

# TERMODINAMICA 2

---

*Principio di conservazione della massa*

*Il bilancio di una grandezza che si conserva*

*Il Primo Principio della Termodinamica*

*Il Secondo Principio della Termodinamica*

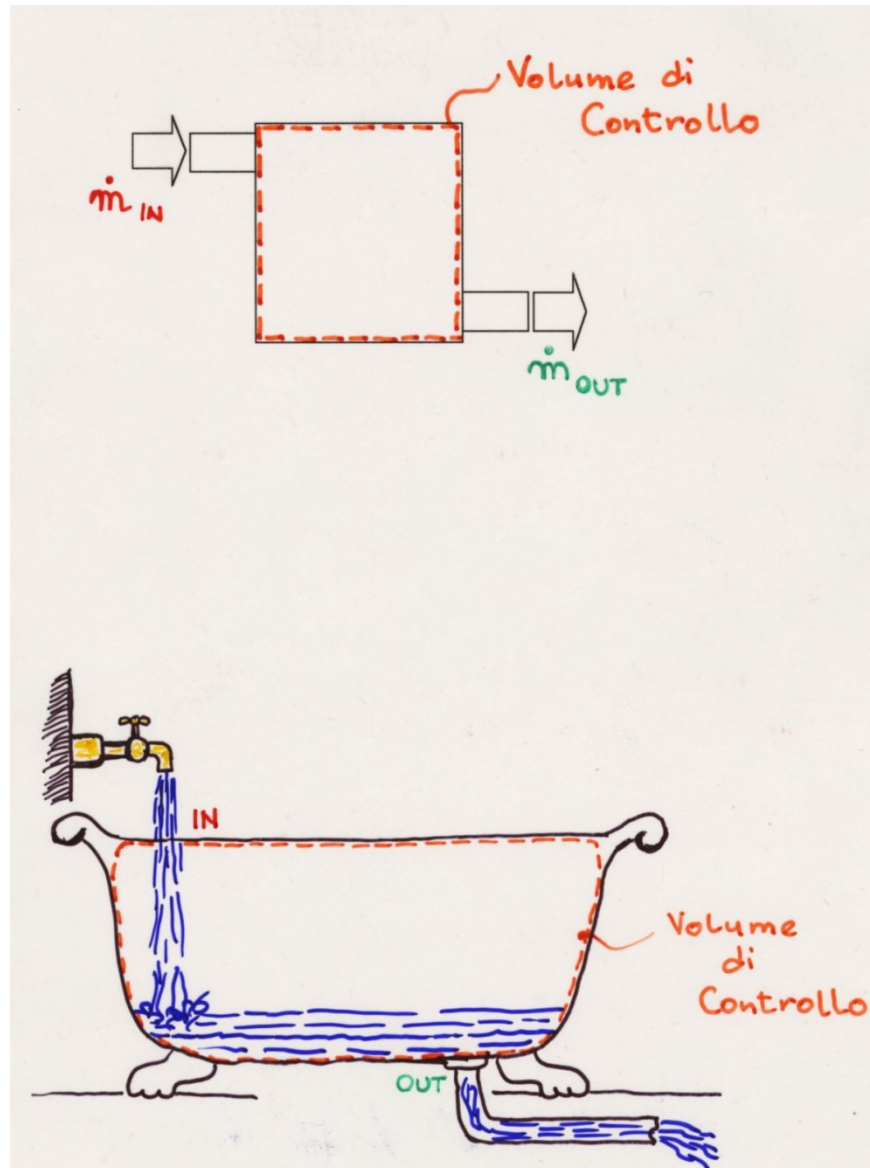
*Motori termici*

*Macchine frigorifere*

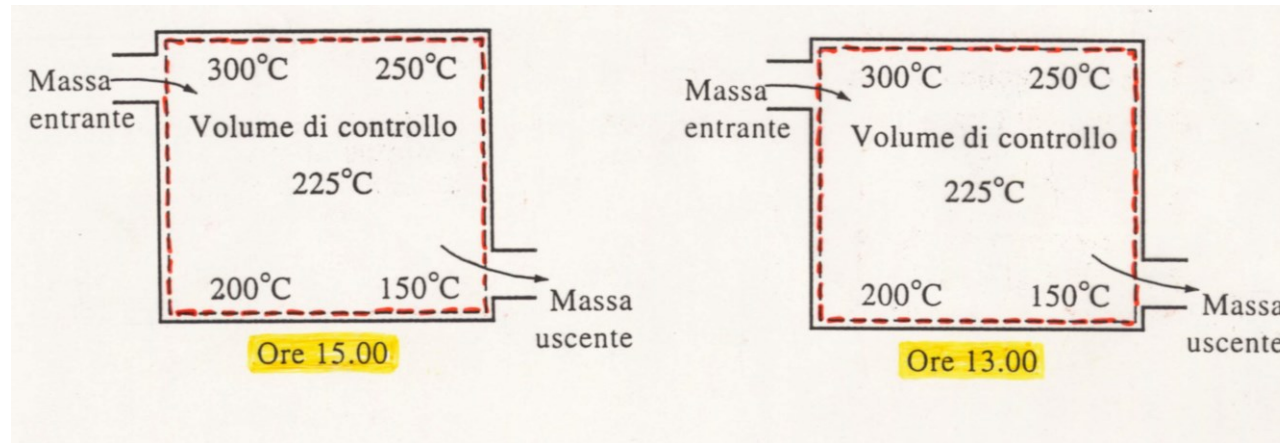
*Rendimenti ed efficienze*

## I sistemi aperti e i volumi di controllo

•  
$$\dot{m} = m/\Delta t = (\rho V)/\Delta t$$



## Sistemi che evolvono in regime stazionario



Si definisce **regime stazionario** quel modo di evolvere di un sistema per cui si verificano i seguenti comportamenti:

- nessuna proprietà all'interno del sistema varia nel tempo: volume  $V$ , massa  $m$ , pressione  $p$ , energia  $E$ , ...;
- nessuna proprietà al contorno del sistema varia: flussi di massa rimangono costanti e rimangono costanti le loro proprietà, temperatura  $t$ , entalpia  $h$ , ...;
- flussi di calore, flussi di lavoro tra sistema e ambiente restano costanti nel tempo.

## Principio di conservazione della massa

In tutti i fenomeni fisici la massa dei sistemi interessati si conserva.

Individuato un sistema, considerando la sua massa (con le possibili variazioni nel tempo) e le diverse portate che fluiscono attraverso il suo contorno, è possibile enunciare la seguente relazione che corrisponde al senso comune e nasce dall'effettuare un **bilancio di massa**:

$$\left( \begin{array}{l} \textit{portata totale} \\ \textit{di massa} \\ \textit{entrante} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \textit{portata totale} \\ \textit{di massa} \\ \textit{uscente} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \textit{variazione} \\ \textit{netta di massa} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \\ \textit{nell'unità di tempo} \end{array} \right)$$

In termini matematici tale relazione può essere formalizzata nella forma seguente:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_u = \frac{\Delta m_{vc}}{\Delta \tau}$$

la quale, passando a termini infinitesimi, ossia considerando intervalli di tempo “molto” piccoli si riscrive:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_u = \frac{dm_{vc}}{d\tau}$$

nel campo della **meccanica dei fluidi** questa equazione viene detta **equazione di continuità**

Quando un sistema sia interessato da trasformazioni che avvengono in regime stazionario **non si hanno variazioni nel tempo** e in particolare il termine di **accumulo si annulla**:

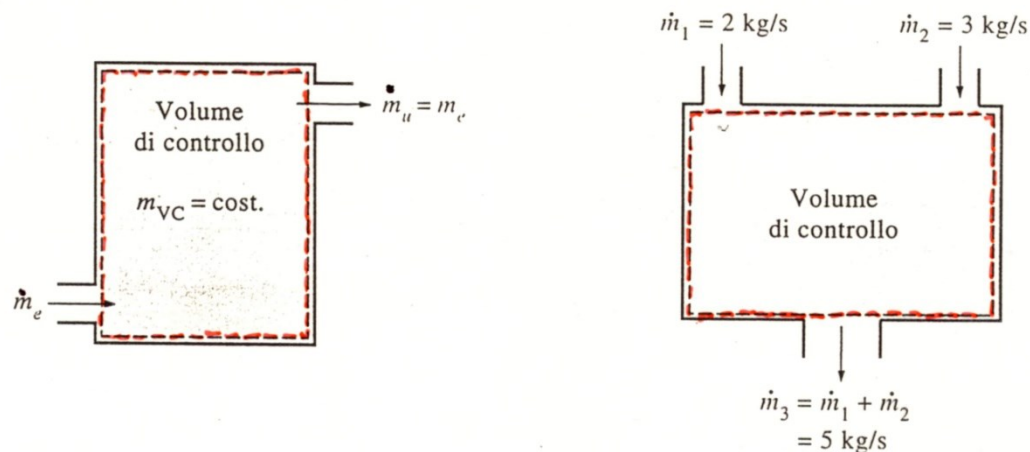
$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_u = 0$$

In altre parole il principio di conservazione della massa è espresso da:

$$\left( \begin{array}{c} \text{portata di massa totale} \\ \text{entrante} \\ \text{nel volume di controllo} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{portata di massa totale} \\ \text{uscente} \\ \text{dal volume di controllo} \end{array} \right)$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_u$$

Ad esempio:



## Il bilancio di una grandezza che si conserva

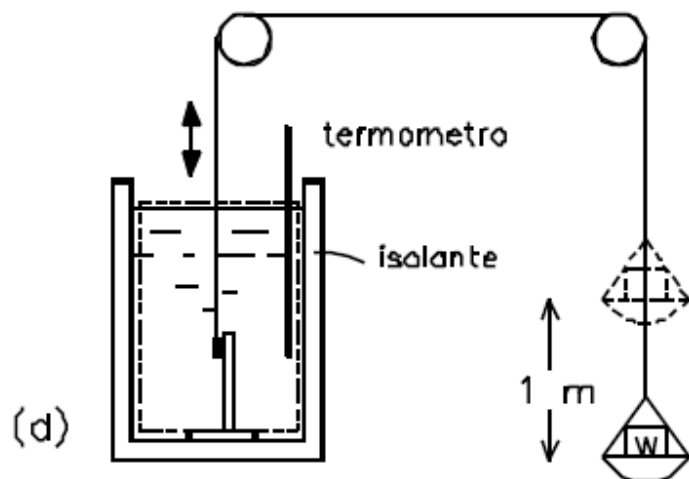
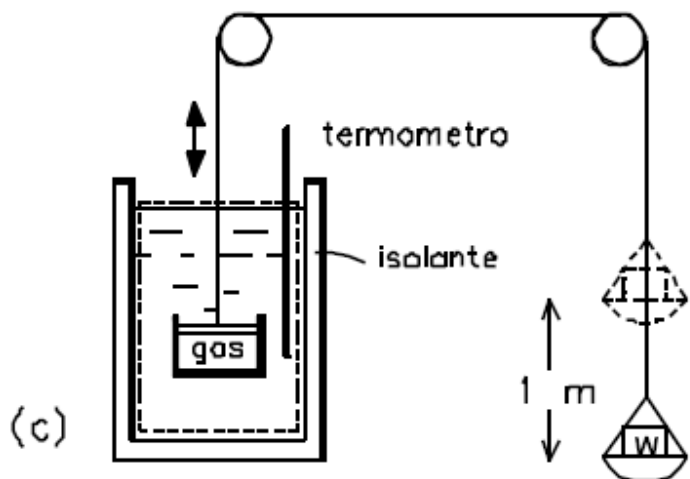
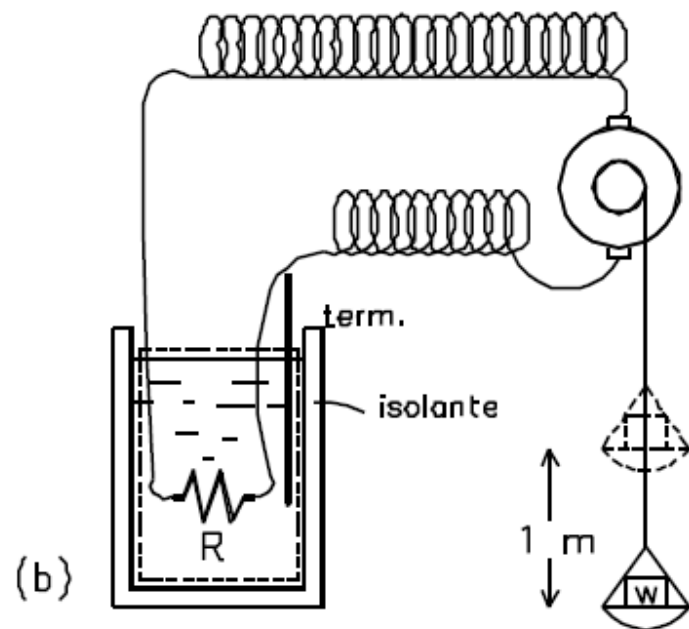
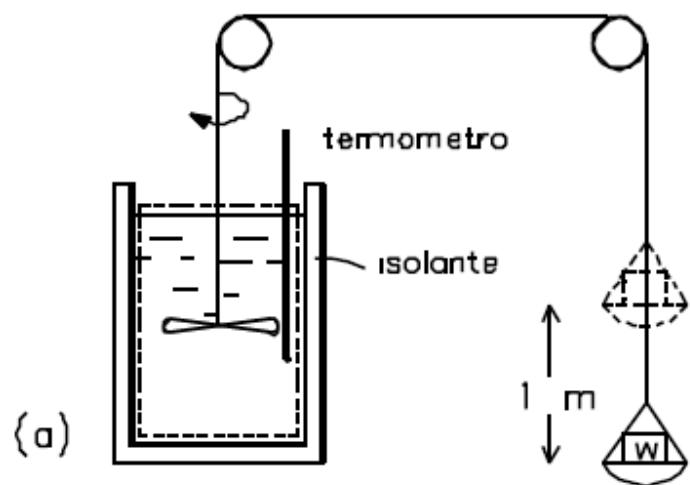
In termini generali per una certa **grandezza G** che si conserva individuato un sistema di interesse è possibile **impostare un bilancio**. Si può quindi scrivere:

$$\begin{array}{l}
 \boxed{\mathbf{a}} \quad \left( \begin{array}{c} \textit{portata totale} \\ \textit{della grandezza G} \\ \textit{entrante} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \textit{portata totale} \\ \textit{della grandezza G} \\ \textit{uscente} \\ \textit{dal volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \textit{produzione totale} \\ \textit{della grandezza G} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) \\
 \\
 - \left( \begin{array}{c} \textit{consumo totale} \\ \textit{della grandezza G} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \textit{variazione netta} \\ \textit{per unità di tempo} \\ \textit{della grandezza G} \\ \textit{nel volume} \\ \textit{di controllo} \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$\boxed{\mathbf{b}} \quad \textit{Entrata} - \textit{Uscita} + \textit{Produzione} - \textit{Consumo} = \textit{Accumulo}$$

$$\boxed{\mathbf{c}} \quad \dot{G}_i - \dot{G}_u + \dot{P} - \dot{C} = \frac{dG}{dt}$$

# Gli esperimenti di Joule



## Primo principio: la conservazione dell'energia

Oltre alla conservazione della massa in natura si osserva anche la **conservazione dell'energia**.

Definito un sistema è necessario andare a individuare tutte i diversi scambi e variazioni di energia coinvolti nel fenomeno che si sta osservando.

Un sistema può scambiare energia sotto forma di lavoro e calore con l'ambiente, ma anche un flusso di massa che attraversa il volume di controllo fa variare l'energia del sistema. Mettendo per bene in conto tutto ci si accorge che:

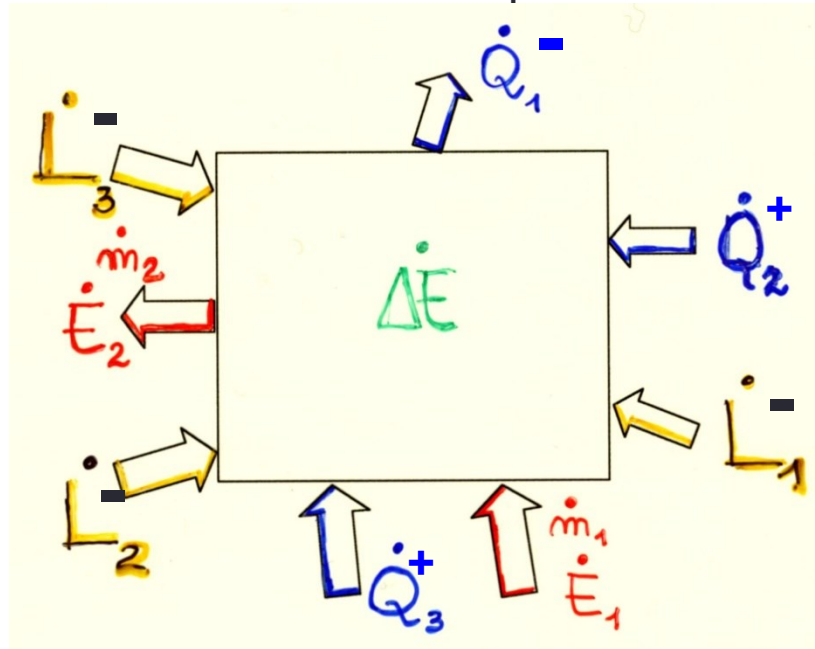
***l'energia non si crea, nè si distrugge ma solo si trasforma***

Questo è un **postulato** ovvero una proposizione che si chiede di ammettere come vera fintanto che non sarà dimostrato il contrario, in altre parole non esiste nessun processo in natura che lo violi.

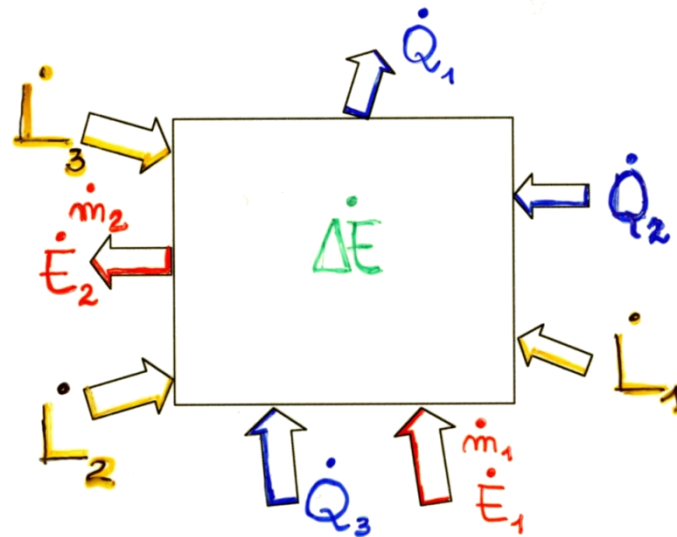


## Bilancio di energia

Anche per l'energia è utile procedere con la tecnica dei bilanci. Riferendosi all'**unità di tempo**, e quindi alle portate di massa e alle potenze in ingresso o uscita per il sistema sotto schematizzato si può scrivere la relazione di bilancio.



$$\left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{che attraversa} \\ \text{il contorno} \\ \text{come lavoro} \\ \text{e calore} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{uscite} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \\ \text{con la massa} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{entrante} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \\ \text{con la massa} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{variazione} \\ \text{netta di} \\ \text{energia} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \end{array} \right)$$



$$\left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{che attraversa} \\ \text{il contorno} \\ \text{come lavoro} \\ \text{e calore} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{uscite} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \\ \text{con la massa} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{potenza totale} \\ \text{entrante} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \\ \text{con la massa} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{variazione} \\ \text{netta di} \\ \text{energia} \\ \text{nel volume} \\ \text{di controllo} \end{array} \right)$$

$$\dot{Q} - \dot{L} + \sum \dot{E}_{e,massa} - \sum \dot{E}_{u,massa} = \frac{dE_{vc}}{d\tau}$$

$Q = \text{potenza termica scambiata attraverso il contorno} = \sum Q_e - \sum Q_u$

$L = \text{potenza meccanica scambiata in tutte le forme} = \sum L_u - \sum L_e$

Ricordando quanto visto intorno all'energia specifica di una portata di massa si può riscrivere la relazione:

$$\dot{Q} - \dot{L} - \sum \dot{m}_u e_u + \sum \dot{m}_e e_e = \frac{dE_{vc}}{d\tau}$$

in **regime stazionario** il principio di conservazione dell'energia è espresso da:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u e_u - \sum \dot{m}_e e_e$$

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u \left( h_u + \frac{w_u^2}{2} + gz_u \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right)$$

se non si hanno variazioni di energia cinetica e potenziale:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u h_u - \sum \dot{m}_e h_e$$

- **forma generale:**

$$\dot{Q} - \dot{L} - \sum \dot{m}_u \left( h_u + \frac{w_u^2}{2} + gz_u \right) + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) = \frac{\Delta E_{tot, sistema}}{\Delta \tau}$$

- **In regime stazionario:**

$$\dot{Q} - \dot{L} - \sum \dot{m}_u \left( h_u + \frac{w_u^2}{2} + gz_u \right) + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) = 0$$

- **se non si hanno variazioni di energia cinetica e potenziale:**

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u h_u - \sum \dot{m}_e h_e$$

- **per sistemi chiusi e trasformazioni aperte:**

$$\begin{aligned} Q - L &= \Delta E_{tot} = \Delta E_p + \Delta E_k + \Delta E_e + \Delta E_m + \Delta E_c + \Delta E_n \dots + \Delta U \\ &= \Delta E_p + \Delta E_k + \Delta U = mg(z_2 - z_1) + m \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + m(u_2 - u_1) \end{aligned}$$

- **se non si hanno variazioni di energia cinetica e potenziale:**

$$Q - L = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

- **per sistemi chiusi e trasformazioni cicliche:**

$$Q - L = 0$$

## Il Primo Principio e la conservazione dell'energia

Dal principio generale di conservazione dell'energia si sono elaborati alcune versioni utili in campi circoscritti della fisica:

energia cinetica, energia potenziale gravitazionale



**conservazione dell'energia meccanica**

+ energia potenziale elettrica, energia potenziale magnetica, energia chimica, energia nucleare, ***energia interna***



**conservazione dell'energia totale**

+ *calore e lavoro*

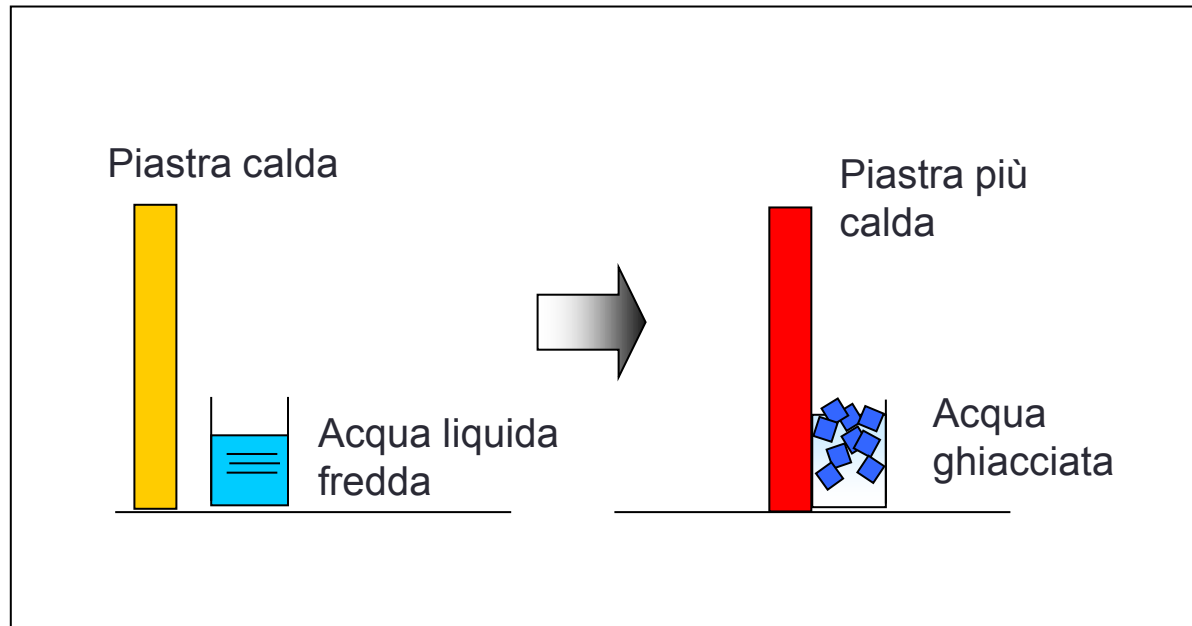


**Primo Principio della Termodinamica**

## Oltre il Primo Principio

Il Primo Principio della Termodinamica non fornisce alcuna indicazione riguardo ad alcuni aspetti “*pratici*”.

- ***l'evoluzione spontanea*** delle trasformazioni; non individua cioè il verso in cui esse possono avvenire.



Per il Primo Principio il fenomeno descritto qui sopra è descrivibile come scambio di energia: se il calore passasse dall'acqua (temperatura più bassa) alla piastra (temperatura più alta), l'energia dell'acqua diminuirebbe e quella della piastra aumenterebbe.

**La “qualità” dell’energia e il rendimento delle trasformazioni che avvengono nelle macchine termiche.** Per il primo principio tutte le energie hanno uguale qualità. In seguito ad una certa trasformazione o ad una serie di trasformazioni in una macchina tutto il calore fornito può essere trasformato in lavoro.



$$Q = L$$

Secondo il Primo Principio è sempre possibile che tutto il calore venga trasformato in lavoro: cioè che il rendimento di una trasformazione, sia essa aperta o ciclica, risulti pari a uno. L’esperienza ha invece mostrato che tale rendimento è pari a uno solo per alcune particolari trasformazioni aperte e che invece è sempre minore di uno per tutte le trasformazioni cicliche.

## Secondo Principio della Termodinamica

- Il Secondo Principio della Termodinamica si basa sulle osservazioni condotte per oltre un secolo sul funzionamento dei motori termici e sulle macchine frigorifere.
- Il Secondo Principio, al pari del Primo, ha le caratteristiche di un postulato cioè dell'enunciazione di una verità che viene ritenuta tale fintanto che qualcuno non dimostrerà il contrario.
- Il Secondo Principio si presenta in molteplici “enunciati”: ognuna lo descrive da un particolare punto di vista, ma ognuna di queste particolari descrizioni permette di trarre tutte le indicazioni che sono contenute nelle altre.
- Le molteplici forme assunte dall'enunciato del Secondo Principio si rifanno, principalmente, agli enunciati originali espressi rispettivamente da *Lord Kelvin*, *Max Planck* e *Julius Clausius*.



## Motori Termici

Per ***trasformare il calore in lavoro*** sono necessari degli opportuni dispositivi che vengono detti ***motori termici*** i quali hanno le seguenti caratteristiche:

- Funzionano secondo trasformazioni cicliche: alla fine di ogni ciclo la macchina si ripresenta nelle condizioni iniziali pronta per fornire ancora lavoro.
- Ricevono calore da una sorgente a temperatura elevata: collettori solari, bruciatori alimentati da combustibili fossili, reattori nucleari.
- Convertono parte del calore assorbito in lavoro, sotto forma ad esempio di rotazione di un albero motore.
- Cedono la parte che non è possibile utilizzare del calore assorbito a una sorgente a temperatura bassa: l'aria atmosferica, l'acqua di un fiume o del mare, etc.

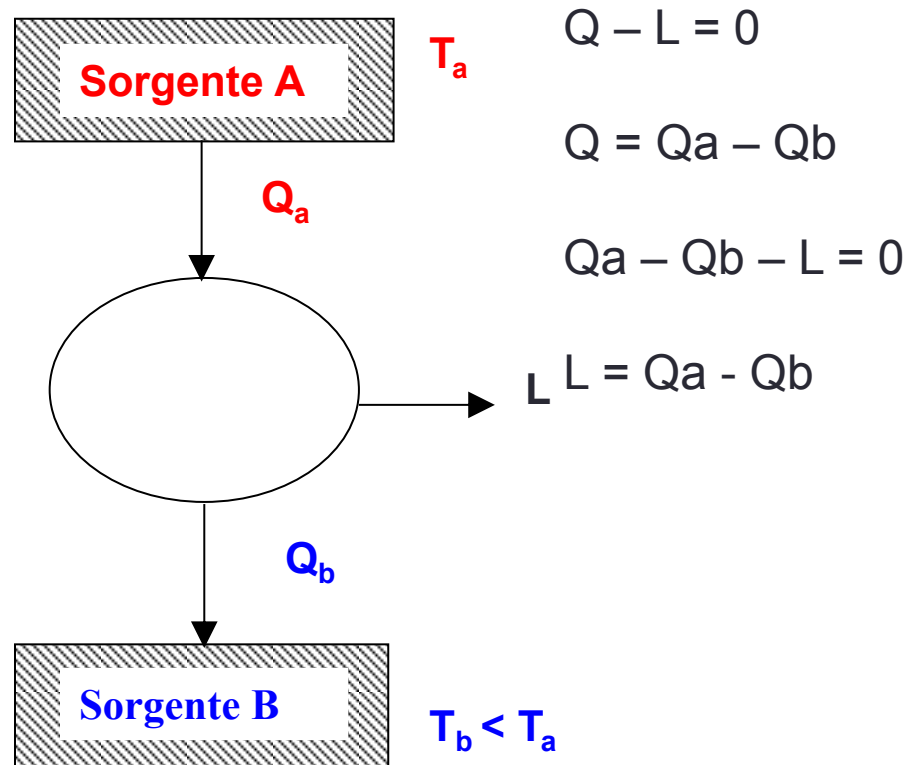
## Sorgenti di Calore

### ***sorgenti di calore***

corpi di massa talmente grande da poter cedere od assorbire una qualsiasi quota di calore senza che la loro temperatura subisca variazioni.

Esempio: un processo di combustione, il sole, l'aria atmosferica, l'acqua di un lago, del mare, di falda...

## Rappresentazione schematica di una macchina termica

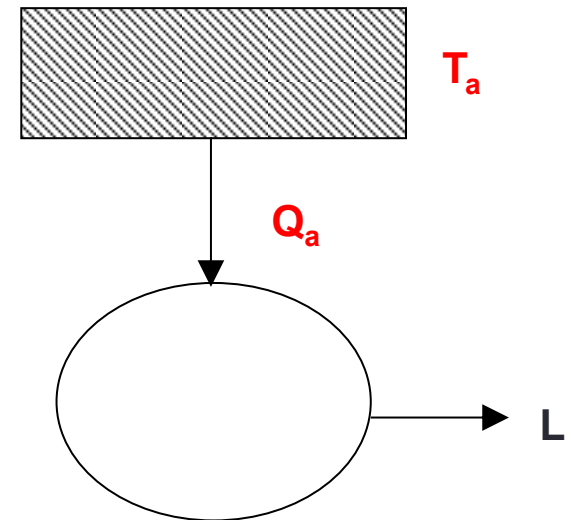


## Secondo Principio secondo Kelvin-Planck

I risultati delle esperienze condotte nello sviluppo delle macchine termiche hanno dimostrato praticamente che esiste un limite alla trasformazione di calore in lavoro, ed è impossibile convertire in lavoro, mediante un processo che operi con continuità, tutto il calore sottratto ad una sorgente.

Sinteticamente questo è riassunto nell'*enunciato di Kelvin-Planck* del secondo principio:

***E' impossibile costruire una macchina operante secondo un processo ciclico che trasformi in lavoro tutto il calore estratto da una sola sorgente a temperatura uniforme e costante nel tempo.***



**Questa  
macchina non  
può funzionare!**

## Rendimento di una macchina termica

$$\eta = \text{rendimento} = \frac{\text{risultato ottenuto}}{\text{energia impiegata}} = \frac{L}{Q_a}$$

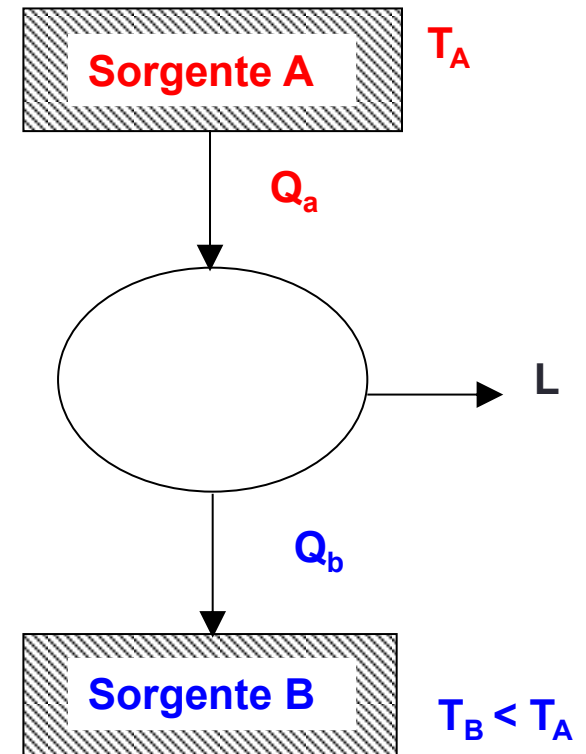
1° Principio sistema chiuso e trasformazione ciclica

$$\Delta U = Q - L$$

$$0 = Q - L$$

$$Q = L$$

$$\eta = \frac{L}{Q_a} = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} = 1 - \frac{Q_b}{Q_a}$$

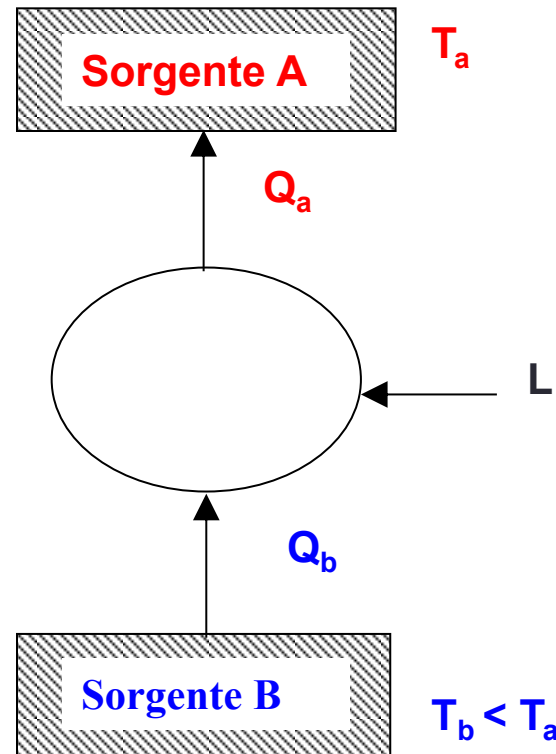


## Macchine frigorifere e Pompe di calore

E' esperienza comune che il calore passa spontaneamente da corpi a temperatura elevata a corpi a bassa temperatura. Per fare avvenire il processo contrario è necessario mettere a punto degli opportuni dispositivi che vengono detti **macchine frigorifere o pompe di calore**, i quali hanno le seguenti caratteristiche:

- Funzionano secondo trasformazioni termodinamiche cicliche: alla fine di ogni ciclo la macchina si ripresenta nelle condizioni iniziali pronta trasferire ancora calore.
- Assorbono calore da una sorgente a bassa temperatura.
- Cedono il calore assorbito a una sorgente a temperatura elevata.
- Necessitano di una ulteriore quota di energia immessa dall'esterno sotto forma di lavoro (o calore).

## Rappresentazione schematica di una macchina frigorifera



$$Q - L = 0$$

$$Q = Q_b - Q_a$$

$$Q_b - Q_a - (-L) = 0$$

$$L = Q_a - Q_b$$

## Secondo Principio secondo Clausius

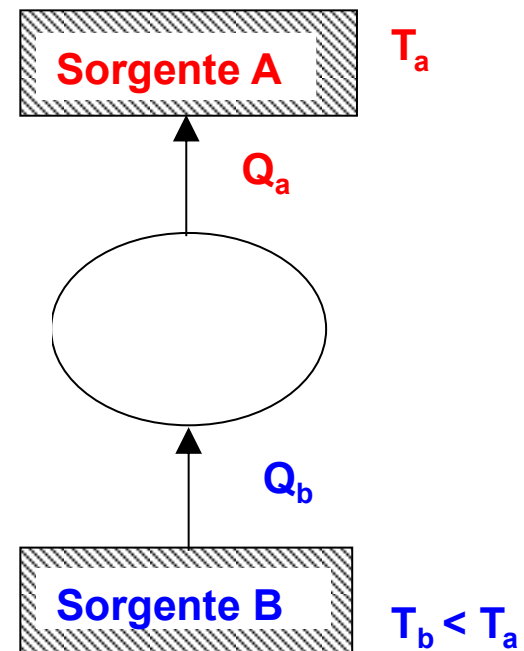
L'esperienza dimostra che il passaggio *spontaneo* di calore avviene solo da un corpo ad alta temperatura ad uno a bassa temperatura.

Mediante l'intervento dell'uomo, o se si preferisce mediante l'intervento di una macchina, è invece possibile far passare del calore da corpi a bassa temperatura a corpi ad alta temperatura.

Anche questo trasferimento *forzato* di calore ha dei limiti riassunti nell'enunciato del Secondo Principio che va sotto il nome di Clausius:

***E' impossibile costruire una macchina operante secondo un processo ciclico il cui unico risultato sia il trasferimento di calore da un corpo a temperatura inferiore ad un corpo a temperatura superiore.***

**Questa macchina non può funzionare!**





## Prestazione di una macchina frigorifera

$$COP_F = \left( \begin{array}{l} \text{coefficiente} \\ \text{di prestazione} \end{array} \right) = \frac{\text{risultato ottenuto}}{\text{energia impiegata}} = \frac{Q_b}{L}$$

$$COP_{PdC} = \left( \begin{array}{l} \text{coefficiente} \\ \text{di prestazione} \end{array} \right) = \frac{\text{risultato ottenuto}}{\text{energia impiegata}} = \frac{Q_a}{L}$$

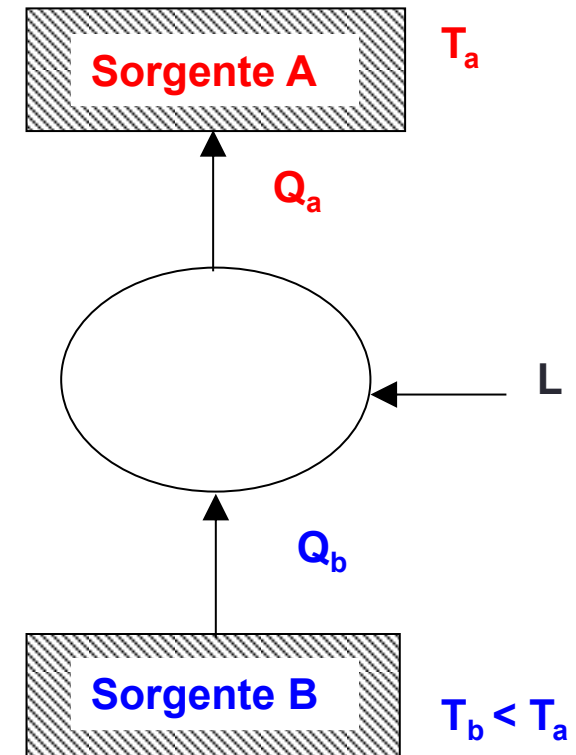
1° Principio sistema chiuso e trasformazione ciclica

$$\Delta U = Q - L = 0$$

$$COP_F = \frac{Q_b}{L} = \frac{Q_b}{Q_a - Q_b} = \frac{1}{\frac{Q_a}{Q_b} - 1}$$

$$COP_{PdC} = \frac{Q_a}{L} = \frac{Q_a}{Q_a - Q_b} = \frac{1}{1 - \frac{Q_b}{Q_a}}$$

$$COP_{PdC} = COP_F + 1$$



## Reversibilità e Irreversibilità dei Processi

Una **trasformazione reversibile** è una trasformazione che può essere ripercorsa in senso inverso **senza** che se ne trovi **traccia** ne sul **sistema** che la esegue ne sull'**ambiente** circostante. Una **trasformazione reversibile** è una trasformazione ideale nella quale gli **attriti** sono **nulli** e gli scambi di energia possono essere invertiti di segno. Nella realtà ci si può solo avvicinare a tale processo ideale senza però mai realizzarlo completamente. Le trasformazioni reversibili sono tuttavia di grande utilità come strumento di confronto con le trasformazioni reali.

Le macchine motrici (motori alternativi, turbine a vapore o a gas) che operano secondo cicli reversibili producono il massimo lavoro possibile.

Le macchine operatrici (compressori, ventilatori, pompe) che operano secondo cicli reversibili richiedono la minor quantità di lavoro possibile.

Quanto più in una macchina reale ci si avvicina a un ciclo reversibile tanto maggiore sarà il lavoro ottenuto da una macchina motrice e minore il lavoro richiesto da una macchina operatrice.

Le cause che rendono le trasformazioni reali *trasformazioni irreversibili* sono le seguenti:

- presenza di attrito: legato a organi in movimento;
- espansioni e compressioni non quasi-statiche
- scambi di calore attraverso salti finiti di temperatura

## Il rendimento di un motore reversibile: teoremi di Carnot

- ***Il rendimento di un motore termico irreversibile è sempre inferiore a quello di uno che operi in maniera reversibile tra le stesse sorgenti di calore.***
- ***I rendimenti di tutti i motori termici reversibili che operino tra le stesse sorgenti di calore sono gli stessi***

**La loro negazione è in contrasto con il secondo principio.**

Il rendimento di un ciclo reversibile dipende solo dalle temperature delle sorgenti:

$$\eta = 1 - \frac{Q_b}{Q_a} \qquad \eta_{rev} = f(T_a, T_b)$$

e quindi:

$$\frac{Q_b}{Q_a} = f(T_a, T_b)$$

## Rendimento di un motore reversibile

La relazione più semplice tra quantità di calore scambiate e le temperature (assolute) a cui avviene lo scambio è:

$$\frac{Q_b}{Q_a} = \frac{T_b}{T_a}$$

Il rendimento di un motore di Carnot o di un qualsiasi altro motore reversibile tra due sorgenti a temperature  $T_a$  e  $T_b$  vale:

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$

## Prestazioni di macchina frigorifera e pompa di calore reversibili

Per una macchina frigorifera che opera secondo un ciclo reversibile vale la relazione:

$$COP_{F,rev} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_b} - 1}$$

Per una pompa di calore che opera secondo un ciclo ideale vale la relazione:

$$COP_{PdC,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_b}{T_a}}$$