Física do calor

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

Monitor: Guilherme Germano

Guilherme.germano@usp.br

edisciplinas.if.usp.br

(buscar: física do calor 4300159)

Plano do Curso

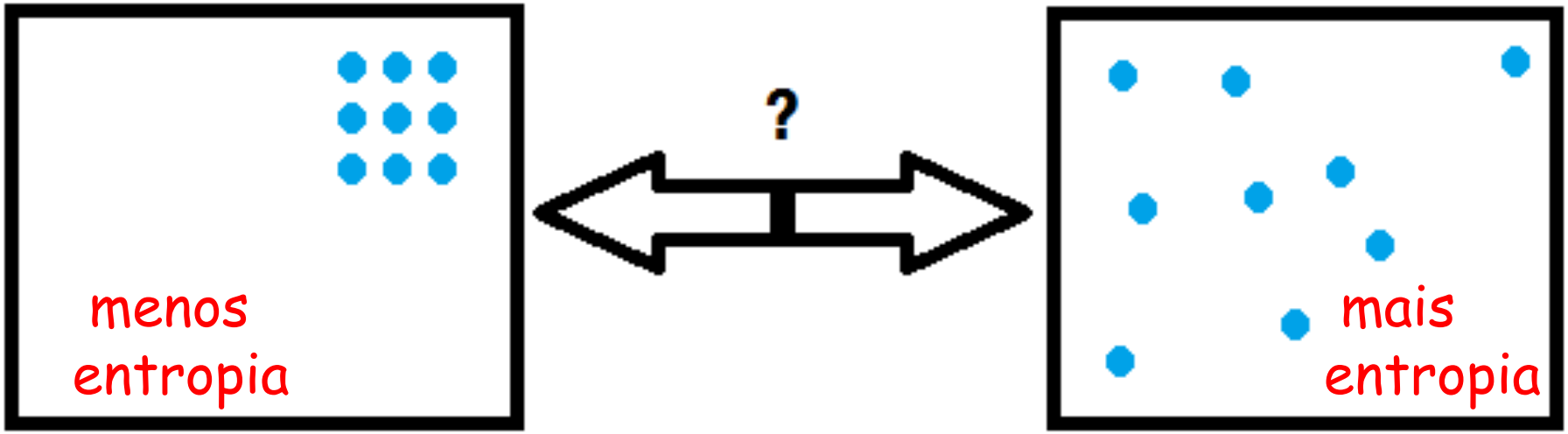
22/03	Cap. 7
25/03	Cap. 7
29/03	Cap. 8
01/04	Cap. 8
05/04	Cap. 8
08/04	Exs.7/8
12/04	
15/04	
19/04	Exs. 7/8
22/04	
26/04	P 1
29/04	Cap. 9
03/05	Cap. 9
06/05	Cap. 9
10/05	Evento
13/05	Cap. 10
17/05	Cap. 10
20/05	Cap. 10
24/05	Cap. 10
27/05	Exs. 10
31/05	P 2
03/06	Cap. 11
07/06	Cap. 11
10/06	Cap. 11
14/06	Exs. 11
17/06	Cap. 12
21/06	Cap. 12
24/06	Cap. 12
28/06	Exs. 12
01/07	P 3
05/07	
08/07	Sub

Capítulo 10

Segunda Lei da Termodinâmica

2ª Lei da Termodinâmica

Existe uma "flecha do tempo"



Qual das duas imagens veio antes ?

Podemos "ver" o sentido do tempo

2ª Lei: enunciado de Kelvin

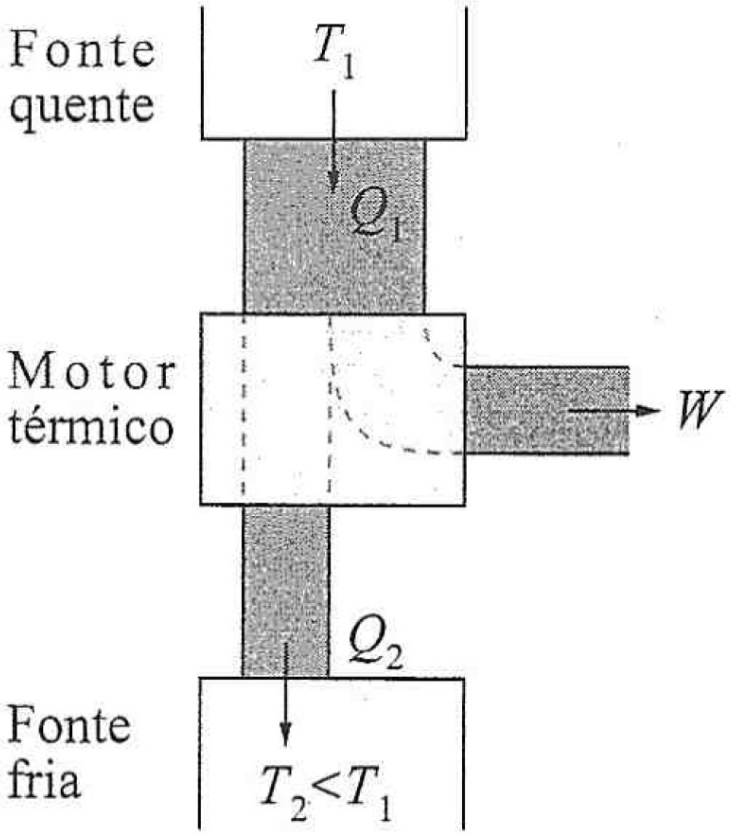
(K): *É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.*

(num ciclo)

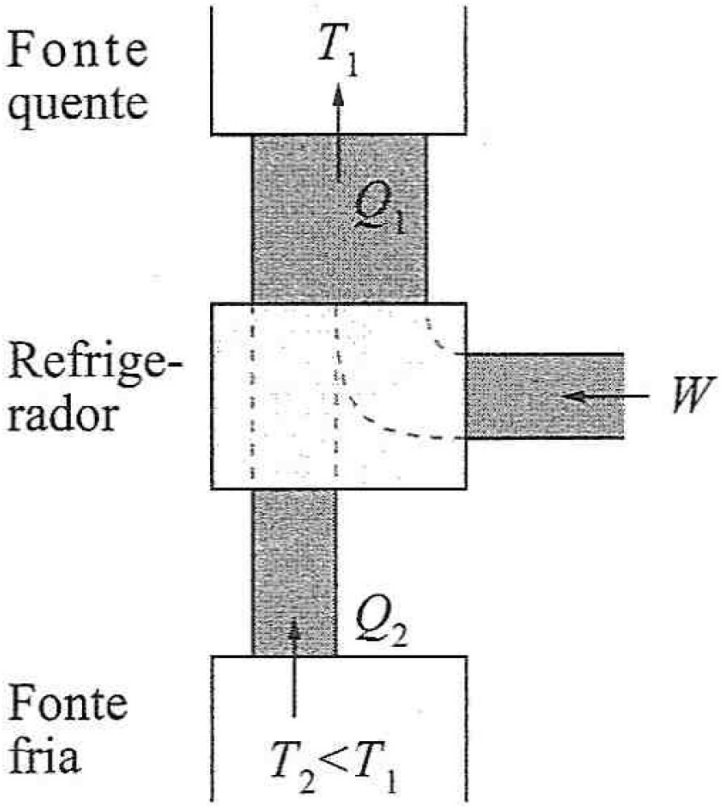
2ª Lei: enunciado de Clausius

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

Motor térmico

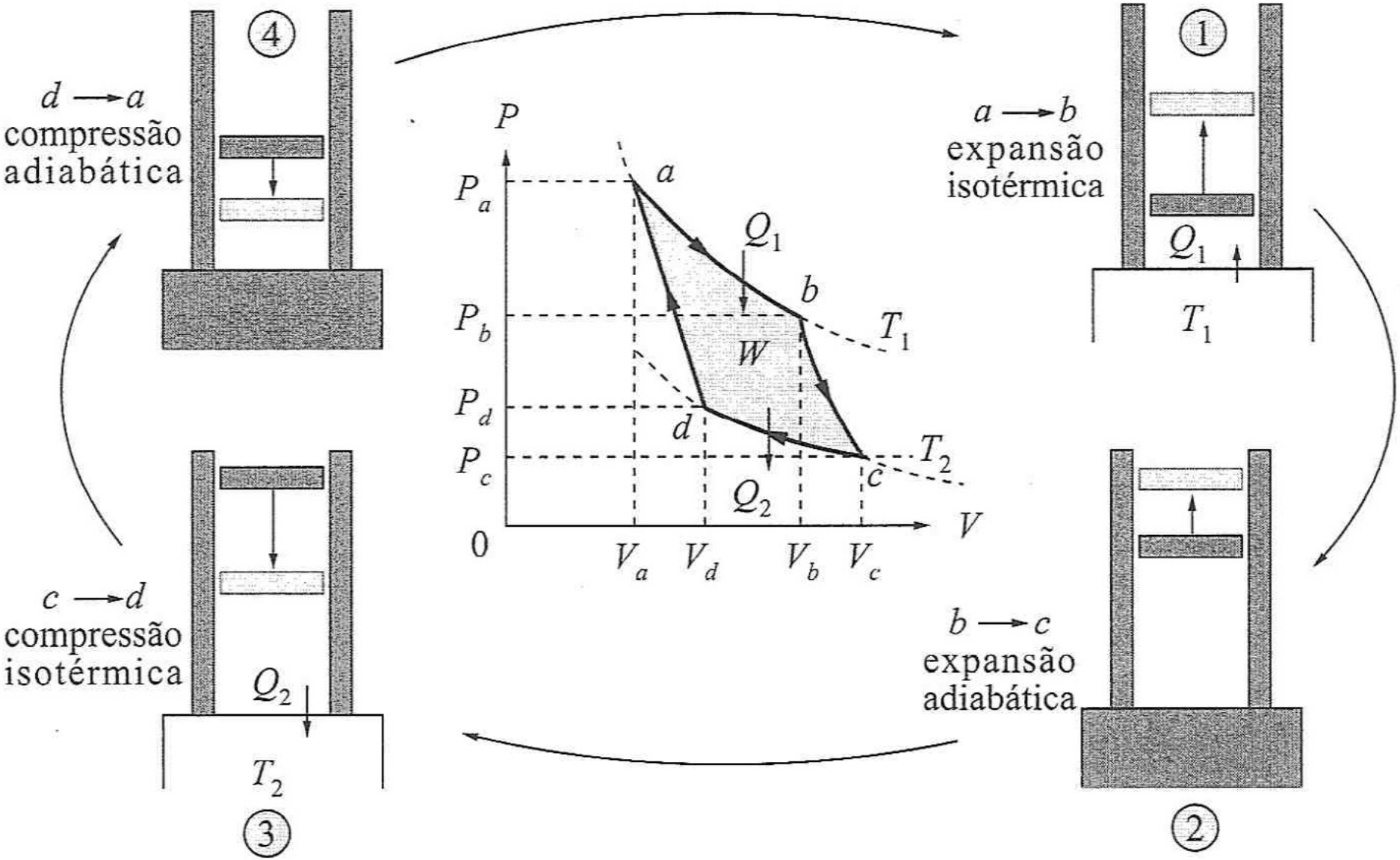


Refrigerador

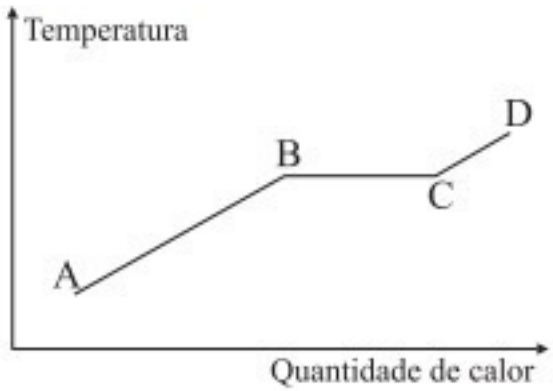


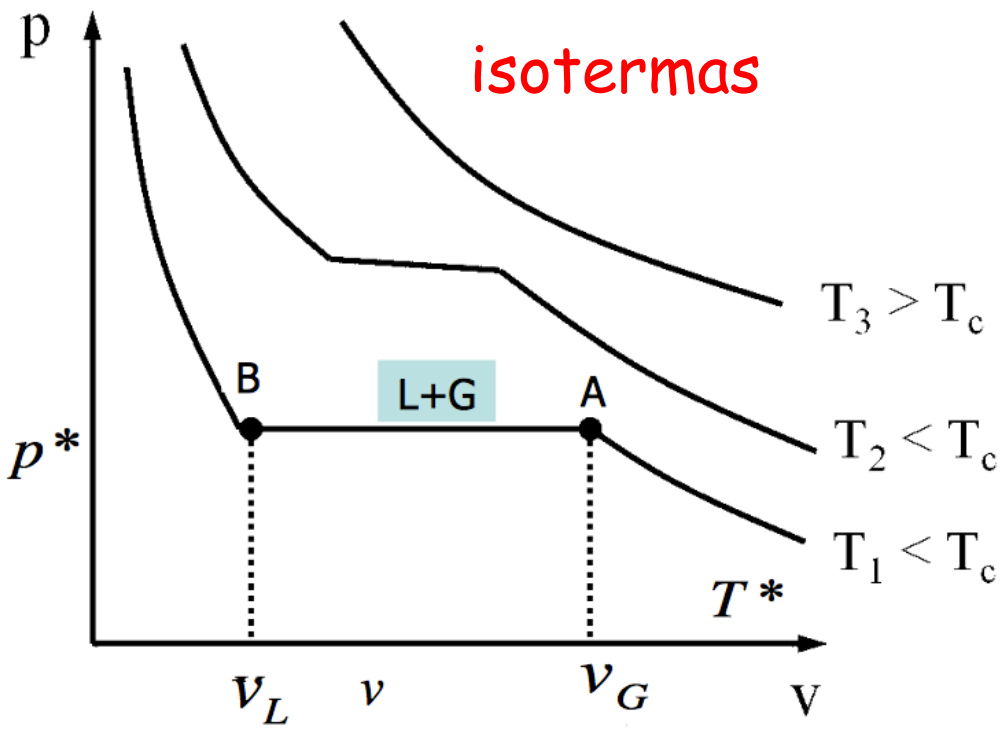
$$Q_1 = W + Q_2$$

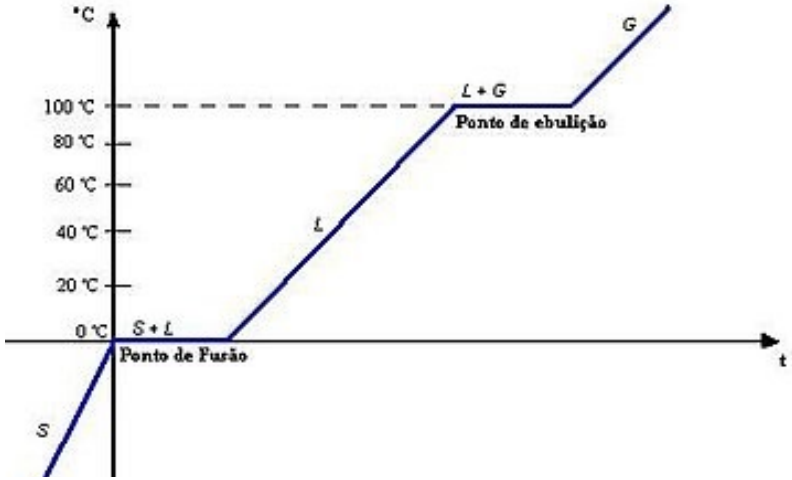
Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot com mudança de fase



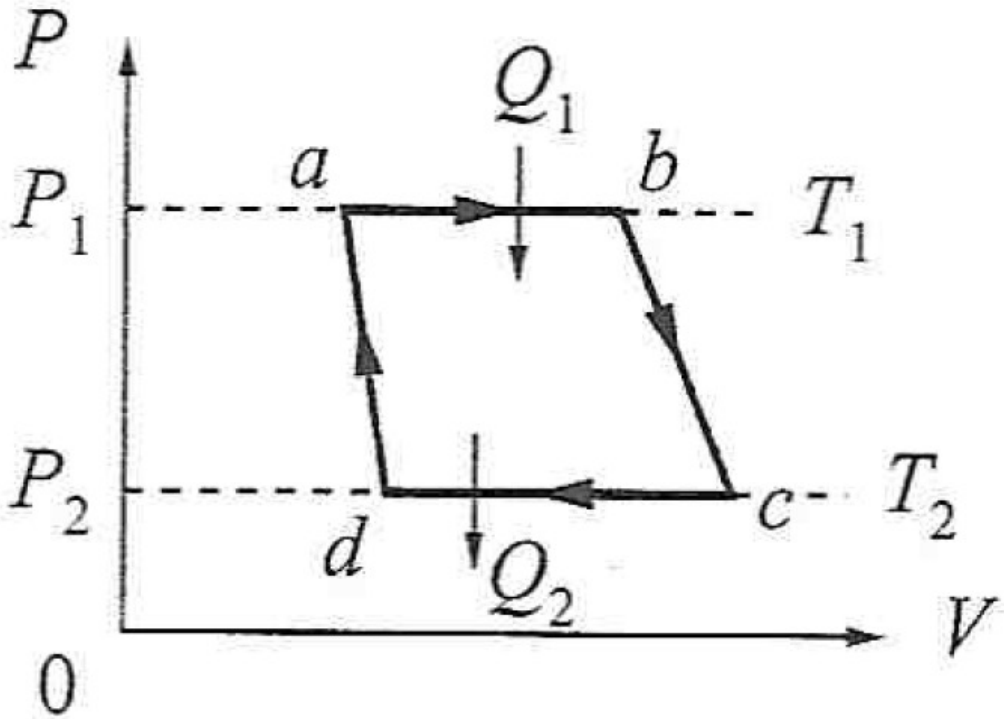




Ciclo de Carnot com mudança de fase

Líquido para gás (vaporização):
pressão e temperatura constantes

Gás para líquido (liquefação):
pressão e temperatura constantes



O "investimento" em energia térmica fornecida é representado por Q_1 (custo de carvão para aquecer a caldeira da máquina a vapor, por exemplo). O "trabalho útil" fornecido é W. O calor Q_2 é um "sub-produto" não aproveitado (na máquina a vapor, é dissipado na atmosfera ou na água de resfriamento do condensador). Logo, é natural definir o rendimento (ou eficiência) do motor térmico por

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{Trabalho fornecido}}{\text{Calor consumido}}$$

$$W = Q_1 - Q_2 \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

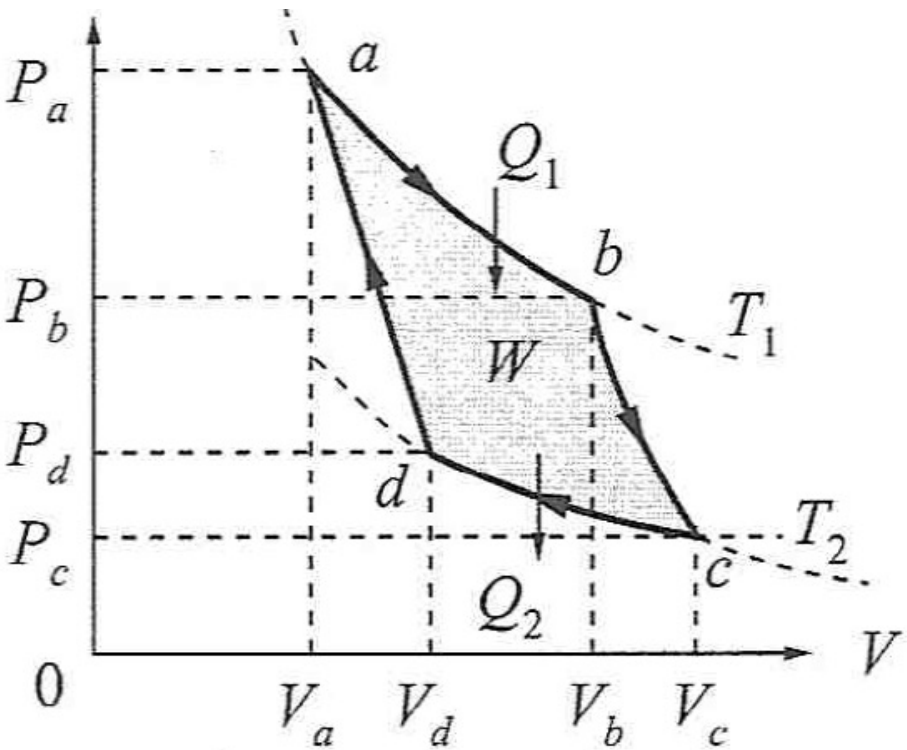
a -> b (proc. isotérmico)

$$Q_1 = W_1 + \Delta U_1$$

$$T_1 = const \rightarrow \Delta U_1 = 0$$

$$Q_1 = W_1 = \int_{V_a}^{V_b} p\, dV$$

$$= \int_{V_a}^{V_b} \frac{n\, R\, T_1}{V}\, dV$$



$$\boxed{Q_1 = n\, R\, T_1\, ln \frac{V_b}{V_a}}$$

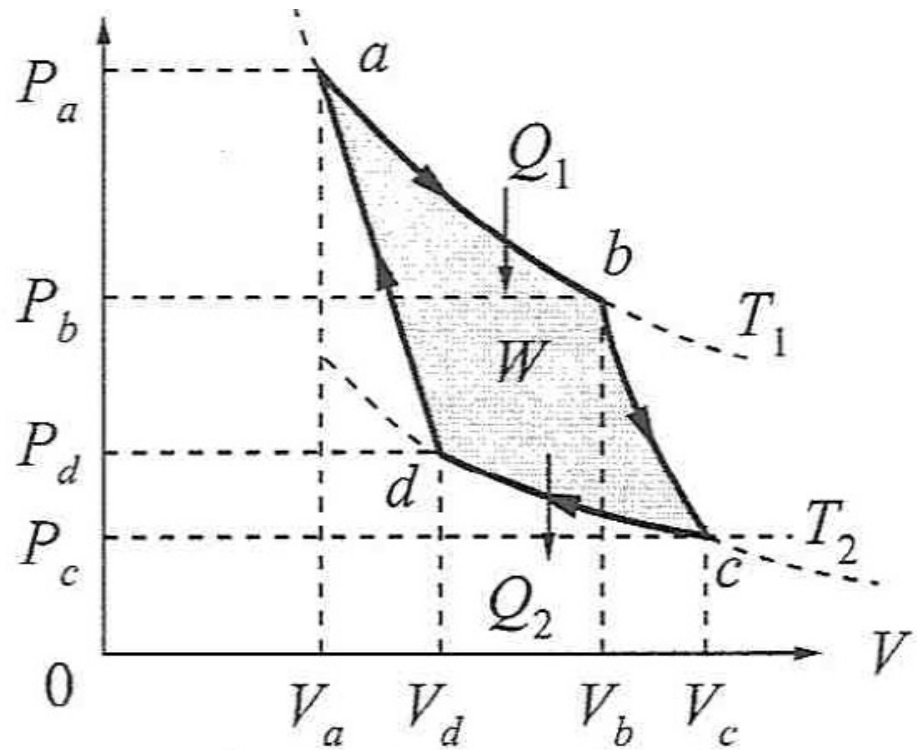
Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

$$Q_{bc} = W_{bc} + \Delta U_{bc}$$

$$Q_{bc} = 0 \rightarrow W_{bc} = -\Delta U_{bc}$$

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} p\, dV$$



$$p = \frac{p_0 V_0^{\gamma}}{V^{\gamma}}$$

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} \frac{p_b V_b^{\gamma}}{V^{\gamma}}\, dV$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

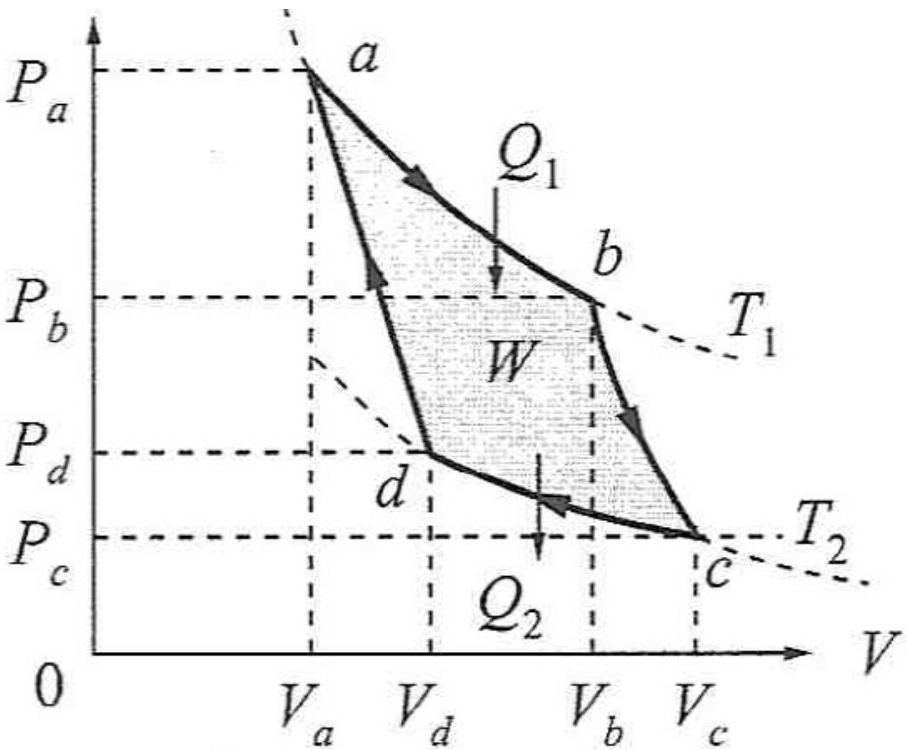
c -> d (proc. isotérmico)

$$Q_2 = W_2 + \Delta U_2$$

$$T_2 = const \rightarrow \Delta U_2 = 0$$

$$Q_2 = W_2 = \int_{V_c}^{V_d} p\, dV$$

$$= \int_{V_c}^{V_d} \frac{n\, R\, T_2}{V}\, dV$$



$$\boxed{Q_2 = n\, R\, T_2\, ln \frac{V_d}{V_c}}$$

Em módulo:

$$Q_2 = n\,R\,T_2\,ln\frac{V_c}{V_d}$$

Gás ideal num processo adiabático

$$p\,V^{\gamma} = p_0\,V_0^{\gamma} = constante$$

$$p\,V = n\,R\,T \quad \longrightarrow \quad p = \frac{n\,R\,T}{V}$$

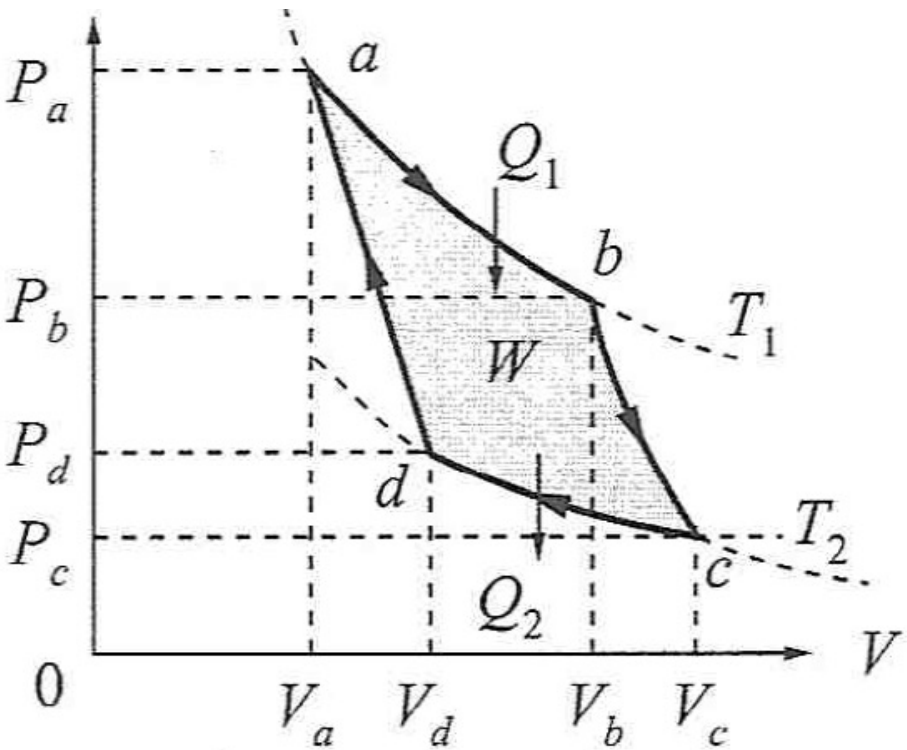
$$\frac{n\,R\,T}{V}\,V^{\gamma} = constante$$

$$\boxed{T\,V^{\gamma-1} = constante}$$

Rendimento no Ciclo de Carnot

b -> c (proc. adiabático)

d -> a (proc. adiabático)



$$V_b^{\gamma-1}T_1 = V_c^{\gamma-1}T_2$$

$$V_a^{\gamma-1}T_1 = V_d^{\gamma-1}T_2$$

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

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \quad \rightarrow \quad ln\frac{V_b}{V_a} = ln\frac{V_c}{V_d}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} Q_2 = n\,R\,T_2\,ln\dfrac{V_c}{V_d} \\ Q_1 = n\,R\,T_1\,ln\dfrac{V_b}{V_a} \end{cases}$$

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

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

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$ (vai que...)

Teorema de Clausius

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

$Q_1 > 0$ calor cedido ao sistema pela fonte quente

$Q_2 > 0$ calor cedido pelo sistema para a fonte fria

Voltamos para a convenção antiga :

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

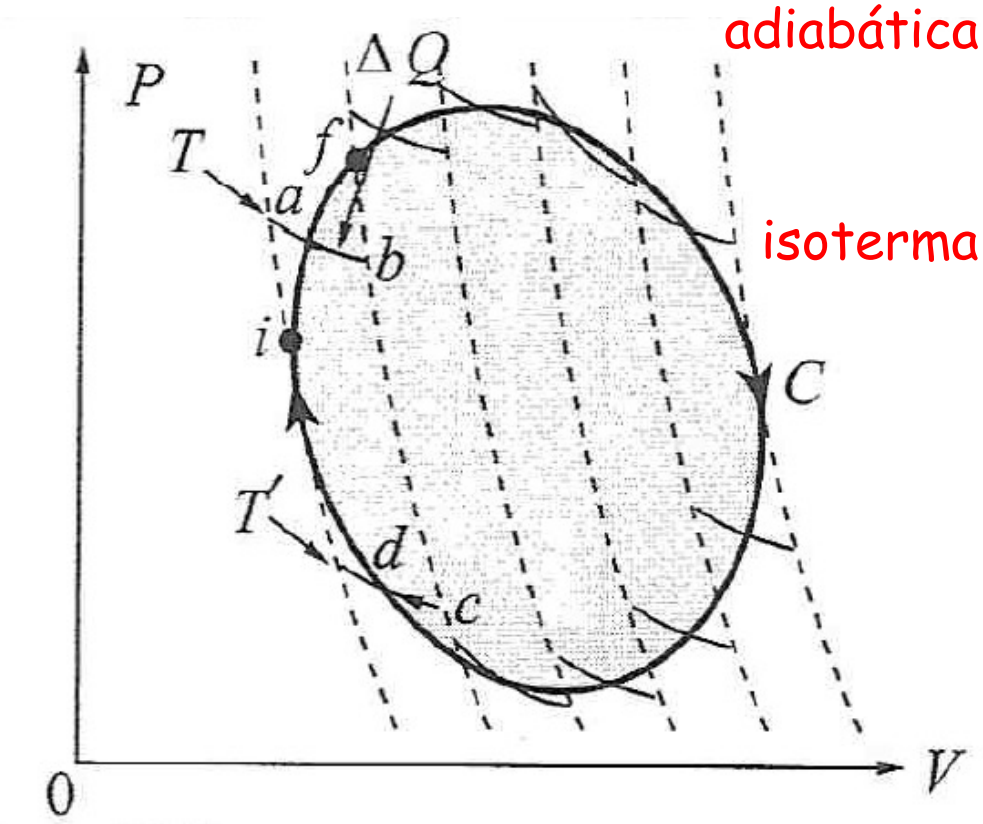
$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$\boxed{\sum \frac{Q}{T} = 0}$$

$$Q_2 < 0$$

Teorema de Clausius

Num ciclo de processos reversíveis vale:



$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

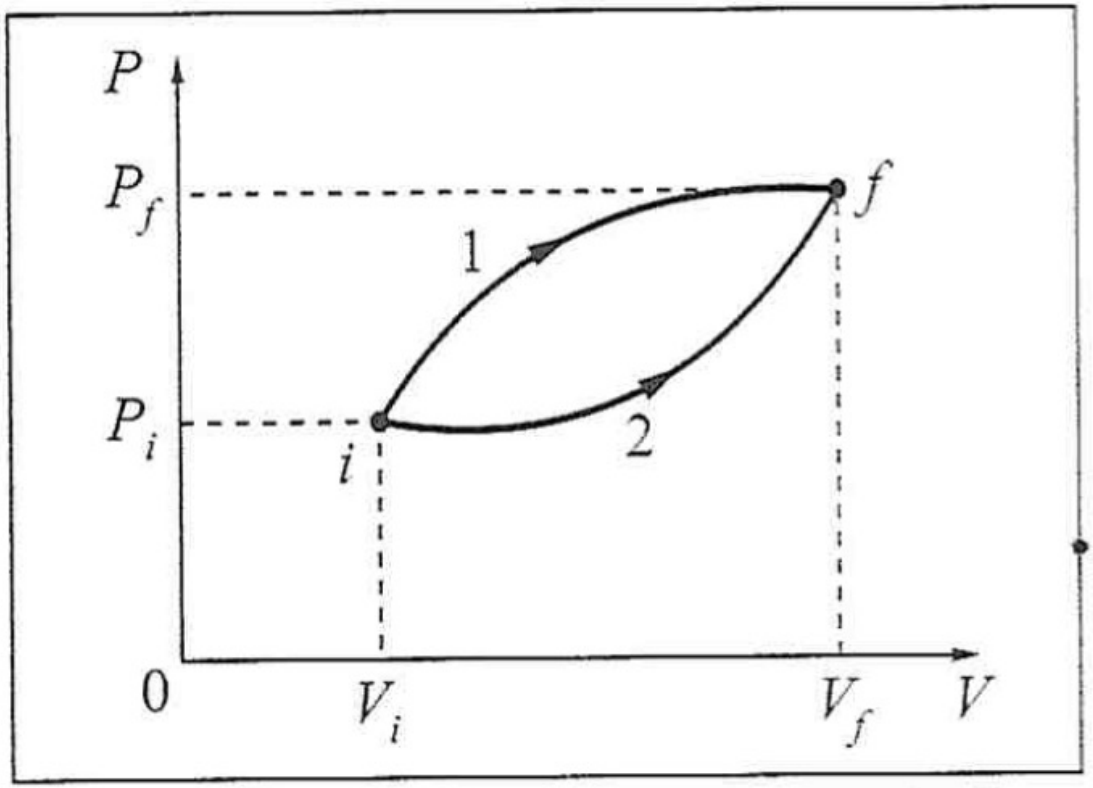


Figura 10.17 — Caminhos reversíveis

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int_{(1)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T} + \int_{(2)\,f}^{i} \frac{d'Q_R}{T} = 0$$

$$\int_{(2)\,f}^{i} \frac{d'Q_R}{T} = -\int_{(2)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T}$$

$$\boxed{\int_{(1)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T} = \int_{(2)\,i}^{f} \frac{d'Q_R}{T}}$$

Não depende do caminho !

Primeira aparição da entropia

do grego: transformação

Nova variável de estado

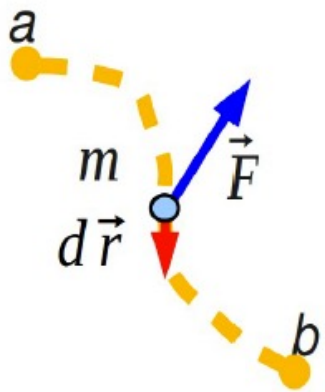
$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = S_f - S_i$$

S = entropia

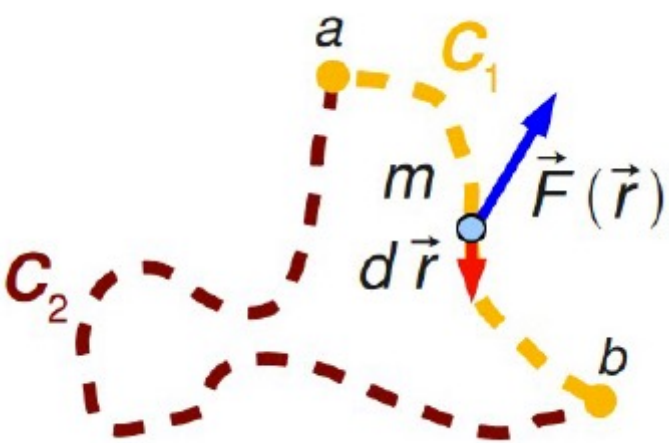
$$dS = \frac{dQ}{T}$$

POW!

ESPERE UM POUCO
JA VI ESSE FILME
memegenerator.net



$$W_{a\to b} = \int_a^b \vec{F}\,.\,d\vec{r}$$



$$\begin{cases} W = \oint_a^b \vec{F}\,.\,d\vec{r} = 0 \\ \\ W_{a\to b}(C_1) = W_{a\to b}(C_2) \end{cases}$$

Definimos a energia potencial :

$$U(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_{ref}}^{\vec{r}} \vec{F}(\vec{r}\,')\,.\,d\vec{r}\,'$$

$$dU = \vec{F}\,.\,d\vec{r}$$

Casos Particulares

Transformação adiabática reversível:

$$dQ = 0 \quad \rightarrow \quad dS = 0$$

Transformação isentrópica

Voltamos portanto a ter uma situação análoga à da energia potencial na mecânica (1, Seção 7.3) e da energia interna (Seção 8.5), o que nos permite, como naqueles casos, definir uma *função de estado* do sistema, cujo valor é definido *a menos de uma constante aditiva arbitrária*. Como a integral só depende dos extremos *i* e *f*, se escolhermos um estado inicial padrão ela passa a depender somente de *f*, que podemos identificar com o estado de equilíbrio termodinâmico do sistema para o qual queremos calcular o valor da função. A arbitrariedade da escolha do estado padrão *i* corresponde à constante aditiva arbitrária: mudar *i* equivale a adicionar uma constante aos valores da função.

$$\boxed{\int_i^f \frac{d'Q_R}{T} = S_f - S_i}$$

S = entropia

Fim

H. Moysés
Nussenzveig
Fluidos
2 Oscilações e Ondas
Calor
CURSO DE
FÍSICA
BÁSICA

Roy Lichtenstein

Desautomatizar...prestar atenção nos detalhes do cotidiano

OH, JEFF... I LOVE YOU, TOO... BUT...