

---

# Termodinamica e fisica tecnica

**basics**

**Dec 30, 2024**



## CONTENTS

<b>1</b>	<b>Storia della termodinamica</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Principi della termodinamica</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Potenziali termodinamici</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Coefficienti termodinamici</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Stati della materia e modelli</b>	<b>13</b>
5.1	Gas ideali . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Trasformazioni termodinamiche</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Cicli termodinamici e macchine termiche</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Meccanismi di trasmissione del calore</b>	<b>19</b>



### Introduzione.

- la termodinamica si occupa della forme di energia, e delle sue variazioni attraverso scambi di lavoro e calore;
- la termodinamica classica fornisce una descrizione macroscopica di sistemi complessi, formati da un numero enorme di componenti elementari (atomi e molecole), per motivi di convenienza: la descrizione macroscopica media comporta una perdita di informazioni sul sistema, e la necessità di una grandezza legata ad essa che indichi il verso naturale di alcune trasformazioni, l'entropia;
- in equilibrio **todo**: in molti casi di interesse comune, l'**equilibrio** termodinamico **locale** viene raggiunto in intervalli di tempo che hanno durata caratteristica molto inferiore ai tempi caratteristici del sistema macroscopico: le leggi della termodinamica vengono quindi applicate anche nello studio della meccanica dei solidi e dei fluidi;

### Argomenti.

- Principi della termodinamica
  - Modello matematico: funzioni di stato,...
  - Dall'esperienza ai principi fisici, alla base del modello
  - Principi per sistemi chiusi e per sistemi aperti: facendo riferimento al *thm del trasporto di Reynolds*
  - grandezze intensive, estensive, sepecifiche,...
- Potenziali termodinamici e coefficienti termodinamici
  - potenziali termodinamici, relazioni di Maxwell
  - coefficienti termodinamici: dilatazione, comprimibilità
  - miscellanea nell'uso delle derivate parziali di funzioni multi-variabile in termodinamica
- Stati della materia: equazioni di stato e equazioni costitutive
  - fluidi:
    - \* gas
    - \* liquidi
  - solidi
  - trasformazioni di fase
  - altro...
- Trasformazioni termodinamiche nei gas e macchine a fluido
  - trasformazioni nei piani termodinamici
  - macchine termiche ideali e non: Carnot, efficienza massima, cicli reali, formulazioni di Kelvin e Plank del secondo principio della termodinamica; disuguaglianza di Clausius
  - cicli termodinamici: Otto, Diesel, Rankine, Joule-Brayton,...
- Meccanismi di trasmissione del calore:
  - conduzione
  - convezione: naturale e forzata
  - irraggiamento

### Extra.

- Formulazione assiomatica della termodinamica
- Cenni di meccanica statistica

basics

Dec 30, 2024

0 min read

## STORIA DELLA TERMODINAMICA

basics

Dec 30, 2024

2 min read





## PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA

**Primo principio della termodinamica.** Il primo principio della termodinamica è il bilancio di energia totale di un sistema

$$\dot{E}^{tot} = P^e + \dot{Q}^e$$

L'energia totale di un sistema può essere scritta come la somma dell'energia cinetica macroscopica  $K$  e l'energia interna  $E$ , una rappresentazione macroscopica dell'energia cinetica delle componenti microscopiche del sistema, attorno ai valori medi macroscopici locali,

$$E^{tot} = K + E .$$

Usando il teorema dell'energia cinetica *macroscopica* [REF] noto dalla meccanica si può ricavare

$$\begin{aligned}\dot{E}^{tot} &= P^e + \dot{Q}^e \\ \dot{K} &= P^{tot} = P^e + P^i \\ \dot{E} &= \dot{Q}^e - P^i\end{aligned}$$

Il bilancio dell'energia interna può essere scritto in forma incrementale come

$$dE = dQ^e - dL^i ,$$

mettendo in evidenza con la notazione che l'energia interna è una variabile di stato del sistema, a differenza degli scambi di lavoro o di calore.

Si assume che l'energia interna del sistema può essere scritta come funzione di variabili di stato cinematiche locali  $\mathbf{x}$  (che non possono contribuire all'energia cinetica macroscopica del sistema) e almeno un'altra variabile di stato additiva, qui chiamata  $S$ .

$$E(\mathbf{x}, S)$$

Il suo differenziale può essere scritto come

$$dE = \left. \frac{\partial E}{\partial \mathbf{x}} \right|_S \cdot d\mathbf{x} + \left. \frac{\partial E}{\partial S} \right|_{\mathbf{x}} \cdot dS$$

Il bilancio di energia interna in forma incrementale può essere riscritto come

$$\begin{aligned}dE &= -dL^i + dQ^e = \\ &= -\delta L^{i,rev} + d^+ D + dQ^e\end{aligned}$$

avendo separato nel lavoro interno il contributo delle azioni reversibili e non reversibili. In accordo con l'esperienza, si assume che il contributo al lavoro interno delle forze non reversibili è sempre positivo,  $d^+ D \geq 0$ : questo contributo viene chiamato **dissipazione**.

Poiché sia il differenziale dell'energia e il contributo reversibile del lavoro interno sono dei termini reversibili, allora anche la somma di dissipazione e flusso di calore deve essere un contributo reversibile, indicato con  $\delta U$ .

Dal confronto delle due espressioni del differenziale dell'energia interna, avendo riconosciuto il contributo reversibile del lavoro interno nel primo termine, si può scrivere

$$\delta L^{i,rev} = -\frac{\partial E}{\partial \mathbf{x}} \Big|_S d\mathbf{x} \quad , \quad \delta U = \frac{\partial E}{\partial S} \Big|_{\mathbf{x}} dS$$

**Terzo principio della termodinamica: definizione e segno della temperatura.** La temperatura viene definita come la variabile parziale dell'energia interna del sistema rispetto alla variabile di stato  $S$ ,

$$T := \frac{\partial E}{\partial S} \Big|_S .$$

Il terzo principio della termodinamica postula che la temperatura sia sempre positiva.

$$T := \frac{\partial E}{\partial S} \Big|_S > 0 .$$

**Secondo principio della termodinamica: enunciato di Clausius.** L'enunciato di Clausius del secondo principio della termodinamica può essere formulato in accordo con l'evidenza che la dissipazione sia sempre non negativa. Infatti

$$TdS =: \partial U = \underbrace{d^+D}_{\geq 0} + dQ^e \geq dQ^e ,$$

e quindi

$$dS \geq \frac{dQ^e}{T} .$$

**Secondo principio della termodinamica per sistemi complessi e direzione dei trasferimenti di calore.**

L'esperienza evidenzia che il trasferimento di calore avviene dai corpi a temperatura maggiore a corpi a temperatura minore, ossia il flusso di calore fa aumentare l'energia interna del corpo freddo e diminuire quella del corpo caldo.

Nello scambio di calore tra due corpi  $i, j$  a temperature  $T_i, T_j$ , questa evidenza sperimentale può essere scritta come

$$dQ_{ji} \geq 0 \quad \text{se} \quad T_i \geq T_j \quad \rightarrow \quad \frac{dQ_{ji}}{T_j} + \frac{dQ_{ij}}{T_i} \geq 0 ,$$

dove  $dQ_{ji} = -dQ_{ij}$  è il flusso di calore dal corpo  $i$  al corpo  $j$ , positivo se fa aumentare l'energia interna di  $j$  e diminuire quella di  $i$ .

$$dS_i = \underbrace{\frac{dD_i}{T_i}}_{\geq 0} + \frac{dQ^{e,i}}{T_i} + \sum_{j \neq i} \frac{dQ_{ij}}{T_i}$$

Poiché  $S$  è una variabile estensiva, il valore associato all'intero sistema è uguale alla somma dei valori delle sue parti,  $S = \sum_i S_i$ . E' quindi possibile ricavare una relazione per l'intero sistema sommando i contributi dovuti a tutte le sue parti.

$$\begin{aligned} dS &= \sum_i dS_i = \\ &= \sum_i \sum_i \frac{dQ^{e,i}}{T_i} + \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{dQ_{ij}}{T_i} + \underbrace{\frac{dD_i}{T_i}}_{\geq 0} = \\ &\geq \sum_i \frac{dQ^{e,i}}{T_i} + \sum_{\{i,j\}} \underbrace{\left( \frac{dQ_{ij}}{T_i} + \frac{dQ_{ji}}{T_j} \right)}_{\geq 0} = \\ &\geq \sum_i \frac{dQ^{e,i}}{T_i} . \end{aligned}$$

basics

Dec 30, 2024

0 min read



## POTENZIALI TERMODINAMICI

Partendo dall'espressione incrementale del primo principio della termodinamica è possibile definire altre funzioni delle variabili di stato (**TODO** *Ruolo della trasformata di Legendre*), chiamati **potenziali termodinamici**

**Energia interna.**  $E(\mathbf{x}, S)$

$$dE = -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} + TdS$$

**Energia libera di Helmholtz.**  $F(\mathbf{x}, T) := E - TS$

$$\begin{aligned} dF &= dE - TdS - SdT = \\ &= -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} + TdS - TdS - SdT = \\ &= -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} - SdT \end{aligned}$$

**Entalpia.**  $H(\mathbf{F}, S) := E + \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}$

$$\begin{aligned} dH &= dE + \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} + \mathbf{x} \cdot d\mathbf{F} = \\ &= -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} + TdS + \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} + \mathbf{x} \cdot d\mathbf{F} = \\ &= \mathbf{x} \cdot d\mathbf{F} + TdS \end{aligned}$$

**Energia libera di Gibbs.**  $G(\mathbf{F}, T) := H - TS$

$$\begin{aligned} dG &= dH - TdS - SdT = \\ &= \mathbf{x} \cdot d\mathbf{F} + TdS - TdS - SdT = \\ &= \mathbf{x} \cdot d\mathbf{F} - SdT \end{aligned}$$

**Derivate parziali dei potenziali come definizione di variabili termodinamiche.** Osservando i differenziali dei potenziali termodinamici, si possono riconoscere che le variabili termodinamiche  $T$ ,  $S$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{x}$  possono essere scritte come derivate parziali dei potenziali termodinamici,

$$\begin{aligned} T &= \left. \frac{\partial E}{\partial S} \right|_{\mathbf{x}} = \left. \frac{\partial H}{\partial S} \right|_{\mathbf{F}} \\ S &= -\left. \frac{\partial F}{\partial T} \right|_{\mathbf{x}} = -\left. \frac{\partial G}{\partial T} \right|_{\mathbf{F}} \\ \mathbf{F} &= -\left. \frac{\partial E}{\partial \mathbf{x}} \right|_S = -\left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right|_T \\ \mathbf{x} &= \left. \frac{\partial H}{\partial \mathbf{F}} \right|_S = \left. \frac{\partial G}{\partial \mathbf{F}} \right|_T \end{aligned}$$

**Relazioni di Maxwell.** Applicando il **teorema di Schwarz** sulle derivate miste ai potenziali termodinamici, si ricavano

le relazioni di Maxwell,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial x_i} = -\frac{\partial F_i}{\partial S} \\ \frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial F_i}{\partial T} \\ \frac{\partial T}{\partial F_i} = \frac{\partial S}{\partial x_i} \\ \frac{\partial S}{\partial F_i} = -\frac{\partial x_i}{\partial T} \end{array} \right.$$

e

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_i}{\partial x_j} = \frac{\partial F_j}{\partial x_i} \\ \frac{\partial x_i}{\partial F_j} = \frac{\partial x_j}{\partial F_i} \end{array} \right.$$

basics

Dec 30, 2024

0 min read

## COEFFICIENTI TERMODINAMICI

**Calore specifico.**

$$S_x := T \left. \frac{\partial S}{\partial T} \right|_x$$

**Coefficienti di espansione termica.**

$$\alpha_x := \frac{1}{v} \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_x = - \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_x$$

**Coefficienti di comprimibilità.**

$$\beta_x := - \frac{1}{v} \left. \frac{\partial v}{\partial P} \right|_x = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_x$$

basics

Dec 30, 2024

0 min read





## STATI DELLA MATERIA E MODELLI

### Stati della materia.

- gas
- liquidi
- solidi
- plasma

### Alcune leggi costitutive.

- solidi elastici:
  - solidi lineari elastici isotropi
- fluidi:
  - in base all'equazione di stato:
    - \* gas perfetti
    - \* gas reali
    - \* ...
  - in base all'espressione degli sforzi:
    - \* fluidi newtoniani
    - \* fluidi non-newtoniani

basics

Dec 30, 2024

0 min read

## 5.1 Gas ideali

**Legge di Boyle-Mariotte.**  $PV = \text{cost.}$  a  $T$  costante (trasformazione isoterma).

**Legge di Gay-Lussac I (o Charles).**  $V \propto T$  a  $P$  costante (trasformazione isobara).

**Legge di Gay-Lussac II.**  $P \propto T$  a  $V$  costante (trasformazione isocora).

**Legge dei gas ideali.**  $PV = nRT$

basics

Dec 30, 2024

0 min read

## TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE

basics

Dec 30, 2024

1 min read



## CICLI TERMODINAMICI E MACCHINE TERMICHE

Le macchine termiche sono sistemi che sfruttano scambi di calore per produrre lavoro (**macchine dirette**, come i motori a combustione) o lavoro per scambiare calore da sistemi freddi a sistemi più caldi (**macchine inverse**, come i frigoriferi).

Di solito, le macchine termiche sfruttano un fluido di lavoro. Le macchine a fluido possono essere un sistema aperto (es. motori aeronautici) o chiuso (circuiti delle centrali elettriche e di frigoriferi), o un sistema che è aperto solo in alcune fasi (es. nei motori alternativi, la camera di combustione è un sistema aperto solo durante le fasi di aspirazione e scarico, se si trascurano le perdite).

**Macchine ideali.** *Macchina ideale di Carnot; efficienza massima; enunciati di Planck e Kelvin del secondo principio della termodinamica.*

**Macchine reali.** *Cicli ideali: Otto, Diesel, Rankine, Joule-Brayton,...;*

basics

Dec 30, 2024

0 min read



## **MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE**