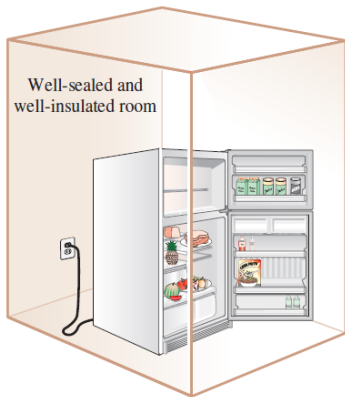


# Termodinâmica e Transferência de Calor 2022/2023

Aula n°2: Energia, Trabalho e Calor

José M. Castanheira  
Departamento de Física, Universidade de Aveiro

3 de outubro de 2022



**FIGURE 3-1**

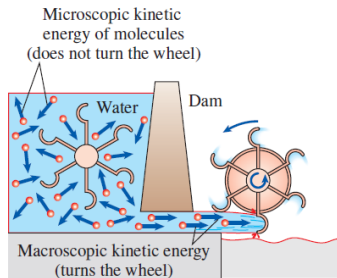
A refrigerator operating with its door open in a well-sealed and well-insulated room.

- Como variará a temperatura da sala?



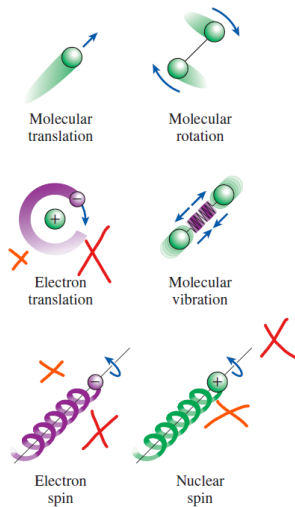
**FIGURE 3-4**

The macroscopic energy of an object changes with velocity and elevation.



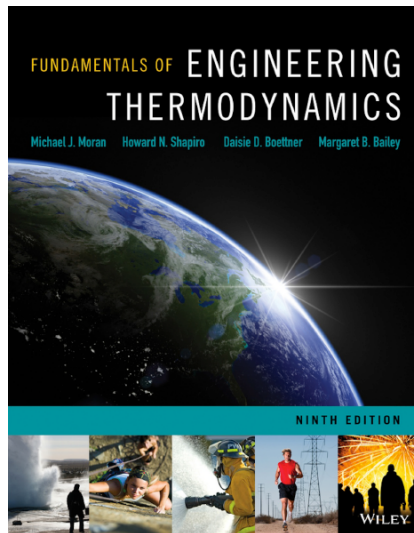
**FIGURE 3-8**

The *macroscopic* kinetic energy is an organized form of energy and is much more useful than the disorganized *microscopic* kinetic energies of the molecules.

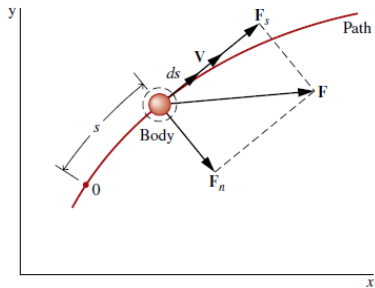


**FIGURE 3-6**

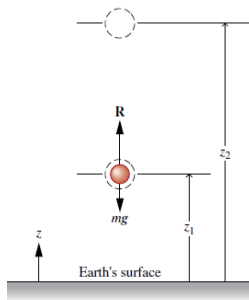
The various forms of microscopic energies that make up *sensible* energy.



**Bibliografia:** Moran, Shapiro, Boettner, Bailey: Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 9th Edition  
Capítulo 2.



$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}. \quad (1)$$

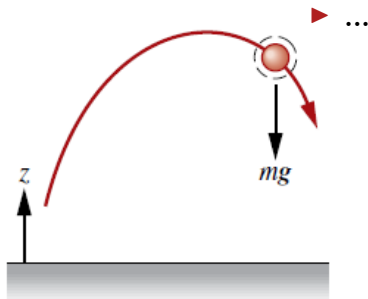


$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{z_1}^{z_2} R dz - \int_{z_1}^{z_2} mg dz. \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = \int_{z_1}^{z_2} R dz.$$

$$\Delta KE + \Delta EP = \int_{z_1}^{z_2} R dz. \quad (3)$$

Nota: Para ser coerente com a bibliografia, também usaremos siglas em inglês.



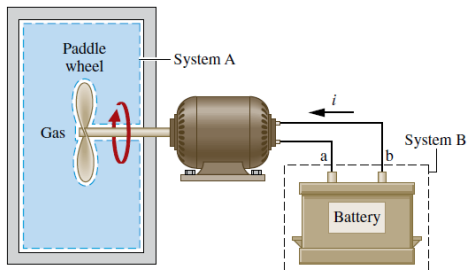
$$\frac{1}{2}mV_2^2 + mgz_2 = \frac{1}{2}mV_1^2 + mgz_1. \quad (4)$$

A energia total conserva-se!



## Definição generalizada de trabalho:

*Trabalho é uma interação entre o sistema e a sua vizinhança tal que os efeitos na vizinhança poderiam ser substituídos pela subida ou descida de um peso, mantendo-se as alterações observadas no sistema.*



## Convenção de sinal do trabalho:

$W > 0$ : trabalho realizado pelo sistema;

$W < 0$ : trabalho realizado sobre o sistema.

## Potência:

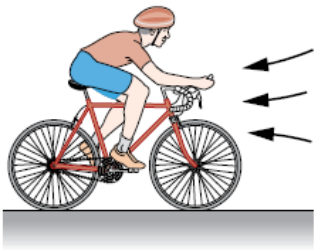
Potência média:  $\overline{\dot{W}} = \frac{W}{\Delta t}$ ;

Potência instantânea:  $\overline{\dot{W}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta t}$ .

Quando o trabalho resulta de uma força macroscópica observável

$$\dot{W} = \vec{F} \cdot \vec{V}.$$

## Exercício 1.



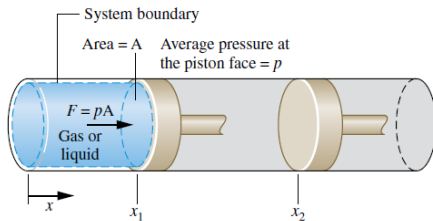
Calcule a potência que um ciclista deve desenvolver para se deslocar à de 20 milhas por hora, contrariando a resistência do ar circundante. A força de resistência do ar ou força de arrasto aerodinâmico é dada por

$$\frac{1}{2}C_d A \rho V^2,$$

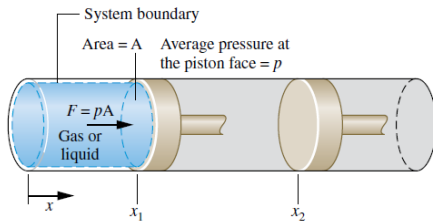
onde  $C_d$  é o coeficiente de arrasto (constante),  $A$  é a área frontal da bicicleta e do ciclista e  $\rho$  é a densidade do ar.

Considere os seguintes valores típicos:

$C_d = 0.88$ ,  $A = 3.9 \text{ ft}^2$  e  $\rho = 0.075 \text{ lb/ft}^3$ , e  $V = 20 \text{ mi/h} = 29.33 \text{ ft/s}$ .

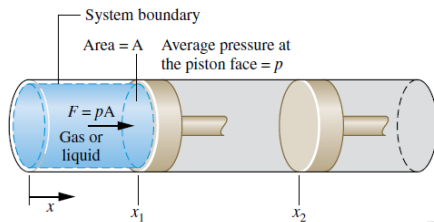


$$\delta W = p A dx = p dV$$



$$\delta W = p A dx = p dV$$

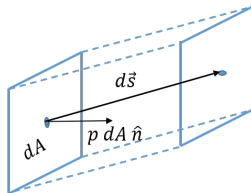
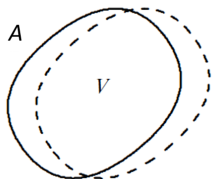
$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV.$$



$$\delta W = p A dx = p dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

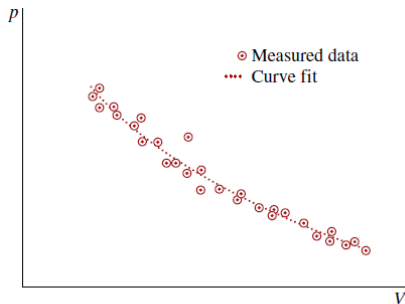
Esta expressão é válida qualquer que seja a forma do volume.



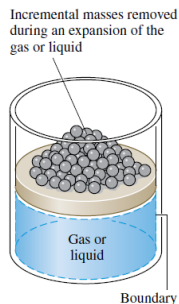
$$\delta W = p dA \hat{n} \cdot d\vec{s}, \quad dV = dA \hat{n} \cdot d\vec{s}$$

$$\therefore W = \int_{V_i}^{V_f} p \, dV.$$

## Expansões/compressões reais e processos quase-estáticos

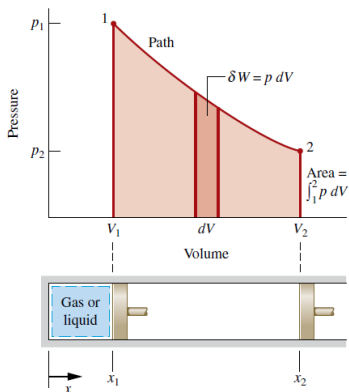


**FIG. 2.5** Pressure at the piston face versus cylinder volume.

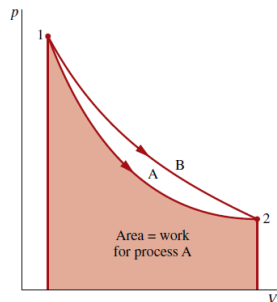


**FIG. 2.6** Illustration of a quasiequilibrium expansion or compression.





**FIG. 2.7** Work of a quasiequilibrium expansion or compression process.



**FIG. 2.8** Illustration that work depends on the process.

Veja [aqui](#) e [aqui](#) algumas animações.

## Processos politrópicos

Em muitos processos quase-estáticos a pressão e o volume (ou o volume específico) relacionam-se por expressões analíticas. Uma importante classe de processos são os **processos politrópicos**:

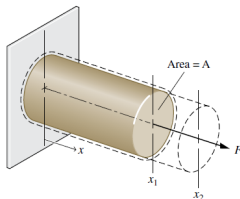
$$pV^n = \text{constante} \quad \text{ou} \quad pv^n = \text{constante},$$

onde  $n$  é uma constante.

### Exercício 2.

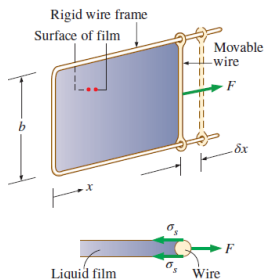
Um gás dentro de um sistema pistão-cilindro sofre expansão politrópica  $pV^n = \text{constante}$ , duplicando o seu volume.

Sabendo que a pressão e o volume iniciais eram 3 bar e  $0.1 \text{ m}^3$ , determine o trabalho do processo, em kJ, nos seguintes casos (a)  $n = 1.5$ , (b)  $n = 1.0$  e (c)  $n = 0$ .



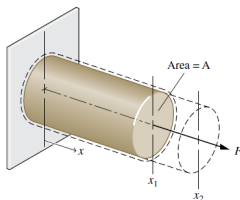
**FIG. 2.9** Elongation of a solid bar.

$$W = - \int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx$$



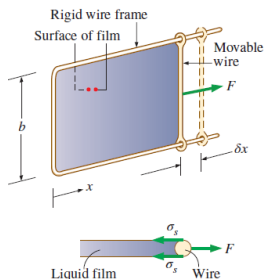
**FIGURE 3-35**

Stretching a liquid film with a U-shaped wire, and the forces acting on the movable wire of length  $b$ .



**FIG. 2.9** Elongation of a solid bar.

$$W = - \int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx$$



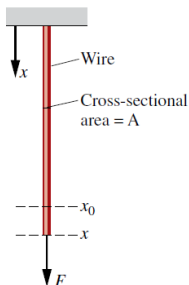
$$W = - \int_{A_1}^{A_2} \sigma_s dA$$

**FIGURE 3-35**

Stretching a liquid film with a U-shaped wire, and the forces acting on the movable wire of length  $b$ .

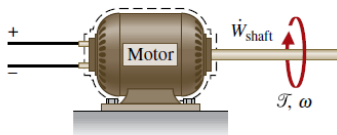
A tensão superficial,  $\sigma_s$  também pode ser designada por  $\tau$ ,  $W = - \int_{A_1}^{A_2} \tau dA$ .

## Exercício 3.



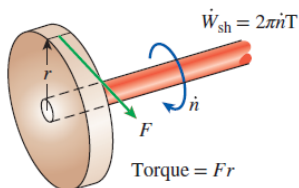
Uma barra de aço suspensa verticalmente, com área de secção transversal  $A$  e comprimento inicial  $x_0$  é deformada (distendida) por uma força  $\vec{F}$  aplicada na sua extremidade. A tensão normal na barra varia linearmente de acordo com  $\sigma = C\varepsilon$ , onde  $\varepsilon$  é a distensão, dada por  $\varepsilon = (x - x_0)/x_0$ , e  $x$  é o comprimento após a deformação;  $C$  é uma constante material (módulo de Young). Supondo que a área da secção transversal permaneça constante,

- obtenha uma expressão para o trabalho realizado pela barra.
- calcule o trabalho realizado numa barra de comprimento inicial  $x_0 = 1.000\text{ m}$  e comprimento final  $1.001\text{ m}$ ; secção  $A = 6.5\text{ cm}^2$  e módulo de Young  $C = 170\text{ GPa}$ . Calcule a força que deforma a barra.



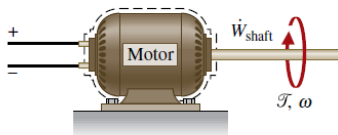
$$W = Fs = \left( \frac{\mathcal{T}}{r} \right) (2\pi rn) = 2\pi n\mathcal{T},$$

onde  $n$  é o número de rotações.



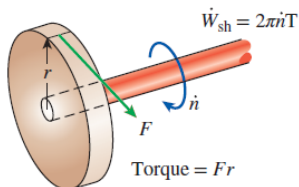
**FIGURE 3–30**

Shaft work is proportional to the torque applied and the number of revolutions of the shaft.



$$W = Fs = \left( \frac{\mathcal{T}}{r} \right) (2\pi rn) = 2\pi n\mathcal{T},$$

onde  $n$  é o número de rotações.

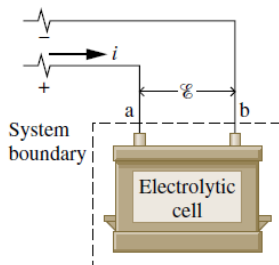


$$\dot{W} = 2\pi\dot{n}\mathcal{T} = \mathcal{T}\omega,$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular.

**FIGURE 3–30**

Shaft work is proportional to the torque applied and the number of revolutions of the shaft.

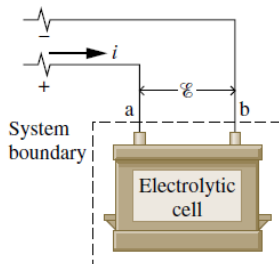


**FIG. 2.11** Electrolytic cell used to discuss electric power.

$$\delta W = E dZ,$$

onde  $Z$  é a carga eléctrica e  $E$  é a diferença de potencial eléctrico.





**FIG. 2.11** Electrolytic cell used to discuss electric power.

$$\delta W = E dZ,$$

onde  $Z$  é a carga eléctrica e  $E$  é a diferença de potencial eléctrico.

$$\dot{W} = E i,$$

onde  $i$  é a intensidade de corrente  
 $i = dZ/dt$ .

Nos processos anteriores, para onde vai ou de onde vem a energia transferida pelo trabalho?

A **energia total**,  $E$ , de um sistema é dada por

$$E = KE + PE + U,$$

onde

$KE$  é a energia cinética do sistema movendo-se de forma ordenada como um todo,

$PE$  é a energia potencial associada à posição do sistema num campo gravítico (ou eléctrico, se o corpo tiver carga eléctrica),

$U$  representa a **energia interna**, 'armazenada' no sistema sob diversas forma: energia cinética das moléculas, energia da ligações atómicas intramoleculares, energia das ligações das electrões aos núcleos, etc.

A quantidade de energia é sempre dada relativamente ao valor,  $E_0$ , de um estado de referência arbitrário. Mas o valor que interessa na análise dos processos é a variação da energia

$$E_2 - E_1 = (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) + (U_2 - U_1)$$

e o valor de referência cancela-se

$$\Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U.$$

O termo **calor** refere processos de transferência de energia que não podem ser classificados como trabalho. A transferência de energia só ocorre se o sistema e a vizinhança estiverem a temperaturas diferentes, e dá-se no sentido da temperatura mais baixa.

Utilizaremos o símbolo  $Q$  para representar o calor.

Convenção de sinal para o calor:

$Q > 0$ : o sistema recebe energia;

$Q < 0$ : o sistema cede energia.

O termo **calor** refere processos de transferência de energia que não podem ser classificados como trabalho. A transferência de energia só ocorre se o sistema e a vizinhança estiverem a temperaturas diferentes, e dá-se no sentido da temperatura mais baixa.

Utilizaremos o símbolo  $Q$  para representar o calor.

**Convenção de sinal para o calor:**

$Q > 0$ : o sistema recebe energia;

$Q < 0$ : o sistema cede energia.

Tal como o trabalho, o calor não é uma propriedade do sistema pois o a energia transferida sofre a forma calor,  $Q$ , quando um sistema varia entre dois estados depende do processo que levou o sistema do estado inicial ao estado final. Assim, uma variação infinitesimal de calor deve ser indicada por  $\delta Q$ , e o calor transferido no processo que leva o sistema dum estado 1 ao estado 2 é dado por

$$Q = \int_1^2 \delta Q.$$

A taxa transferência de energia sob a forma de calor, ou, de forma abreviada, a taxa de transferência de calor num processo, é dada por

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt},$$

e o 'calor transferido' entre dois instantes  $t_1$  e  $t_2$  é dado por

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt.$$

A taxa transferência de energia sob a forma de calor, ou, de forma abreviada, a taxa de transferência de calor num processo, é dada por

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt},$$

e o 'calor transferido' entre dois instantes  $t_1$  e  $t_2$  é dado por

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt.$$

Muitas vezes, é útil conhecer o **fluxo de calor**,  $\dot{q}$ , definido como a taxa de transferência de calor por unidade de área, de forma que, se  $A$  é a área da fronteira do sistema onde ocorre a transferência de calor, a taxa de transferência de calor será dada por

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} dA.$$

A taxa transferência de energia sob a forma de calor, ou, de forma abreviada, a taxa de transferência de calor num processo, é dada por

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt},$$

e o 'calor transferido' entre dois instantes  $t_1$  e  $t_2$  é dado por

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt.$$

Muitas vezes, é útil conhecer o **fluxo de calor**,  $\dot{q}$ , definido como a taxa de transferência de calor por unidade de área, de forma que, se  $A$  é a área da fronteira do sistema onde ocorre a transferência de calor, a taxa de transferência de calor será dada por

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} dA.$$

Um processo onde não ocorrem transferências de calor, i.e., em que  $\delta Q = 0$  em qualquer momento, é designado por **processo adiabático**.

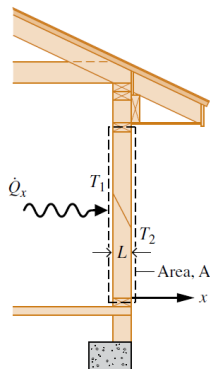


## Modos de transferência de calor

Fazemos aqui uma breve referência aos modos de transferência de calor para escrever as equações que dão as respectivas taxas de transferência. Um estudo mais detalhado será apresentado na segunda parte da UC.

## Modos de transferência de calor

Fazemos aqui uma breve referência aos modos de transferência de calor para escrever as equações que dão as respectivas taxas de transferência. Um estudo mais detalhado será apresentado na segunda parte da UC.



A **Lei de Fourier** para a **condução de calor** a uma dimensão é dado por

$$\dot{Q}_x = -\kappa A \frac{dT}{dx},$$

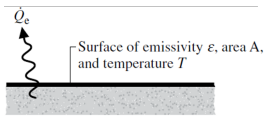
onde  $\kappa$  é a condutividade térmica do material onde ocorre a condução de calor.

## Emissão de radiação térmica

*Princípio de Prévost:* Todos os materiais acima do zero absoluto emitem radiação electromagnética (radiação térmica).

## Emissão de radiação térmica

*Princípio de Prévost:* Todos os materiais acima do zero absoluto emitem radiação electromagnética (radiação térmica).

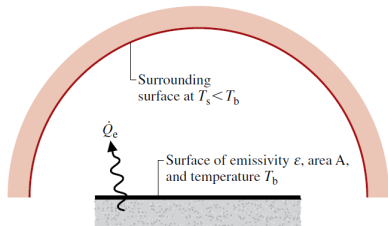


O taxa de emissão de energia por radiação por qualquer material é uma fracção  $\varepsilon$ , entre 0 e 1, da radiação emitida por corpo negro, que é dada pela [lei de Stefan-Boltzmann](#),

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma AT^4,$$

onde  $\varepsilon$  é a emissividade do material e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,

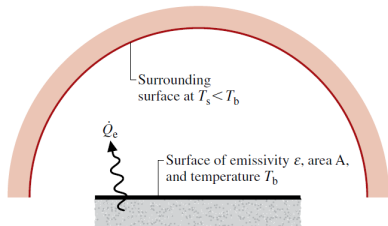
$$\sigma = 5.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4.$$



Quando o corpo emissor à temperatura  $T_b$  é rodeado por um meio à temperatura  $T_s$ , a transferência de calor por radiação é dada por

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A [T_b^4 - T_s^4]$$

onde o sentido positivo da transferência de calor é o indicado na figura.



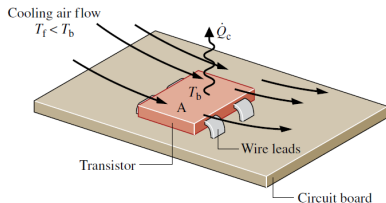
Quando o corpo emissor à temperatura  $T_b$  é rodeado por um meio à temperatura  $T_s$ , a transferência de calor por radiação é dada por

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A [T_b^4 - T_s^4]$$

onde o sentido positivo da transferência de calor é o indicado na figura.

## Convecção

## Convecção



A figura ilustra a transferência de calor entre uma superfície à temperatura  $T_b$  e uma corrente de fluido à temperatura  $T_s$ .

A taxa de transferência de energia da superfície para o fluido pode ser quantificada pela seguinte expressão empírica:

$$\dot{Q}_c = h A (T_b - T_f),$$

conhecida como [Lei do arrefecimento de Newton](#). A constante  $h$  é designada por coeficiente de transferência de calor.



A Primeira Lei da Termodinâmica diz que a variação da energia total de um Sistema Fechado é igual à diferença entre a energia transferida para o sistema sobre a forma de calor e o trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança:

$$E_2 - E_1 = Q - W, \quad \Delta KE + \Delta PE + \Delta U = Q - W.$$

A Primeira Lei da Termodinâmica diz que a variação da energia total de um Sistema Fechado é igual à diferença entre a energia transferida para o sistema sobre a forma de calor e o trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança:

$$E_2 - E_1 = Q - W, \quad \Delta KE + \Delta PE + \Delta U = Q - W.$$

Em variações infinitesimais

$$dE = \delta Q - \delta W.$$

A **Primeira Lei da Termodinâmica** diz que a variação da energia total de um **Sistema Fechado** é igual à diferença entre a energia transferida para o sistema sobre a forma de calor e o trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança:

$$E_2 - E_1 = Q - W, \quad \Delta KE + \Delta PE + \Delta U = Q - W.$$

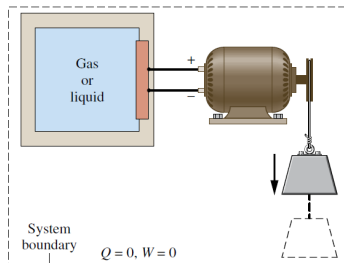
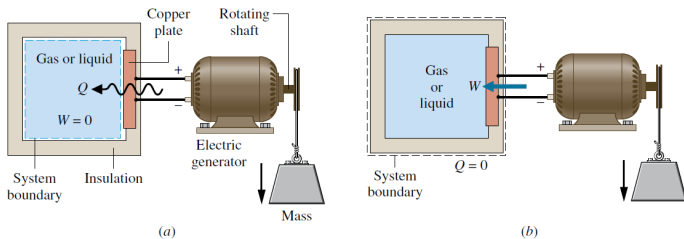
Em variações infinitesimais

$$dE = \delta Q - \delta W.$$

e a taxa instantânea de variação de energia de um sistema fechado é dada por

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}.$$

# A importância da definição da fronteira do sistema...



Num ciclo a variação da energia do sistema é nula.

$$Q = W.$$

