

MISURE DI TEMPERATURA

Introduzione

La temperatura è una proprietà che regola il trasferimento di energia termica da un sistema ad un altro. Quando due sistemi sono alla stessa temperatura, e quindi sono in equilibrio termico, non avviene alcun trasferimento di calore. Quando esiste invece una differenza di temperatura, il calore tenderà a muoversi dal sistema a temperatura più alta verso quello a temperatura più bassa, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. Il trasferimento del calore può avvenire in 3 modalità differenti:

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

Legge zero della termodinamica

La legge zero della termodinamica ha come concetto base l'idea che due corpi che possiedono la stessa temperatura sono in equilibrio termico. Essa infatti afferma che se due corpi sono in equilibrio termico con un terzo corpo allora sono in equilibrio termico anche tra di loro. Quindi per definizione i tre corpi sono alla stessa temperatura T . Dunque la temperatura di un corpo A si può misurare portando un certo corpo, cioè uno strumento di misura, in equilibrio termico con il corpo iniziale e osservando le variazioni di una sua qualche proprietà che vari con la temperatura. Dunque la variazione di temperatura di un corpo provoca una variazione di diverse grandezze quali:

- Variazione di stato fisico = usata per definire i punti fissi ovvero i campioni di temperatura da utilizzare per le tarature (punto di ebollizione dell'acqua, punto triplo, punto di congelamento)
- Variazione di volume = utilizzati come principi fissi per realizzare i termometri ovvero gli strumenti per interpolare fra i punti fissi
- Variazione di proprietà elettriche = utilizzati come principi fissi per realizzare i termometri ovvero gli strumenti per interpolare fra i punti fissi
- Variazione di irraggiamento = utilizzati come principi fissi per realizzare i termometri ovvero gli strumenti per interpolare fra i punti fissi

Scale per la misura di temperatura

Dal momento che la temperatura è una grandezza intensiva non è misurabile mediante confronto con campioni unitari della grandezza. Non è dunque possibile fare una comparazione diretta ma occorre usare uno strumento su cui sono definiti dei punti fissi, di solito due; tra questi due punti si costituisce una scala detta scala di temperatura. Dal momento che per costruire una scala di temperatura servono dei punti fissi occorre comprendere come definirli.

Le prime scale di misura erano dunque basate su due punti fissi:

1. Scala Fahrenheit: i due punti fissi erano la temperatura più bassa che riuscì a misurare e la sua temperatura corporea. Questa scala è anche chiamata scala centottantigrada
2. Scala Celsius: i due punti fissi erano la temperatura di ebollizione e di solidificazione dell'acqua

Storicamente però, poiché i riferimenti, scelti riferendosi a fenomeni fisici facilmente riproducibili, non si sono rivelati accettabili né come numero, né dal punto di vista della riproducibilità, si è tentato di costruire scale di temperatura che si riferissero alla termodinamica. Il primo che propose delle scale termodinamiche basate su principi termodinamici fu Lord Kelvin nell'Ottocento. Dunque presto ci si accorse che non bastavano dei punti fissi ma era necessario definire metodi di interpolazione tra i punti fissi. Per definire correttamente e univocamente una scala di temperatura è quindi necessario definire almeno un punto fisso e un rapporto di temperature. Per creare una scala di temperatura secondo Kelvin occorre radicarla su una teoria stabile e robusta. Occorre dunque basarsi su una teoria solida e condivisa. L'implementazione della scala verrà fatta con strumenti reali che potranno cambiare con lo sviluppo della tecnologia ma lo scopo è sempre quello di creare una scala che segua una

teoria chiara e condivisa. La teoria su cui basa il suo ragionamento è il ciclo di Carnot il cui rendimento vale:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

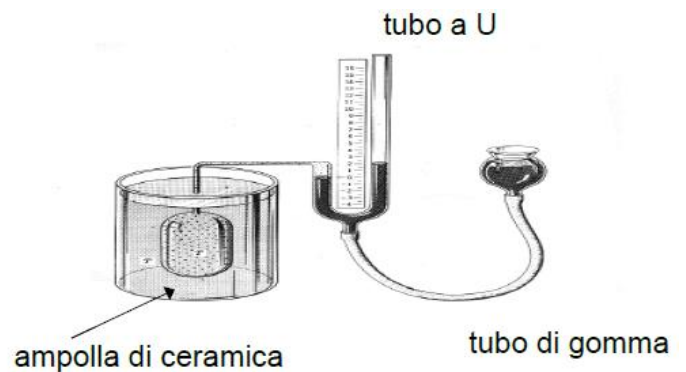
Egli legò dunque il rapporto tra i calori scambiati e le sue temperature trovando così un rapporto di temperatura che insieme a un punto fisso (punto triplo dell'acqua) permette di definire completamente una scala delle temperature. Ricordiamo che il valore numerico del punto triplo è 273,16K dal momento che ciò rende l'intervallo tra il punto di solidificazione e quello di ebollizione dell'acqua pari a 100K. Per poter effettuare la misura delle due temperature e definire quindi il rapporto di temperatura è possibile usare un termometro a gas ideale.

Termometro a gas ideale

Si può dimostrare che la temperatura termodinamica è uguale alla temperatura del gas ideale, quindi può essere misurata con il termometro a gas ideale, il gas ideale in realtà non esiste ma un qualunque gas può essere considerato tale a pressioni molto basse, prossime a zero. Il termometro a gas ideale usa una proprietà macroscopica per definire scale ed unità corrispondenti alla teoria termodinamica:

$$Pv = nRT$$

Se il volume è costante la pressione dipende linearmente dalla temperatura. Un termometro a gas a volume costante mantiene una quantità di gas costante all'interno di un ambiente con volume costante e misura le variazioni di pressione provocate dalle variazioni di temperatura. Il volume è mantenuto costante così: il termometro a gas ideale è costituito da un'ampolla con del gas collegata a un tubo a U contenete acqua o mercurio. Alzando o abbassando il tubo di gomma si mantiene il volume del gas in ampolla costante.



Scala pratica internazionale delle temperature

I termometri a gas ideali sono di difficile uso e poco ripetibili pertanto nelle scale pratiche si sono utilizzati come campioni standard altri strumenti. Ciò ha portato all'assunzione della scala pratica internazionale delle temperature che è oggi il riferimento per le misure di temperatura. Si creano dunque strumenti che danno in uscita un valore che sarebbe pari a quello restituito da un termometro a gas ideale. Nella normativa definita dalla scala pratica internazionale delle temperature sono ripresi i seguenti concetti fondamentali:

1. Unità di misura = l'unità di misura della temperatura termodinamica è il Kelvin. Oltre alla scala Kelvin è stata definita anche la scala Celsius
2. Intervallo di temperatura considerato = l'intervallo di temperature considerato va da 0,65K alla più alta temperatura misurabile sfruttando le leggi dell'irraggiamento.
3. Punti fissi = i punti fissi sono punti di stati fisici facilmente riproducibili e universali. Sono utilizzati per la taratura dei termometri. I punti fissi generalmente sono:
 - Passaggi di stato che sono funzione della sostanza considerata
 - Punti tripli = coesistenza dei tre stati della materia solido liquido e gassoso in equilibrio. Non si usa più il punto triplo dell'acqua perché è poco stabile
4. Termometri per le interpolazioni = nella normativa sono definiti i tipi di termometri da utilizzare in ciascun campo di temperatura per interpolare i punti fissi. Sono da considerarsi come termometri campione. In base alla fascia di temperatura sono consigliati particolari tipi di termometri:
 - 0,65-5K = termometri a pressione di vapore
 - 3K-punto triplo del neon = termometri a gas

- Punto triplo idrogeno - punto di fusione dell'argento = termometri a resistenza di platino
 - Sopra il punto di fusione dell'argento = termometri a radiazione
5. Definisce i valori forniti dai termometri campione in corrispondenza dei punti fissi
6. Definisce le funzioni interpolanti da adottare tra i vari punti fissi

L'insieme di queste norme definiscono una scala di temperatura a cui tutte le misure devono essere riferibili.

Strumenti per la misura di temperatura

Esistono vari tipi di strumenti per la misura di temperatura:

- Termometri a espansione
- Termometri a resistenza metallica o termoresistenze
- Termistori
- Termocoppie
- Pirometri e termocamere (misure di temperatura nell'infrarosso)

Termometri a espansione

Sfruttano la variazione termica di volume di materiali diversi provocate dalla variazione di temperatura. Di questa categoria fanno parte:

- Termometri a colonna di liquido detti anche a bulbo = è importante ricordare che questi trasduttori hanno il problema della dinamica o meglio il problema di velocità di risposta che richiede del tempo. Hanno dunque dei limiti di prontezza. Permettono una lettura immediata, sono di facile utilizzo e sono poco costosi. Risultano però essere fragili, una volta fuori taratura non può essere più ritardato, l'intervallo di temperatura è relativamente limitato ed è poco accurato, dell'ordine dei decimi. [Nei liquidi si misura l'innalzamento di una colonna di liquido a seguito di una pressione provocata dalla dilatazione termica del liquido a volume costante.]
- Termometri bimetallici = sfruttano la diversa espansione termica di materiali differenti. Si prendono due strisce metalliche con coefficienti di dilatazione termica diversi tra loro. Anche in questo caso la mancanza di buona linearità porta ad errori dell'ordine dei decimi. Elementi bimetallici possono essere utilizzati sia come misuratori di temperatura sia come elementi combinati, con funzione sia di sensore sia di controllore. Ne esistono di diversi tipi e forme. Anche in questo caso risultano essere di facile lettura. Non coprono però una vasta gamma di temperature e come già detto sono poco accurati. [Nei solidi si misura l'allungamento di due diversi materiali metallici a diverso coefficiente di dilatazione termica]

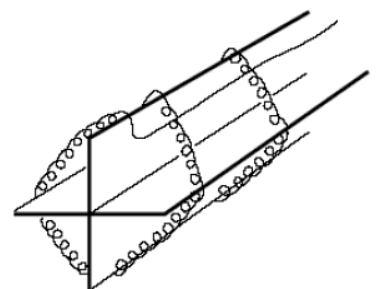
Nei gas e vapori la pressione provocata dall'espansione termica del gas a volume costante.

Termoresistenze

I termometri a resistenza metallica sono anche noti come termoresistenze. Si basano sull'idea secondo cui la resistenza di un metallo dipende dalla temperatura dello stesso, si sfrutta dunque la variazione di resistenza con la temperatura. Il sensore deve essere sensibile solo alla temperatura e non alla deformazione. La sensibilità alla temperatura è dunque superiore alla variazione di resistenza legata alla deformazione; questo implica qualche semplificazione per quanto riguarda i circuiti di misura. Il classico termometro a resistenza venne realizzato avvolgendo una bobina di platino su una trama di mica (silicato di alluminio e potassio, isolante) e mettendo il tutto all'interno di un tubo di vetro. Sebbene tale costruzione produca un elemento molto stabile, il contatto termico tra platino e punto di misura è molto scarso. Ciò implica un tempo di risposta elevato. Inoltre la fragilità della struttura ne limita l'utilizzo in laboratorio. La variazione di resistenza in funzione della temperatura è pari a:

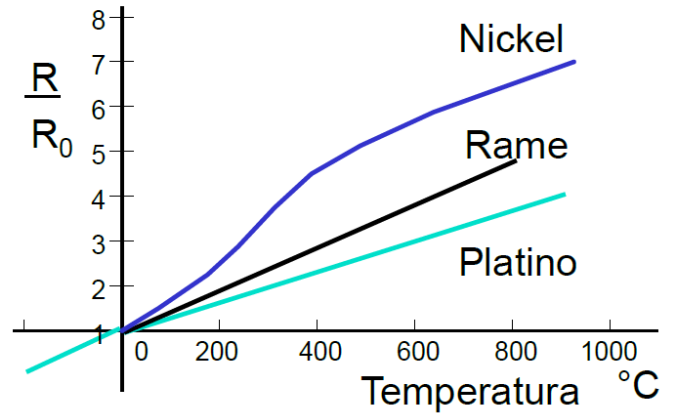
$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \delta T^3 + \dots)$$

Meyers RTD Construction



I materiali usati per le termoresistenze sono:

- Platino = perché essendo un metallo nobile non si ossida
- Nichel = ha una migliore sensibilità e quindi a parità di variazione di temperatura la variazione di resistenza registrata è maggiore rispetto a quella del platino. Usato per applicazioni con modeste variazioni di temperatura
- Rame = ha una minore resistenza all'ossidazione e una minor resistività elettrica. Usato per applicazioni intorno alla temperatura ambiente.



Un materiale usato per le termoresistenze dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

1. Coefficiente di temperatura elevato così da avere un'elevata sensibilità. Il coefficiente di temperatura dipende dal tipo di materiale metallico che costituisce la termoresistenza e non essendo solitamente lineare con la temperatura, viene normalmente definito nel campo 0-100°C:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}$$

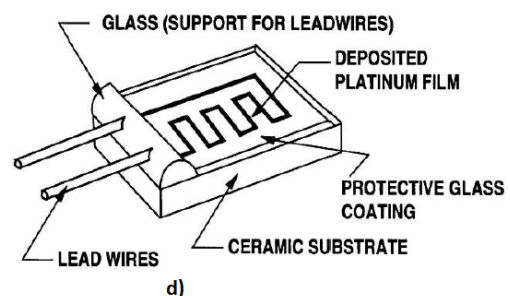
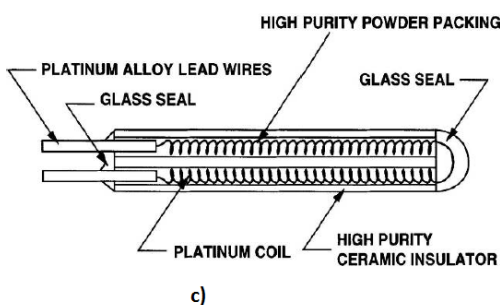
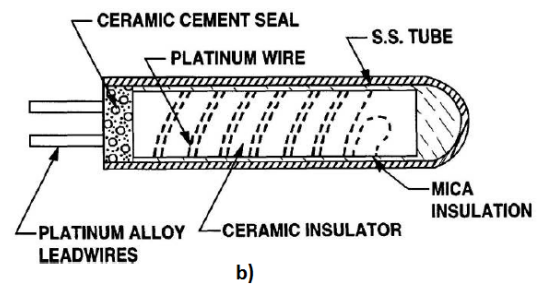
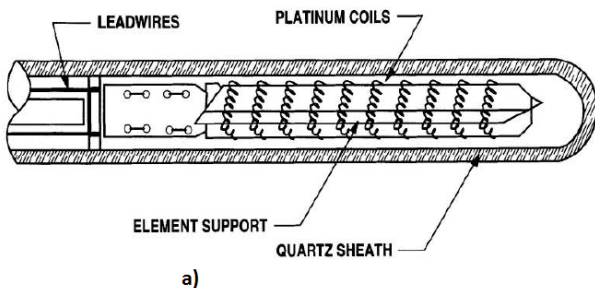
2. Alto punto di fusione così da avere un elevato campo di misura
3. Linearità
4. Stabilità nel tempo evitando dunque che possa ossidarsi o corrodarsi

Le termoresistenze vengono designate in un specificato modo:

simbolo Pt / valore di resistenza a 0°C / classe di tolleranza / numeri di fili di collegamento / campo di temperatura di impiego

Ricordiamo che esistono molte tecnologie realizzative di questi sensori come ad esempio

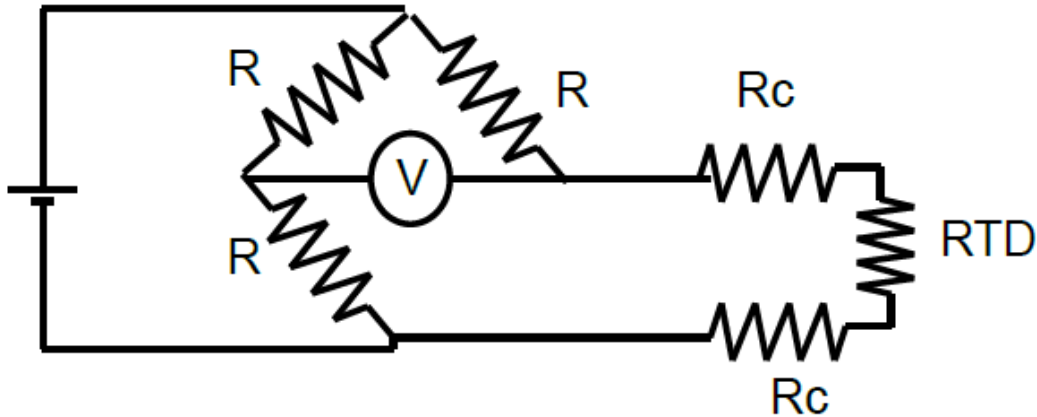
- a. Termometro standard a resistenza di Pt = utilizzato solitamente in elaborati poiché estremamente fragile
- b. A filo avvolto = costituito da un filo avvolto su un mandrino cilindrico di ceramica. È caratterizzato da una buona accuratezza per l'uso industriale
- c. A filo sospeso = in questa configurazione la bobina è assemblata in piccoli fori all'interno del mandrino cilindrico ceramico. Le bobine sono sostenute da polvere di ceramica e siglate alle estremità
- d. A fil metallico = in questo caso un sottile film di platino è depositato all'interno di un substrato ceramico



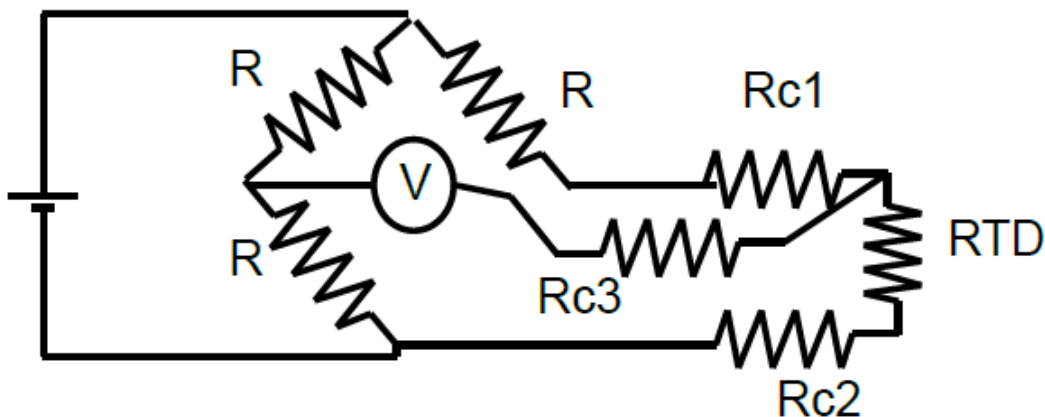
Termoresistenze: circuiti di misura

Dal momento che la misura della temperatura viene realizzata misurando la resistenza elettrica del sensore, è fondamentale che il circuito elettrico usato per la misura della resistenza elettrica sia realizzato in modo opportuno. Esistono diversi tipi di configurazioni:

- A 2 fili = è la più semplice ma è poco utilizzata a causa di una serie di svantaggi come l'introduzione di errori grossolani di misura se la resistenza dei fili di collegamento R_c non è trascurabile rispetto a quella del termoelemento R . Viene dunque utilizzata nel caso di fili di collegamenti corti e di bassa resistività

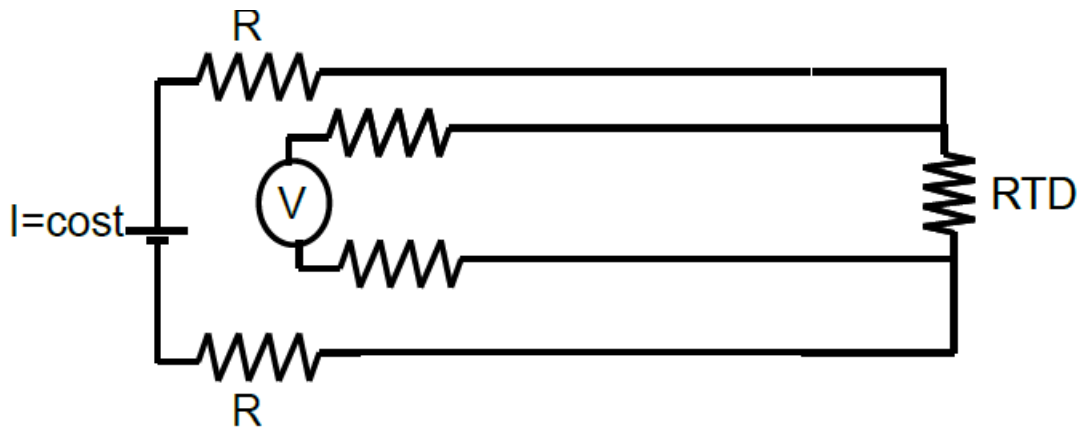


- A 3 fili = è il collegamento più usato industrialmente data la miglior accuratezza ottenibile dalla misura infatti elimina gli effetti provocati dalla resistenza dei fili di collegamento del termoelemento RTD. In questo caso i fili 1 e 2 sono di uguale lunghezza e quindi di uguale resistenza $R_{c1} = R_{c2}$, ed essendo posti su due rami contigui del ponte non provocano alcuna variazione. Il filo 3, anch'esso lungo uguale, dato il metodo di misura con multimetro a elevata impedenza, non è percorso da corrente e pertanto la sua resistenza R_{c3} non influisce sull'uscita.



- A 4 fili = questa tecnica viene usata quasi esclusivamente in laboratorio poiché fornisce la miglior accuratezza in senso assoluto. Questo metodo è anche noto come tecnica volt amperometrica. In questo caso si genera una corrente circolante nel circuito. I due fili interni sono i cavi di misura ma la corrente circolante è minima quindi la caduta di potenziale sui cavi di misura è trascurabile. Occorre però prestare attenzione all'auto riscaldamento perché potrebbe falsare la misura. Per ovviare questo problema occorre alimentare a tensioni basse però non devono essere troppo basse altrimenti la sensibilità è limitata. Si può allora optare per un'alimentazione pulsata. Dunque volendo limitare l'effetto di riscaldamento dovuto al passaggio di corrente, è possibile pulsare l'alimentazione; la termoresistenza ha il transitorio termico lento, quindi la lettura non

risente del riscaldamento elettrico, la lettura risulta però discontinua. In questo modo il riscaldamento è molto più basso.



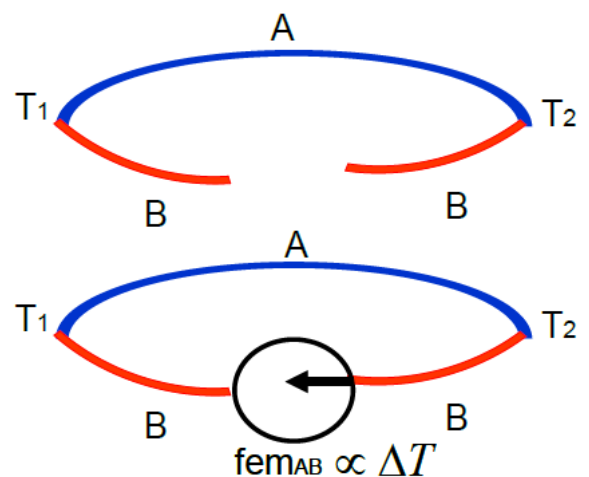
Le termoresistenze sono strumenti accurati, hanno un elevato campo di misura e sono stabili e lineare. Sono però costosi, sono sensibili all'urto e alla vibrazione, hanno una costante di tempo elevata a causa dell'involucro e possono riscaldarsi per effetto Joule e ciò può causare errori.

Termistori

Anche i termoresistori sono misuratori di temperatura che sfruttano la variazione di resistenza in funzione della temperatura. Si differenziano dalle termoresistenze perché sono costituiti da materiali semiconduttori metallici che dunque possono variare la propria resistenza elettrica all'aumento della temperatura sia aumentando che diminuendo. Sono ottenuti in laboratorio mediante drogaggi ed è dunque possibile modificarne la struttura atomica e renderli soggetti alla temperatura in modo analogo ai conduttori, ma molto più sensibili alle variazioni. Esistono pertanto termistori con coefficiente di temperatura TC negativo (NTC) o positivo (PTC). La procedura di produzione prevede che il semiconduttore venga sminuzzato, mescolato ad un legante in una proporzione corretta, pressato e quindi sinterizzato. Creare un sensore usando della polvere compressa ha come vantaggio la possibilità di avere una qualsiasi geometria. Nella sinterizzazione si può personalizzare parecchio la geometria e ciò permette di avere dei sensori di temperatura di forme molto diverse. La sinterizzazione permette quindi di avere sensori di piccole dimensioni e con tempi di risposta molto ridotti. A causa della tecnologia realizzativa presentano coefficienti di temperatura molto più elevati rispetto alle termoresistenze. Sono dunque strumenti molto sensibili ma generalmente fortemente non lineari. Inoltre, essendo il valore di resistenza elevato, non risentono di problemi di misura dovuto alla resistenza dei cavi, semplificando i circuiti di misura. Hanno dunque un'elevata sensibilità, dimensioni ridotte, sono a basso costo, è possibile realizzare un circuito di misura a 2 fili ma hanno campi di misura limitati, non sono lineari e sono fragili.

Termocoppie

Si basano su un principio legato a delle scoperte storiche. Seebeck scoprì che quando due fili conduttori di metalli differenti sono uniti alle due estremità e uno dei due estremi è riscaldato, c'è un flusso continuo di corrente nel circuito termoelettrico. Aprendo tale circuito la differenza di potenziale risulta essere funzione della temperatura ai due giunti e della composizione dei due metalli (effetto seebeck). Le termocoppie si basano proprio su questo principio; risultano essere molto semplici poiché costituite da solo due fili metallici, trasducono direttamente mediante effetto termoelettrico, permettono di misurare temperature sia elevate che estremamente ridotte e sono dunque molto diffuse. L'effetto Seebeck afferma dunque che in un circuito formato da 2 materiali diversi A e B, se i due giunti sono a temperature diverse $T_1 \neq T_2$ si genera la forza elettromotrice. La forza elettromotrice

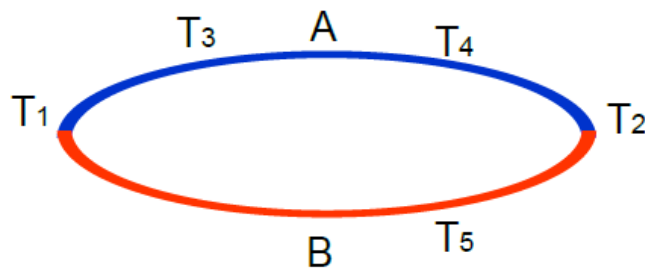


sarà funzione della differenza di temperatura stessa e può essere rilevata mediante un misuratore di tensione; se invece si usa misuratore di corrente si rileva la corrente stessa. Generalmente si prediligono i misuratori di tensione così da non avere corrente circolante e influenzare, anche se minimamente, la misura. Con l'espressione *giunti* indichiamo i punti di contatto tra i due fili di metalli diversi. I due giunti prendono due nomi differenti a seconda della temperatura a cui si trovano: quello a temperatura maggiore si chiama giunto caldo mentre quello a temperatura inferiore si chiama giunto freddo. Il giunto caldo viene anche chiamato giunto di misura mentre quello freddo giunto di riferimento. Se si impone una corrente circolante in un circuito formato da due materiali diversi un giunto si scalderà mentre l'altro si raffredderà; si può quindi affermare che ai giunti si ha assorbimento e cessione di calore. Questo effetto è noto come effetto Peltier e viene di solito usato per raffreddare i sensori o i circuiti elettronici; tale effetto modifica la temperatura dei giunti e quindi può generare errori di misura. Se invece in un conduttore si ha un gradiente di temperature positivo in direzione della corrente vi è trasformazione di energia termica in elettrica e dunque il conduttore assorbe calore dall'ambiente (effetto Thomson). Il fenomeno opposto si verifica se il gradiente è negativo nella direzione della corrente. Noto l'effetto seeback possiamo fare due osservazioni importanti:

- Se i due materiali sono uguali non si genera alcuna forza elettromotrice
- Se le temperature dei due giunti sono le medesime non si genera alcuna forza elettromotrice

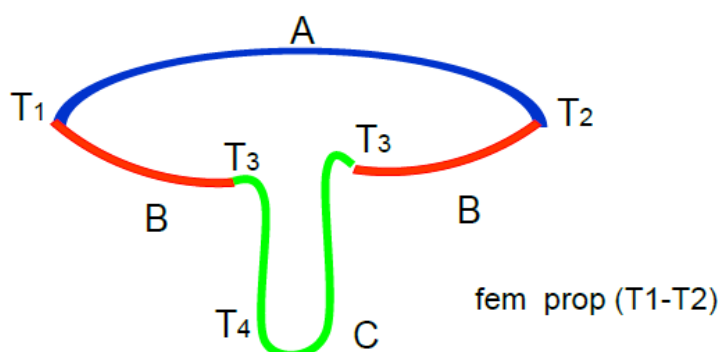
Le termocoppie sono regolate da 5 proprietà:

1. La forza elettromotrice che si genera dipende solo dalle temperature dei due giunti e non dalle variazioni termiche dei cavi lungo il collegamento. Ciò permette di fare misure di temperatura senza preoccuparsi della temperatura dei cavi. Questa legge è conseguenza diretta della legge del circuito omogeneo.

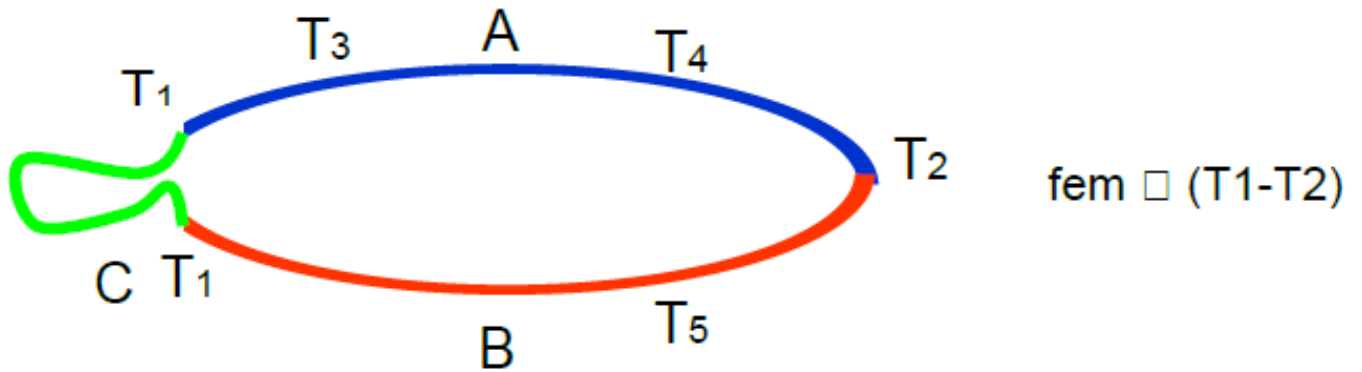


$$fem_{AB} \propto (T_1 - T_2)$$

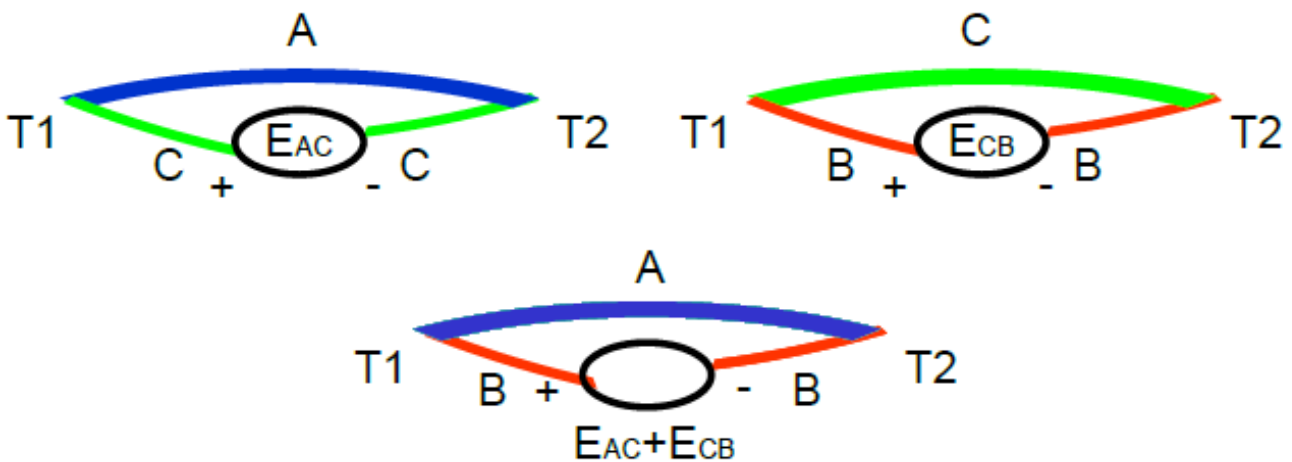
2. Se si aggiunge un filo di un nuovo materiale in uno dei due cavi la forza elettromotrice non dipende né da esso né dalla sua temperatura se i due nuovi giunti hanno la stessa temperatura. Questa proprietà permette di inserire uno strumento di misura della forza elettromotrice nel circuito lungo uno dei due conduttori. È la diretta conseguenza della legge termoelettrica dei materiali intermedi secondo cui la somma algebrica delle forze elettromotrici in un circuito composto da un numero qualsiasi di metalli diversi è nulla, se la temperatura è uniforme lungo tutto il circuito.



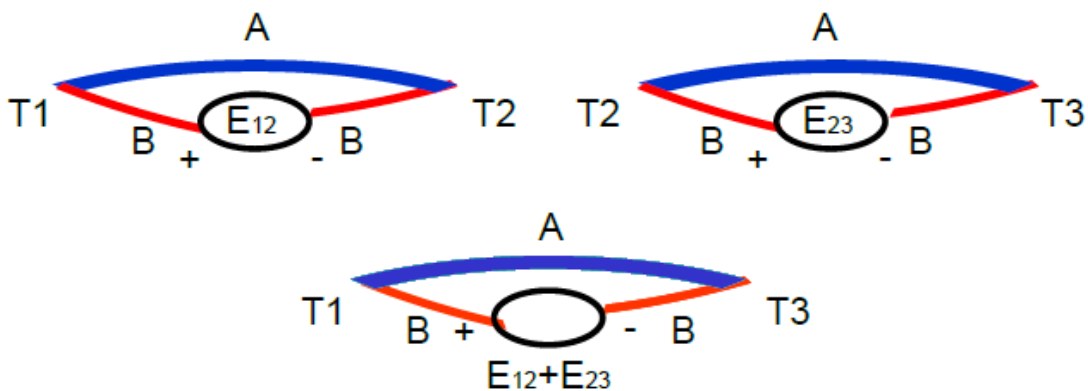
3. Se si aggiunge un filo di un nuovo materiale in uno dei due giunti la forza elettromotrice non dipende né da esso né dalla sua temperatura se i due nuovi giunti hanno la stessa temperatura. Questa proprietà è utile sia per inserire uno strumento di misura nel circuito sia per saldare o brasare i giunti della termocoppia. È la diretta conseguenza della legge termoelettrica dei materiali intermedi come la proprietà precedente.



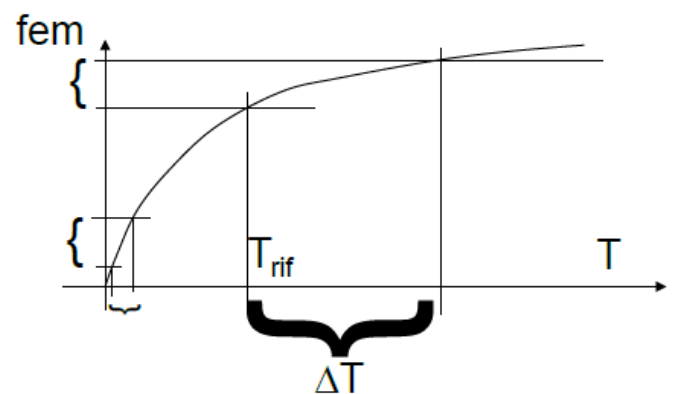
4. Se si prendono delle termocoppie di diversi materiali è possibile conoscere la forza elettromotrice di una termocoppia ottenuta come combinazione di certi materiali a patto di avere i giunti sempre alla stessa temperatura. Dunque se la termocoppia A e C con i giunti a T_1 e T_2 genera la fem E_{AC} e la termocoppia B e C con i giunti a T_1 e T_2 genera la fem E_{BC} allora la termocoppia A e B con i giunti a T_1 e T_2 genera la fem $E_{AB} = E_{AC} + E_{BC}$. Questa proprietà permette di calcolare il potere termoelettrico di qualsiasi termocoppia se è noto il potere termoelettrico di ogni materiale con riferimento ad un unico materiale, considerato come standard di riferimento; il materiale di riferimento è il platino. Ciò permette a priori di stimare la sensibilità attesa per una termocoppia. Si hanno dunque delle tabelle che contengono i potenziali dei diversi materiali rispetto al platino con giunto di riferimento a 0°C e giunto di misura a 100°C . Vi sono valori sia positivi che negativi per una questione di convenzione: analizzando la tabella si sa già che la massima sensibilità si ha accoppiando il primo e l'ultimo elemento della tabella dei potenziali perché si ha la differenza di potenziale massima. La scelta dei materiali della termocoppia dipende anche da altri fattori oltre alla sensibilità.



5. Nota come legge delle temperature intermedie afferma che se si conosce la forza elettromotrice di una termocoppia collegata tra due temperature e poi si conosce quella tra due temperature successive è possibile dedurre la forza elettromotrice che si avrebbe tra la temperatura minima e quella massima. Questa proprietà è utilizzata per riferire le misure di una qualsiasi temperatura a 0°C senza necessariamente tenere il giunto fermo a 0°C .



La termocoppia non ha un comportamento lineare per questo occorre una curva della termocoppia poiché altrimenti a ogni variazione di temperatura la variazione di forza elettromotrice sarebbe costante. Ciò non è vero nel caso delle termocoppie e dunque occorre la curva della termocoppia. Nella curva della termocoppia a pari forza elettromotrice la variazione di temperatura dipenderà dalla temperatura di riferimento. Dunque la forza elettromotrice dipende sia dalla variazione di temperatura sia dal valore iniziale della stessa temperatura. Sebbene numerosi materiali siano soggetti a effetti termoelettrici, solo un limitato numero di coppie vengono ampiamente utilizzate. Ciascuna coppia mostra una combinazione di proprietà (linearità, campo di misura, incertezza, sensibilità) che la rendono indicata in una particolare classe di applicazioni. Dal momento che l'effetto termoelettrico è talvolta non lineare, la sensibilità varia con la temperatura.



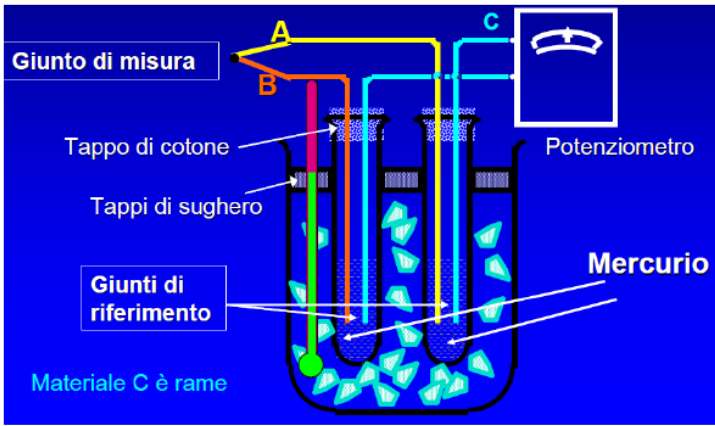
I vantaggi di una termocoppia sono che è semplice, robusta, a basso costo, di vasta varietà di tipi e forme e ampi campi di misura. Gli svantaggi è che non hanno un comportamento lineare, restituiscono bassi valori di tensione in suscita, necessitano di un riferimento p, sono poco stabili e sensibili.

Termocoppie: circuiti di misura

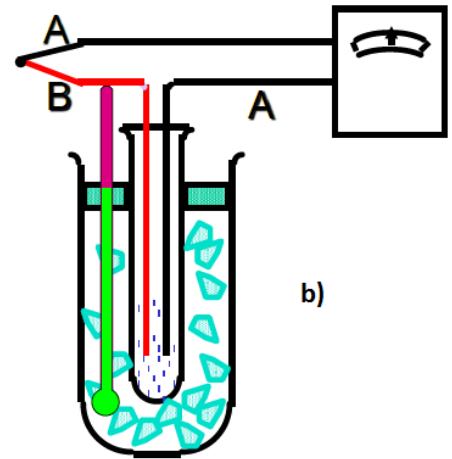
Le termocoppie necessitano di un circuito di misura che permetta di rilevare la forza elettromotrice generata e di compensare gli effetti di avere il giunto freddo che non si trova a 0°C ma ad una temperatura diversa. Possono essere di tipo diversi:

- Circuito con giunto di riferimento in bagno di acqua e ghiaccio con due giunti di riferimento = non viene usato in campo industriale a causa della scomodità, viene invece usato in laboratorio. In questo caso spesso non si saldano i fili ma si immergono in un bagno di mercurio che essendo conduttore rappresenta un giunto (proprietà 3)
- Circuito con giunto di riferimento in bagno di acqua e ghiaccio con un unico giunto di riferimento (proprietà 2)
- Circuito con giunto di riferimento con circuito di compensazione = che legge la temperatura del giunto freddo e genera una forza elettromotrice che è la stessa che avrebbe generato la termocoppia se fosse stata posta tra 0 e T_2 . In serie con la forza elettromotrice generata dalla termocoppia.

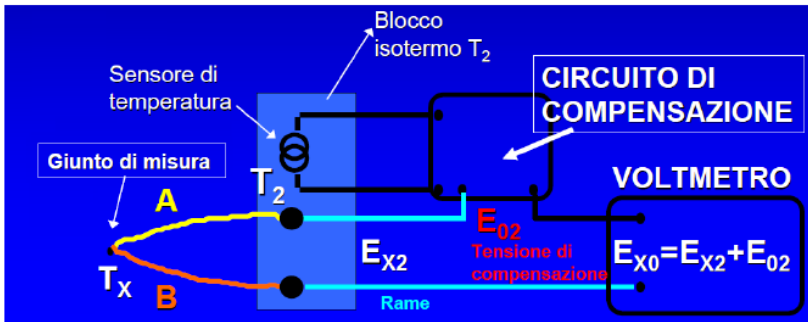
d. Termopile. Serie di termocoppie = questa circuito aumenta la sensibilità riducendo così l'incertezza in misura



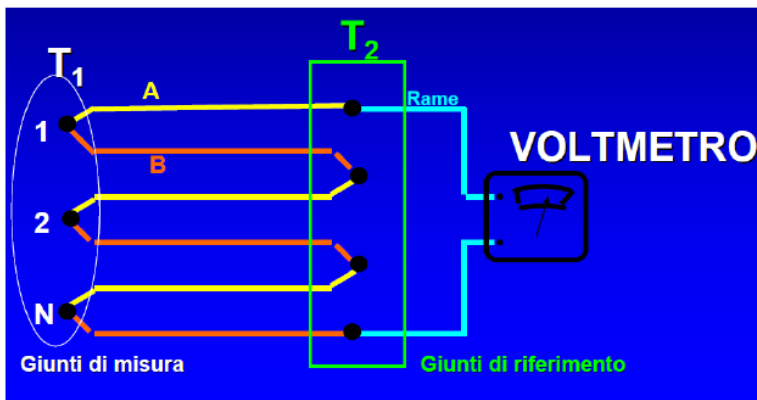
a)



b)



c)



d)