

Fisica Tecnica per l'Informatica

Cristian Mercadante

UNIMORE | ULTIMO AGGIORNAMENTO: 13/06/2019

Lezione 1 – 21 settembre 2016

Introduzione

Principio del favore di sicurezza: è l'ipotesi che il sistema che andremo a modellare si comporti peggio del sistema reale. Ad esempio, dimensiono un sistema nelle condizioni limite di lavoro (come temperatura massima, ecc.).

Termodinamica: quella branca della fisica tecnica che si occupa di quello che succede nei processi guardando allo stato iniziale e allo stato finale: si occupa delle variazioni dei parametri operativi dei processi (temperatura, energia, ecc.). L'analisi termodinamica ci permette di analizzare problemi di controllo termico, senza considerare cosa succede durante i processi.

Trasmissione del calore: è necessario dimensionare le componenti di scambio di calore, affinché possano effettivamente svolgere il loro compito.

Fluidodinamica: nella maggior parte dei problemi di controllo termico si utilizzano dei fluidi operatori (aria, liquidi, ecc.). Quando movimentiamo un fluido, ci serve garantire una certa portata di fluido. È necessario verificare che pompe e ventole, per esempio, assicurino le prestazioni da noi richieste.

Termodinamica

È la scienza che studia l'energia (nelle sue varie forme) ed i suoi cambiamenti. Noi studiamo la termodinamica classica, che si basa sullo studio macroscopico della materia: noi prescindiamo dalla struttura particellare e guardiamo soltanto alle proprietà medie di una certa porzione di materia che comprende grandi quantità di particelle.

Densità: è il rapporto fra la massa di una certa porzione di materia e il volume che essa occupa. Posso valutarla in scala microscopica: prendo una certa porzione di materia delimitata da un certo volume, divido il numero di particelle per il volume. Se rimango sulla scala macroscopica, l'andamento della densità in funzione del volume è continuo. Quando il numero di particelle è piccolo, può succedere che la densità aumenti. Se poi decremento il volume, tanto è il volume di una particella, la densità diminuisce. C'è una soglia: **limite del continuo**, sotto la quale non ho più una variazione lineare. Sotto al limite del continuo tutte le formule che studieremo non sono applicabili.

Misura: tutte le grandezze hanno senso se possono essere quantificate. È un processo non banale: bisogna prendere la quantità da misurare, una quantità dello stesso tipo, presa come riferimento, a cui assegnare il valore unitario (unità di misura) e bisogna vedere quante volte l'unità è presente nella grandezza. Ogni unità di misura ha un simbolo, ed eventualmente anche un'incertezza (un possibile errore).

Sistema: è una regione di spazio (anche variabile) o porzione di materia, oggetto dei nostri studi. Esso è posto in un ambiente con cui può interagire in vari modi.

Contorno: è la superficie che delimita il sistema, lo separa dall'ambiente. Può essere attraversato da flussi di energia e da materia. Può essere fisso o mobile.

Lezione 2 – 28 settembre 2016

Sistemi termodinamici

Un sistema si dice **chiuso** (o massa di controllo) se non è attraversato da flussi di massa, altrimenti si dice **aperto** (o volume di controllo).

Per descrivere un sistema è necessario definirne il **confine** (contorno), il **contenuto**, lo **stato** (conoscere tutte le proprietà del sistema in ogni suo punto), gli **stati di aggregazione** (fasi) del contenuto (un sistema si dice omogeneo se è monofasico e mono-componente), le **proprietà termodinamiche** (quantità che andiamo a misurare per capire lo stato del sistema), qualsiasi caratteristica macroscopica del sistema. Le proprietà si dicono **intensive** se non dipendono dalle dimensioni del sistema (ad esempio, se si parla di temperatura del sistema, si parla della temperatura media). Le proprietà si dicono **estensive** se dipendono dall'estensione del sistema (ad esempio, la massa). Le proprietà **specifiche** sono rapporti fra proprietà estensive, che dunque diventano indipendenti dall'estensione del sistema (ad esempio, la densità). Le fasi del sistema dipendono dagli stati di aggregazione della materia (fase solida, liquida, gassosa).

Lo stato **gassoso** è tale quando le molecole sono libere di muoversi l'una rispetto all'altra. Un gas ha la proprietà di occupare tutto lo spazio che gli si concede. Nello stato gassoso le interazioni fra molecole sono poco frequenti, specialmente se il gas è rarefatto. Il gas non ha né volume, né forma propria, ma si adatta al suo contenitore.

Nel **liquido** esistono legami intermolecolari, deboli, ma la distanza media fra le diverse molecole è uniforme. Il volume è costante: il liquido presenta volume proprio, ma non forma propria (si adatta al recipiente).

Nella fase **solida** abbiamo legami più o meno forti fra le particelle. Queste non possono muoversi fra di loro, al di là di piccole variazioni. Il solido quindi presenta forma e volume propri: per variare la forma di un solido bisogna rompere i legami fra le sue particelle.

Definire lo stato di un sistema è inutile e oneroso: dovrei conoscere per ogni particella la sua posizione, la sua velocità per ogni istante. Perciò sono utili valori medi, tali per cui gli scostamenti nel sistema siano minimali. Se invece non c'è molta omogeneità, allora l'approssimazione non vale. Bisogna assumere che il sistema sia in uno **stato di equilibrio**, cioè uno stato in cui non vi siano potenziali (gradienti di temperatura, disuniformità della pressione, ecc.) L'equilibrio termodinamico totale del sistema deve includere l'equilibrio a ogni possibile gradiente possibile in esso: equilibrio termico, meccanico (pressione), di fase, chimico, elettrico.

Subire delle **trasformazioni** (processi) vuol dire passare da uno stato ad un altro. Il sistema passa per stati intermedi, detti "percorso" della trasformazione. In termodinamica assumiamo con approssimazione che il sistema passi per serie di stati di equilibrio, perciò posso assumere le proprietà omogenee in ogni istante della trasformazione. Tale approssimazione diventa tanto più forte, quanto più velocemente si muove il sistema.

Esempio: nel meccanismo cilindro-pistone, il gas nella camera del cilindro è a pressione costante durante il funzionamento? Sì, se il sistema si muove molto lentamente. Cos'è la pressione? È il risultato macroscopico delle interazioni su scala microscopica delle particelle del fluido con le pareti. Quando un corpo macroscopico impatta una parete, ha luogo una variazione della quantità di moto per trasmettere alla parete una forza. L'interazione di ogni particella con la parete le trasmette una forza macroscopica. La pressione è l'effetto cumulativo medio delle interazioni di tutte le particelle sulla parete. La pressione aumenta quindi con la densità del gas, con la temperatura, ecc. Durante l'espansione del gas, se il pistone si muove con velocità bassissima, le molecole del gas hanno modo di distribuirsi uniformemente nel sistema. Risultato: la pressione è uniforme. Se il pistone si muove a velocità notevole, le molecole di gas non si distribuiranno mai uniformemente, né in compressione, né in espansione. Nella termodinamica si pensa al sistema come una sequenza di stati di equilibrio a cui si aggiunge un **termine dissipativo o coefficienti di rendimento**.

Un processo si dice **ciclico** se lo stato iniziale e finale coincidono.

Unità di misura

Il Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI) impone di applicare determinate misure, per legge obbligatorie. Include sette unità fondamentali (massa, lunghezza, tempo, temperatura, intensità di corrente elettrica, intensità luminosa e quantità di materia).

Grandezza	Unità di misura
Lunghezza	Metro [m]
Massa	Kilogrammo [kg]
Tempo	Secondo [s]
Temperatura	Grado kelvin [K]
Intensità di corrente	Ampere [A]
Intensità luminosa	Candela [cd]
Quantità di materia	Mole [mol]
Forza newton [N]	Forza newton [N]
Energia joule [J]	Energia joule [J]
Potenza watt [W]	Potenza watt [W]
Pressione pascal [Pa]	Pressione pascal [Pa]
Energia: kilowattora [kWh]	1 kWh = 3.6·10 ⁶ J
Energia: kilocaloria* [kcal]	1 kcal = 4.186 kJ
Energia: british thermal unit* [BTU]	1 BTU = 1055 J
Potenza: kilocaloria/ora* [kcal/h]	1 kcal/h = 1.16 W
Potenza: british thermal unit/ora* [BTU/h]	1'000 BTU/h = 293 W
Potenza: ton of refrigeration* [ton]	1 ton = 12'000 BTU/h
Potenza: cavallo vapore* [CV]	1 CV = 746 W
Potenza: horse power* [HP]	1 HP = 1.014 CV

Pressione: bar [bar]	1 bar = 100'000 Pa
Pressione: atmosfera* [atm]	1 atm = 101'325 Pa
Pressione: mm Hg* [torr]	1 torr = 133 Pa
Pressione: mm H ₂ O* [mm H ₂ O]	1 mm H ₂ O = 9.81 Pa

- L'indicazione dell'unità di misura deve obbligatoriamente seguire ogni misura numerica, in simbolo e non per esteso (ad es. 1 m, 10 kg, 100 W)
- Se non segue un'indicazione numerica, il nome dell'unità di misura va invece riportato per esteso e con iniziale sempre minuscola, anche se deriva da un nome proprio (come, ad esempio, all'interno della frase: "l'unità di misura della potenza è il watt")
- Dopo il simbolo dell'unità di misura non va mai il puntino (neanche dopo min o atm)
- Per separatore decimale si può usare un punto in basso o, solo in Italia, una virgola (che altrove è generalmente il separatore delle migliaia)
- Occorre utilizzare, quando possibile, le unità di misura derivate (N, J, W, Pa)
- Se si impiegano a denominatore due o più simboli, è opportuno raggrupparli entro parentesi; ad esempio, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ si può anche scrivere $W/(m \cdot K)$, che è perfettamente equivalente, mentre scrivere $W/m \cdot K$ può ingenerare confusione poiché può essere inteso come $(W/m) \cdot K$
- Sono consentiti multipli e sottomultipli delle unità fondamentali solo per un fattore 1000; tuttavia, è ammesso l'uso di alcune grandezze come il centimetro ($1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$) o il bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)
- I prefissi da anteporre al simbolo dell'unità di misura per indicare i principali multipli e sottomultipli sono: tera ($T \leftrightarrow 10^{12}$), giga ($G \leftrightarrow 10^9$), mega ($M \leftrightarrow 10^6$), kilo ($k \leftrightarrow 10^3$, con la k sempre minuscola), milli ($m \leftrightarrow 10^{-3}$), micro ($\mu \leftrightarrow 10^{-6}$), nano ($n \leftrightarrow 10^{-9}$), pico ($p \leftrightarrow 10^{-12}$)
- È ammesso per i fluidi l'uso del litro ($1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3$), con possibilità di utilizzare per il simbolo dell'unità di misura sia L che l (maiuscola o minuscola)
- È spesso opportuno scandire a gruppi di 3 le cifre di un numero molto lungo, sia prima che dopo il separatore decimale, impiegando uno spazio, un puntino in alto o un apostrofo in alto per separare i vari gruppi (ad esempio, 1'234.567'89)
- Si considerano cifre significative la prima (da sinistra a destra) diversa da zero e tutte quelle che la seguono, compresi gli zeri (ad esempio, in 0.001'234 m le cifre significative sono solo quattro, e la misura può essere più convenientemente espressa nella forma 1.234 mm);
- Il numero di cifre significative di una misura numerica può essere sfruttato per fornire un'informazione sulla precisione con cui si conosce la grandezza fisica misurata (ad esempio, 10'000 W può significare che la misura ha precisione dell'ordine di 1 W, ma se la precisione reale è dell'ordine di 100 W, è più conveniente scrivere 10.0 kW o $1.00 \cdot 10^4 \text{ W}$).

Lezione 3 – 30 settembre 2016

Proprietà termodinamiche fondamentali

Per la regola delle fasi di Gibbs ci serve sapere $c-f+2$ proprietà termodinamiche intensive o specifiche per conoscere lo stato di un sistema: numero di componenti – numero di fasi +2.

Densità (ρ): rapporto fra massa di una quantità di sostanza e il volume da essa occupato. La densità a rigore è una proprietà "al punto", ovvero può essere variabile da punto a punto del sistema e in ogni punto la densità si calcola col passaggio al limite per il volume che tende al limite del continuo. Si misura in kg/m^3 .

Volume specifico (v): è il reciproco della densità.

Peso specifico (γ): serve quando abbiamo sostanze soggette al campo gravitazionale. È la densità moltiplicata per l'accelerazione di gravità. È il peso dell'unità di massa della sostanza.

$$m = \int_V \rho dV = \int_V \frac{1}{v}$$

Se la densità del sistema è uniforme, $m = \rho \cdot V$

Pressione: è la forza esercitata da un fluido su una superficie reale o virtuale. È la forza per unità di area. Spesso per misurarla si usa il kilogrammo-forza (kgf): è un'unità di misura di forza peso dell'unità di massa nel campo gravitazionale. Si usa per la pressione il kgf/cm^2 . Quando molte particelle per il loro moto impattano contro una parete, le interazioni sono talmente potenti che hanno come effetto medio la pressione e come effetto cumulativo la forza di pressione esercitata sulla superficie. Se un gas è rarefatto, la pressione del gas cala. Se la temperatura del gas aumenta, a parità di volume, aumenta la temperatura, perché aumenta l'energia cinetica delle particelle e quindi aumenta la frequenza di interazioni e il trasferimento di energia legato alla variazione della quantità di moto con la superficie. Se per esempio volessimo misurare la pressione in un tubo recipiente, lo si mette in collegamento con un tubo ricurvo detto "manometro a U" che si riempie con un fluido. Si misura la differenza di quota fra i due menischi (superfici di divisione fra liquido e gas): la differenza di pressione è proporzionale alla variazione di quota. Oggi si misura con dei sensori: scatolette in cui da una parte c'è la pressione da misurare, dall'altra il sensore è posto in collegamento con una pressione assegnata, in mezzo c'è una membrana deformabile, su cui c'è un sensore piezometrico. La membrana si flette, il sensore misura la deformazione della membrana. Sono sensori poco costosi, calibrati e possono essere usati industrialmente perché restituiscono un segnale elettrico. Problemi: hanno una pressione limite, oltre il quale la membrana subisce una deformazione plastica; hanno una sensibilità che è una percentuale della massima pressione misurabile. Sono sensori che vanno presi con una pressione massima scelta opportunamente e utilizzati con cautela. Tipicamente la pressione è confrontata con quella atmosferica. La differenza di pressione che misura è detta "**pressione relativa**", ovvero relativa all'atmosfera. La "**pressione assoluta**" invece è valutata rispetto allo 0 termodinamico assoluto, raggiungibile in condizioni di materia assente (vuoto perfetto), oppure in cui le particelle sono perfettamente ferme. Siccome la maggior parte dei problemi sono problemi in cui conta la differenza di pressione, essendo la pressione assoluta pari alla pressione relativa + la pressione atmosferica, se valuto una differenza di pressione, questa è uguale alla differenza fra le pressioni relative. Quando si parla di pressione relativa si parla di pressione al manometro; se pressione negativa (depressione) si parla di pressione al vacuometro. Il "tubo di Goudon" è un tubo ricurvo al cui interno viene applicata la pressione da misurare: questo tende a deformarsi verso l'esterno all'aumentare della pressione. È molto robusto, non molto preciso, si scalibra per deformazione plastica. La pressione assoluta a livello del mare è di 1 bar.

Temperatura: è la misura macroscopica dell'energia cinetica a livello macroscopico della materia. La molecola del gas si muove per energia cinetica traslazionale, se si muove, per energia cinetica rotazionale, se ruota su sé stessa, o per energia cinetica vibrazionale, se si muove nello spazio a sua disposizione su traiettoria oscillante e ruota su un asse con orientazione casuale rispetto alla traiettoria. Nel caso dei liquidi è simile, ma per i solidi le molecole sono rigidamente vincolate nella loro posizione, quindi gli atomi possono possedere solo energia cinetica vibrazionale, ovvero oscillano ad altissima frequenza attorno alla loro posizione di equilibrio. Il trasferimento di energia cinetica su scala microscopica è da noi visto macroscopicamente come trasferimento di calore.

Un corpo si dice in **equilibrio termico** se la sua temperatura interna è uniforme, ovvero se non ci sono zone ad energia cinetica microscopica differenziata. Due corpi sono in equilibrio termodinamico fra loro se sono alla stessa temperatura, quindi non ci sono flussi di energia cinetica microscopica fra i due.

Principio zero della termodinamica:

Se due corpi sono entrambi in equilibrio termico con un terzo corpo, sono anche in equilibrio fra loro.

Sono così definibili le scale termometriche. Un termometro viene calibrato rispetto ad un riferimento assoluto, che viene confrontato con un altro corpo: se questi sono in equilibrio termodinamico, anche l'oggetto e il riferimento assoluto lo sono. Ghiaccio e acqua bollente sono i termini di riferimento per la calibrazione. Il termometro va in equilibrio termico con la superficie misurata: il termometro misura la propria temperatura. Noi usiamo la scala celsius, basata sulla scala centigrada. Oggi si usa la scala Kelvin, in cui lo 0 è lo zero termodinamico assoluto: $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Terzo principio della termodinamica:

Lo zero termodinamico assoluto non può essere raggiunto.

La scala Kelvin usa lo stesso grado della scala Celsius, ma cambia lo zero. Differenza di temperatura in gradi Kelvin sono uguali a differenze di temperatura in gradi Celsius. Altra scala in uso è la Fahrenheit, ma proibita in Europa: lo zero di riferimento è quello di una miscela di acqua e sale. La scala Rankine è l'equivalente della scala Kelvin per quella Celsius. La temperatura si misura con sensori di diverso tipo:

- **Sensori a dilatazione:** tutte le sostanze sono soggette a un aumento di volume all'aumento della temperatura (a causa dell'aumento della distanza interatomica per variazione dell'energia cinetica microscopica). I primi termometri utilizzati erano a dilatazione di liquido (mercurio, alcol o acqua colorata): nel bulbo c'è la sostanza; a esso è collegato un tubo capillare (in cui vi è il vuoto) che fa risalire il liquido alla sua dilatazione. Si gradua quindi la scala lungo il tubo capillare. Con i solidi si costruiscono termometri metallici, formati da due piastrine di metalli diversi e vincolate rigidamente alle

estremità. Queste hanno coefficienti di dilatazione diversi, quindi una delle due fletterà di più. Sono molto resistenti, ma poco precisi.

- **Termocoppie:** è una giunzione fra due fili di materiale diverso. Ai capi di essi si misura una tensione dell'ordine dei mV che è proporzionale alla temperatura dei fili. Costano molto poco e non sono precisissime.
- **Termoresistenze:** realizzate avvolgendo attorno a una barretta di materiale dielettrico/isolante un filamento di platino (tipicamente). Si applica alle estremità una corrente a bassissimo amperaggio e si misura la tensione che si ottiene nel circuito. Tramite la legge di Ohm, è possibile risalire alla temperatura. Sono estremamente precise, ma più lente e assai costose. Oggi si realizzano serigrafando un circuito resistivo.
- **Termistori:** sono delle termoresistenze a semiconduttore. Se per la termoresistenza la correlazione tra temperatura e resistenza è lineare e blanda, nel caso del semiconduttore la relazione è esponenziale. Questo rende il termistore particolarmente sensibile. Costano pochissimo, ma si scalibrano.
- **Sensori all'infrarosso:** la misura non avviene né per contatto, né per immersione. In prossimità della superficie della materia solida, gli atomi superficiali sono soggetti ad oscillazioni che avvengono contro campi elettronici. Una particella che si muove in un campo elettromagnetico crea un'onda elettromagnetica. Se la temperatura superficiale è molto alta, emette luce infrarossa, visibile. La radiazione emessa dalla superficie è una manifestazione dell'energia cinetica microscopica. I sensori ad infrarosso misurano la radiazione infrarossa emessa da una superficie che è proporzionale all'intensità della temperatura della superficie. Sono costosi, complicati da utilizzare con precisione. Si chiamano pirometri per misurare temperature alte, per oggetti incandescenti. Griglie di pirometri costituiscono termocamera.

Energia di un sistema termodinamico

Primo principio della termodinamica:

L'energia non si crea, né si distrugge, ma si trasforma.

Energia di un sistema:

- **Forme macroscopiche di energia:** possono essere valutate rispetto a un potenziale di riferimento. Ad esempio, la quantità di moto, l'energia potenziale (quella che un gravo possiede in relazione alla sua quota in un sistema di riferimento).
- **Forme microscopiche di energia:** può essere:
 - energia **termica**/sensibile (è l'energia cinetica in scala microscopica);
 - energia **chimica** (legata alla formazione di legami chimici fra particelle atomiche);
 - energia **fisica**/latente (legata alla rottura di legami secondari che può portare cambiamenti di fase);
 - energia **nucleare** (legata alla rottura o formazione di particelle su scala subatomica).

Queste costituiscono l'**energia interna** di un sistema. L'**energia totale (E)** è la somma delle forme macroscopiche (energia cinetica ed energia potenziale). È riferita alla massa del sistema. Dividendo per la massa si ottiene l'**energia specifica (e)**.

Lezione 4 – 5 ottobre 2016

Calore e lavoro

L'energia può essere scambiata tramite il contorno della materia. Se si tratta di energia termica prende il nome di **calore**, mentre se si tratta di energia meccanica (collegata allo spostamento del punto di lavoro) si chiama **lavoro**. Il lavoro di una forza è la forza moltiplicata per lo spostamento del suo punto di applicazione. Il lavoro totale è:

$$L = \int_1^2 \delta L = \int_1^2 F ds$$

Useremo le convenzioni della termodinamica classica: il calore fornito dal sistema all'ambiente è positivo, mentre quello ricevuto, assorbito dal sistema è negativo. Ad esempio, il lavoro di un ventilatore è negativo, quello di un motore a combustione interna è positivo, quello di una pompa per un fluido è negativo, perché è l'acqua che aziona il sistema. Pompe e ventilatori scambiano lavoro negativo, mentre macchine generatrici (cicli motore, ecc.) scambiano lavoro positivo. Il lavoro in una trasformazione è un'energia (si misura in joule). Possiamo pensarlo come una pressione per una variazione di volume, soprattutto quando questo ha a che fare con compressione o espansione di un fluido in pressione. Ad esempio, nel sistema cilindro-pistone, la forza che il fluido applica sul pistone esegue il lavoro che è pari alla forza stessa per lo spostamento.

$$L = \int_1^2 \delta L = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Il lavoro è energia. Ma se voglio sapere cosa succede istantaneamente, ottengo la **potenza meccanica**: è il lavoro scambiato nell'unità di tempo. Il lavoro è dunque l'integrale della potenza rispetto al tempo.

$$\dot{L} = \frac{\delta L}{dt} \quad [W]$$

Nel caso in cui la potenza meccanica fosse costante nel tempo, allora:

$$\dot{L} = \frac{L}{\Delta t}$$

Se in un corpo ci sono zone in cui l'energia cinetica è maggiore, questa si propaga nel materiale: è il calore. Un sistema che non scambia calore tramite il contorno si dice **adiabatico**. Calore fornito al sistema è positivo, quello ceduto dal sistema è negativo. La **potenza termica** scambiata è il calore scambiato nell'unità di tempo.

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \quad [W]$$

Nel caso in cui la potenza termica fosse costante nel tempo, allora:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Primo principio per i sistemi chiusi

Se abbiamo una pentola su un fornello, questa cede calore all'esterno attraverso le sue pareti. Il calore fornito alla pentola è il calore netto scambiato: è la somma algebrica del calore scambiato attraverso ogni parete del sistema, ovvero, nel nostro esempio, è quello positivo fornito al sistema, a cui è sottratto quello scambiato con l'esterno. Fornendo calore, aumenta l'energia della pentola.

Può esserci anche lavoro fornito al sistema (negativo per convenzione), ma questo incrementa l'energia del sistema.

$$Q - L = \Delta E$$

$$\Delta E = \Delta|E_c| + \Delta|E_p| + \Delta U$$

Nella pratica si possono attuare delle semplificazioni: per un sistema **stazionario** le variazioni di energia cinetica e potenziale sono nulle. È un sistema in cui sono nulle le variazioni, non le energie. Ne segue:

$$Q - L = \Delta U$$

Per sistemi chiuso stazionario con **trasformazioni cicliche**, la variazione dell'energia interna è nulla, perché lo stato finale coincide con lo stato iniziale. Ad esempio, il ciclo motore. Segue che calore netto scambiato è uguale al lavoro netto scambiato:

$$Q = L$$

Su base istantanea:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \frac{dE}{dt} \quad [W]$$

Esempio: circuito termoidraulico: si utilizza per raffreddamento di un sistema tramite fluido. Abbiamo diverse componenti che interagiscono col fluido. Abbiamo una caldaia che trasferisce calore al fluido (calore positivo). Il circuito trasporta il fluido ai radiatori (per dissipare calore, negativo). Per far circolare il fluido serve una pompa, che fornisce lavoro negativo. Inoltre, vi è anche il calore disperso per dissipazione dalle tubazioni del circuito. Applicando il primo principio della termodinamica:

$Q - L = (Q_{gn} + Q_e + Q_d) - L_p \equiv |Q_{gn}| - |Q_e| - |Q_d| + |L_p| = \Delta U$
con $\Delta U=0$ in condizioni stazionarie (a regime).

