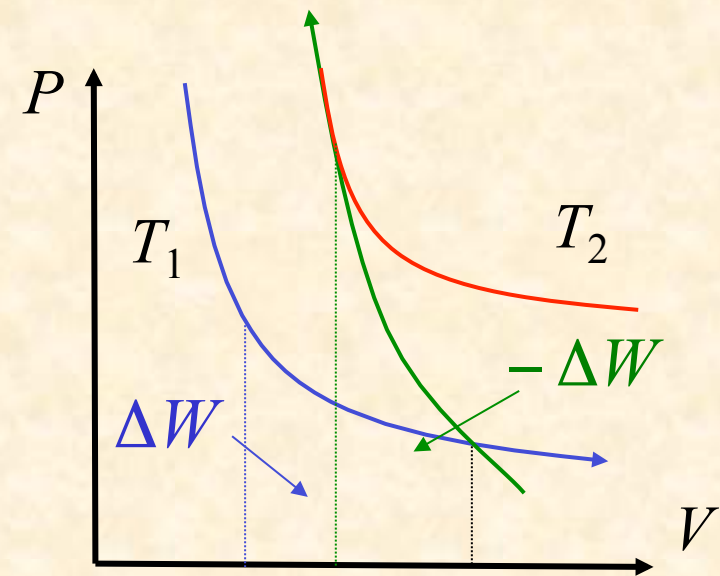
A segunda lei da Termodinâmica

Convém notar que

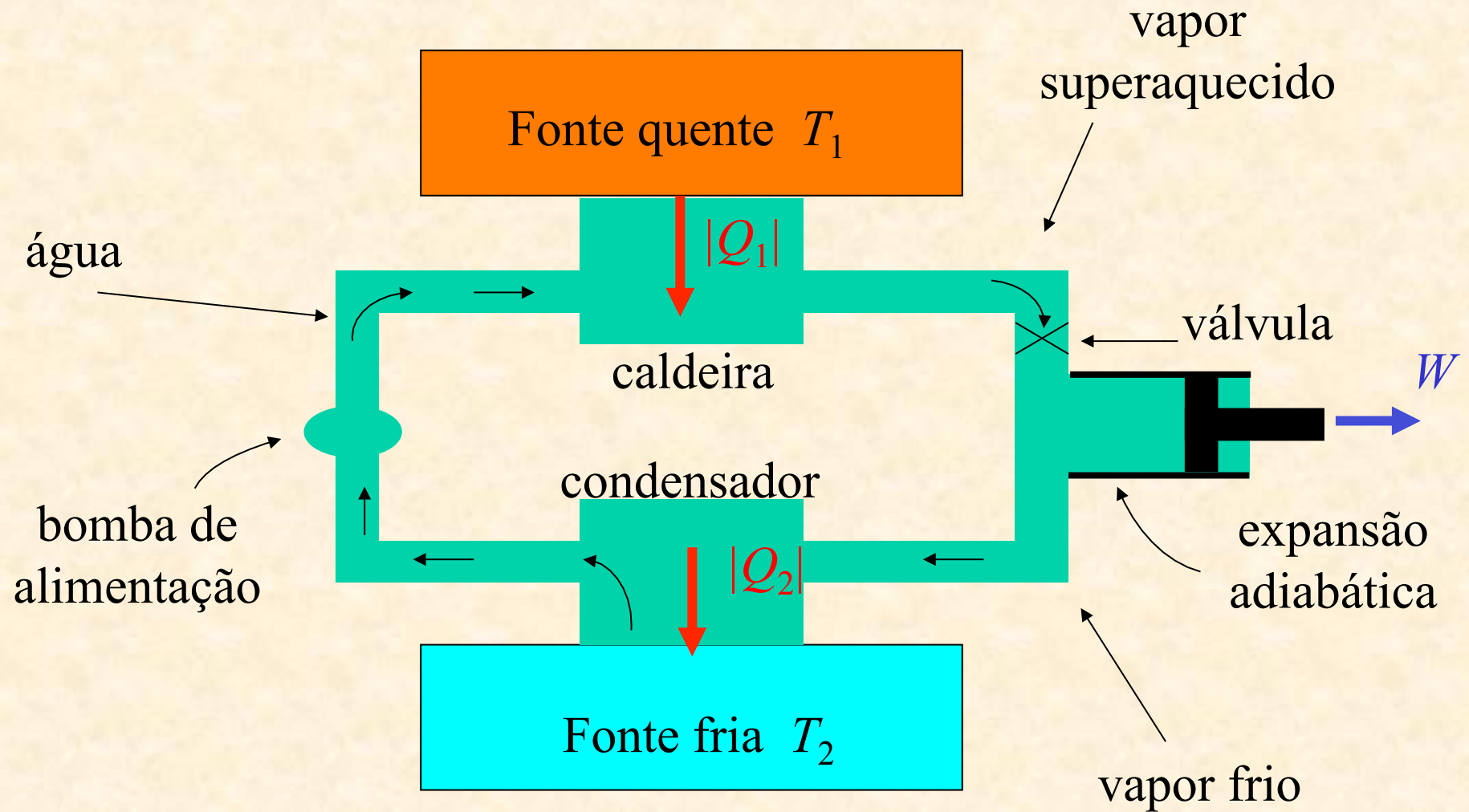
- O enunciado de Clausius **não implica** que não se possa transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. Podemos expandir um gás ideal isotermicamente a T_1 e depois comprimí-lo adiabaticamente até $T_2 > T_1$ de forma que

$$\Delta W_{total} = 0$$

Aqui também há mudança do estado final do gás ideal. A completa transferência de calor de um corpo para o outro não é o **único efeito**.



Motor térmico: processo cíclico!



Motor térmico

O diagrama ao lado representa o **processo cíclico** de um motor térmico e $T_1 > T_2$

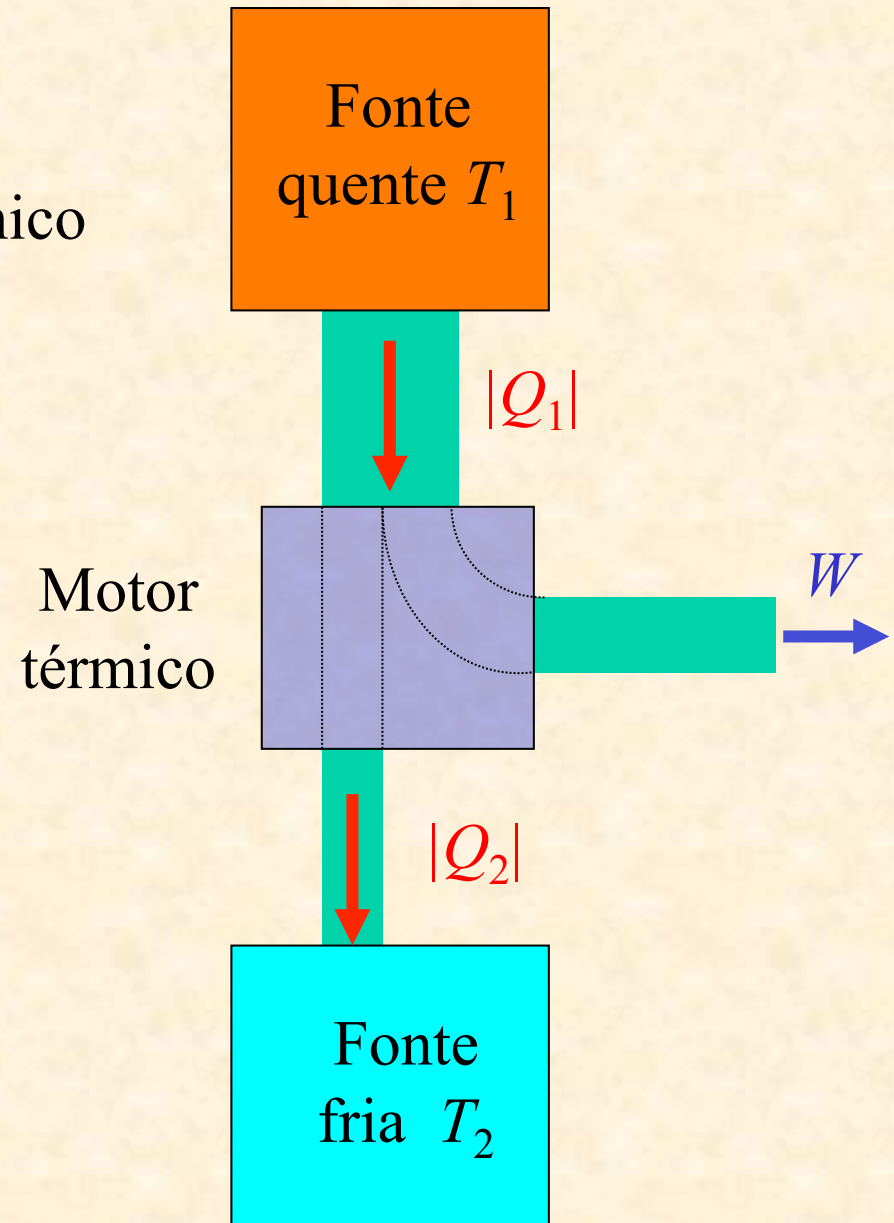


$$\Delta U = 0 \Rightarrow W = Q_1 + Q_2$$

Como $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$ e $W > 0$



$$W = |Q_1| - |Q_2|$$



Motor térmico

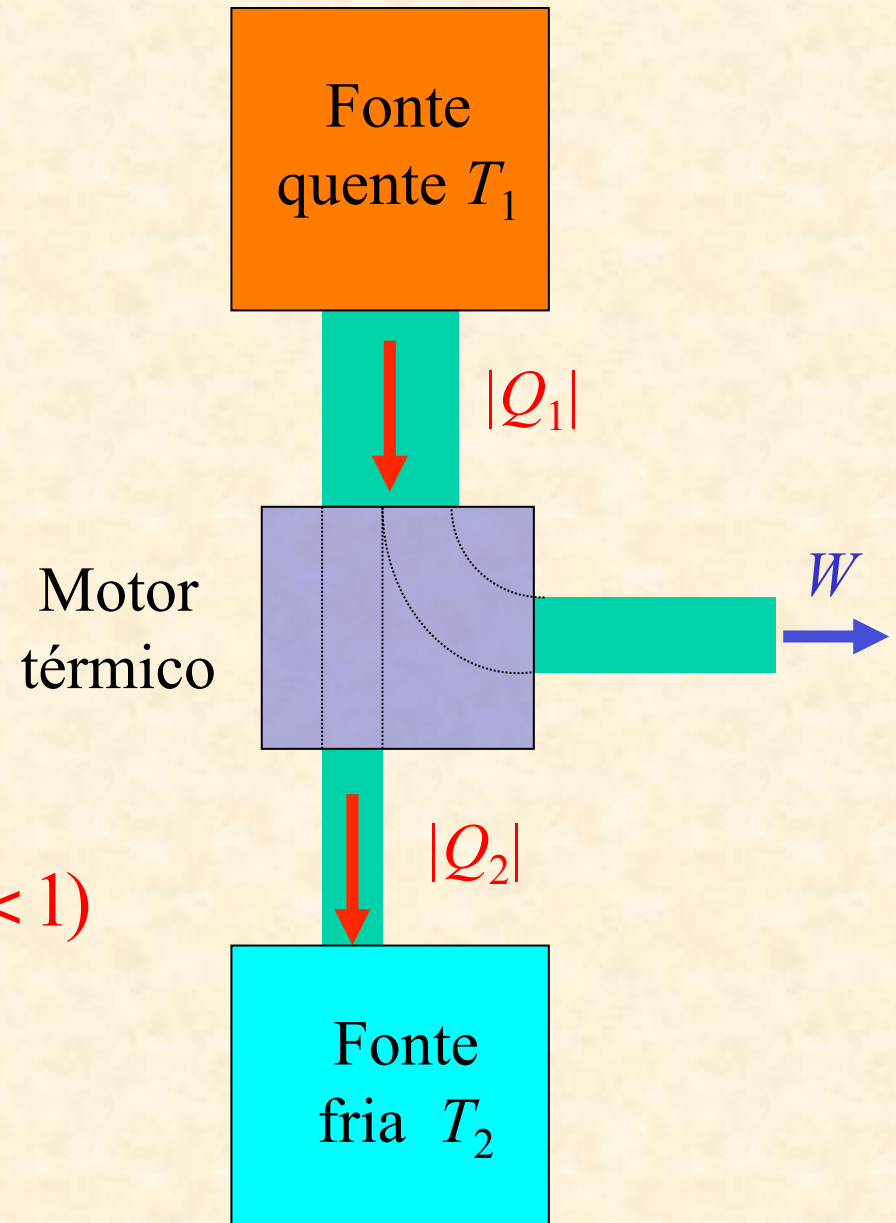
O rendimento de um motor térmico

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{trabalho executado}}{\text{calor absorvido}}$$



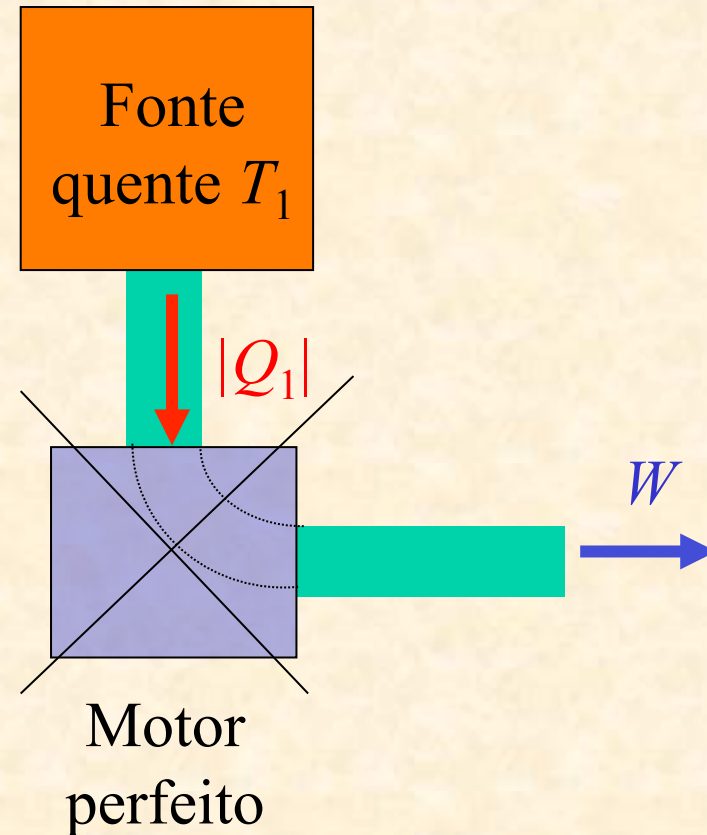
$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

$(\eta < 1)$



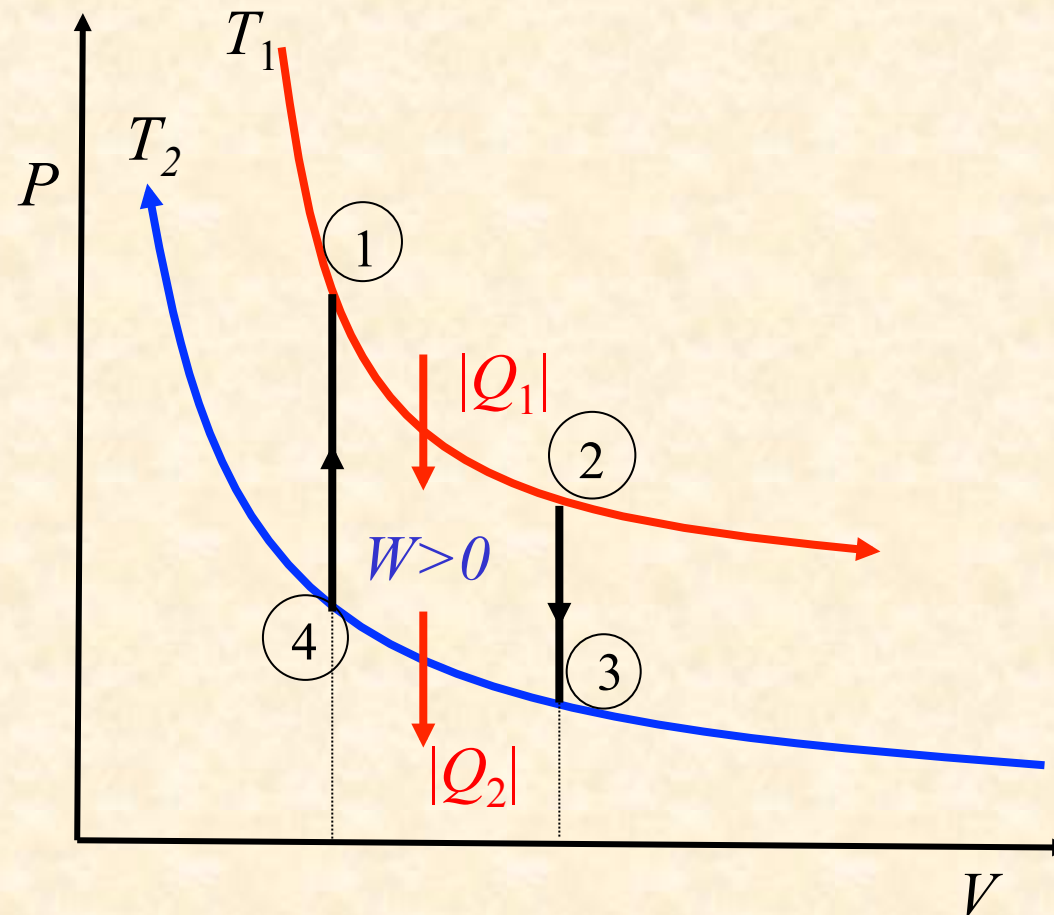
Motor térmico

O enunciado de Kelvin da 2^a lei da Termodinâmica implica na impossibilidade de existir um **motor térmico perfeito**



Exemplo

Uma máquina de Stirling usa $n = 8,1 \times 10^{-3}$ moles de um gás ideal como combustível. A máquina opera entre 95°C e 24°C a $0,7$ ciclos por segundo e o volume da substância dobra durante a expansão.



Exemplo

a) Qual o trabalho efetuado por ciclo?

Expansão e compressão isotérmicas e dois processos isocóricos

$$W_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right), \quad W_{34} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right), \quad W_{23} = W_{41} = 0$$

$$\begin{aligned} W &= W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = nR(T_1 - T_2) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \\ &= \left\{ (8 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,31 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K}) \times (95^\circ \text{C} - 24^\circ \text{C}) \ln 2 \right\} = 3,3 \text{ J} \end{aligned}$$

b) Qual é a potência da máquina?

$$P = \frac{W}{t} = \frac{3,31 \text{ J}}{1,43 \text{ s}} \approx 2,3 \text{ W}$$

Exemplo

c) Quanto de calor é absorvido pela máquina?

$$|Q_1| = W_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad e \quad |Q_2| = -W_{34} = -nRT_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

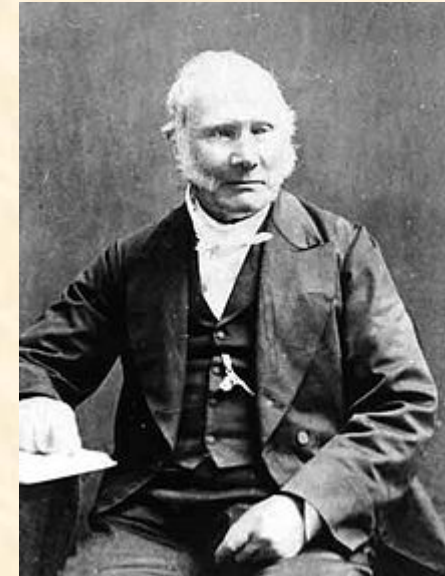
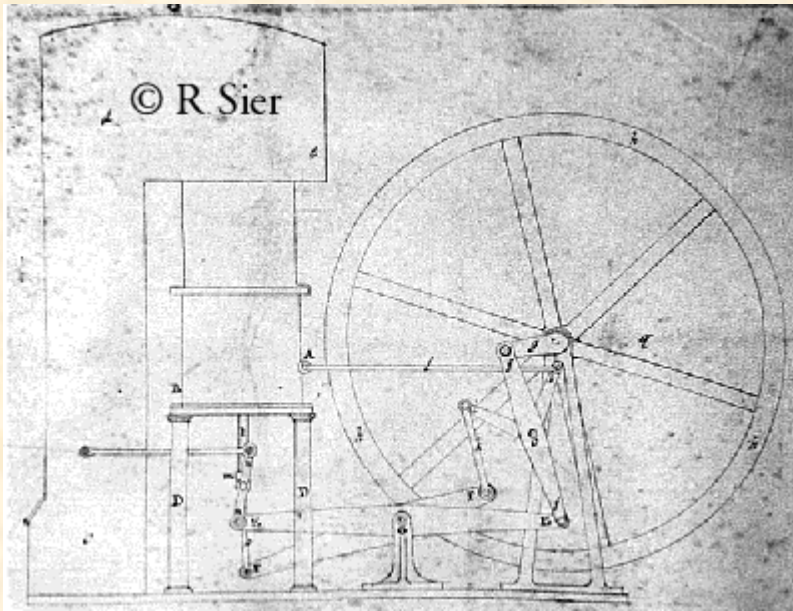
$$|Q_1| = W_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) =$$

$$= \left\{ (8 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,31 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K}) \times 368 \text{ K} \ln 2 \right\} \approx 17 \text{ J}$$

d) Qual é a eficiência da máquina?

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{297 \text{ K}}{368 \text{ K}} = 19\%$$

Robert Stirling



Reverendo escocês
1790-1878

Patente de 1816
primeira máquina operante em 1818

<http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>

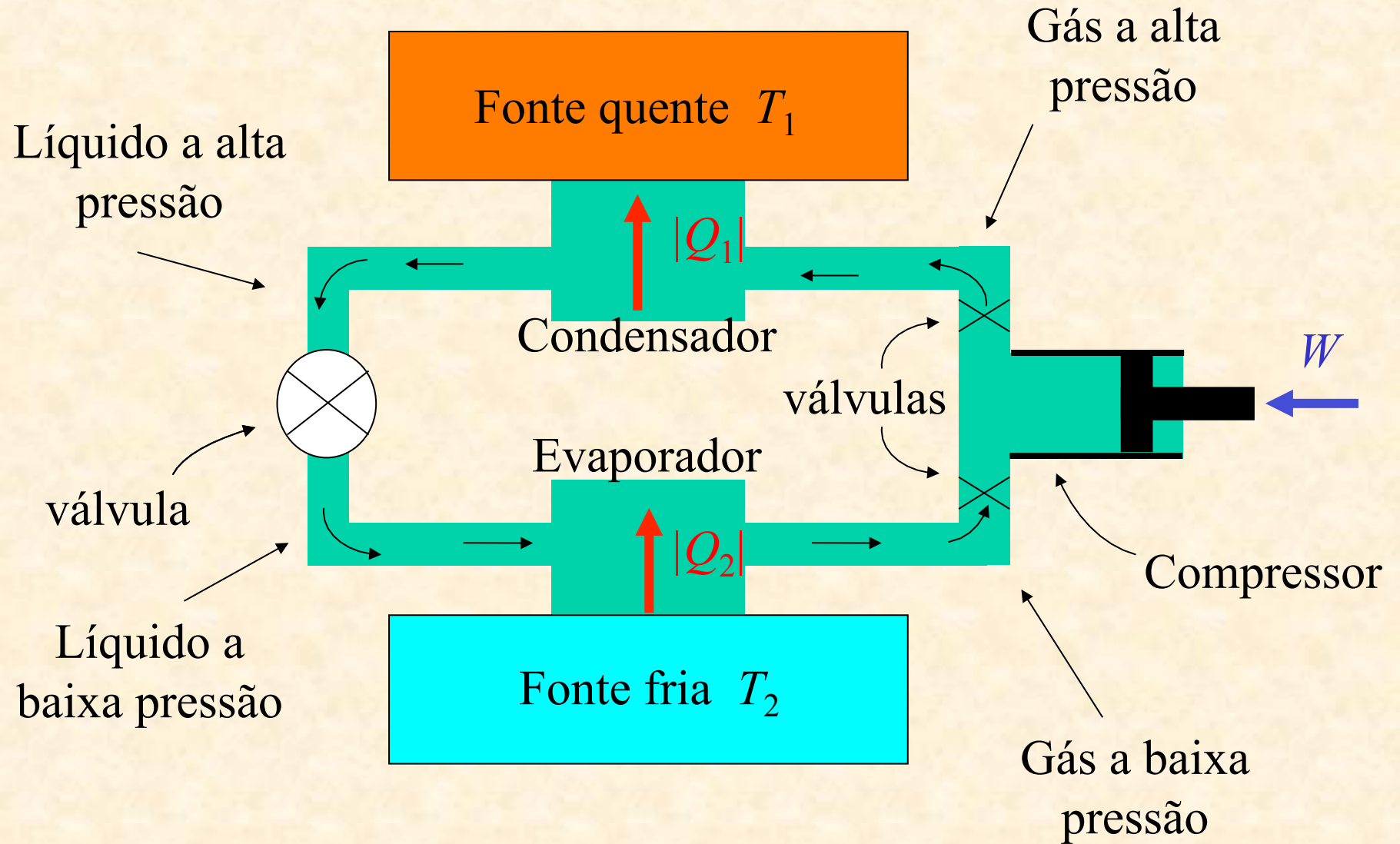
http://web.mit.edu/2.670/www/spotlight_2005/engine_anim.html

**Desafio:
construa um motor de Stirling**



<http://www.youtube.com/watch?v=WTmmvs3uIv0&feature=related>

Refrigerador



Refrigerador

O diagrama ao lado representa o processo cíclico de um refrigerador e $T_1 > T_2$

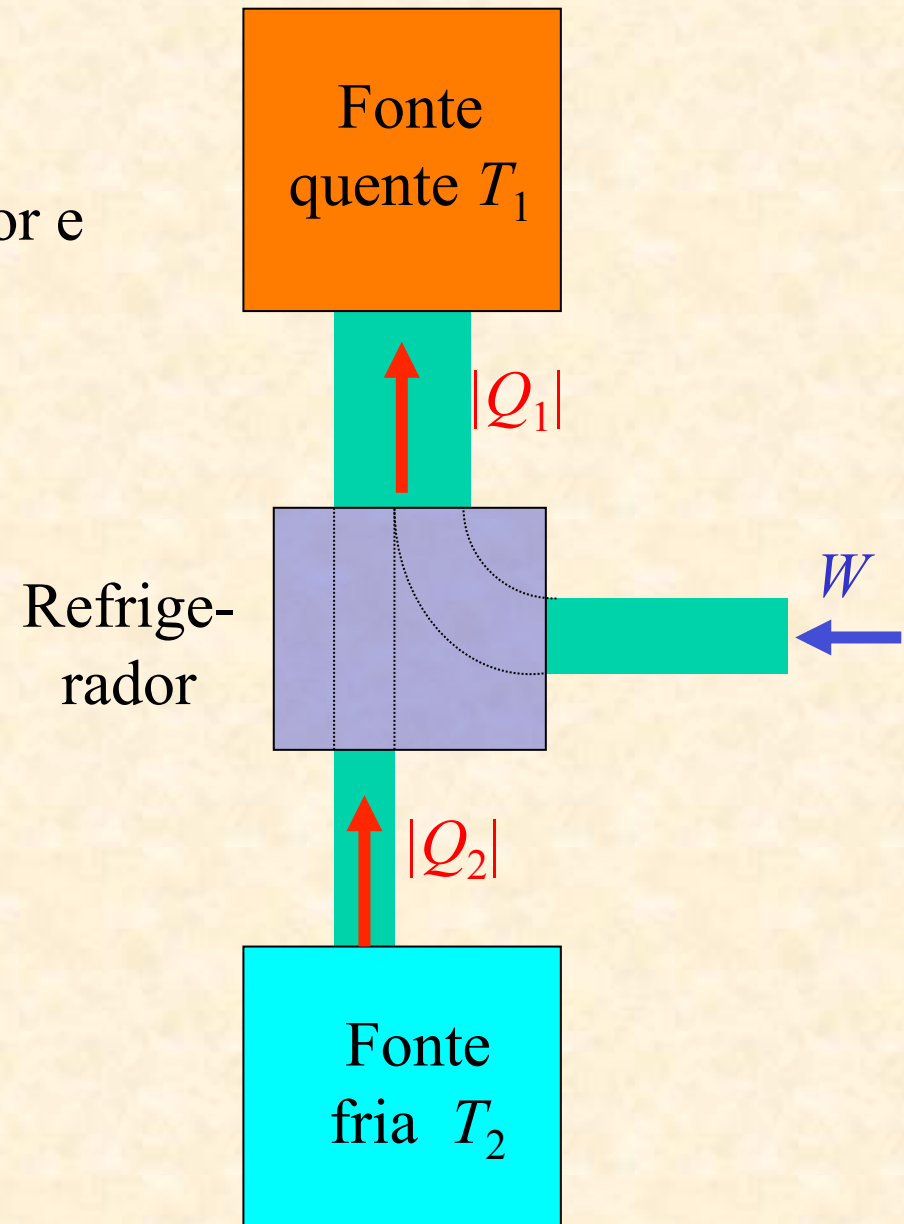


$$\Delta U = 0 \Rightarrow W = Q_1 + Q_2$$

Como $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$ e $W < 0$



$$|W| = |Q_1| - |Q_2|$$



Refrigerador

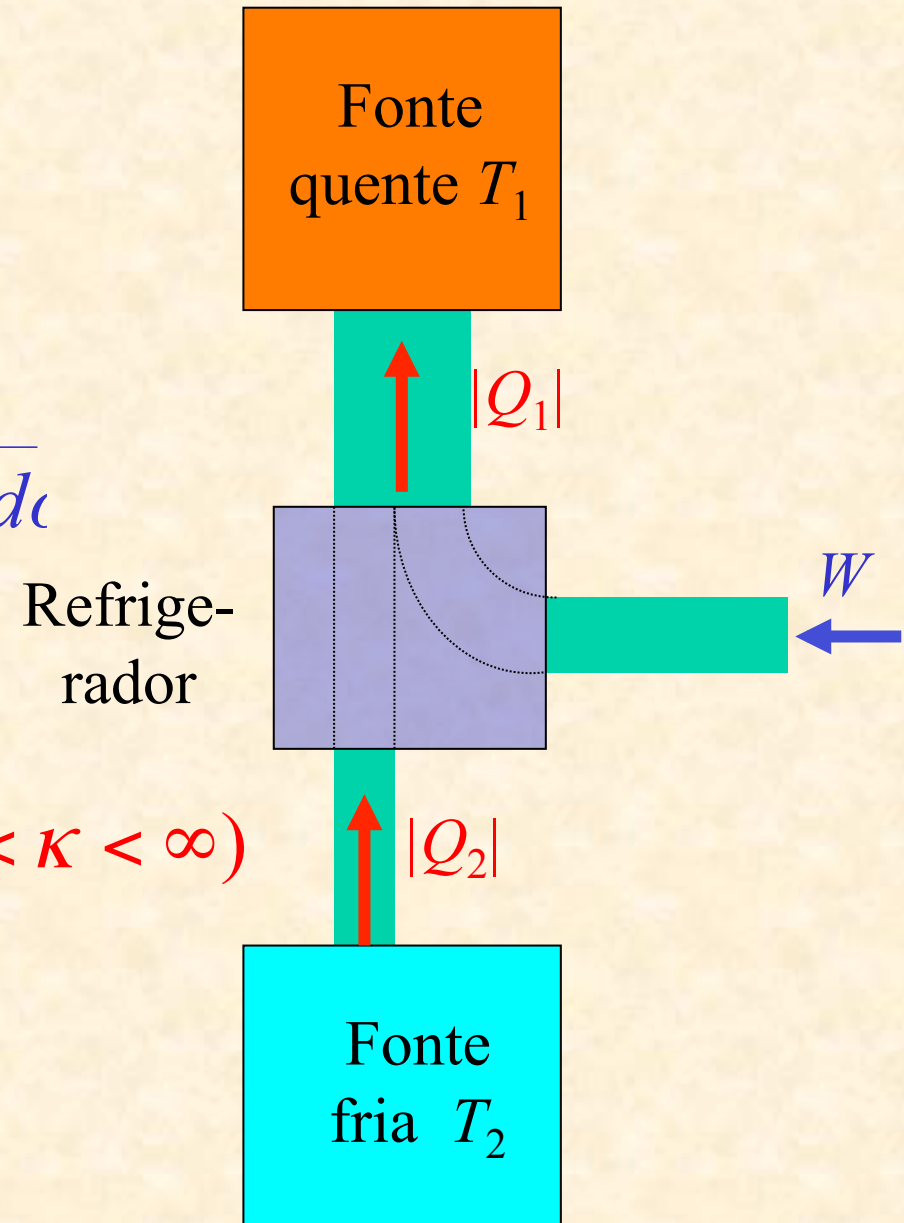
O coeficiente de desempenho de um refrigerador

$$\kappa = \frac{|Q_2|}{|W|} = \frac{\text{calor absorvido}}{\text{trabalho fornecido}}$$



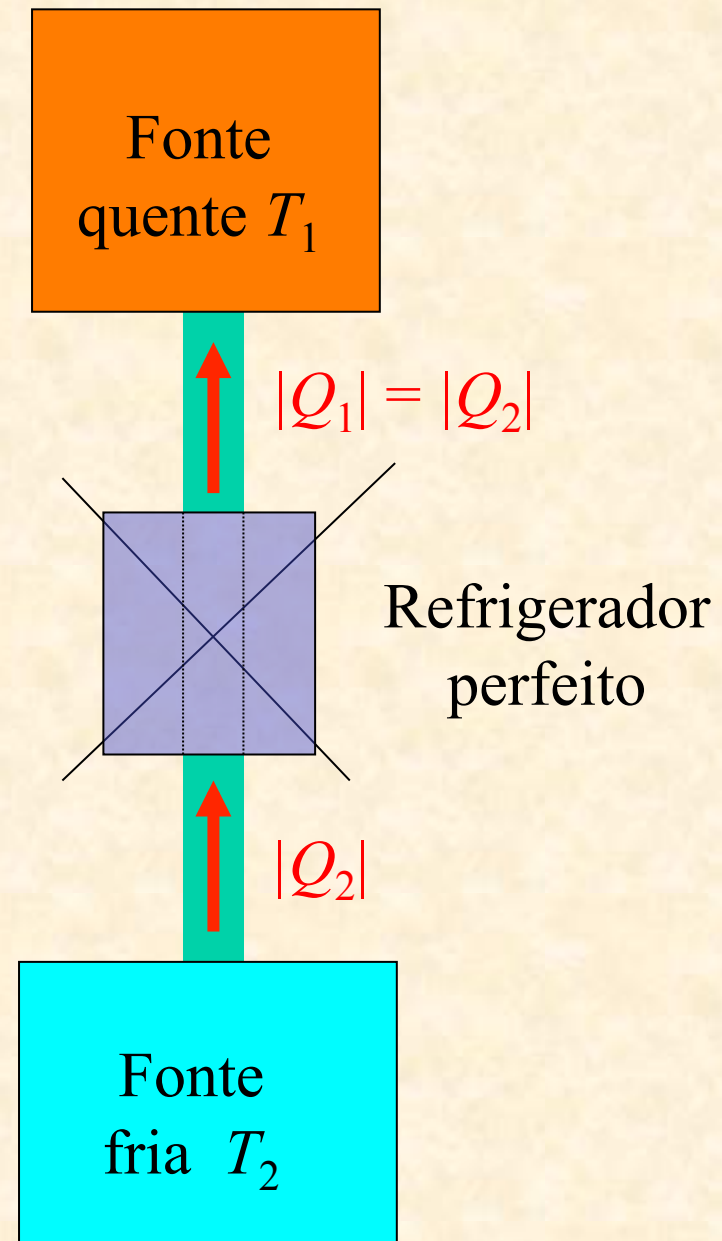
$$\kappa = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|}$$

$$(0 < \kappa < \infty)$$



Refrigerador

O enunciado de Clausius da 2ª lei da Termodinâmica implica na impossibilidade de existir um refrigerador perfeito



Exemplo

Um refrigerador ideal com coeficiente de desempenho 4,7 extrai calor de um recipiente frio à taxa de 250 J/ciclo.


- a) Qual o trabalho necessário, por ciclo, para manter o refrigerador em funcionamento?

$$|W| = \frac{|Q_2|}{K} = \frac{250 J}{4,7} = 53 J$$

- b) Qual o calor entregue ao meio ambiente por ciclo?

$$\Delta U = (|Q_1| - |Q_2|) - |W|$$

$\Delta U = 0$ em um ciclo


$$|Q_1| = |Q_2| + |W| = 53 J + 250 J = 303 J$$

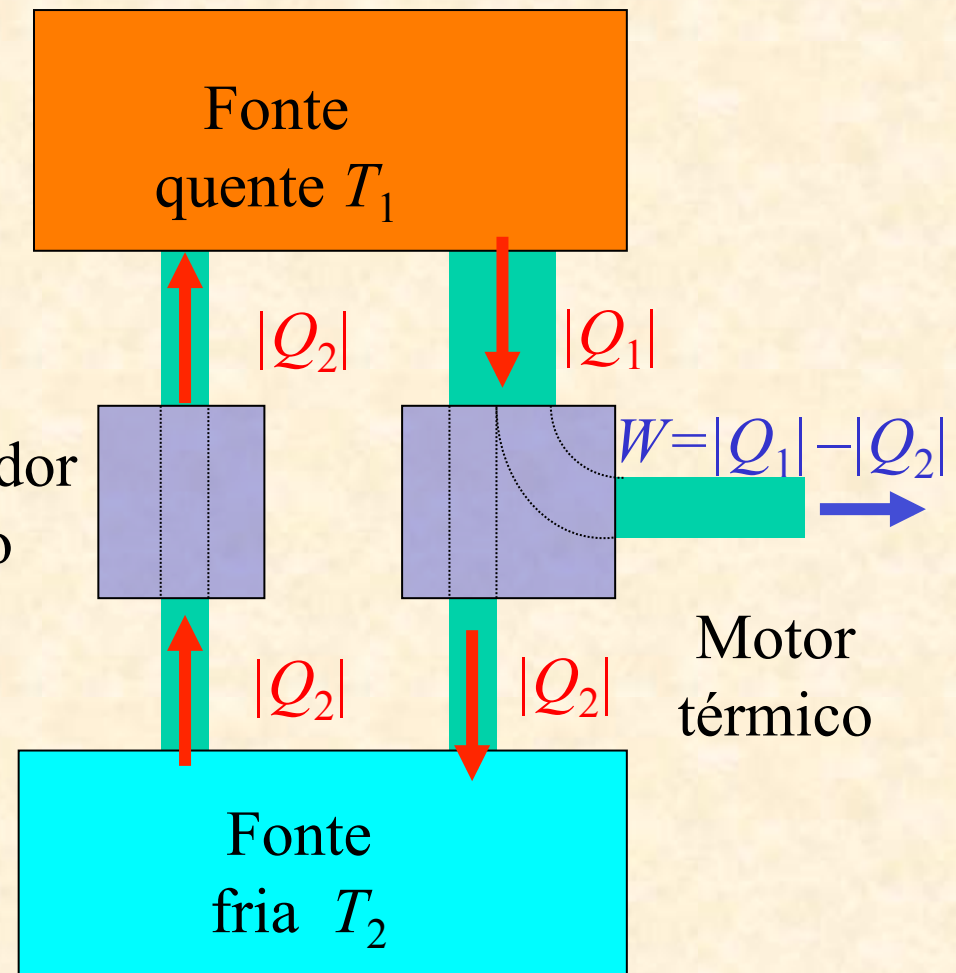
Equivalência dos enunciados

Se (C) não é válido podemos acoplar um **refrigerador perfeito** a dois reservatórios entre os quais opera um **motor térmico real**.



resultado líquido

Refrigerador perfeito

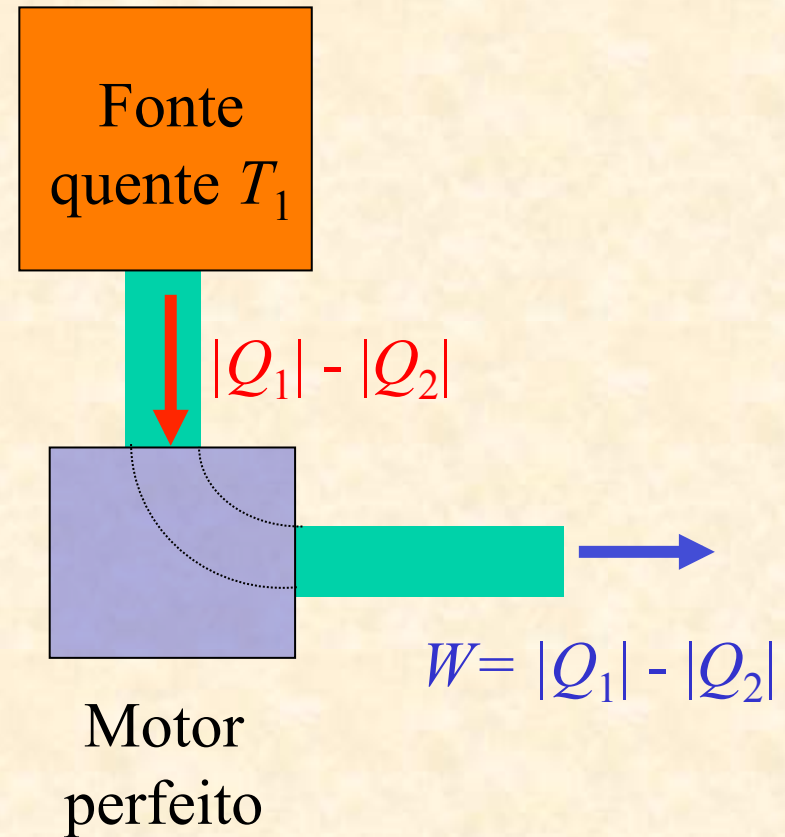


Equivalência dos enunciados

resultado líquido



Motor perfeito e
(K) \rightarrow (C)

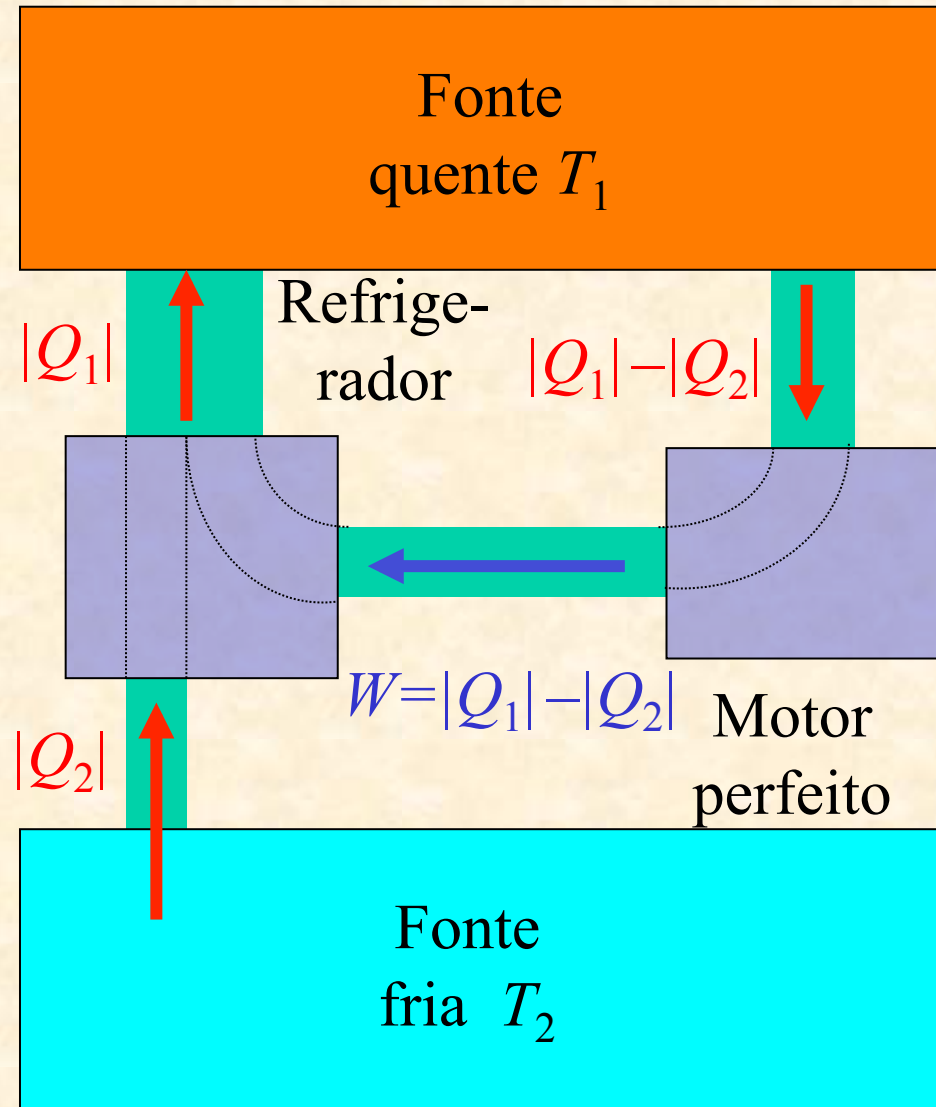


Equivalência dos enunciados

Se (K) não é válida podemos acoplar a saída de um **motor perfeito** à entrada de um **refrigerador real**



resultado líquido



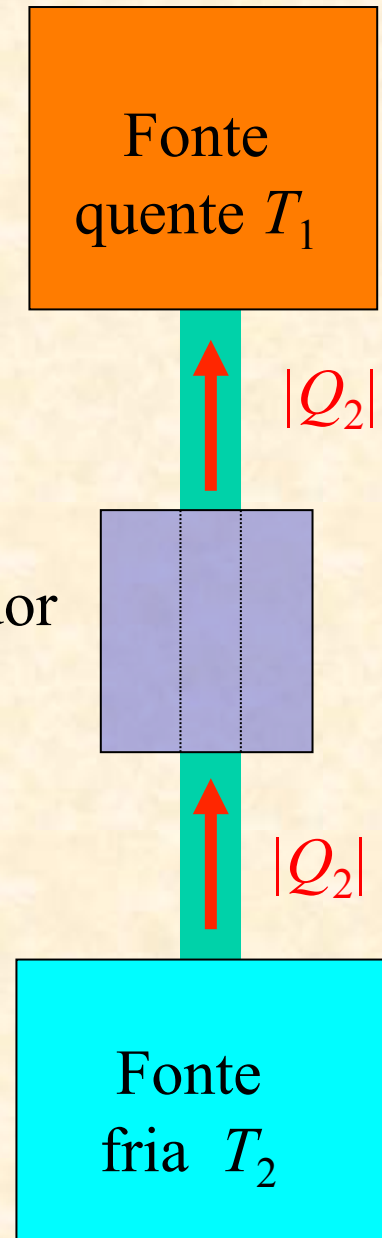
Equivalência dos enunciados

resultado líquido



Refrigerador perfeito e
(C) \rightarrow (K)

Refrigerador
perfeito



O ciclo de Carnot



Dadas uma fonte quente e uma fonte fria, qual é o **máximo rendimento** que se pode obter de um **motor térmico** operando entre elas?



Processos reversíveis

- Existência de **atrito** reduz o rendimento pois a **energia mecânica** se transforma **irreversivelmente em calor**.
- Corpos a temperaturas diferentes, se postos em contato, **transferem calor** de um para o outro **irreversivelmente**.

http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot

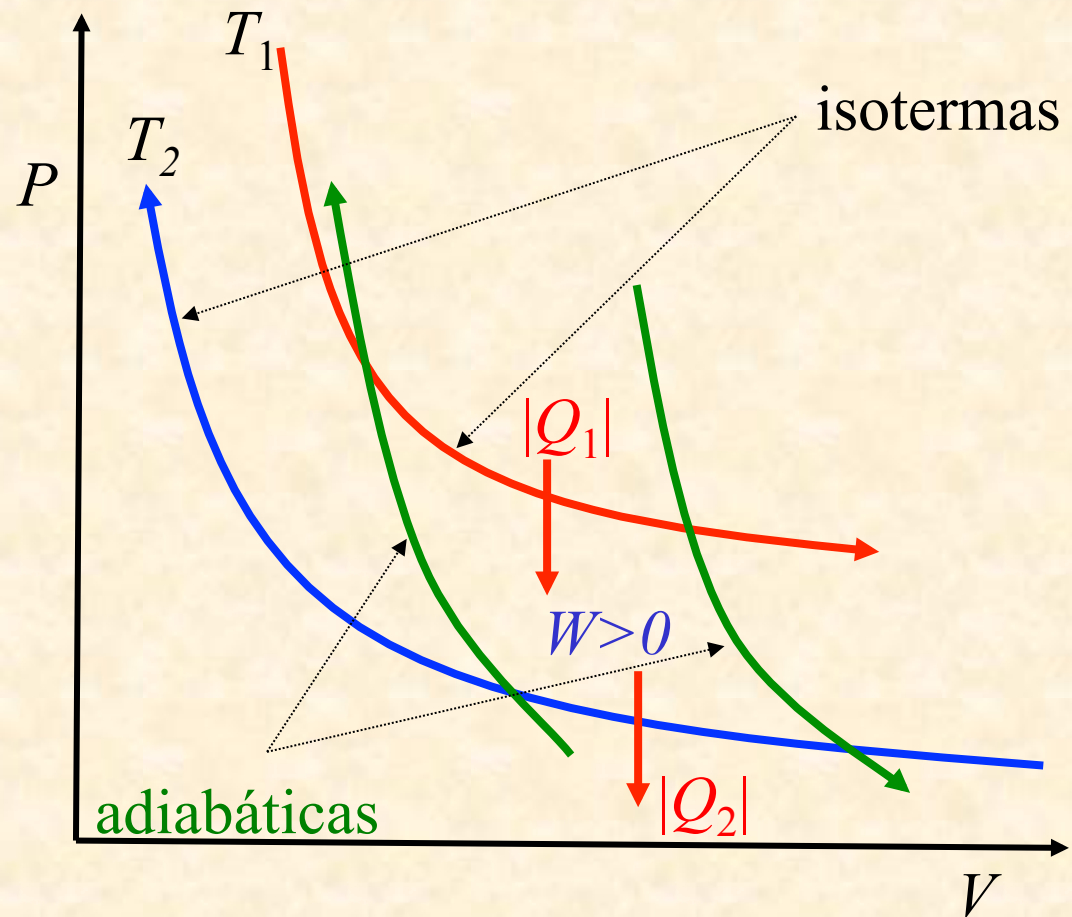
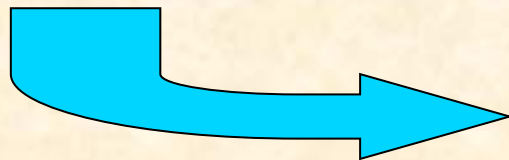
O ciclo de Carnot



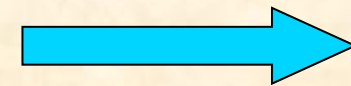
- Troca de calor deve ser feita isotermicamente
- Mudança de temperatura deve ser feita adiabaticamente

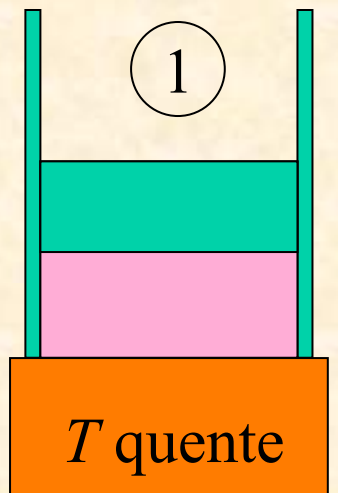


Ciclo reversível

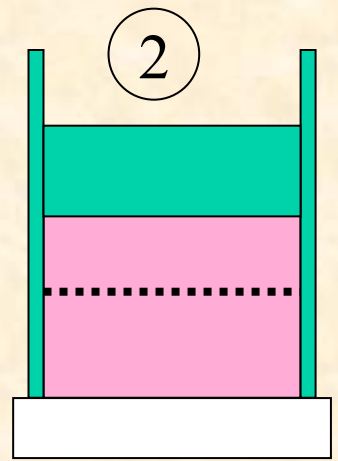


implementação

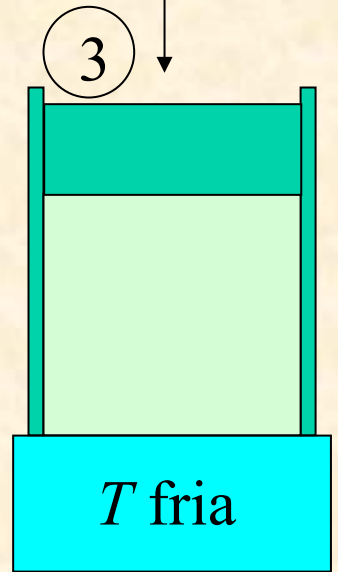




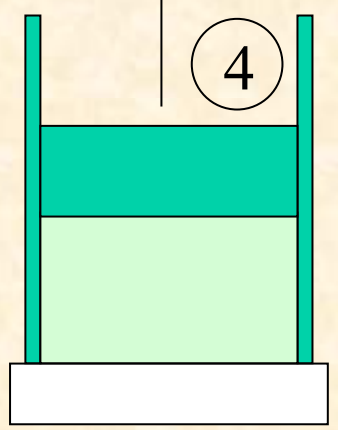
expansão isotérmica



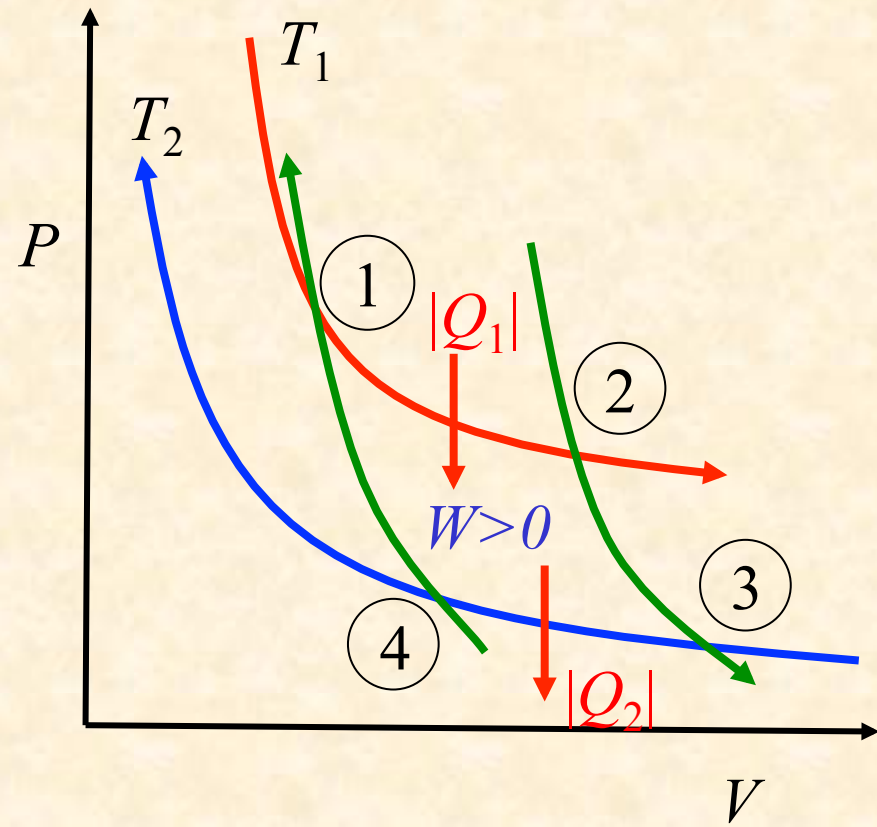
expansão adiabática



compressão isotérmica



compressão adiabática

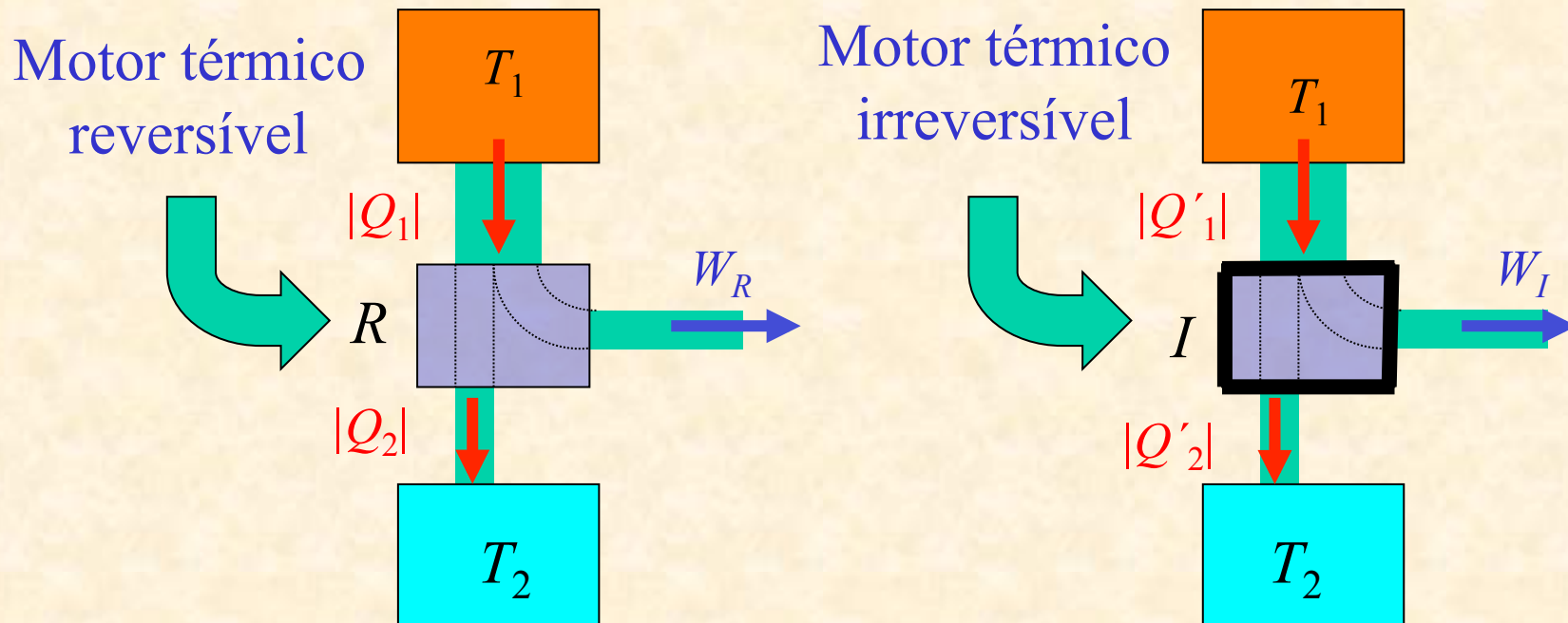


T fria

T quente

O teorema de Carnot

- Nenhuma máquina térmica que opere entre uma dada fonte quente e uma dada fonte fria pode ter rendimento superior ao de uma máquina de Carnot
- Todas as máquinas de Carnot que operem entre estas duas fontes terão o mesmo rendimento



O teorema de Carnot

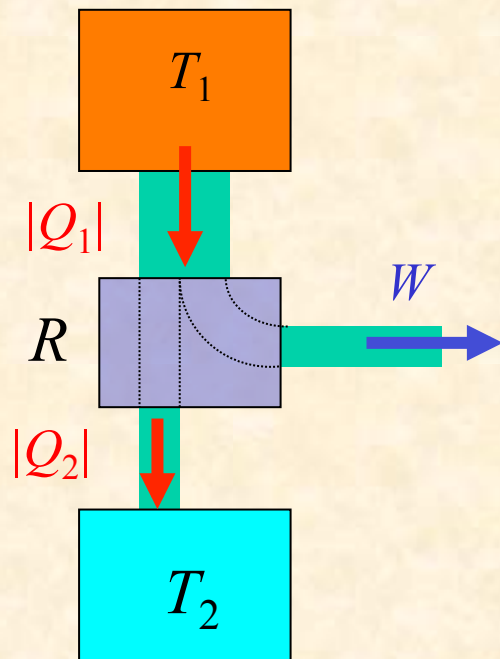
Podemos ajustar os ciclos para que

$$W_R = W_I = W$$

$$\eta_R = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{|W|}{|Q_1|}$$

Supondo
 $\eta_R < \eta_I$

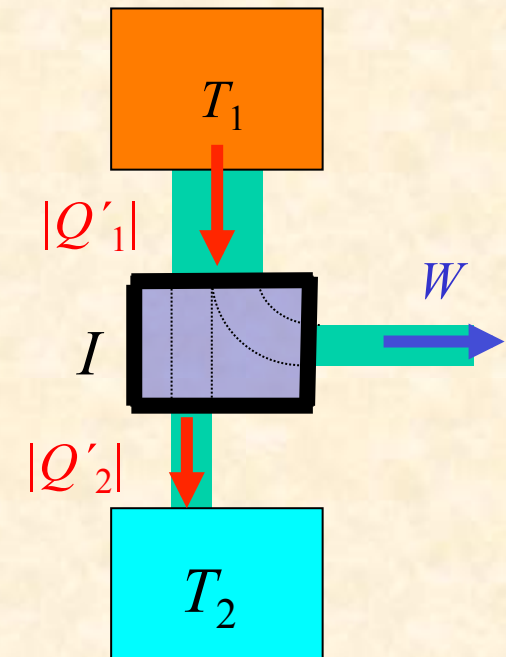
$$\eta_I = 1 - \frac{|Q'_2|}{|Q'_1|} = \frac{|W|}{|Q'_1|}$$



$$|Q'_1| < |Q_1|$$

e

$$|Q'_2| < |Q_2|$$



O teorema de Carnot (parte I)

Revertendo a máquina de Carnot podemos usá-la como refrigerador



Efeito líquido: transferir

$$|Q_1| - |Q'_1| = |Q_2| - |Q'_2| > 0$$

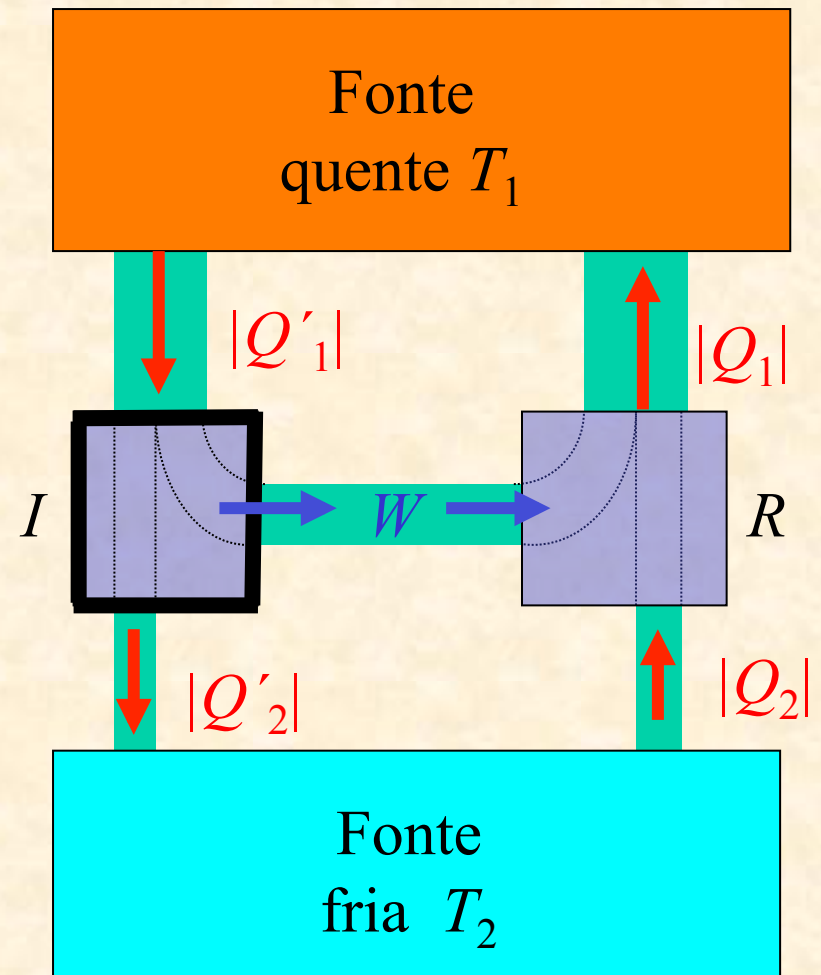
da fonte fria para a fonte quente



viola (C)



$$\eta_R \geq \eta_I$$



O teorema de Carnot (parte II)

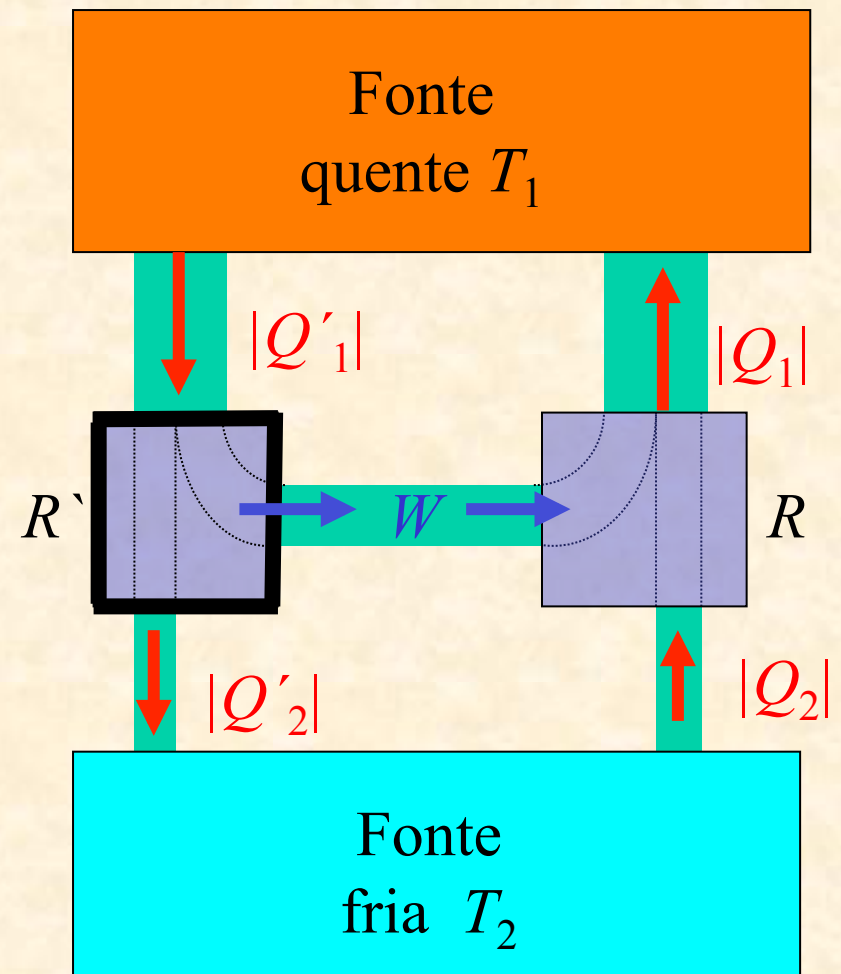
Se (I) também é uma máquina de Carnot (R') podemos inverter os papéis de (R') e (R)



$$\eta_{R'} \geq \eta_R$$



$$\eta_R = \eta_{R'}$$



A escala termodinâmica de temperatura

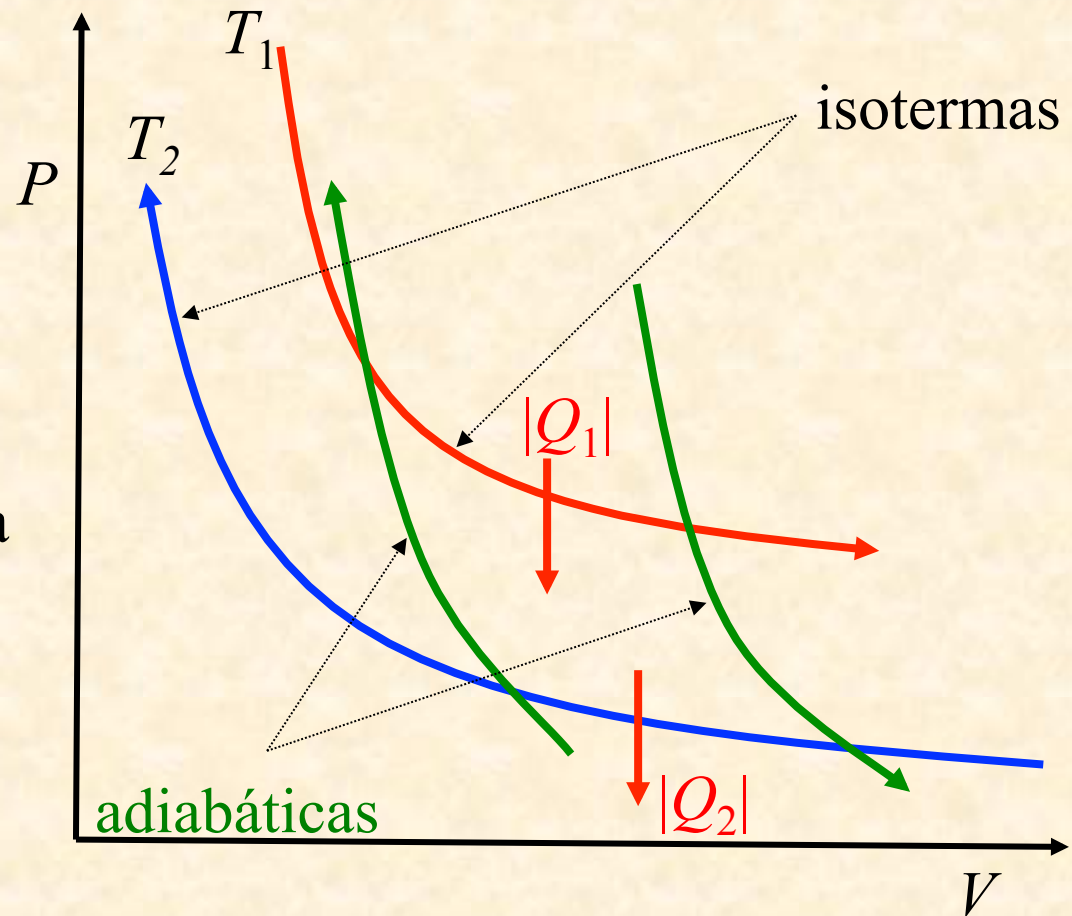
As **únicas características** das fontes quente e fria do ciclo de Carnot são as suas **temperaturas**.



Rendimento de uma máquina de Carnot deve ser uma **função universal de T_1 e T_2** .



$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = f(T_1, T_2)$$



A escala termodinâmica de temperatura

3 possíveis ciclos de Carnot:

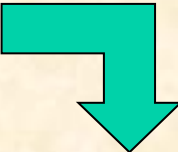
1-2-3-4, 4-3-5-6 ou 1-2-5-6

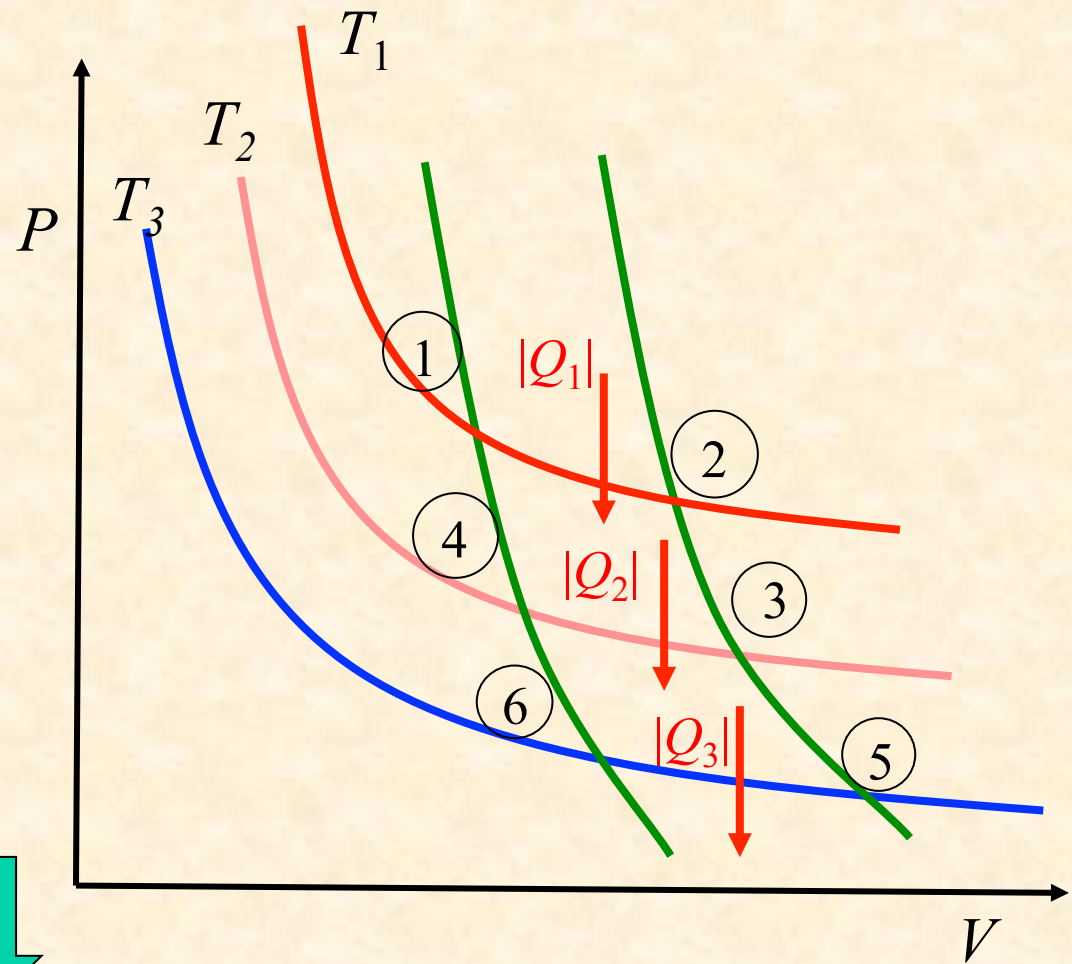
$$1-2-3-4 \rightarrow \frac{|Q_1|}{|Q_2|} = f(T_1, T_2)$$

$$4-3-5-6 \rightarrow \frac{|Q_2|}{|Q_3|} = f(T_2, T_3)$$

$$1-2-5-6 \rightarrow \frac{|Q_1|}{|Q_3|} = f(T_1, T_3)$$

como $\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = \frac{|Q_1|}{|Q_3|} \frac{|Q_3|}{|Q_2|}$





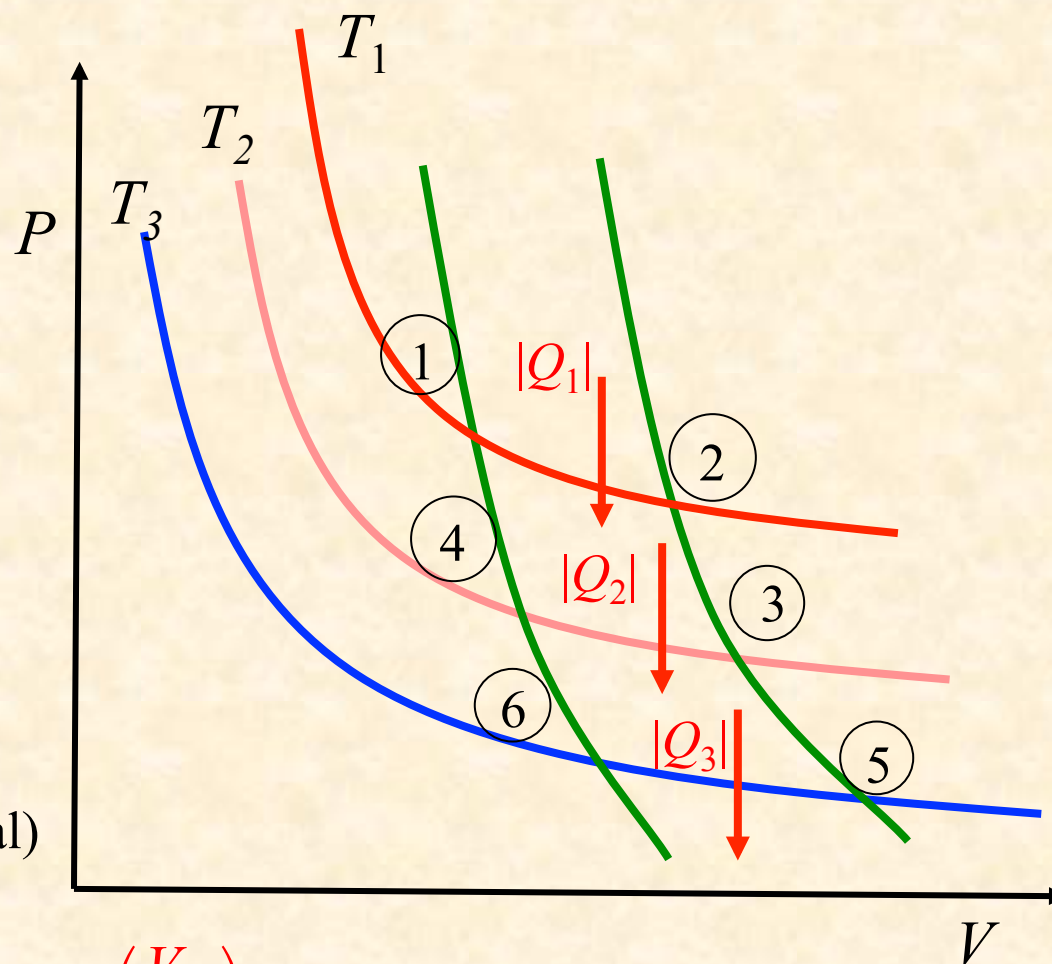
A escala termodinâmica de temperatura

$$f(T_1, T_2) = \frac{f(T_1, T_3)}{f(T_2, T_3)}$$

$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = f(T_1, T_2) = \frac{F(T_1)}{F(T_2)}$$

Definimos (verificar com gás ideal)

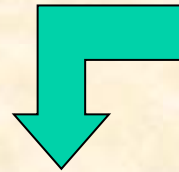
$$F(T) \equiv T \quad W_{i \rightarrow f} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$



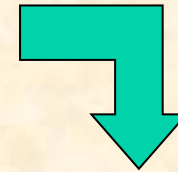
A escala termodinâmica de temperatura



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



Motor térmico

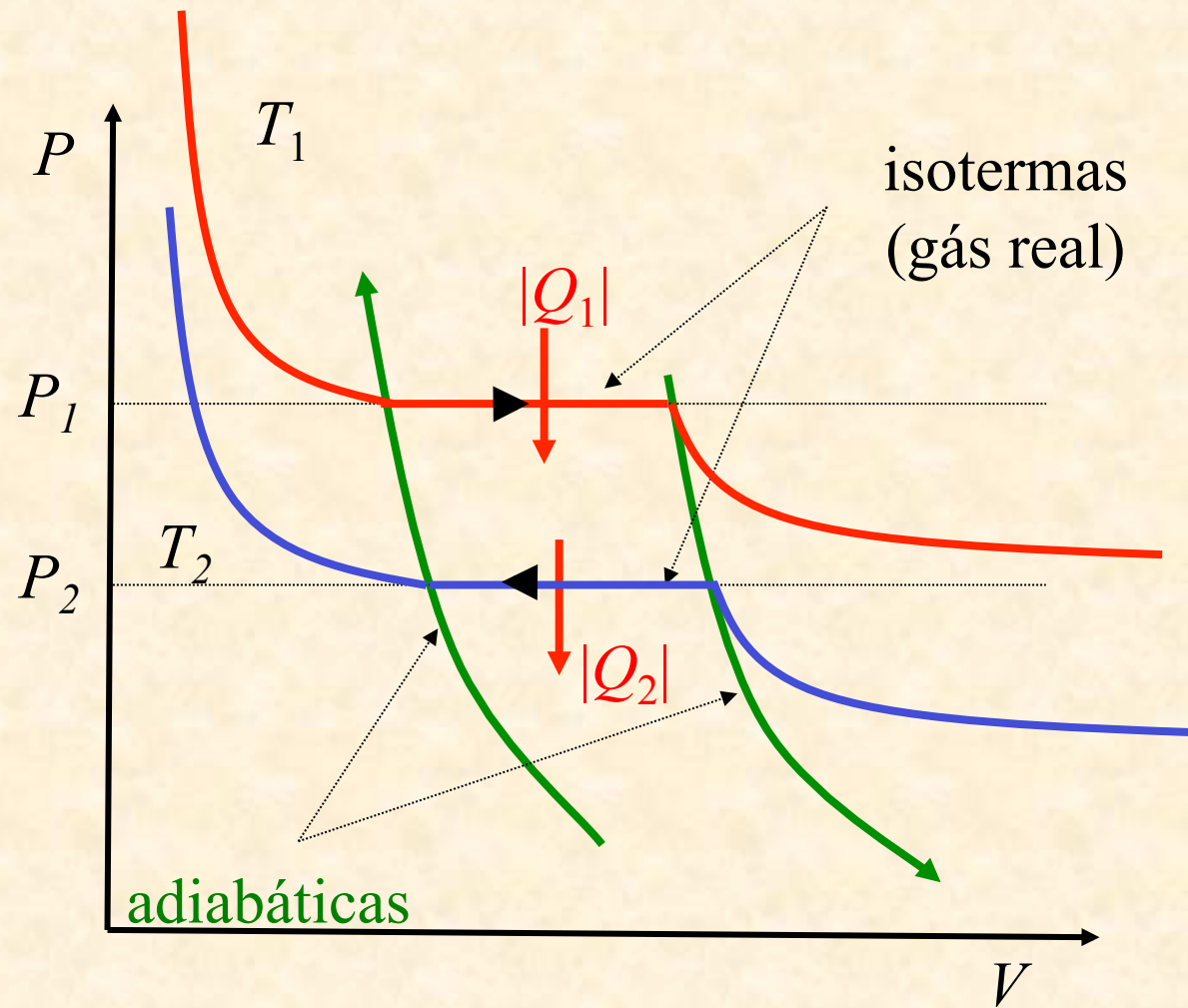


Refrigerador

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\kappa = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Máquina a vapor ideal



Exemplo

A caldeira de uma máquina a vapor funciona a 180°C ($T_1 = 453\text{K}$) e o vapor escapa diretamente para a atmosfera. Qual seria o rendimento máximo da máquina?

A pressão P_2 é a pressão atmosférica, na qual a temperatura de ebulição da água é de 373K . Então o rendimento é

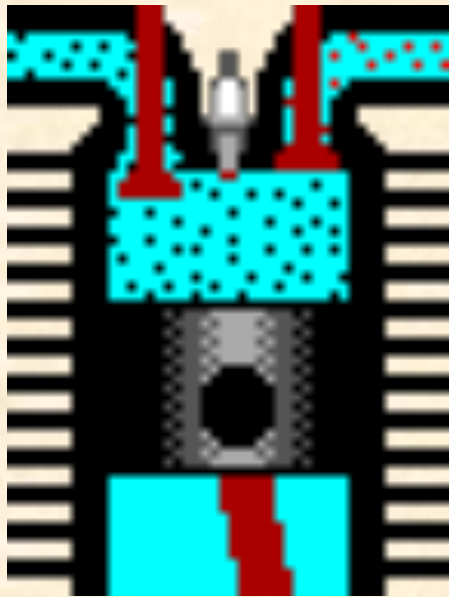
$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{80}{453} = 0,18$$

Comentário: o condensador serve para resfriar o vapor d'água, à temperatura ambiente (300K), o que elevaria a eficiência da máquina

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{153}{453} = 0,33$$

Cilindro de um automóvel

O ciclo de Otto



$$\eta_{gasolina} = 25\%$$

ciclo de otto

