

GIANNI CESINI
GIOVANNI LATINI
FABIO POLONARA

Fisica tecnica

seconda edizione



EDIZIONE DIGITALE SU
PANDORA
CAMPUS

CittàStudi
EDIZIONI

APPROFONDIMENTI

Capitolo 2

a cura di:
Gianni Cesini
Giovanni Latini
Fabio Polonara

INTRODUZIONE ALLA TERMODINAMICA APPLICATA

2.3.2

TERMODINAMICA STATISTICA

In alternativa alla descrizione macroscopica, si può tentare di analizzare i sistemi che si incontrano in natura accettando il fatto che la materia consista di particelle discrete, atomi e molecole.

In accordo con questo punto di vista, per esempio, una certa quantità di gas confinata in un recipiente consiste di un enorme numero di molecole in moto caotico verso tutte le direzioni, che collidono tra loro e con le pareti del recipiente.

Secondo questo approccio sarà necessario introdurre delle ipotesi circa la natura delle collisioni, se sono elastiche oppure no, e anche circa la natura delle interazioni tra le molecole, se esse siano ristrette alle collisioni o se ci sia un qualche tipo di interazione anche quando le molecole non collidono tra loro. In più sarà necessario dare un'interpretazione dei legami che tengono più atomi insieme in una molecola, se siano elastici, rigidi o di qualche altro tipo.

Ad esempio la massa d'aria contenuta alla pressione atmosferica e a temperatura ambiente nel volume di un centimetro cubo contiene approssimativamente $2,6 \cdot 10^{19}$ molecole. Ciascuna di queste molecole ha una sua velocità, una sua energia e interagisce con le altre molecole per collisioni o per forze a distanza. Per descrivere il sistema dal punto di vista microscopico occorrerebbero tre coordinate per la posizione di ciascuna molecola e altrettante per le componenti della velocità. Per ottenere in maniera completa il comportamento del sistema sarebbero necessarie $6 \cdot (2,6 \cdot 10^{19})$ equazioni.

Un modo per risolvere il problema è di affidarsi a considerazioni di carattere statistico e alla teoria della probabilità introducendo i valori medi per tutte le particelle in gioco.

In altre parole, sarà necessario formulare un modello molecolare per ciascuna sostanza.

È abbastanza chiaro che non esiste un esperimento diretto che possa validare la correttezza di tali modelli. Ogni strumento che è possibile usare sarebbe enormemente grande rispetto alle dimensioni delle molecole e non sarebbe quindi capace di misurare le forze che agiscono su di loro. L'unico modo con il quale si può giudicare se un modello è adeguato è quello di ricavare a partire dal modello stesso il comportamento di un gran numero di molecole, cioè di un sistema macroscopico, e poi di confrontare quel risultato con le misure fatte con gli strumenti usuali.

Per esempio nella teoria cinetica dei gas si viene a stabilire una relazione tra la temperatura e la velocità quadratica media delle molecole. Mentre la velocità di ogni singola molecola è sconosciuta, il valore della temperatura indica che vi è maggior probabilità che le molecole abbiano una velocità vicino a un certo valore piuttosto che un altro.

Lo studio della Termodinamica a livello microscopico consente non solo di ritrovare i risultati ottenuti a livello macroscopico ma consente anche di seguire l'evolversi del sistema in condizioni lontane dall'equilibrio ponendo così le basi della Termodinamica dei processi irreversibili.

L'adozione dell'approccio della Termodinamica classica, che considera le proprietà del sistema dal punto di vista macroscopico ritenendo il sistema un tutto continuo, è sufficiente per la gran parte dei casi che verranno esaminati. In tali casi il numero di molecole presenti in un elemento di volume è enormemente elevato: i concetti di pressione, temperatura, densità possono prescindere dalla realtà del discontinuo.

Ciò non sarebbe più possibile nei casi di vuoto molto spinto ove il cammino libero medio delle molecole è maggiore delle dimensioni del recipiente: i concetti di stato di equilibrio, di densità, di pressione cesserebbero di avere significato.

[...]

2.6

PRESSIONE, DENSITÀ E TEMPERATURA

Le tre proprietà intrinsecamente intensive, vale a dire pressione, densità e temperatura, costituiscono il punto di partenza per la valutazione di tutte le altre proprietà di un sistema termodinamico, in quanto sono le più facilmente misurabili.

Dalla conoscenza di queste tre proprietà risulterà possibile risalire, attraverso gli strumenti che vengono progressivamente introdotti a partire dal Capitolo 3, alle altre proprietà di interesse per la Termodinamica applicata, molte delle quali sono assai difficili da misurare o da determinare in modo indipendente.

2.6.1

PRESSIONE

Una caratteristica essenziale dei fluidi è l'estrema mobilità interna che essi presentano. I due tipi fondamentali di fluidi, cioè i liquidi e gli aeriformi, si differenziano per il fatto che i primi sono pochissimo comprimibili, mentre i secondi lo sono in genere in misura molto elevata.

Con buona approssimazione si può schematizzare lo stato liquido definendo liquido perfetto un liquido che soddisfa le seguenti caratteristiche:

- le parti del liquido possono scorrere le une sulle altre senza attrito;
- ogni cambiamento di forma (che non comporti cambiamento di volume) si può compiere senza spendere lavoro;
- una variazione di pressione non determina alcuna variazione di volume (incomprimibilità).

Dati questi presupposti è possibile introdurre il concetto di pressione in maniera semplice come quello adatto a schematizzare il fatto che una forza non si possa dire applicata in un determinato punto, ma piuttosto distribuita su una superficie.

La **pressione** è quindi definita come la componente normale di una forza divisa per la superficie su cui è applicata:

$$p = \lim_{A \rightarrow A'} \left(\frac{F_n}{A} \right)$$

dove A' è la più piccola area per cui la materia può essere pensata come un continuo, così piccola da poter essere considerata un punto.

La pressione è una proprietà dei fluidi mentre la grandezza equivalente nel caso dei solidi prende il nome di tensione.

Se la pressione è uniforme su tutta la superficie si ha:

$$F = p \cdot A$$

Risulta immediatamente che la pressione ha le dimensioni di una forza divisa per una superficie e quindi si misura assumendo come unità la pressione per la quale sulla superficie unitaria si esercita la forza unitaria. Nel Sistema Internazionale la pressione unitaria è la pressione di 1 newton per metro quadrato e viene chiamata pascal [Pa]:

$$1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

Per le applicazioni è spesso conveniente usare i multipli del pascal, in particolare:

$$1 kPa = 10^3 Pa$$

$$1 bar = 10^5 Pa$$

$$1 MPa = 10^6 Pa$$

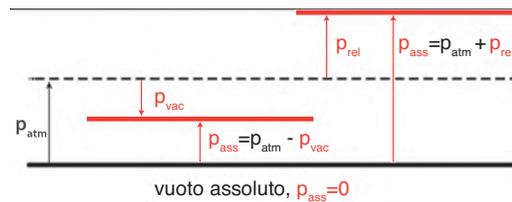
In Termodinamica quando si parla di pressione ci si riferisce di solito alla **pressione assoluta**, (p_{ass}), per la quale il valore 0 è riferito al vuoto assoluto, mentre il valore di pressione misurato da molti strumenti è quello relativo alla **pressione atmosferica**, (p_{atm}); il suo valore 0 è assunto alla pressione atmosferica e prende appunto il nome di **pressione relativa**, (p_{rel}):

$$p_{rel} = p_{ass} - p_{atm}$$

Se la pressione assoluta è inferiore a quella atmosferica anziché di pressione relativa si parla di **pressione al vacuometro**, definita come:

$$p_{vac} = p_{atm} - p_{ass}$$

Figura 2.14
Pressione assoluta,
relativa e al
vacuometro



La pressione atmosferica normale o standard è quella misurata alla latitudine di 45° , al livello del mare e a una temperatura di 15°C , che corrisponde a una colonna di mercurio di 760 mm:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101'325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$$

Naturalmente le variazioni della pressione atmosferica dovute all'altitudine o alla meteorologia influenzano la misura della pressione relativa, ma non quella della pressione assoluta.

2.6.1.1

PRESSIONE IDROSTATICA

Nella definizione di liquido perfetto si è detto che esso deve essere incompressibile. In realtà i liquidi sono debolmente compressibili e la deformazione, per quanto energetica possa essere la compressione, è sempre perfettamente elastica.

È quindi opportuno tener presente che i liquidi, una volta deformati, tendono a riprendere il loro volume iniziale, espandendosi in ogni direzione. Quando un liquido è compresso diminuiscono le distanze medie fra molecola e molecola, in ogni punto del liquido. Dunque, in ogni punto del liquido, e nella stessa misura, il liquido tende a ripristinare fra le molecole le distanze che corrispondono alle normali condizioni di equilibrio.

Questo fatto, all'apparenza paradossale, conduce in particolare alla **Legge di Pascal** (se si aumenta la pressione in un punto di un liquido confinato in un contenitore, l'aumento di pressione si realizza in tutto il contenitore).

In effetti alla base della statica e della dinamica dei fluidi, e in particolare dei liquidi, giace il fatto che si possa considerare ogni elemento materiale come avente, per così dire, una propria individualità e che quindi lo stesso si possa riconoscere ovunque si sposti. Questo modo di vedere conduce a parlare del moto delle particelle di un sistema continuo senza scendere a livello molecolare. Sulle particelle (o elementi) di un fluido agiranno, oltre alle forze esterne (per esempio la gravità), anche le forze di contatto dovute alle azioni degli elementi vicini.

Se ci si limita ai liquidi ideali, le forze fra elemento ed elemento sono sempre **normali alla superficie di separazione** dei due elementi (in caso contrario vi sarebbero forze di attrito interno). Se poi ci si limita alle condizioni di equilibrio, le forze di attrito si annullano e anche per i liquidi viscosi valgono le leggi della statica, valide per i liquidi ideali.

Essendo la pressione una forza per unità di superficie, si potrebbe pensare che essa sia un vettore; in realtà, la pressione in ogni punto di un fluido è la stessa

in tutte le direzioni ovvero essa ha un'intensità, ma non una specifica direzione: la pressione è quindi una grandezza scalare.

Si consideri infatti un elemento di volume (ΔV) di un liquido **in quiete**. La risultante delle forze agenti su (ΔV) è zero. Le forze agenti sono sia le forze esercitate sull'elemento (ΔV) dal liquido circostante normalmente **alle superfici** di separazione, sia ogni altra forza (per esempio la forza di gravità) che si dirà genericamente esterna o **di volume**.

Si può dimostrare che in un punto qualsiasi del liquido il valore della pressione è indipendente dall'orientazione dell'elemento di superficie (ΔA).

Si consideri, a scopo esemplificativo, per (ΔV) il volume del cilindretto mostrato in Figura 2.15 limitato da una parte da una sezione retta ($\Delta A'$) e dall'altra da una sezione obliqua (ΔA) il cui piano fa un angolo (α) con il piano della sezione retta.

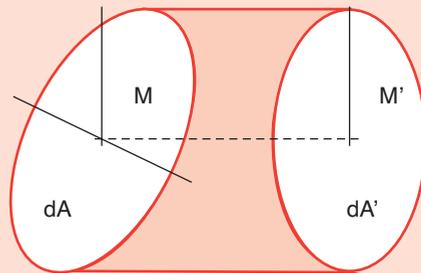


Figura 2.15

La pressione in un punto è indipendente dall'orientazione della superficie

Detta (Δx) la lunghezza media del cilindretto si ha ($\Delta V = \Delta A \cdot \Delta x$).

A questo punto è facile individuare nei termini relativi alle forze sulle superfici (ΔA) e ($\Delta A'$) infinitesimi del 2° ordine, mentre ogni altro termine relativo a forze esterne o di volume rappresenta un infinitesimo del 3° ordine; si ricordi che non occorre tener conto delle forze sulle pareti laterali del cilindretto in quanto normali all'asse dello stesso.

Quando si scrive la condizione di equilibrio (somma delle componenti di tutte le forze lungo l'asse (x) uguale a zero) e poi si passa al limite per ($\Delta x \rightarrow 0$), il punto (M) tende al punto (M'), il termine relativo alle forze di volume scompare e rimane da porre uguale a zero la differenza tra la forza agente sulle due superfici (l'una perpendicolare all'asse x e l'altra formante con lo stesso asse l'angolo α) e dunque in termini di pressione:

$$p \cdot dA \cdot \cos \alpha - p' \cdot dA' = 0$$

e poiché:

$$dA \cdot \cos \alpha = dA'$$

si ha:

$$p = p'$$

La pressione su una superficie è indipendente dall'orientazione della superficie stessa. Comunque (ΔA) ruoti intorno al punto (M), la pressione su di essa è sempre la stessa e dipende solamente dalle condizioni del fluido nel punto (M). È questo il motivo per cui si parla di pressione nel punto (M). Del tutto correttamente si può dire che ogni elemento di superficie di un liquido in equilibrio è soggetto a una pressione che è costantemente normale all'elemento di superficie e che non cambia in modulo qualunque sia la orientazione della superficie. È questo il motivo per cui si parla della pressione come di una quantità scalare. Si può aggiungere che il risultato ora ottenuto, se l'attrito interno è trascurabile, è valido anche per un liquido in moto in base alle medesime considerazioni fisiche e matematiche sopra esposte.

Si può dunque definire in ogni punto, anche per un liquido ideale in moto, una pressione indipendente dall'orientazione dell'elemento della superficie sul quale essa si esercita.

Si riprenda ora l'esame del cilindretto con entrambe le sezioni (ΔS) e ($\Delta S'$) normali all'asse (x) e si imponga di nuovo la condizione di equilibrio, ma si valuti ora come varia la pressione lungo la direzione (x) dell'asse. La condizione di equilibrio diviene:

$$p \cdot dA - p' \cdot dA' + X \cdot \rho \cdot \Delta V = 0$$

dove (X) rappresenta la generica accelerazione lungo l'asse (x) e (ρ) rappresenta la densità del liquido; poichè:

$$\Delta V = \Delta A' \cdot \Delta x$$

$$\Delta A = \Delta A'$$

ne segue l'equazione:

$$\frac{p - p'}{\Delta x} = \rho \cdot X$$

che per (M) tendente a (M') si scrive:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \cdot X$$

Questa espressione rappresenta l'equazione fondamentale dell'idrostatica: la variazione della pressione (p) in una direzione (x) è uguale al prodotto della densità (ρ) per la componente, nella direzione (x), del vettore che definisce le forze esterne di volume.

Analoghe relazioni valgono per le direzioni (y) e (z).

Nel caso particolarmente importante della forza di gravità, quando l'unica direzione da prendere in considerazione è costituita dall'asse (z), l'equazione diviene:

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot g$$

dove (g) rappresenta l'accelerazione di gravità;

L'immediata integrazione dell'equazione dà il noto risultato per la pressione esercitata sulla base di una colonna di fluido di altezza (z) e densità (ρ):

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta z$$

Se il fluido è comprimibile, come l'aria, la variazione di pressione va calcolata mettendo in conto la modalità di variazione della densità del fluido sotto il proprio peso, usando la:

$$\Delta p = \int \rho \cdot g \cdot dz$$

Per valori piccoli dell'altezza (z) la variazione della pressione con l'altezza è piccola nel caso degli aeriformi, in considerazione del basso valore della densità. In un contenitore di gas (ad esempio una stanza a pressione atmosferica) la pressione può ritenersi costante anche perché il peso del gas è insufficiente a causare rilevanti variazioni di densità.

Se si considera un liquido il cui pelo libero è a contatto con l'atmosfera la pressione a una quota h al di sotto del pelo libero vale:

$$p = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot z$$

avendo considerato che, per l'incomprimibilità del liquido, la sua densità non varia con la profondità (e naturalmente questo vale se la profondità non è troppo elevata).

2.6.2

DENSITÀ E VOLUME SPECIFICO

Nell'ipotesi del continuo, la **densità**, (ρ), è definita come la massa dell'unità di volume:

$$\rho = \frac{1}{v} = \lim_{V \rightarrow V'} \left(\frac{m}{V} \right) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

dove (V') è il volume più piccolo per cui la materia può essere ancora considerata un continuo; normalmente (V') è sufficientemente piccolo da poter essere considerato un punto. Matematicamente la densità può essere così descritta come una funzione continua della posizione e del tempo. È dunque una proprietà intensiva che può variare da un punto all'altro all'interno di un sistema.

L'inverso della densità prende il nome di **volume specifico** e si indica con il simbolo (v):

$$v = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$$

Come la densità, il volume specifico è una grandezza intensiva e può variare da un punto all'altro.

Il volume specifico si misura in $[\text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$ e la densità, ovviamente, in $[\text{kg m}^{-3}]$.

La densità dell'acqua (a 4°C e $1,01325 \text{ bar}$) vale circa $1'000 \text{ kg m}^{-3}$, quella dell'aria nelle stesse condizioni circa $1,20 \text{ kg m}^{-3}$ e quella del mercurio circa $13'000 \text{ kg m}^{-3}$.

Il volume specifico e la densità dipendono dalla temperatura, sono pertanto proprietà termofisiche. Il volume specifico e la densità degli aeriformi dipendono anche dalla pressione mentre quelle dei liquidi e dei solidi ne sono praticamente indipendenti. Ecco perché i liquidi si caratterizzano come **incomprimibili**, a significare che il loro volume specifico non varia al variare della pressione.

Da non confondere con la densità, il peso specifico, (γ), è definito come il peso di un volume unitario di una sostanza:

$$\gamma = \rho g \quad [\text{N m}^{-3}]$$

con (g) che è l'accelerazione di gravità, pari a $9,8066 \text{ [m s}^{-2}]$. Il peso specifico si misura in $[\text{N m}^{-3}]$.

A volte, specialmente in Termodinamica chimica, è comodo esprimere il volume specifico su base molare invece che con riferimento alla massa. La quantità di una sostanza può essere data su base molare in termini di **chilomole** (kmol) e si scriverà:

$$n = \frac{m}{M}$$

Il numero di chilomoli di una sostanza si ottiene dividendo la massa (m) di sostanza in chilogrammi per la massa molare (M) in $[\text{kg kmol}^{-1}]$.

In Termodinamica si indica che una proprietà è espressa su base molare disegnando un trattino sopra il suo simbolo:

$$\bar{v} = Mv$$

(\bar{v}) è pertanto il volume specifico molare, misurato in $[\text{m}^3 \text{kmol}^{-1}]$.

2.6.3

TEMPERATURA

La temperatura è un concetto di uso quotidiano e tuttavia non è per nulla semplice da definire. È legato alla sensazione di caldo e di freddo, ma in maniera del tutto qualitativa e individuale e a volte anche fuorviante, come si può sperimentare se si toccano due materiali diversi, uno conduttore, come il ferro, e uno isolante, come il legno. Pur se i due materiali sono alla stessa temperatura dell'ambiente, toccandoli, uno dei due dà la sensazione di essere più freddo, ma ciò non è vero evidentemente.

Se non è possibile dare una definizione alla temperatura si può invece definire quando due corpi stanno alla stessa temperatura.

Chiunque sa che se si prende una bevanda calda e la si lascia su un tavolo in ambiente per un tempo sufficientemente lungo questa si raffredda mentre se si estrae dal frigo una bevanda fredda questa, lasciata sullo stesso tavolo, si riscalda. In Termodinamica questi fenomeni si classificano come scambi di calore tra sistema (bevanda) e ambiente, di verso naturalmente opposto nei due casi; la bevanda calda cede calore all'ambiente e si raffredda mentre la bevanda fredda assorbe calore dall'ambiente e si riscalda.

In entrambi i casi dopo un tempo sufficiente lo scambio di calore tra il sistema e l'ambiente cessa e cessa anche il raffreddamento (o il riscaldamento) della bevanda. Si dice che il sistema e l'ambiente hanno raggiunto l'**equilibrio termico**.

Il requisito perché sistema e ambiente siano in equilibrio termico è l'uguaglianza della proprietà **temperatura**.

Detto in altro modo, due corpi all'equilibrio termico hanno la stessa **temperatura**.

2.6.3.1

IL PRINCIPIO ZERO DELLA TERMODINAMICA

Sul concetto di equilibrio termico è basato il **principio zero della Termodinamica**, secondo il quale **due sistemi in equilibrio termico con un terzo sistema sono in equilibrio termico fra loro**.

Il nome "principio zero" deriva dal fatto che, nonostante stia concettualmente a monte del 1° e del 2° principio, venne formulato da Ralph H. Fowler (1889-1944) nel 1931, cioè molti anni dopo gli altri due.

La misura della temperatura si basa proprio sul principio zero: se, infatti, il terzo sistema cui si fa cenno è il termometro allora lo stesso principio può essere rivisto così: **due sistemi sono in equilibrio termico se un terzo sistema (il termometro) misura per entrambi lo stesso valore della proprietà temperatura**.

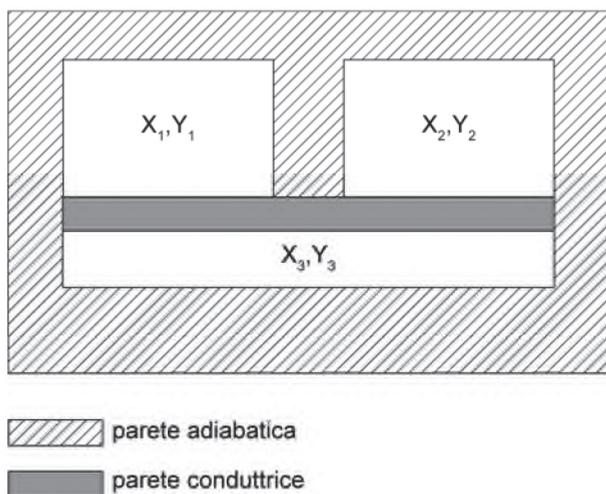


Figura 2.16
Principio zero della Termodinamica

Per portarsi all'equilibrio termico il sistema e l'ambiente debbono essere separati da pareti rigide e fisse ma non adiabatiche.

2.6.3.2

MISURA DELLA TEMPERATURA

Il terzo sistema è dunque lo strumento in grado di misurare la temperatura degli altri due sistemi in equilibrio termico, e prende appunto il nome di termometro.

Caratteristica del termometro è che una delle sue proprietà varia con la temperatura ed è correlabile con la temperatura stessa, mentre le altre proprietà indipendenti rimangono costanti. La proprietà che varia con la temperatura è detta **variabile termometrica** (per esempio la dilatazione di una colonna di mercurio, la pressione di un gas mantenuto a volume costante, la resistenza elettrica di un conduttore, la forza elettromotrice, la radiazione elettromagnetica, la suscettività magnetica, la velocità del suono).

Individuata la variabile termometrica occorre rintracciare la legge che correla i valori della variabile alla temperatura. La legge può essere qualsiasi, purché biunivoca, tale cioè che a un valore della variabile corrisponda uno e un sol valore di temperatura e viceversa.

Se (x) è la variabile termometrica, il legame più semplice è del tipo:

$$T(x) = ax$$

dove (a) è una costante da determinare sperimentalmente utilizzando uno dei due metodi seguenti.

Metodo a) – scala assoluta

È il metodo stabilito nel 1954 dalla Conferenza Generale di Pesi e Misure, secondo il quale la costante a si deriva assegnando un **valore preciso alla temperatura di uno stato fisso ben riproducibile**.

$$T(x_1) = ax_1$$

$$\frac{T(x)}{x} = \frac{T(x_1)}{x_1}$$

Lo stato fisso è il punto triplo dell'acqua cui si assegna la temperatura di:

$$T_{TR} = 273,16$$

da cui:

$$273,16 = ax_{TR}$$

e poi

$$T(x) = 273,16 \frac{x}{x_{TR}}$$

Il termometro considerato di riferimento, perché più preciso nonostante le difficoltà applicative, è quello che usa la pressione del gas ideale a volume costante come variabile termometrica (termometro a gas ideale). Tutti i gas, al tendere a zero della pressione, se confinati in un recipiente a volume costante mostrano un legame di proporzionalità tra temperatura e pressione.

Il legame tra temperatura e variabile termometrica è dato dall'espressione:

$$T(p) = 273,16 \lim_{p_{TR} \rightarrow 0} \left(\frac{p}{p_{TR}} \right)$$

che rappresenta a oggi la definizione operativa di temperatura.

Poiché, come si vedrà più avanti, un gas a pressione vicina allo zero può essere considerato un gas ideale, questi dispositivi sono conosciuti come termometro a gas ideale.

L'intervallo unitario di temperatura, pari alla frazione $\left(\frac{1}{273,16} \right)$ della temperatura del punto triplo dell'acqua, prende il nome di **kelvin** e si indica con il simbolo [K].

La scelta del valore di 273,16 per il punto triplo comporta che la temperatura di fusione normale (PFN, dove con l'aggettivo "normale" si indica la pressione atmosferica) dell'acqua vale 273,15, cioè 0,01 K in meno della temperatura del punto triplo.

Da un punto di vista concettuale l'ideale sarebbe quello di disporre di una scala indipendente dalle proprietà di una sostanza. Fu Lord Kelvin (1824-1907) a definire una scala di temperatura indipendente basata sul 2° principio della Termodinamica. Tale scala, nota come scala **termodinamica**, verrà introdotta nel seguito.

Qui è importante notare che esiste perfetta congruenza tra i valori di temperatura misurati sulla scala termodinamica e quelli misurati con il termometro a gas ideale, che per chiarezza possono essere definiti **temperatura empirica**. Quindi tra la **temperatura termodinamica** e la temperatura misurata dal termometro di riferimento (e quindi, di conseguenza, da qualsiasi altro termometro tarato su di esso) non esiste alcuna differenza.

Metodo b) – scala pratica

Il metodo comunemente adottato prima del 1954 si basa sul considerare due stati facilmente riproducibili, da cui:

$$T(x_1) = ax_1 \quad T(x_2) = ax_2$$

e poi:

$$T(x) = \frac{T(x_2) - T(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot x$$

La differenza tra le temperature dei due punti fissi viene divisa arbitrariamente in un certo numero di intervalli, detti **gradi**.

I due stati facilmente riproducibili possono essere il **punto di fusione normale**, **PFN**, e il **punto di ebollizione normale**, **PEN**, dell'acqua (l'aggettivo "normale" significa a pressione atmosferica, cioè a 101,325 kPa).

A questo punto è solo necessario fissare l'intervallo di unità di misura della temperatura. Se si sceglie:

$$T_{PFN} = 0 \quad T_{PEN} = 100$$

si ottiene la **scala celsius** (inventata da Anders Celsius, 1701-1744), con l'intervallo diviso in 100 parti uguali (da cui il nome comunemente usato di **scala centigrada**) di ampiezza pari a 1 °C.

Con il termometro a gas ideale la temperatura in gradi celsius è quindi definita dalla:

$$T(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{100}{p_{pen} - p_{pfn}} \cdot p \right)$$

Sia la scala celsius che la scala assoluta dividono l'intervallo tra PFN e PEN dell'acqua in 100 parti, per cui è:

$$1 [K] = 1 [^{\circ}C]$$

Ne discende che:

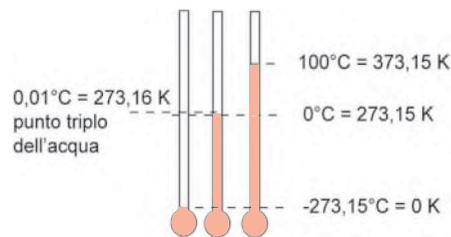
$$T[K] = T [^{\circ}C] + 273,15$$

$$T [^{\circ}C] = T [K] - 273,15$$

$$\Delta T [K] = \Delta T [^{\circ}C]$$

da cui si evince anche l'uso di indicare con il simbolo (T) sia la temperatura assoluta, misurata in [K], che la temperatura della scala celsius, misurata in [°C].

Figura 2.17
Scala assoluta
e scala Celsius



Il fatto che l'ampiezza dell'intervallo unitario di temperatura sia lo stesso per la scala assoluta e per la scala celsius ha importanti ricadute applicative. Avendo a che fare con una differenza di temperature alla prima potenza $\Delta T = (T_1 - T_2)$ si potranno usare entrambe le scale indifferentemente.

Se la differenza è fra temperature a potenza diversa dalla prima, come succede nello scambio termico per irraggiamento, le due scale danno risultati diversi e occorre usare sempre e solo la scala kelvin. Lo stesso vale per quelle situazioni in cui compare un solo valore della temperatura e non una differenza. In questi casi, nel dubbio, è meglio usare la scala kelvin il cui impiego è sempre corretto cosa che non sempre accade per la scala celsius.

Un diverso intervallo di temperatura tra i punti fissi è quello tipico della **scala fahrenheit**:

$$T_{PFN} = 32$$

$$T_{PEN} = 212$$

si ottiene la **scala fahrenheit**, con l'intervallo diviso in 180 parti uguali pari a 1°F. La scala fahrenheit è usata soprattutto nei paesi Anglosassoni.

La scala assoluta collegata alla scala dei gradi fahrenheit è la scala rankine.

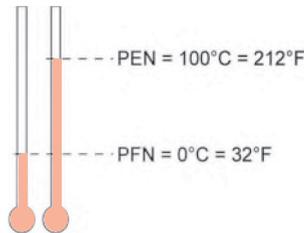


Figura 2.18

Scala Celsius e scala Fahrenheit

$$1 [R] = 1 [^{\circ}F]$$

$$T[R] = T[^{\circ}F] + 459,67$$

$$T[^{\circ}F] = T[R] - 459,67$$

$$\Delta T [R] = \Delta T [^{\circ}F]$$

La conversione tra scala celsius e scala fahrenheit (e tra scala kelvin e scala rankine) si ottiene con i seguenti algoritmi

$$T [^{\circ}C] = \frac{5}{9}(T [^{\circ}F] - 32)$$

$$T [^{\circ}F] = \frac{9}{5}(T [^{\circ}C] + 32)$$

$$T [K] = \frac{5}{9}T [R]$$

$$T [R] = \frac{9}{5}T [K]$$

La Tabella 2.1 riporta il valore della temperatura di alcuni punti fissi misurati nelle diverse scale.

punto fisso	T [°C]	T [K]	T [R]	T [°F]
zero assoluto	-273,15	0	0	-459,67
PFN dell'acqua	0	273,15	491,67	32
punto triplo dell'acqua	0,01	273,16	491,69	32,02
PEN dell'acqua	100	373,15	671,67	212

Tabella 2.1

Temperatura dei principali punti fissi misurati su diverse scale

2.6.3.3

LA SCALA INTERNAZIONALE DI TEMPERATURA – ITS90

Il termometro di riferimento per le misure di assoluta precisione è dunque il termometro a gas ideale, il cui uso è riservato ai laboratori specializzati.

Per consentire la taratura dei termometri di uso pratico si è deciso di definire, attraverso misure molto accurate fatta appunto con il termometro a gas ideale, la temperatura di un certo numero di punti fissi facilmente riproducibili. Si tratta di punti tripli o punti di fusione ed ebollizione normale di sostanze pure che costituiscono, insieme alle regole che definiscono come deve essere fatta l'interpolazione tra gli stessi punti, la **Scala Internazionale di Temperatura, ITS**.

L'ultima revisione della ITS è stata fatta nel 1990. La Tabella 2.2 riporta i punti fissi della ITS-90.

Tabella 2.2
Punti fissi della
ITS90

	T_{90}/K	$T_{90}/^{\circ}\text{C}$	Substance ^a	State ^b
1	3 to 5	-270,15 to -268,15	He	V
2	13,8033	-259,3467	e-H ₂	T
3	~17,0	~-256,15	e-H ₂ (or He)	V (or G)
4	~20,3	-252,85	e-H ₂ (or He)	V (or G)
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O ₂	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	234,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H ₂ O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	M
11	429,7485	156,5985	In	F
12	505,078	231,928	Sn	F
13	692,677	419,527	Zn	F
14	933,473	660,323	Al	F
15	1234,93	961,78	Ag	F
16	1337,33	1064,18	Au	F
17	1357,77	1084,62	Cu	F

^a All substances except ³He are of natural isotopic composition, e-H₂ is hydrogen at the equilibrium concentration of the ortho- and para- molecular forms.

^b For complete definitions and advice on the realization of these various states, see "Supplementary Information for the ITS-90". The symbols have the following meanings:

V: vapour pressure point; T: Triple Point (temperature at which the solid, liquid and vapour phases are in equilibrium); G: gas thermometer point; M, F melting point, freezing point (temperature, at a pressure of 101 325 Pa, at which the solid and liquid phases are in equilibrium).

I simboli T_{90} e T_{90} stanno a indicare le temperature in [K] o [$^{\circ}\text{C}$] misurate con termometri calibrati ai punti fissi della ITS90.

[...]