

Física Geral I • FIS0703

Aula 17

21/11/2016

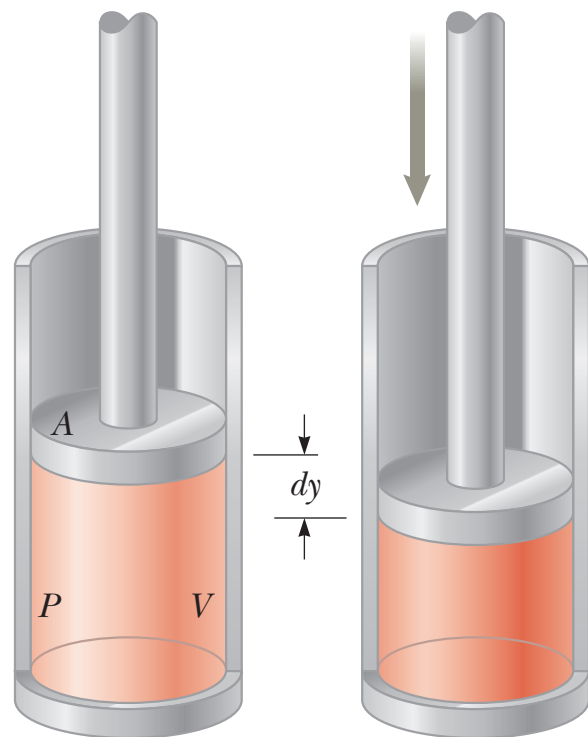
Trabalho e calor em processos termodinâmicos

- O estado dum **sistema em equilíbrio** é descrito por **variáveis de estado**: para qualquer configuração do sistema estes variáveis têm certos valores.

Variáveis de estado importantes: **pressão, volume, temperatura, energia interna.**

- Outras variáveis são associadas à **transferência de energia** através da fronteira do sistema. Exemplos são: **Calor** e **trabalho**.

Um gás num cilindro fechado com um pistão amovível:



Em equilíbrio: P e V

pressão que o gás exerce sobre as paredes e o pistão.

Empurramos o pistão para baixo de forma **quase-estática**

O sistema está sempre em equilíbrio

Trabalho realizado no sistema:

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -F\hat{j} \cdot dy\hat{j} = -Fdy = -PAdy$$

$$dW = -PdV$$

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

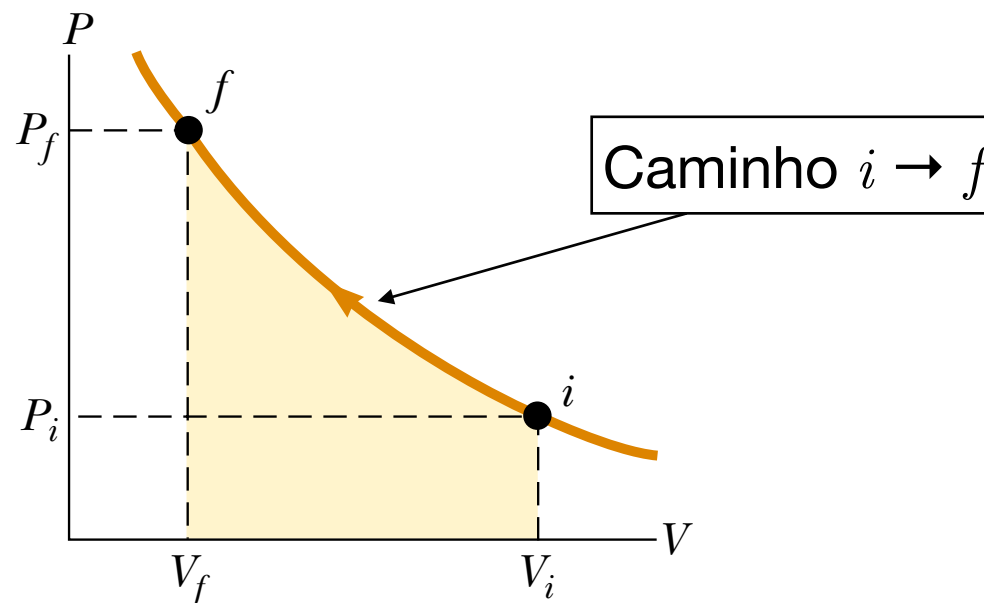
Gás comprimido $\rightarrow dV < 0 \rightarrow dW > 0$

Trabalho realizado quando o volume é alterado de V_i para V_f .

Em geral, P não é constante.

Trabalho e calor em processos termodinâmicos

O estado do sistema pode ser indicado num **diagrama PV**:

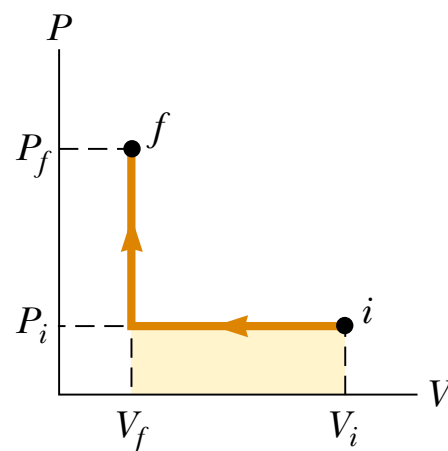


$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

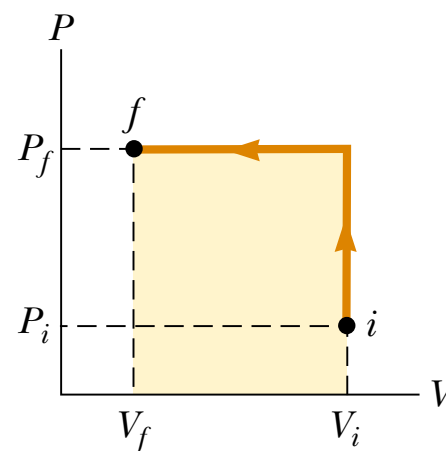
O integral é a área abaixo da curva $P(V)$

O trabalho realizado no gás depende do caminho $i \rightarrow f$.

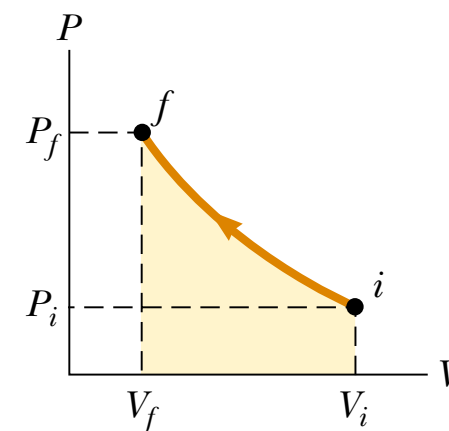
Exemplos:



$$W = -P_i(V_f - V_i)$$



$$W = -P_f(V_f - V_i)$$



Trabalho e calor em processos termodinâmicos

A transferência de energia em forma de calor também depende do processo.

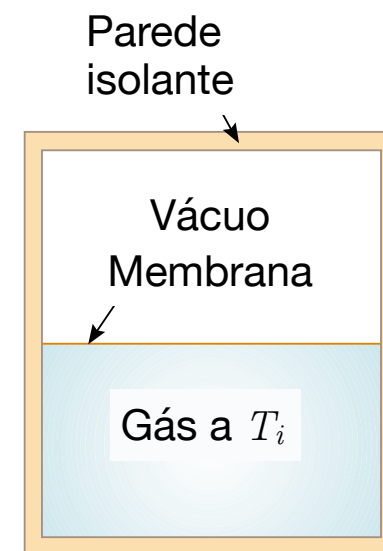
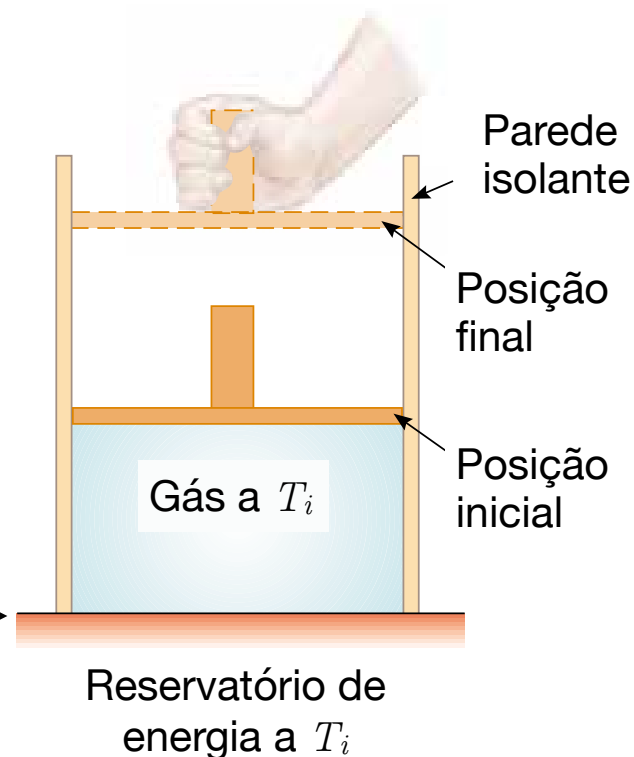
Exemplo: dois estados iniciais e finais iguais dum gás ideal.

O pistão é deixado subir
muito devagar.

Ao expandir-se, o gás
realiza trabalho no pistão.

A temperatura do gás é
mantida constante.

Sistema em contacto
térmico com um
reservatório de energia.



Sistema isolado.

Membrana removida:
o gás expande-se
sem realizar trabalho
ou transferência de
calor.

Um reservatório de energia é um sistema tão grande que uma transferência de energia finita não altera a sua temperatura significativamente.

- Pressão, volume e temperatura finais são **idênticos** nos dois casos.
- No primeiro calor é transferido, no segundo não.

Conclusão: a transferência de energia em forma de calor depende dos estados inicial e final, e dos estados intermédios do sistema.

A primeira lei da termodinâmica

Considere um sistema cujo estado muda de (P_i, V_i) para (P_f, V_f) .

Durante este processo, o calor Q é transferido e o trabalho W é realizado no sistema.

Para processos diferentes $i \rightarrow f$, Q e W variam. Mas a grandeza $Q + W$ é sempre a mesma.

E_{int} ... energia interna (em muitos livros designado de U)

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

A primeira lei da termodinâmica
(uma forma da lei da conservação da energia)

Uma consequência: existe uma grandeza chamada energia interna que é determinada pelo estado do sistema.

→ E_{int} é uma variável de estado.

Não são verdadeiros diferenciais

$$dE_{\text{int}} = \delta Q + \delta W$$

Processo infinitesimal:

Exemplos:

► Sistema isolado $Q = W = 0$ $\Delta E_{\text{int}} = 0$ $E_{\text{int},f} = E_{\text{int},i}$ (E_{int} constante)

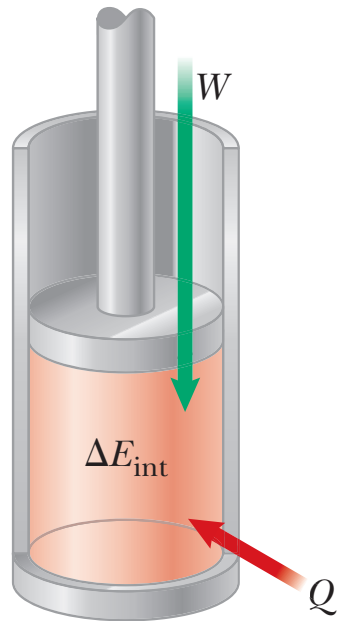
► Processo cíclico (sistema não isolado)

E_{int} é inalterada (estados inicial e final são idênticos) $\Delta E_{\text{int}} = 0$ $Q = -W$

Curva fechada no diagrama PV

$W_{\text{ciclo}} = \text{área incluída pela curva fechada}$

Aplicações: processos adiabáticos



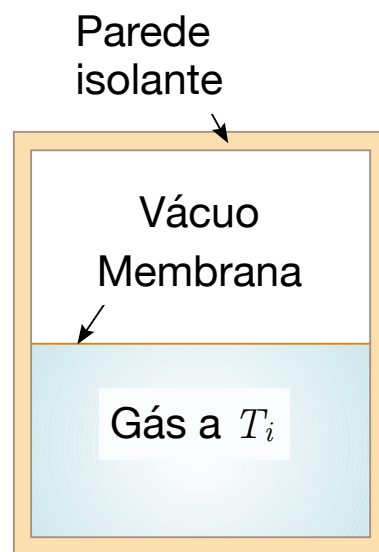
Como varia a **energia interna** em vários processos, durante os quais **trabalho** é realizado no sistema e **calor** é transferido para o sistema? (O sentido pode ser o contrário, com $Q < 0$ ou $W < 0$)

● **Processos adiabáticos:** não ocorre transferência de calor, $Q = 0$.

Como se podem realizar processos adiabáticos?

- ▶ Isolamento térmico.
- ▶ O processo decorre tão rapidamente que não há tempo para transferência de calor.

$$\Delta E_{\text{int}} = W \quad \text{para processos adiabáticos}$$

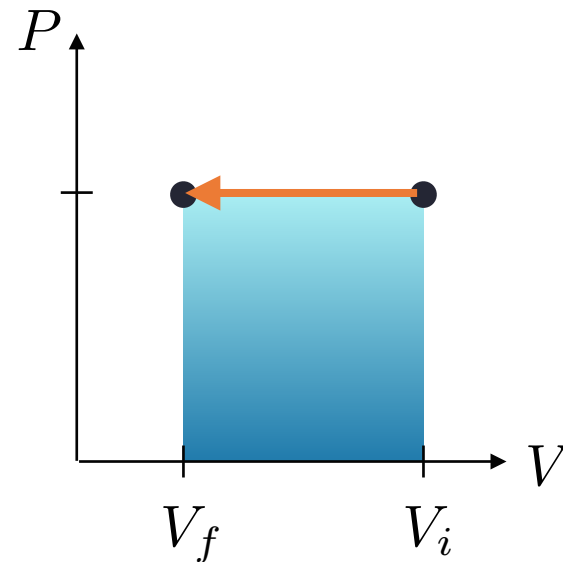


Um caso particular é a **expansão adiabática livre**: trabalho não é realizado durante a expansão do gás, e a energia interna não se altera.

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

Aplicações: processos isobáricos e isocóricos

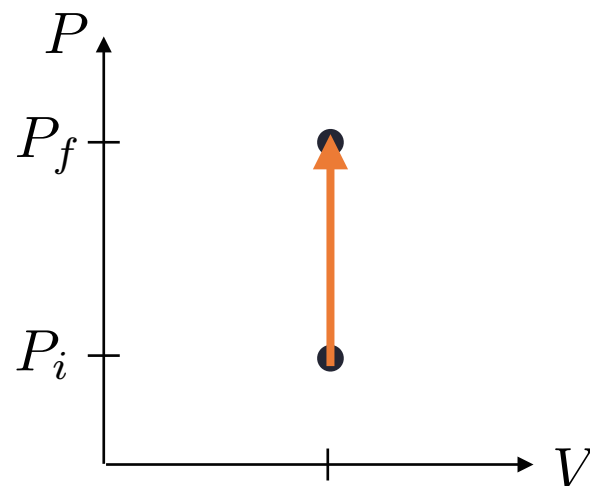
- Processos isobáricos: decorrem a pressão constante.



$$P_f = P_i = P$$

$$W = -P(V_f - V_i)$$

- Processos isocóricos (isovolumétricos): decorrem a volume constante.



$$V_f = V_i$$

$$W = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q$$

Quando o volume dum sistema é mantido constante, todo o calor transferido para o sistema permanece em forma de energia interna.

Aplicações: processos isotérmicos

- Processos isotérmicos: decorrem a temperatura constante.

Realização: sistema em contacto com um reservatório a temperatura constante.

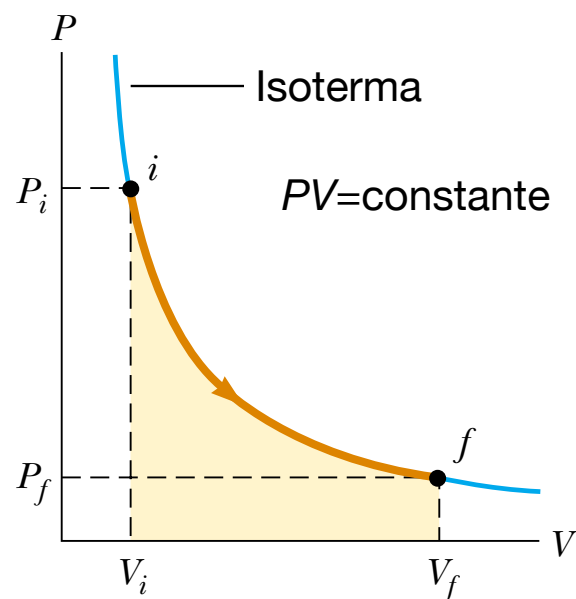
$$PV = nRT \quad P = \frac{\text{constante}}{V} \quad \text{isoterma} \quad (\text{hipérbole num diagrama PV})$$

A energia interna dum gás ideal depende apenas da sua temperatura.

$$\longrightarrow \quad \Delta E_{\text{int}} = 0 \quad Q = -W \quad \text{num processo isotérmico}$$

Qualquer calor transferido para o sistema sai em forma de trabalho.

- Qual é o trabalho realizado num gás ideal durante uma expansão isotérmica?



$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT \ln V \Big|_{V_i}^{V_f}$$

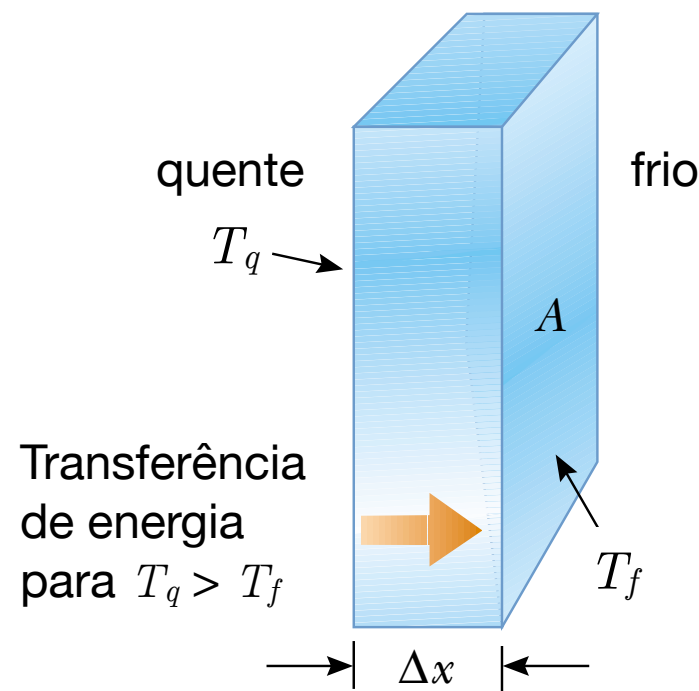
$$W = nRT \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right)$$

$$V_i < V_f \quad \text{expansão:} \quad W < 0$$

$$V_i > V_f \quad \text{compressão:} \quad W > 0$$

Transferência de energia: condução térmica

- ▶ Contacto direto entre sistemas a temperaturas diferentes.
- ▶ Ao nível microscópico: **colisões** entre partículas (átomos, moléculas, eletrões) dos sistemas diferentes.
- ▶ Nestas colisões, partículas com maior energia cinética perdem parte dela, e as partículas com menor energia cinética ganham a mesma.
- ▶ Colisões entre partículas vizinhas (e o movimento de eletrões livres em metais) propagam parte desta energia ao longo do sistema.
- ▶ A **taxa** da transferência de energia por condução depende muito do material.



Experiências:

A taxa da transferência

$$\mathcal{P} = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\Delta T = T_q - T_f$$

Espessura infinitesimal:

$$\mathcal{P} = kA \left| \frac{dT}{dx} \right|$$

A lei da condução térmica

O sentido do fluxo de calor é sempre de quente para frio.

$$\frac{dT}{dx}$$

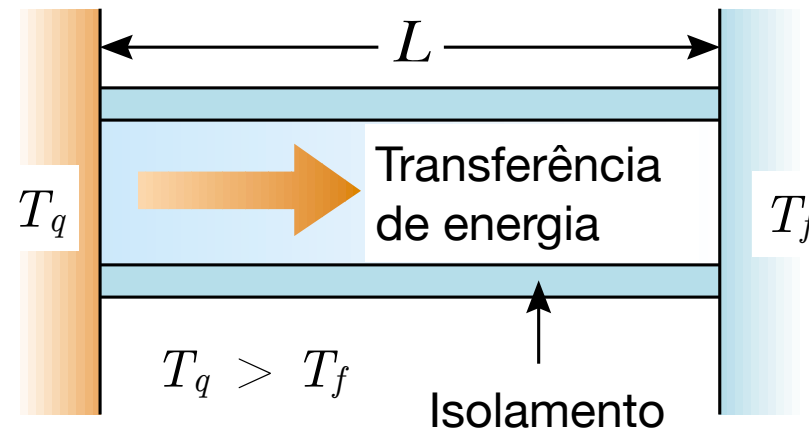
o gradiente da temperatura

$$k$$

a condutividade térmica

Transferência de energia: condução térmica

- Uma **barra uniforme** isolado exceto nas extremidades, onde está em contacto com reservatórios a T_q e T_f .



- **Estado estacionário:** dT/dx constante ao longo da barra

$$\left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{T_q - T_f}{L}$$

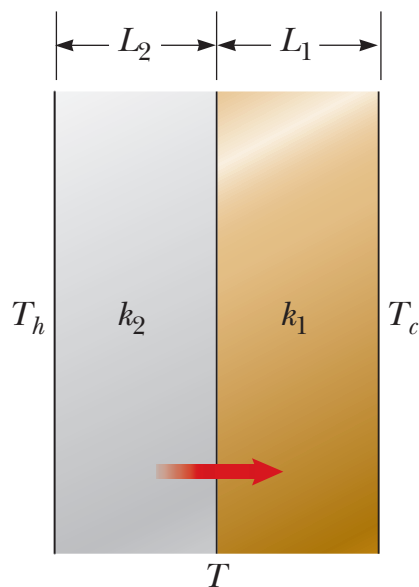
$$\mathcal{P} = kA \left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{T_q - T_f}{L}$$

- **Barras compostas** de vários materiais, e com (L_i, k_i) :

$$\mathcal{P} = \frac{A(T_q - T_f)}{\sum_i (L_i/k_i)}$$

Exemplo: dois materiais diferentes

$$\mathcal{P} = \frac{A(T_q - T_f)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}$$



A **taxa** de transferência de calor através de qualquer área transversal deve ser **constante**.

Substance	Thermal Conductivity (W/m · °C)
<i>Metals (at 25°C)</i>	
Aluminum	238
Copper	397
Gold	314
Iron	79.5
Lead	34.7
Silver	427
<i>Nonmetals (approximate values)</i>	
Asbestos	0.08
Concrete	0.8
Diamond	2 300
Glass	0.8
Ice	2
Rubber	0.2
Water	0.6
Wood	0.08
<i>Gases (at 20°C)</i>	
Air	0.023 4
Helium	0.138
Hydrogen	0.172
Nitrogen	0.023 4
Oxygen	0.023 8