

CALORE E TEMPERATURA

La *Termodinamica* utilizza dei concetti del linguaggio comune come *calore* e *temperatura*, ha quindi per oggetto lo studio delle trasformazioni del calore legate alla variazione di temperatura; queste trasformazioni sono regolate dai 3 **principi della termodinamica**, assiomi assolutamente veri su cui si fonda il mondo dell'energia e del calore.

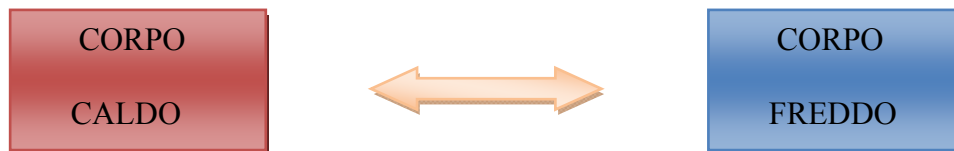
Occorre, però, precisare la differenza tra calore e temperatura; in passato generalmente si pensava che il calore fosse una sostanza, un fluido, detto "calorico", capace di migrare da un corpo caldo ad uno freddo (concetto fluido-calorico). Il *calore* è **energia** in movimento, dunque lavoro espresso o esprimibile, in particolare è lavoro potenziale, una forma di accumulo di energia (come tale si misura in **Joule**). La *temperatura*, invece, è una grandezza fisica fondamentale, che ci fornisce la misura dello stato termico di un corpo (nel S.I. viene espressa in **Kelvin**).

Un corpo caldo ha tanta temperatura o tanto calore?

Ha tanta temperatura, perché un corpo non possiede calore, esso si percepisce solo quando ho uno spostamento di energia da un corpo all'altro, quindi il calore è trasporto di energia tra due oggetti a causa della loro differenza di temperatura.

PRINCIPIO ZERO

*Quando pongo a contatto due corpi che hanno una diversa temperatura, si ha un flusso di calore dal corpo più caldo a quello più freddo fino a quando entrambe non raggiungono la stessa temperatura, raggiungendo l'**equilibrio termico**.*



Calore e Temperatura sono legati da un rapporto di CAUSA-EFFETTO: da un lato la differenza di temperatura è la causa del flusso di calore tra i corpi; dall'altro è il calore a determinare la differenza di temperatura.

La differenza di temperatura si indica con $\Delta T = T_2 - T_1$

ΔT tra due diversi corpi a e b: è la causa del trasporto di calore; $T_a - T_b$ (principio zero)

ΔT all'interno dello stesso corpo: è l'effetto del calore ricevuto; $T_{b \text{ fin}} - T_{b \text{ in}}$ (primo principio)

Il flusso di calore avviene sempre dal corpo più caldo a quello più freddo e mai viceversa.

Storicamente, però, venne enunciato prima il principio uno e poi il principio zero, perché quando venne enunciato il principio uno ancora si credeva che il calore fosse un fluido, mentre era più intuitivo capire che un corpo sottoposto a calore aumentasse la sua temperatura.

Dal punto di vista meccanico il calore è trasporto di energia, dato dalla vibrazione delle molecole presenti nella materia, le quali sottoposte all'innalzamento della temperatura si "agitano", quando si raggiunge l'equilibrio termico si ha lo stesso livello di agitazione molecolare, non c'è più trasporto di energia, questa situazione corrisponde al principio zero. Se in natura vigesse solo il principio zero tutto avrebbe la stessa temperatura e si arriverebbe alla morte termodinamica dell'universo; le

differenze di temperatura, e in generale tutte le differenze, e i flussi di energia che ne conseguono rendono possibile la vita.

TERMOMETRIA

Il principio zero è il fondamento della **termometria**, che tratta la misurazione della temperatura, attraverso la determinazione del valore di una proprietà di un corpo, e sta alla base del funzionamento del suo strumento di misurazione: il **termometro**.

Il termometro misura la temperatura di un corpo tramite un contatto in cui si stabilisce un flusso di calore; la maggior parte dei termometri ne sentono l'effetto, cioè l'innalzamento di temperatura, altri, invece, ne sentono il flusso, ad esempio la termocamera ad infrarossi (questi sono detti *flussometri*), entrambe le categorie ci forniscono comunque la misura della temperatura.

In realtà usando il termometro ottengo una misura "falsata": in quanto conosco la temperatura che ha il corpo dopo avergli sottratto calore avendoci messo il termometro a contatto; misuro, infatti, la temperatura del corpo dopo il trasporto di energia, non saprò quindi mai davvero la temperatura del corpo prima della misurazione. Durante il contatto il termometro, a causa delle sue caratteristiche termo-fisiche, fa cambiare temperatura al corpo. Ad esempio: un termometro piccolo e leggero a contatto con un corpo grande e massivo non influisce sulla temperatura di quest'ultimo; mentre un termometro più massivo e pesante a contatto con lo stesso corpo, causerà un abbassamento della temperatura anche di alcuni gradi. Quindi un termometro piccolo mi dà una misura meno artefatta, uno più grande influisce maggiormente nella misura.

Va inoltre sottolineato che non esiste un misuratore di vera temperatura, poiché essa è sempre misurata indirettamente, in quanto noi la esprimiamo in relazione ad altre grandezze fisiche "normali", misurabili, nel termometro, le quali variano al variare della temperatura (lunghezza, volume, pressione, ecc..). Tali grandezze, definite ausiliarie, prendono il nome tecnico di **caratteristiche termometriche**; alcune di esse variano linearmente con temperatura, altre no.

Si preferisce utilizzare una grandezza lineare in modo tale che: nota la grandezza termometrica x e note le due costanti di taratura del termometro, si riesca a stimare con una semplice equazione lineare ($T = ax + b$, eq.^{ne} di una retta) la temperatura in funzione di x . Si usano anche i termometri non lineari, poiché oggi i calcoli vengono affidati a calcolatori digitali tramite opportune curve di taratura.

I primi termometri furono a mercurio: un liquido che si dilata dentro un tubo, si taravano i due punti fissi e si ipotizzava una scala lineare.

Tradizionalmente, in termometria ambientale a temperature normali, i due punti fissi che si prendono sono: **punto di congelamento (0 °C)** e **punto di ebollizione (100 °C) dell'acqua**.

LE SCALE TERMOMETRICHE

- **Scala Celsius (°C)** : è una scala centigrada, 100 unità nell'intervallo tra il punto in cui l'acqua gela (0 °C) e il punto in cui evapora (100 °C); si può costruire un intorno più ampio che va da -50 °C a +150 °C. Questa scala viene usata per tutte le misure comuni e commerciali e per molte misure scientifiche in quasi tutti i paesi;
N.B. Non si possono misurare temperature troppo lontane dall'ultimo punto di taratura.
- **Scala Réaumur (°R)** : è una scala ormai abbandonata, sono fissati i medesimi punti di riferimento fondamentali della scala Celsius, ma l'intervallo tra di essi è suddiviso solo in 80 gradi, detti gradi Réaumur .
- **Scala Fahrenheit (°F)** : è usata principalmente nei paesi anglosassoni e in quei Paesi che non hanno aderito al S.I. ; al punto di fusione del ghiaccio (0 °C) corrispondono 32° F e al punto di ebollizione dell'acqua (100 °C) corrispondono 212 °F. La temperatura t in gradi

centesimali e la corrispondente temperatura f in gradi Fahrenheit sono legate quindi dalla relazione

$$t = 5/9 (f - 32).$$

- **Scala termodinamica delle temperature assolute (usata nel S.I.):** la scala termodinamica delle temperature assolute universalmente adottata è la scala termometrica di lord Kelvin. Lo zero di questa scala è lo zero assoluto ($T = 0$), cioè la temperatura alla quale il volume di un gas perfetto si annulla (si osservi che T non è mai negativa), mentre il valore del grado di questa scala, detto grado Kelvin (**K**) è fissato nel S.I. stabilendo che il punto triplo dell'acqua sia 273,16 K (cioè 0,01 °C) e che la temperatura dell'acqua bollente a pressione atmosferica standard (101325 Pa) sia 373,15 K. L'intervallo di temperatura di 1 Kelvin coincide con 1 grado Celsius; la variazione di temperatura è la stessa, è quindi possibile utilizzare indifferentemente gradi Celsius o Kelvin in tutte quelle formule dove è richiesta una differenza di temperatura ΔT .

Osservazioni: La scala di temperatura Celsius si indica con t minuscolo, mentre quella assoluta con T grande; esse sono legate tra loro dalla relazione:

$$T = t + 273,15 [K]$$

Esempio:

Casa riscaldata $T_{\text{int}} = 20 \text{ °C} = 293,15K$

$T_{\text{est}} = 0 \text{ °C} = 273,15K$

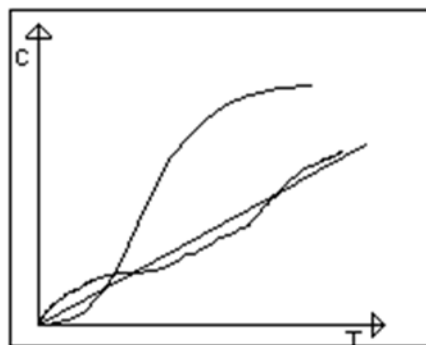
$\Delta T = ? \rightarrow \Delta T = 20 \text{ °C}$

$\Delta T = 20 \text{ K}$

NON $\Delta T = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ K} \rightarrow$ Il ΔT non cambia

IL TERMOMETRO E LA SUA TARATURA

Ogni termometro è descritto da un grafico, detto *curva di taratura*, sul quale è descritto l'andamento della caratteristica termometrica in funzione della temperatura. A seconda dell'andamento di tale curva si avranno comportamenti più o meno lineari: è uno degli elementi caratteristici per la classificazione dei tipi di termometro.



Esempi di diversi tipi di curve di taratura

I termometri possono essere divisi in campioni primari (i più precisi, l'errore massimo di questi strumenti deve essere contenuto entro il millesimo di grado), secondari, terziari, etc. a seconda della precisione nel livello di taratura e misura di temperatura; i termometri primari sono strumenti da laboratorio, assolutamente inadatti ad usi industriali o domestici: sono di riferimento e vengono utilizzati per tarare gli altri strumenti, o per esperimenti che richiedano grande precisione. Di tali campioni ve ne è uno per ogni stato della C.E.: esso è depositato presso un apposito istituto e serve

come riferimento per la taratura di tutti i termometri del Paese. In Italia, il campione primario si trova all'Istituto Colonnetti di Torino e all'istituto Elettrotecnico G. Ferraris. A livello di coordinazione superiore si trova il W.E.C.C. (Western European Corporation Calibration): esso coordina a livello Europeo lo scambio di campioni tra i centri di taratura nazionali.

- **Termometro a gas perfetto:** gas perfetto → gas rarefatto

i termometri a gas perfetto possono essere divisi in due categorie:

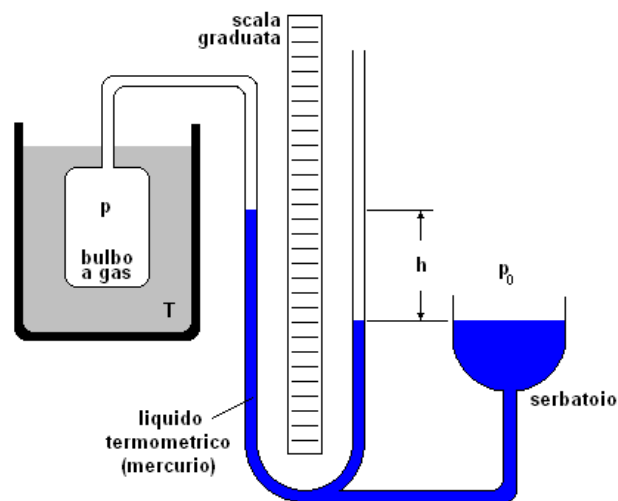
- a *volume costante*, leggo le variazioni di pressione, dovute all'aumento di temperatura;
- a *pressione costante*, leggo le variazioni del volume del gas.

In entrambi il principio di funzionamento si basa sulla ben nota equazione di stato dei gas perfetti:

$$pV = nR_0T$$

$$R_0 = 8314 \frac{J}{kmolK}$$

R_0 = costante dei gas
 T = temperatura assoluta in K
 n = numero di moli



Schema di principio di un termometro a gas perfetto

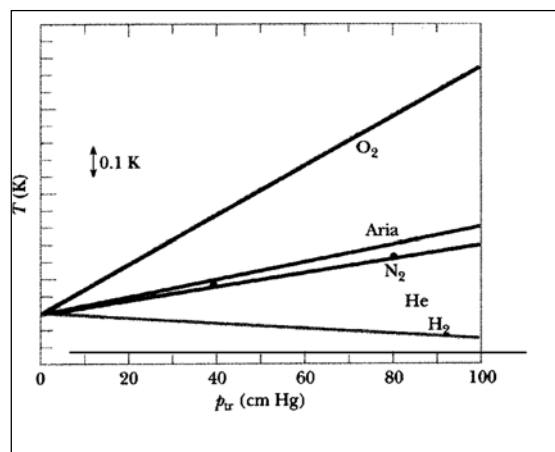
- **Volume costante:** il dispositivo è composto da un piccolo contenitore ceramico collegato ad un tubicino trasparente di sezione molto piccola a forma di “U”, riempito in parte da un liquido colorato (perché ben visibile); nella parte inferiore della “U” si innesta un altro tubo, questa volta flessibile che termina in una ampolla, anch’essa riempita dello stesso liquido. Si usa la ceramica in quanto è uno dei materiali che meno si dilatano al variare della temperatura, si ha infatti la necessità di un volume il più possibile costante. Lo strumento è completato da una scala graduata inserita all’interno della “U”, che permetterà di misurare le variazioni di altezza del liquido (e quindi di pressione). All’interno del contenitore ceramico si mette un gas puro, solitamente Ossigeno, Idrogeno, Elio, o Azoto: quelli che meglio approssimano i gas perfetti. Per tarare il termometro si segue questo procedimento: per prima cosa si deve incidere un riferimento sulla parte sinistra del tubo a “U”, che segnerà il volume del gas, che non deve variare, si immerge poi il contenitore in un ambiente a temperatura ben nota, per esempio in un ambiente in cui l’acqua è al punto triplo. A questo punto si lascia stabilizzare il termometro, poi, misurando la differenza di altezze del liquido tra i due rami della “U”, è possibile calcolare la pressione a cui si trova il gas in questo sistema. Una volta effettuata la taratura, mettendo in contatto il recipiente con il corpo di cui voglio conoscere la temperatura, basta attendere che il termometro sia in equilibrio termico e

leggere la nuova altezza h del liquido di destra, avendo cura di spostare l'ampolla del tubo flessibile in modo che il volume del gas non vari (ossia che nel ramo sinistro della "U" il liquido rimanga a livello del riferimento). A questo punto è possibile calcolare il nuovo valore p della pressione del gas, e quindi risalire alla temperatura del nuovo sistema grazie alla relazione

$$T(p) = (273.15 \text{ K}) \frac{p}{p_0}$$

con p pressione appena misurata e p_0 pressione rilevata a 0 gradi

Osservando il comportamento della pressione, a volume costante, di gas differenti su un piano cartesiano (p, T), si può notare che tutte le rette che descrivono i diversi gas, se prolungate verso le basse temperature, puntano asintoticamente ad un unico valore. Questo fatto vale anche qualora la pressione tende a zero: in tale zona, impiegando gas diversi, si otterrà la stessa misura.



Caratteristica di temperatura di alcuni gas, al variare della pressione

- **Pressione costante:** costruttivamente è simile al tipo descritto in precedenza: esso dovrà però funzionare a pressione costante cioè il livello del liquido stavolta sarà mantenuto identico nei due rami della "U" (in modo da avere la stessa pressione); si dovranno misurare poi le variazioni di altezza del livello (quindi di volume) del liquido per poter determinare la nuova temperatura. Questo è possibile grazie all'equazione:

$$T(V) = (273.15 \text{ K}) \frac{V}{V_0}$$

con V volume appena misurato e V_0 volume rilevato a 0 gradi.

Possiamo infine elencare vantaggi e svantaggi del termometro a gas perfetto:

Vantaggi:

1. è uno strumento molto preciso, è basato sulla radice fisica del principio dei gas perfetti; copre un vasto range di temperatura dai -270°C (Usando l'Elio che liquefa appunto solo a 3K) ai 1700°C (limite posto dalla porcellana con cui esso è costruito);
2. misura in modo diretto la temperatura Kelvin: per questo è ottimo per tarare gli altri strumenti e talvolta può essere un termometro campione (primario).

Svantaggi:

1. è fondamentalmente uno strumento per usi da laboratorio, non è né di pratico impiego, né di facile trasportabilità;
2. è inadatto a misurare temperature di corpi molto piccoli (perché è molto difficile costruire un termometro a gas di dimensioni ridotte);
3. è delicato dal punto di vista meccanico: anche le minime accelerazioni perturbano di molto il livello del liquido.

- Termometro a liquido:



Esempio di termometro a liquido

non assume un comportamento esattamente lineare, perché non esistono liquidi perfetti; il liquido utilizzato è solitamente mercurio oppure alcool o toluene quando le temperature assumono valori molto bassi. La lettura di temperatura avviene per mezzo di una scala graduata posta di fianco al capillare. Le misure possono essere effettuate tra i -180°C e i 650°C , anche se per andare molto oltre i 100°C , o molto sotto i -25°C si richiedono soluzioni tecnologiche che elevano molto i costi.

Vantaggi:

1. la lettura di temperatura immediata, il che lo rende facilmente utilizzabile; può esser facilmente costruito in serie, per cui costa poco;
2. se usato su range di temperatura molto limitati, si possono apprezzare variazioni molto ridotte di temperatura.

Svantaggi:

1. se la taratura, viene sballata per qualsiasi motivo, difficilmente può essere ritarato;
2. non ha un comportamento strettamente lineare;
3. se viene usato su ampi intervalli di temperature, la scala graduata non può essere molto fine;
4. è piuttosto fragile e difficile da smaltire.

- Termometro a solido:



Esempio di termometro a solido

Classici termometri a lancetta che sfruttano la differenza tra le dilatazioni termiche di due nastri metallici di natura diversa (i cui coefficienti di dilatazione termica sono cioè diversi), saldati tra loro e forgiati a elica, a lamina o a spirale. La differente dilatazione dei due metalli provoca una deformazione del nastro che viene amplificata con un sistema di leve e trasmessa a un indice che si muove su una scala graduata.

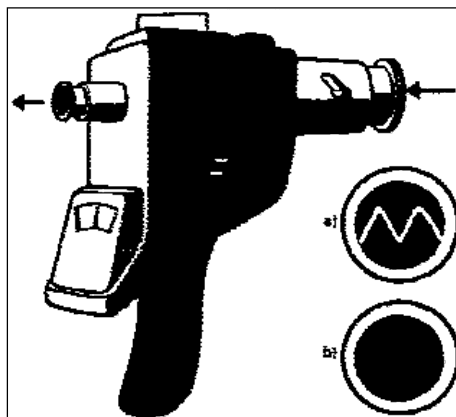
Vantaggi:

1. Il costo è minimo;
2. E' di semplice utilizzo;
3. E' robusto.

Svantaggi:

1. La precisione e l'accuratezza sono piuttosto scarse, tanto che possono originare errori anche di 5-10°C.

- Pirometro ottico:



Pirometro ottico tipo a filamento evanescente

questo tipo di termometro sfrutta il colore di un oggetto per individuarne la sua temperatura: infatti ogni corpo emette radiazione elettromagnetica su tutto lo spettro, con un massimo molto pronunciato che dipende solo dalla temperatura. Il pirometro ottico ha la forma di un cannocchiale, in cui il campo visivo è separato in metà: la parte sinistra serve per mettere a fuoco il corpo, mentre quella destra contiene un oggetto preso come riferimento

Diversamente, tale riferimento, può essere costituito da un disco diviso in vari settori colorati, che viene fatto ruotare fino a che il colore del corpo in esame non corrisponde perfettamente a quello del settore circolare. A questo punto i corpi sono teoricamente alla stessa temperatura: in seguito al

colore ottenuto posso così conoscerne il valore. Questo sistema funziona solo con temperature alte, e non si è trovato un metodo oggettivo di misura del colore.

Vantaggi:

1. Rileva la temperatura senza necessità di contatto, per cui si possono ottenere misure in un intervallo inaccessibile agli altri tipi di termometri, specialmente per valori molto elevati.

Svantaggi:

1. E' abbastanza costoso;
2. Non è molto preciso, si misurano dai 1500 ai 3000°C con errori relativi del 10-15 %.

- Termocamera a infrarossi:



non misura la temperatura ma *l'intensità di radiazione luminosa* che emanano i corpi, che è legata alla temperatura dalla legge di Stefan :

$$I = \sigma_0 a T^4$$
$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

I= intensità di radiazione luminosa
 σ_0 = costante di Stefan
a= emissività del materiale

La caratteristica termometrica è legata alla temperatura da una quarta potenza: questo la rende fortemente non lineare. Tipicamente questo strumento si avvale di una telecamera sensibile alle radiazioni infrarosse che fornisce le scansioni termografiche degli oggetti da studiare, ha senso se guardo corpi omogenei, perché altrimenti i cambiamenti di colore possono essere dovuti alla diversa emissività dei materiali.

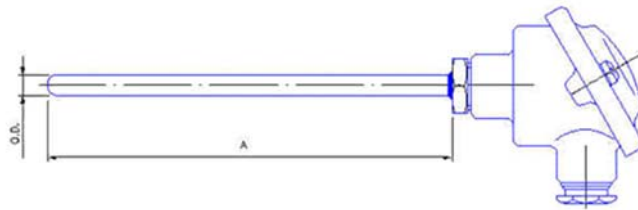
Vantaggi:

1. funziona a qualsiasi temperatura, l'unico limite è tecnologico, ossia si deve avere la possibilità di misurare l'intensità luminosa a particolari lunghezze d'onda (molto lunghe per le basse temperature).

Svantaggi:

1. il sistema di misura è di solito molto costoso;
2. misura l'intensità di radiazione luminosa, non la temperatura.

- Termoresistenza:



Esempio di termoresistenza

la termoresistenza è uno strumento con il quale si può calcolare la temperatura facendo passare della corrente all'interno di un filo elettrico, così ne misuro la resistenza ($R = \frac{\Delta V}{I}$; dove ΔV è la differenza di tensione e I è l'intensità di corrente elettrica).

La resistenza R varia secondo la legge approssimata:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \Delta T)$$

R_0 e α_0 sono costanti di taratura
 α_0 = coefficiente di temperatura
 R_0 = resistenza a 0°

Di seguito riportiamo una tabella con i valori di R_0 (calcolabile come $\rho \cdot L / Sez$, con L = lunghezza del filo e Sez = sezione del filo) e α_0 per i più comuni materiali conduttori, semiconduttori ed isolanti:

Caratt. fisiche Materiale	Resistività a 0°C $\rho = \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$	Coeff. di temperatura ($\alpha_0 = 1/\text{K}$)
Conduttori		
Argento	0.015	0.0036
Rame elettrolitico	0.016	0.0042
Rame	0.017	0.0043
Bronzo fosforico	0.018	0.0040
Oro	0.021	0.0036
Alluminio	0.028	0.0043
Tungsteno	0.050	0.0042
Ottone	0.085	0.0039
Ferro puro	0.100	0.0050
Platino	0.103	0.0036
Ferro dolce	0.13	0.0048
Stagno	0.13	0.0045
Piombo	0.20	0.0043
Argentana	0.35	0.00017
Manganina	0.40	0.00001
Ferro-Silicio	0.50	0.001
Costantana	0.50	0.000008
Ferro-Nichel	0.80	0.0007
Mercurio	0.94	0.00089
Nichel-Cromo	1	0.0001
Semiconduttori		

Carbone	30	0.0004
Germanio	$47 \cdot 10^4$	Neg.
Silicio	$2.3 \cdot 10^9$	Neg.
	Isolanti	
Carta secca	10^{14}	
Bachelite	$5 \cdot 10^{16}$	
Vetro	$9 \cdot 10^{16}$	
Olio minerale	10^{17}	
Porcellana	$2 \cdot 10^{19}$	
Polistirolo	10^{22}	

Le termoresistenze più comunemente utilizzate sono le Pt-100 (Pt sta per platino, 100 sono gli Ω a 0°C quindi corrisponde a R_0). Vengono tuttavia costruiti sensori a resistenza con altri materiali: il rame, ad esempio, è utilizzato laddove si richiede un' elevata linearità, il nichel dove si desidera contenere i costi e/o avere elevata sensibilità.

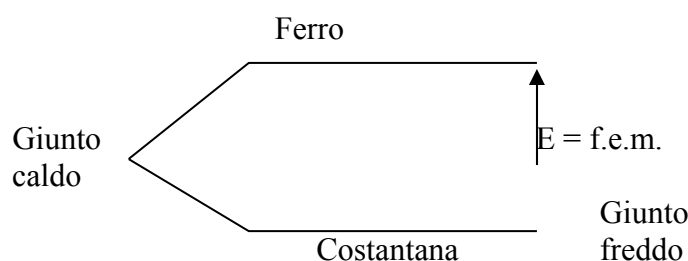
Vantaggi:

1. buone caratteristiche di linearità;
2. non abbisogna di tarature continue se la resistenza è ben isolata dall'esterno;
3. è sempre precisa e piuttosto accurata;
4. può svolgere misure in un campo vasto compreso fra i -260°C e $+1000^\circ\text{C}$;
5. è robusta, ed ha una vita piuttosto lunga.

Svantaggi:

1. bassa sensibilità;
2. può essere piuttosto costosa;
3. non è adatto a misure di temperatura di corpi molto piccoli, in quanto non è facilmente miniaturizzabile, e presenta quindi notevole inerzia termica

- **Termocoppia:** è un dispositivo il cui funzionamento si basa sull'effetto *Seebeck*: se si pongono due metalli diversi a contatto in modo da formare un anello e si portano le due giunzioni (o giunti) a temperature differenti, in queste si generano tensioni di valore differente, che provocano il fluire nell' anello di una corrente di intensità proporzionale alla differenza di temperatura tra le due giunzioni. Se, come mostrato in figura seguente, si realizza un circuito costituito da due metalli diversi uniti in corrispondenza del punto dove si vuole misurare la temperatura, ossia il giunto caldo, e scollegati in corrispondenza del giunto freddo, qui, grazie all' effetto di cui sopra, si misurerà una certa differenza di tensione (dell'ordine del millivolt), proporzionale alla differenza di temperatura dei due giunti.



Struttura della termocoppia

In relazione alle condizioni ambientali e alle temperature da rilevare, vengono impiegate diverse coppie di metalli (tipo di termocoppia indicata con la lettera maiuscola dell'alfabeto), che forniscono tensioni diverse, e a cui corrispondono range termici di impiego e valori di tensione forniti diversi:

Tipo	Composizione(+/-)	Range (°C)
C	W-Rh(5%)/W-Rh(26%)	0 - 2300
E	Chromel / Costantana	0 - 982
J	Ferro / Costantana	0 - 760
K	Chromel / Alumel	-184 - 1260
R	Pt-Rh (13 %) / Pt	0 - 1593
S	Pt-Rh (10 %) / Pt	0 - 1538
T	Rame / Costantana	-180 - 400

Vantaggi:

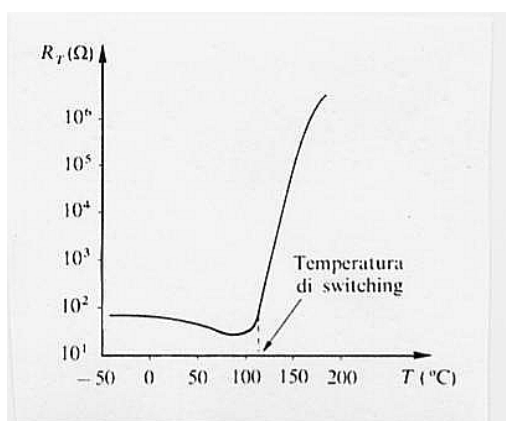
1. ampio range di funzionamento;
2. possibilità di impiego di materiali resistenti alle diverse condizioni ambientali;
3. costi contenuti;
4. grazie alle loro dimensioni ridotte, e conseguente piccola inerzia termica sono particolarmente adatte a misure in sistemi molto piccoli;
5. hanno un'accuratezza elevata, circa 0.1°C.

Svantaggi:

1. sono poco precisi: con la coppia rame-costantana si misura una forza elettromotrice di 0,42mV/°C, quindi un valore piccolo, difficile da misurare, che risente con molta facilità di disturbi esterni (rumore), difficili da schermare;
2. la mancanza di linearità.

- **Termistore o termometro elettronico:** si tratta di sensori che basano il loro funzionamento sullo stesso principio delle termoresistenze, con la differenza che l'elemento sensibile non è un metallo ma un semiconduttore in silicio.

I termistori NTC (negative temperature coefficient, coefficiente di temperatura α_0 negativo), per la loro costruzione, presentano una caratteristica resistenza-temperatura fortemente non lineare: necessitano di un apposito circuito di linearizzazione. I PTC (positive temperature coefficient, coefficiente di temperatura α_0 positivo) sono caratterizzati da una caratteristica che presenta un brusco cambiamento di pendenza quando viene raggiunta la cosiddetta temperatura di switching. Esistono tuttavia dei particolari PTC in silicio, aventi una caratteristica più regolare.



Caratteristica tipica di un PTC ceramico

Vantaggi:

1. elevata sensibilità (la resistenza può variare del 5% per ogni °C di variazione di temperatura), sono usati per costruire termometri di precisione;
2. ridotti tempi di risposta (legati alla bassa inerzia termica);
3. versatilità di impiego.

Svantaggi:

1. la non linearità;
2. il ridotto intervallo di temperature di impiego.

ESERCIZI

1. A) Noti il Volume, la Pressione e la Temperatura calcolare, tramite l'equazione dei gas perfetti, il numero di moli.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	V=		1 m³						
2	p=		100000 Pa						
3	t=		20 °C						
4	T=		293,15 K		pV= nR₀T		n.moli=?		
5						n=	0,04103 kmol		
6									
7	R₀=		8314 J/kmolK						
8									
9									

- B) Facendo variare il Volume, cambia il numero di moli:

