



TERMOMETRI

- Caratteristiche degli strumenti
- Perturbazione di un termometro
- Termometro a liquido
- Prontezza di un termometro
- Effetto Seebeck
- Termometro a termocoppia
- Termometri a resistenza, termistori, pirometri

Caratteristiche degli strumenti

- Intervallo di funzionamento:

- Valore massimo (portata)
- Valore minimo (soglia)

- Prontezza:

tempo necessario affinché lo strumento reagisca alla sollecitazione

- Sensibilità: $S = \Delta(\text{risposta}) / \Delta(\text{grandezza})$

$\Delta(\text{risposta})$ = variazione della risposta dello strumento

$\Delta(\text{grandezza})$ = variazione della grandezza da misurare

- Errore di sensibilità (o risoluzione):

è legato alla sensibilità dello strumento. Esprime la variazione minima della grandezza da misurare che lo strumento riesce ad apprezzare

- Precisione:

dà un'indicazione di quanto la risposta di uno strumento dipenda solo dalla grandezza che si vuole misurare e non da altre cause esterne

Occorre inoltre tener presente la perturbazione che il processo di misura induce sul fenomeno in esame. Questa corrisponde ad un errore sistematico dovuto al processo di misura.

Perturbazione di un termometro (errore sistematico)

T_1 = temperatura del sistema del quale si vuole misurare la temperatura, isolato dall'ambiente (non scambia calore)

C_1 = capacità termica del sistema

T_A = temperatura dell'ambiente (Ipotesi: $T_1 > T_A$)

C_2 = capacità termica del termometro

- Mettiamo in contatto il termometro, inizialmente a temperatura ambiente, con il sistema. Una volta raggiunto l'equilibrio termodinamico tra sistema e termometro, si raggiungerà la temperatura T_2

Si avrà: $T_1 > T_2 > T_A$ (con l'ipotesi $T_1 > T_A$)

- Ricaviamo quanto vale T_2 . Supponendo che il sistema scambi calore solo con il termometro, si ha:

$$C_2 \cdot (T_2 - T_A) = C_1 \cdot (T_1 - T_2)$$

Da cui:

$$T_2 = \frac{T_1 + \frac{C_2}{C_1} T_A}{1 + \frac{C_2}{C_1}}$$

Quindi la temperatura che misura il termometro (T_2) è diversa dalla temperatura originaria del sistema (T_1). L'operazione di misura ha raffreddato il sistema.

N.B. Se $C_2 \ll C_1 \Rightarrow T_2 \approx T_1$

- L'entità della perturbazione vale:

$$\Delta T_{2 \text{ sist.}} = |T_1 - T_2| = \frac{|T_1 - T_A| \frac{C_2}{C_1}}{1 + \frac{C_2}{C_1}} = \frac{|T_1 - T_A|}{1 + \frac{C_1}{C_2}}$$

- Se la perturbazione introdotta dal termometro è minore della risoluzione dello strumento, allora l'errore sistematico si può trascurare, altrimenti la lettura del termometro va corretta tenendo conto della perturbazione.

Termometro a liquido

- Il principio su cui si basa il "*termometro a gas perfetto*" (termometro campione), richiede una tecnica di uso assai delicato e quindi raramente impiegata nella pratica di laboratorio. In pratica si usano sempre termometri secondari che vengono tarati su termometri campione.
- Il più antico e ancor oggi assai diffuso è il *termometro a liquido*, che sfrutta la dilatazione di un liquido posto in un tubo graduato. Esso è costituito da un bulbo di vetro connesso con un capillare anch'esso di vetro e contenente un liquido opportunamente scelto. Il funzionamento del termometro a liquido è basato sulla differenza del coefficiente di dilatazione termica tra il liquido e il vetro.
- Esempio: il mercurio ha $\alpha=0.0001826 \text{ K}^{-1}$, mentre il vetro ha un coefficiente circa 100 volte inferiore.
- La precisione di questo strumento è limitata dall'attrito esistente tra la superficie interna del capillare ed il liquido, che fa sì che non sempre il livello del liquido stesso si fermi alla stessa quota quando il termometro si porta alla stessa temperatura.
- L'uso del termometro a capillare è limitato dalla difficoltà di accoppiamento termico con campioni solidi, ed inoltre esso non si presta bene ad essere interfacciato con sistemi di registrazione o di controllo automatico della temperatura.

Termometro a liquido: intervallo di funzionamento

- Il liquido termometrico viene scelto anzitutto a seconda dell'intervallo termico in cui si devono eseguire le misurazioni: tale intervallo non può infatti eccedere gli estremi fissati dalla temperatura di solidificazione e dalla temperatura di ebollizione del liquido.
- Ad ogni modo con un termometro a liquido non si possono di norma misurare temperature superiori a 500 °C circa, perché a tali temperature il vetro comincia a deformarsi.
- È bene inoltre che il liquido termometrico abbia un coefficiente di dilatazione debolmente dipendente dalla temperatura; ciò consente infatti che la scala sia praticamente lineare. La presenza di impurità nel liquido influenza notevolmente l'andamento del coefficiente di dilatazione termica in funzione della temperatura.
- Il liquido termometrico deve inoltre possedere un coefficiente di conduzione termica abbastanza elevato da poter ritenere, istante per istante, tutto il liquido alla stessa temperatura.
- Il mercurio soddisfa molto bene questi requisiti, inoltre l'intervallo tra temperatura di solidificazione (-38.87 °C) e di ebollizione (356.58 °C) è abbastanza esteso, e questo fa sì che il mercurio sia molto usato come liquido termometrico.
- Per temperature inferiori alla minima misurabile con un termometro a mercurio, si possono usare termometri ad **alcol** (temp. di solidificazione -117.3 °C), **pentano** (temp. di solid. -129.72 °C), **toluolo** (temp. di solid. -95 °C), oppure termometri di altro tipo come vedremo più avanti.

Termometro a liquido: sensibilità

- Chiamiamo **h** il livello del liquido nel capillare e **T** la temperatura. Per definizione si ha:

$$S = \frac{dh}{dT}$$

- Sia **A** la sezione del capillare (uniforme per avere una scala lineare) e **V** il volume del liquido, si ha:

$$\frac{dV}{V} = \frac{A \cdot dh}{V}$$

- Sia α il coefficiente di dilatazione termica del liquido (trascuriamo quello del vetro che di norma è molto più piccolo). La variazione di volume del liquido è:

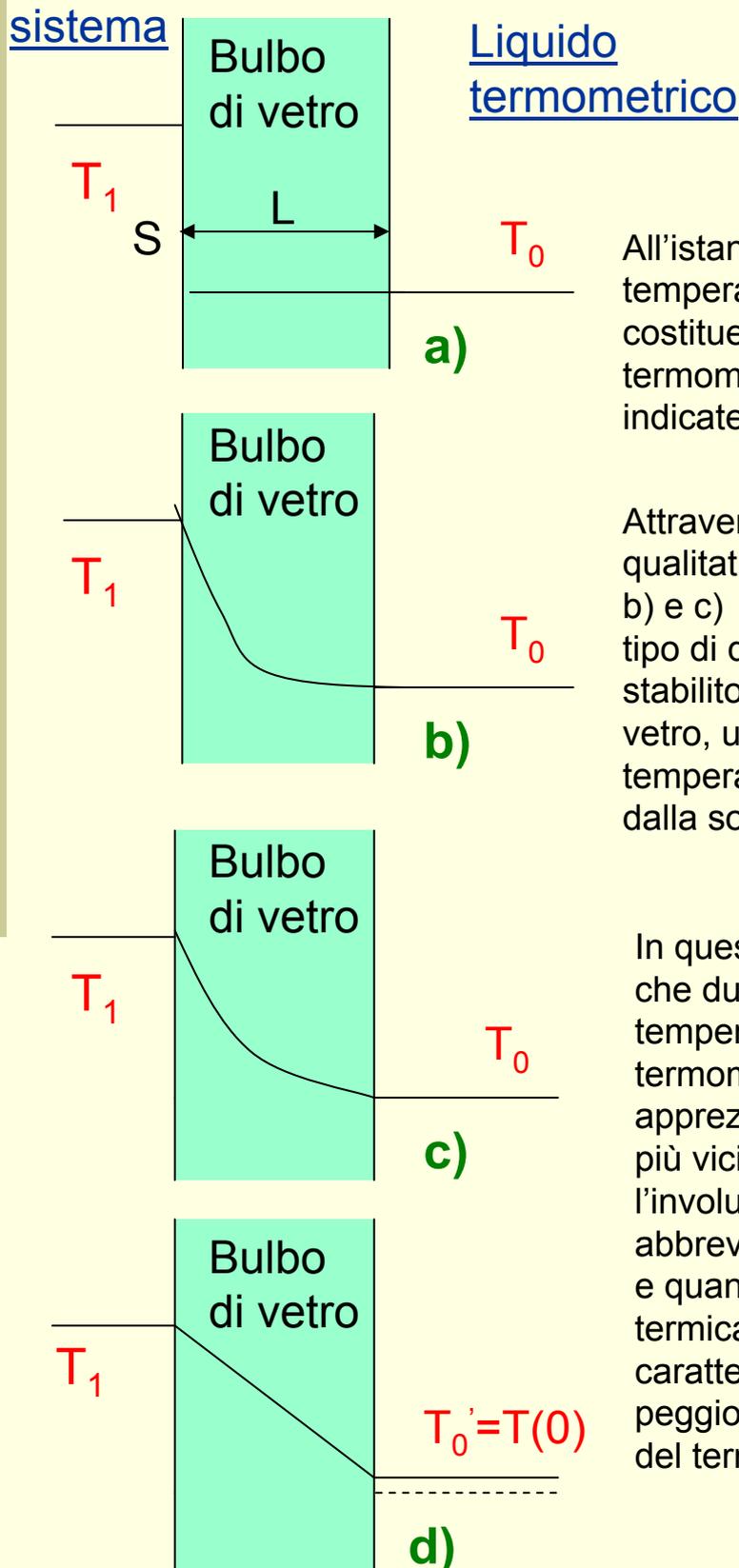
$$dV = \alpha \cdot V \cdot dT \quad \Rightarrow \quad \frac{dV}{V} = \alpha \cdot dT \quad \Rightarrow \quad dh = \frac{V \cdot \alpha \cdot dT}{A}$$

- Da qui ricaviamo la sensibilità dello strumento:

$$S = \frac{dh}{dT} = \frac{V \cdot \alpha}{A}$$

- Per aumentare la sensibilità, a parità di α , si potrebbe aumentare **V**. Questo, come vedremo, va a scapito della prontezza. **A** non si può diminuire a piacere per motivi costruttivi. Inoltre **V** grande, ovvero una grande capacità termica del termometro, aumenta la perturbazione del termometro nel processo di misura, introducendo un grande errore sistematico (il quale però si può valutare e correggere).

Prontezza di un termometro



All'istante dell'immersione, le temperature dell'ambiente, del vetro costituente l'involucro e del liquido termometrico sono schematicamente indicate nella figura a).

Attraverso situazioni intermedie, qualitativamente indicate dalle figure b) e c) si arriva ad una condizione del tipo di quella mostrata in d), in cui si è stabilito, nell'interno della parete di vetro, un andamento lineare della temperatura in funzione della distanza dalla sorgente di calore.

In questa descrizione si fa l'ipotesi che durante tutta la prima fase la temperatura del liquido termometrico non cambi apprezzabilmente; questo è tanto più vicino al vero quanto più sottile è l'involucro del bulbo, in modo da abbreviare il periodo di transizione: e quanto maggiore è la capacità termica del liquido. Quest'ultima caratteristica, però, come già detto, peggiora l'effetto della perturbazione del termometro.

Prontezza di un termometro:

Fase 2

- Facendo l'approssimazione che l'involucro di vetro che racchiude il liquido termometrico sia costituito da due facce piane e parallele di superficie S molto estese rispetto al suo spessore L , si può calcolare la quantità di calore dQ che durante l'intervallo di tempo dt si propaga attraverso la parete di vetro del termometro:

$$dQ = k \frac{S(T_1 - T(t))}{L} dt \quad \text{dove } T(t) \text{ è la temperatura del liquido termometrico al tempo } t$$

- Indichiamo con $\delta = k \cdot S/L$, abbiamo: $dQ = \delta \cdot [T_1 - T(t)] \cdot dt$

- Tale quantità di calore dQ comporta un aumento della temperatura del liquido termometrico pari a:

$$dQ = C \cdot dT \quad [C = \text{capacità termica del liquido}]$$

- quindi si ha: $\delta \cdot [T_1 - T(t)] \cdot dt = C \cdot dT$

ovvero: $\frac{dT}{T_1 - T(t)} = \frac{\delta}{C} dt$ Poniamo $\tau = \frac{C}{\delta}$
[costante di tempo del termometro]

- Integriamo tra 0 e t, abbiamo:

$$\int_0^t \frac{dT}{T_1 - T(t)} = \int_0^t \frac{dt'}{\tau} \quad \Rightarrow \quad -\ln(T_1 - T(t')) \Big|_0^t = \frac{t}{\tau}$$

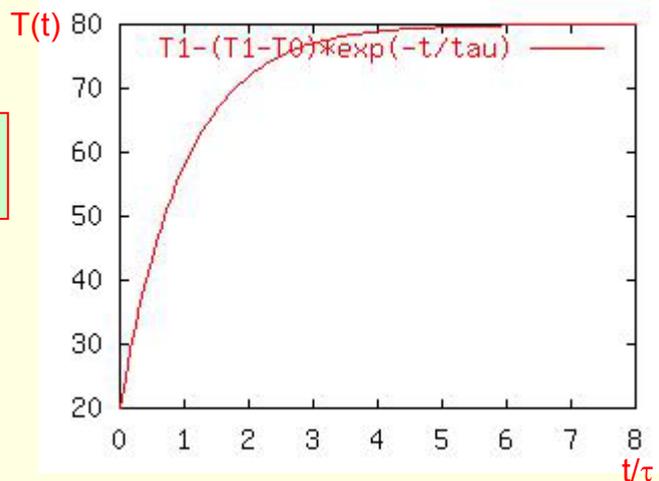
$$\Rightarrow \ln \frac{T_1 - T(t)}{T_1 - T(0)} = -\frac{t}{\tau} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_1 - T(t)}{T_1 - T(0)} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Prontezza di un termometro

- Dall'espressione precedente possiamo esplicitare $T(t)$ $\frac{T_1 - T(t)}{T_1 - T(0)} = e^{-\frac{t}{\tau}}$

$$T(t) = T_1 - (T_1 - T(0)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Sul grafico è riportato $T(t)$ in funzione del rapporto t/τ assumendo $T(0)=20^\circ\text{C}$ e $T_1=80^\circ\text{C}$



- Dal grafico si può notare che dopo un intervallo di tempo pari a $\sim 5 \tau$, la temperatura del termometro ha raggiunto la temperatura finale del sistema.
- La costante τ da quindi una misura della prontezza di risposta del termometro, tanto essa è più piccola e tanto più velocemente il termometro raggiungerà la temperatura di equilibrio.
- $\tau = \frac{C}{\delta} \Rightarrow \tau$ piccola vuol dire capacità termica del termometro piccola

- τ si può misurare facendo un fit lineare alla relazione trovata in precedenza:

$$\ln \frac{T_1 - T(t)}{T_1 - T(0)} = -\frac{t}{\tau}$$

- N.B. Abbiamo assunto che il sistema abbia capacità termica infinita e quindi T_1 non vari in funzione del tempo. Si può consultare il testo di M. Severi o le dispense di Alessio-Improta per la trattazione in cui vari anche T_1
- Abbiamo anche assunto che la fase 1 (ovvero lo stabilirsi del regime lineare all'interno della parete del termometro) duri molto meno della costante di tempo del termometro.

Altri tipi di termometri

- Il termometro a liquido, come abbiamo detto, è certamente il più popolare e gode di diversi pregi:
 - ha una lettura immediata che lo rende accessibile a tutti
 - è poco costoso.

ma ha anche alcuni difetti:

- è fragile;
 - una volta fuori taratura non può essere ritarato;
 - copre un intervallo di temperature abbastanza limitato (tra -180°C e 500°C);
 - normalmente tarato solo ai due punti fissi, non è totalmente lineare, la temperatura non coincide con quella termodinamica per cui non è tanto preciso ($0,5^{\circ}\text{C}$).
 - non può essere interfacciato con un sistema di acquisizione dati che permetta l'elaborazione dei dati e la risposta in tempo reale in caso di variazioni anomale della temperatura
-
- Per ovviare a quest'ultima carenza e per estendere l'intervallo di misura delle temperatura, sono stati realizzati altri tipi di termometri.
In seguito ne vedremo rapidamente alcuni, analizzando un po' più in dettaglio il termometro a termocoppia:
 - Termometro a termocoppia
 - Termometro a resistenza variabile
 - Termometro a termistore
 - Pirometri

Effetto Seebeck

- Nel 1821 T. Seebeck scoprì che se in un circuito formato da due fili composti da metalli diversi tra loro, collegati insieme alle estremità, si scalda una delle due estremità, nel circuito circola corrente continua.
- Se si interrompe il circuito, all'estremità del punto di interruzione è possibile misurare una forza elettromotrice (f.e.m.) che è proporzionale alla temperatura di riscaldamento e del tipo di materiale con cui sono stati costruiti i fili.
- L'unione di due metalli dissimili fra loro, di qualsiasi tipo essi siano, produce questo effetto che è chiamato "effetto Seebeck". Una variazione di temperatura tra le due giunzioni, produce una variazione costante di f.e.m.
- La f.e.m. di Seebeck si sviluppa anche ai capi di un filo metallico che ha le sue estremità a due temperature differenti.
- L'origine del fenomeno è di natura quantistica. In maniera molto qualitativa si può dire che se un conduttore viene riscaldato ad un'estremità, l'elettrone della parte calda acquisterà maggiore energia rispetto a quello dell'estremità fredda. Così l'elettrone più energetico del giunto caldo diffonde verso il giunto freddo dove la sua energia viene abbassata andando ad occupare livelli energetici inferiori liberi. Questo porta ad un accumulo di carica negativa al giunto freddo. Il processo continua finché non si raggiunge uno stato di equilibrio dinamico dove si ha lo stesso numero di elettroni che diffondono verso il giunto freddo e di elettroni che vengono respinti dallo stesso per l'eccesso di carica che si è venuta a formare.
- Ricordiamo quindi che la f.e.m. di Seebeck c'è in tutti i metalli, non necessita di accoppiamenti tra metalli diversi e non si sviluppa sulla giunzione dei due metalli.
- Come vedremo, però, per la realizzazione di un termometro a termocoppia, sono necessari due metalli opportuni di tipo diverso.

Effetto Seebeck

- Ogni materiale quindi svilupperà una certa f.e.m. secondo la legge:

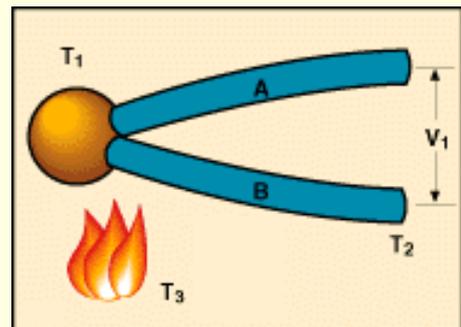
$$E_{\sigma} = \int_{T_2}^{T_1} \sigma(T) \cdot dT = E_{\sigma}(T_1) - E_{\sigma}(T_2)$$

$\sigma(T) = dE_{\sigma} / dT$ è il coefficiente di Seebeck assoluto.

- In una zona dove la E_{σ} è sufficientemente lineare e il coefficiente di Seebeck è quindi circa costante, questa equazione è approssimabile con la

$$E_{\sigma} = \sigma \cdot (T_1 - T_2)$$

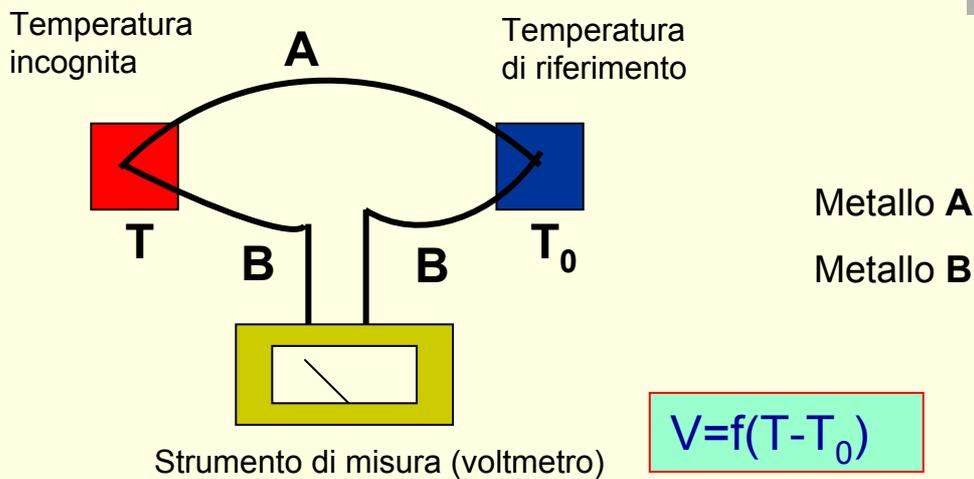
- Oltre al coefficiente di Seebeck assoluto viene utilizzato quello relativo. Consideriamo una coppia di fili rispettivamente A e B, che formano una termocoppia tra le T_1 e T_2 . Si ha una f.e.m. pari a:



$$E_{\sigma} = \int_{T_2}^{T_1} \sigma_A(T) \cdot dT - \int_{T_2}^{T_1} \sigma_B(T) \cdot dT = \int_{T_2}^{T_1} [\sigma_A(T) - \sigma_B(T)] \cdot dT \equiv V_1$$

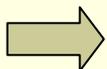
- $\sigma_{AB} = \sigma_A - \sigma_B$ è il coefficiente di Seebeck relativo. I coefficienti di Seebeck sono proprietà intrinseche del singolo materiale.
- Dalla formula riportata sopra si può notare che se A e B fossero due metalli identici, il coefficiente di Seebeck relativo sarebbe nullo e non ci sarebbe nessuna fem ai capi di A e B, da qui la necessità di avere due metalli diversi per la realizzazione di un termometro a termocoppia basato sull'effetto Seebeck.

Termometro a termocoppia



- La risposta del voltmetro è proporzionale alla differenza di temperatura tra la temperatura incognita e la temperatura di riferimento, Per evitare che la scarsa conoscenza nonché la variabilità della temperatura del giunto freddo di riferimento si rifletta in un'incertezza della temperatura da misurare, si opera in modo che la temperatura del giunto freddo sia mantenuta ad una temperatura nota, ad esempio un bagno di acqua e ghiaccio in equilibrio termico a 0 °C. Il problema è che queste condizioni devono essere mantenute costanti; ciò rende questo metodo poco pratico per l'utilizzo del termometro.
- Tuttavia la natura dell'effetto Seebeck contiene alcuni principi molto utili per la realizzazione di un termometro basato su questo effetto, che permettono anche di compensare l'eventuale variazione della temperatura di riferimento.
- Legge delle temperature successive: data una termocoppia AB e tre temperature T_1 , T_2 e T_0 , si ha la seguente relazione:

$$E(T_1-T_2) = E(T_1-T_0) - E(T_2-T_0)$$



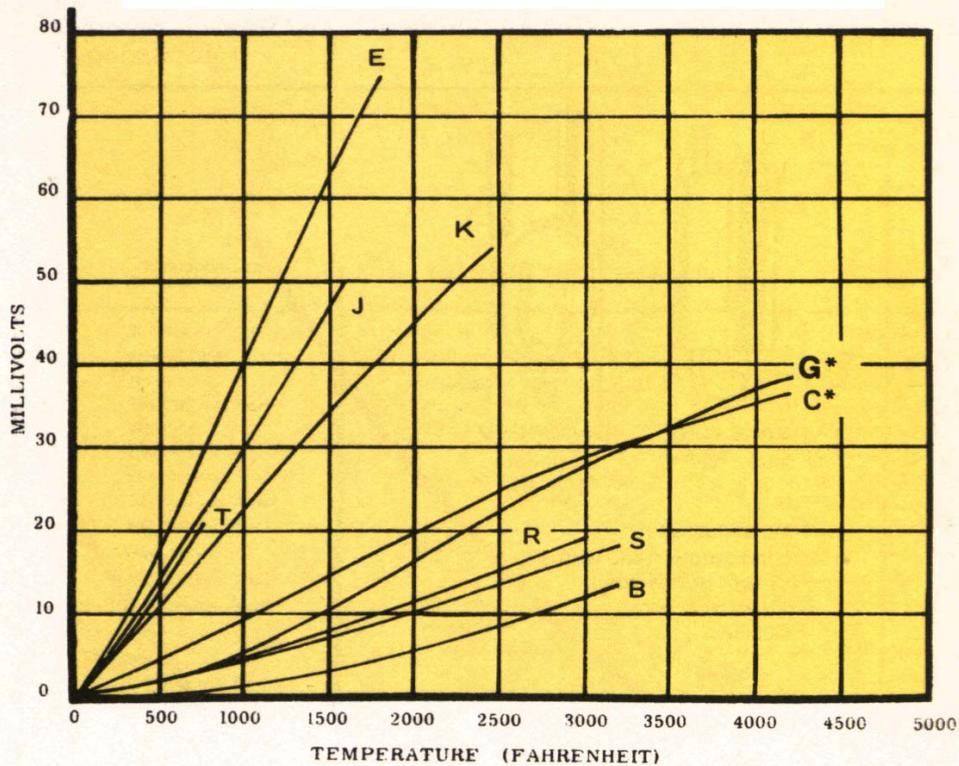
$$E(T_1-T_0) = E(T_1-T_2) + E(T_2-T_0)$$

Termometro a termocoppia

- $E(T_1-T_0)$: è la tensione che si vorrebbe misurare con il giunto di riferimento a 0 °C. Dalla sua conoscenza, tramite tabelle di calibrazione, si ricava la temperatura T_1 che si vuole misurare.
- $E(T_1-T_2)$: è la tensione che misura effettivamente la termocoppia con una giunzione alla temperatura T_1 (che può essere anche di 1000 °C), mentre l'altra giunzione si trova a temperatura T_2 ; tipicamente si tratta della temperatura ambiente.
- $E(T_2-T_0)$: è la tensione di compensazione per riportare la tensione misurata dalla termocoppia a quella nominale con il giunto di riferimento a 0 °C. Essa viene generata con un circuito contenente una sorgente di tensione, una combinazione di resistori fissi ed un misuratore della temperatura ambiente T_2 , ad esempio una resistore sensibile alla temperatura o un termistore (vedi più avanti). Il vantaggio è che, ad esempio, con la termocoppia si misura la temperatura elevata, mentre la temperatura ambiente si misura con un dispositivo più semplice.

- I vantaggi del termometro a termocoppia sono: massa trascurabile (*prontezza*), facilità di accoppiamento termico, piccola conducibilità termica (purché si usino fili sufficientemente sottili e lunghi), basso costo, possibilità di interfacciamento con dispositivi di controllo.
- Svantaggi: *non-linearità e scarsa sensibilità*.
- L'intervallo utile è all'incirca da 10 K a 2000 K. La precisione è limitata principalmente dal sistema di lettura della f.e.m. (praticamente inferiore a 0.1 K). La sensibilità dipende dai materiali usati nei vari tipi di metalli della termocoppia. Ad esempio con la coppia rame-constantana si misura una forza elettromotrice di 0,42mV/°C

Termocoppie: simboli ANSI



Come mostra la figura, la dipendenza della tensione dalla temperatura non è lineare, a meno che non consideriamo un tratto molto ristretto, altrimenti può essere rappresentata mediante delle funzioni polinomiali.

Simbolo	Materiali	Intervallo (°C)	Vmax (mV)
S	Pt-10%Rh/Pt	-50/1760	18
R	Pt-13%Rh/Pt	-50/1650	19
B	Pt30%Rh/Pt6%Rh	0/1820	14
E	Chromel/Costante	-270/1000	75
J	Fe/Costante	-210/1200	50
K	Chromel/Alumel	-270/1370	54
T	Cu/Costante	-270/400	21

Termometri a resistenza

- Questi termometri si basano sul fenomeno fisico della variazione della resistenza R (ovvero della resistività ρ) di un conduttore metallico con la temperatura.

- Per molti metalli, in campi di temperature limitate, può essere assunta una variazione lineare di R , con la temperatura, del tipo:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

essendo R_0 la resistenza a $0\text{ }^\circ\text{C}$ e α il coefficiente di temperatura del materiale considerato.

- La misura della temperatura si riduce così ad una misura di resistenza, che può essere fatta con il metodo voltamperometrico oppure con il ponte di Wheatstone. In ogni caso è necessario far circolare una corrente sulla resistenza per permettere la misura della tensione.
- Pregi: idoneo al funzionamento in ambienti ostili, linearità, dimensioni anche molto ridotte, velocità di risposta, costo contenuto.
- Difetti: richiede circuito di alimentazione. Temperatura massima più bassa di quella di una termocoppia. La sensibilità è limitata dal riscaldamento della resistenza per effetto Joule.
- Il platino è il metallo più usato per questo tipo di termometri, perché un filo di platino può essere prodotto con un estremo grado di purezza. In genere si usa un filo con una resistenza di $100\ \Omega$ a $0\text{ }^\circ\text{C}$ con $\alpha = 0.392\ \Omega/^\circ\text{C}$. Il campo di applicazione è $-200 \div 850\text{ }^\circ\text{C}$ e presenta un'ottima linearità.

Termistori

- I termistori sono costituiti da materiali semiconduttori aventi una conducibilità, di natura elettronica, che aumenta con la temperatura. Sono pertanto elementi termosensibili che possono essere utilizzati per misure di temperatura.
- La resistenza dei termistori, la quale decresce con la temperatura, è rappresentabile in generale dalla formula:

$$R = a \cdot e^{\frac{b}{T}}$$

dove R è la resistenza alla temperatura assoluta T; a è la costante caratteristica della forma e della dimensione del termistore; b è la costante caratteristica del materiale costituente il termistore.

- Quando sia nota R_0 ad una temperatura T_0 si può eliminare la costante a dalla formula precedente:

$$R = R_0 e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

- Il coefficiente di temperatura α è pari a:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2}$$

- I termistori vengono utilizzati in termometria per la grande sensibilità, l'elevata resistenza e le piccole dimensioni.
- I termistori comuni vengono utilizzati fra 100 °C e 400 °C.

Pirometri

- Il pirometro è un dispositivo che permette di eseguire misure di temperatura utilizzando l'energia radiante emessa dal corpo in esame che è proporzionale alla quarta potenza della temperatura del corpo. Il pirometro risulta particolarmente adatto per la misura delle alte temperature, poiché evita il contatto diretto tra corpo caldo ed elemento sensibile dell'apparecchio misuratore.
- **Pirometri a radiazione totale:** le radiazioni visibili e invisibili emesse dal corpo caldo vengono raccolte e concentrate da un sistema ottico su un elemento sensibile che le rivela e le misura. Questi varia con il campo di misura e con l'impiego e può essere del tipo fotocella, termistore, coppia termoelettrica, termometro elettrico a resistenza, etc...
- **Pirometri ottici o a radiazione parziale:** questi pirometri utilizzano le radiazioni visibili di una certa banda ristretta quanto più possibile. La temperatura viene in genere determinata mediante il confronto fatto da un osservatore tra la radiazione del corpo in esame e la radiazione conosciuta proveniente da un'altra sorgente ausiliaria di riferimento, come per esempio un filamento di tungsteno. L'apparecchio contiene un filtro rosso, in modo che il confronto avvenga alla lunghezza d'onda di $0.65 \mu\text{m}$. In alcuni tipi si varia la radiazione dell'elemento di confronto regolandone la corrente di alimentazione, in altri la radiazione del corpo in esame viene eguagliata a quella della sorgente ausiliaria con un filtro assorbente graduato. In genere, il filamento che la corrente di alimentazione rende luminoso scompare sullo sfondo illuminato dalla radiazione in esame quando viene raggiunta l'uguaglianza della gradazione del colore corrispondente alle temperature (pirometro a filamento evanescente). Il filtro o il misuratore della corrente di alimentazione sono direttamente tarati in gradi.