

LA MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA

La misurazione più fatta in assoluto da un ingegnere meccanico è sicuramente la temperatura per cui questa viene usata anche qualora questa non sia la risposta corretta al feedback cercato. Un esempio può essere l'andare a misurare la temperatura per valutare la potenza di una macchina piuttosto che misurare direttamente la potenza in modo diretto.

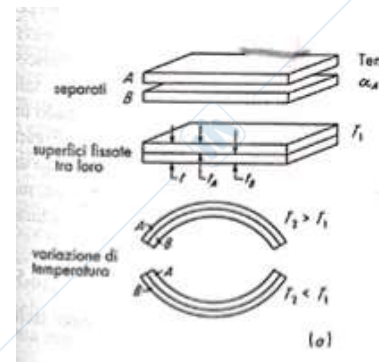
Nell'ambito del corso noi vedremo poi principalmente le misure di base, ovvero a contatto diretto e senza usare materiali smart. Sappiamo benissimo però che esistono anche metodi di misurazione della temperatura basati sull'uso di grandezze radiometriche o materiali termo reagenti.

Esistono vari tipi di termometri, ma i più comuni come sappiamo sono quelli basati sulla dilatazione di un liquido, solitamente mercurio o alcool, entro un capillare. I termometri industriali invece che hanno a che fare con temperature maggiori invece solitamente utilizzano la dilatazione termica dei metalli.

I bimetallici

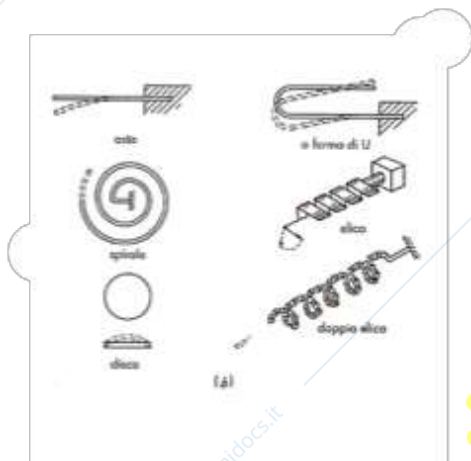
Sono dei termometri molto particolari, adatti ad alti range di temperatura. Come principio sfruttano la deformazione termica di un metallo che induce una flessione. Andando poi a misurare la deformazione potevamo andare a ricavare la temperatura dell'oggetto con il quale il metallo era in contatto.

I bimetallici classici erano composti da due lamine metalliche piuttosto sottili, di materiali diversi con coefficienti di dilatazione non comparabili. Queste due lamine venivano incollate e pressate usufruendo di resine particolari in modo tale da obbligare l'intradosso di una lastra e l'extradosso di un'altra a rimanere incollati. Se la giunzione veniva fatta a 0°C quindi questi al momento a cui venivano posti a una temperatura maggiore andavano a inflettersi. Quello con coefficiente di dilatazione più basso rallentava la flessione mentre quello più alto la trainava. Graduando la scala di flessione della doppia lamina potevamo andare quindi a valutare la temperatura.



Questi sensori possono essere usati anche come elementi di controllo, ad esempio, andiamo ad immaginare un circuito che deve attivarsi solo quando si è raggiunta una determinata temperatura su di una resistenza. Mettendo uno strumento di questo tipo, al variare della temperatura e quindi delle dimensioni di questo oggetto si potrebbe andare ad aprire un circuito piuttosto che un altro.

Esistono anche altri termometri basati sullo stesso principio che però non utilizzano neanche due metalli, ma si basano sullo stesso principio.



Ovviamente per questi termometri quello che conta maggiormente è l'ingombro che si preferisce dare al nostro strumento e il range che voglio misurare. Un oggetto a spirale avrà ovviamente un ingombro principalmente radiale mentre uno elicoidale lo avrà assiale. In funzione di dove dovrò collocare il mio strumento avrò quindi forme diverse. Il range invece è importante in quanto in funzione della ampiezza massima di temperatura che voglio misurare dovrò utilizzare materiali con coefficiente di dilatazione lineare diversa

Questi sono tra i primi termometri nati e sono ancora ad oggi molto in uso soprattutto a livello di sicurezza. Se volessi misurare ad esempio la temperatura interna di un gas dotto non posso andare

ad usare un termometro a resistenza elettrica rischiando la scintilla, ma sono obbligatori addirittura per norma sistemi come questi.

Un'altra caratteristica fondamentale di questi strumenti è la loro capacità di funzionamento anche in assenza di alimentazione, ovvero questi sono **strumenti attivi**.

LE TERMOCOPPIE

Effetto Seebeck

Detto anche effetto termoelettrico, fu trovato in maniera accidentale da Thomas Seebeck nel 1821.

Seebeck in particolar modo notò che si veniva a formare una differenza di potenziale ai capi di una barra metallica sottoposta a un gradiente di temperatura. L'effetto ancora più noto è quello Peltier con il quale si fanno le celle di raffreddamento dei computer ad alte prestazioni.

Seebeck durante i suoi esperimenti non solo osservò l'effetto termo elettrico sulla barra di acciaio, ma si accorse anche che se prendo un anello composto da due metalli diversi e pongo le giunture tra i due metalli a temperature diverse, si veniva a generare sull'anello un campo magnetico che poteva inflettere l'ago di una bussola posto al centro dell'anello stesso.

Questo effetto può essere ovviamente usato come strumento di misura della temperatura quindi seguendo uno schema ideale piuttosto semplice. Costruito un circuito chiuso quindi e messo questo in contatto con due corpi a temperatura corrispettiva T_1 e T_2 , posta un'interruzione nel circuito, se i due oggetti sono a temperatura diversa, si viene a generare una differenza di potenziale ai capi dell'interruzione.



Se non interrompo il circuito ovviamente registrerò invece il passaggio di una corrente.

Con il tempo ovviamente qualcuno penso anche di utilizzare questo

sistema per produrre corrente direttamente, ma come tecnologia non ha mai trovato molto riscontro in quanto la differenza di potenziale che si viene a generare è dell'ordine dei μV .

Come strumento di misura invece un termometro basato sull'effetto Seebeck si dice "termo coppia" ed è uno strumento attivo per cui non necessita di alimentazione, di dimensioni anche piuttosto ridotte se si vuole, con buone precisioni e senza effetti indesiderati (contaminazione del misurando o nascita di scintille) per cui ad oggi sono una delle forme di termometro più usate.

Ora, l'effetto Seebeck funziona in teoria anche con un solo materiale, ma allora perché si chiamano "termocoppie". Il nome è dovuto proprio al fatto che non si usi mai un solo elemento metallico, ma sempre due, l'effetto termoelettrico persiste anche in presenza di una sola specie, ma con due metalli diversi che hanno risposte e comportamenti diversi l'effetto è amplificato e questo ci permette di avere strumenti più precisi e sensibili.

A livello fisico l'effetto termoelettrico è dovuto a due effetti minori, ovvero il trasporto di carica per diffusione e la resistenza al moto fononico (i fononi rappresentano un quanto di vibrazione in meccanica quantistica, argomento da specialistica).

Per rendere lo strumento utile però, non possiamo solo andare a generare la differenza di potenziale, ma dobbiamo anche trovare una formula che legghi tale differenza alla temperatura, dobbiamo scrivere in poche parole la relazione costituenta.

Tale relazione vale quindi:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

dove S_A e S_B sono i coefficienti di Seebeck (o potere termo elettrico) relativi ai due metalli A e B.

I coefficienti di Seebeck sono in realtà funzioni non lineari e dipendono sia dai materiali che dallo loro temperatura assoluta, nonché che dalla loro struttura molecolare. Qualora i coefficienti si possano ritenere costanti nell'intervallo di temperatura considerato allora posso scrivere la formula come:

$$V = (S_B - S_A)(T_2 - T_1)$$

Si ricorda che T_1 e T_2 sono le temperature che si registra sulle giunzioni. Se una giunzione la lascio libera in ambiente quindi e voglio conoscere la temperatura di un oggetto B, quella che ottengo in lettura non è la T del corpo B, ma la differenza della sua temperatura da quella ambiente. Questo mi rende necessario conoscere sempre o quanto meno stimare la T_1 .

Il dispositivo risultante sarà quindi una cosa del genere.

Questo strumento si presta a una marea di funzioni ed è particolarmente comodo essendo uno strumento differenziale a misurare la differenza di temperatura tra due corpi.

Notare come, tanto maggiore è la differenza di potere termo elettrico dei due materiali tanto è più inclinata la retta della curva caratteristica e quindi più sensibile lo strumento. Per questo motivo è molto importante scegliere con cura i materiali.

Le termocoppie

Come abbiamo detto le termocoppie sono trasduttori attivi, in quanto generano spontaneamente una tensione senza aver bisogno di alimentazione. La corrente che si viene a generare abbiamo poi visto essere proporzionale al gradiente di temperatura su cui poggiano le giunzioni. Come abbiamo quindi la differenza di voltaggio ai capi del circuito aperto è data da:

$$e = S_{AB}(T_1 - T_2)$$

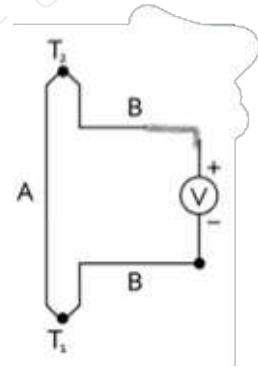
dove S_{AB} viene detta coefficiente di Seebeck. Per la valutazione di tale coefficiente però, dobbiamo fare riferimento ad altre due costanti che sono la costante di Peltier e la costante di Thompson, le quali a loro volta dipendono dalla temperatura. Il coefficiente di Seebeck lo definiamo quindi:

$$S_{AB} = \frac{d\pi_{AB}}{dT} + (\tau_A - \tau_B)$$

dove π_{AB} è la costante di Peltier, dipendente da materiale e temperatura, mentre τ è la costante di Thompson, la quale dipende solo dal materiale.

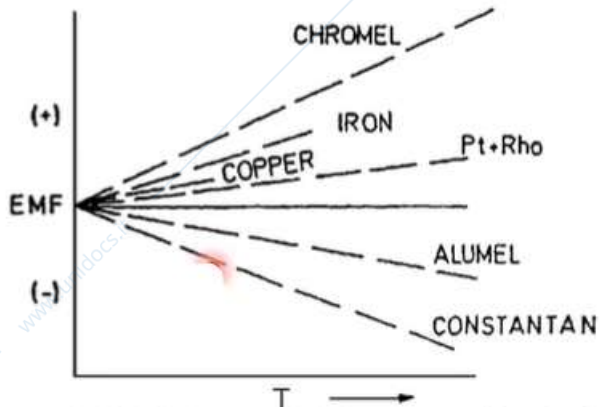
Il coefficiente di Seebeck dunque non è costante ma dipende dai due materiali e dalla T. Per piccole variazioni di temperatura però con buona approssimazione lo possiamo immaginare come costante. Quando non possiamo fare tale approssimazione invece dobbiamo ricorrere alle prove sperimentali e andare a ricavare la funzione del coefficiente sfruttando i polinomi interpolanti anche di grado molto alto, non essendo infatti possibile definire una funzione lineare di base che descrive l'andamento di questo coefficiente.

Una termocoppia alla fine è costituita da due fili molto sottili (per velocizzare l'equilibrio termico) di materiale metallico distinto, saldati assieme in due punti detti giunzioni. Come abbiamo già detto poi, la termocoppia fornisce solo la differenza di temperatura tra due corpi e non la temperatura assoluta, almeno



che non si conosca una delle due temperature di giunzione. La giunzione a temperatura nota è detta **giunzione fredda o di riferimento** mentre quella incognita viene detta **giunzione calda**.

Per quanto riguarda invece la scelta dei materiali da combinare nella termocoppia, questa sarà effettuata sulla base di classificazioni dei materiali in termini di **polarità termoelettrica**. **Un materiale viene detto positivo se la sua forza elettromotrice indotta cresce con la temperatura, mentre viene detto negativo nel caso contrario.**



Polarità termoelettrica per vari materiali

Quelli rappresentati qui in tabella sono quindi i materiali più comunemente usati nelle termocoppie in quanto sono stati normati e si sono rilevati resistenti agli sforzi termici. Si ricorda che in questo grafico l'asse delle ascisse è in riferimento alla temperatura.

Per scegliere i materiali da termocoppia dobbiamo quindi considerare il costo e la capacità di amplificazione del segnale. Stabilita una temperatura da registrare e tirata la verticale per quella temperatura. Trovate le intersezioni con tutti i materiali la coppia con il segmento intersecante più lungo sarà quella che amplifica meglio il segnale. Ovviamente la scelta deve essere proporzionata a costi e interessi della misura.

Le leggi della termocoppia

Legge 1

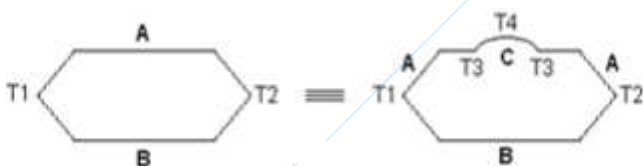
“La f.e.m. per effetto termico di una termocoppia con giunti alle temperature T_1 e T_2 risulta totalmente indipendente da qualsiasi temperatura intermedia ovunque localizzata nel circuito, a patto che i materiali siano omogenei.”



Questa legge in poche parole ci dice che in qualsiasi modo io sistemi la mia termocoppia su di un materiale, a patto che siano gli stessi gradienti di temperatura sulle giunture e i materiali siano omogenei allora queste si comportano alla stessa maniera.

Legge 2

“Se un terzo metallo omogeneo C è inserito dentro A o B , fino tanto che le nuove termogiunzioni sono alla stessa temperatura, la f.e.m. del circuito risulta invariata, indipendentemente dalle temperature intermedie del tratto C ”



Questa legge ci dice invece che data una termocoppia modificata con l'inserimento di un materiale omogeneo C , qualsiasi temperatura questo registri, le due termocoppie si comportano alla stessa maniera a patto che alle giunture si possa registrare la stessa temperatura.

Questo ci permette di usare materiali sensibili per i sensori ma poi materiali anche scadenti per il resto del circuito abbassando così il costo complessivo.

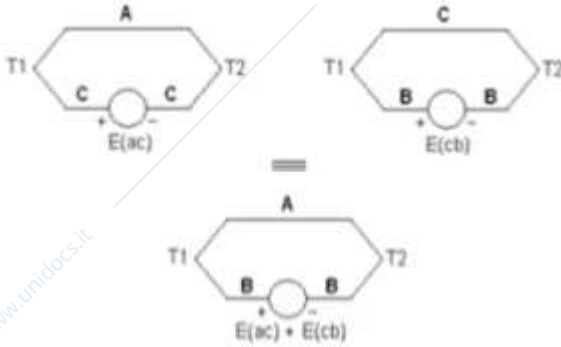
Legge 3

“Se il metallo C è inserito in A e B da una delle due giunzioni, qualsiasi temperatura intermedia del tratto C è irrilevante”



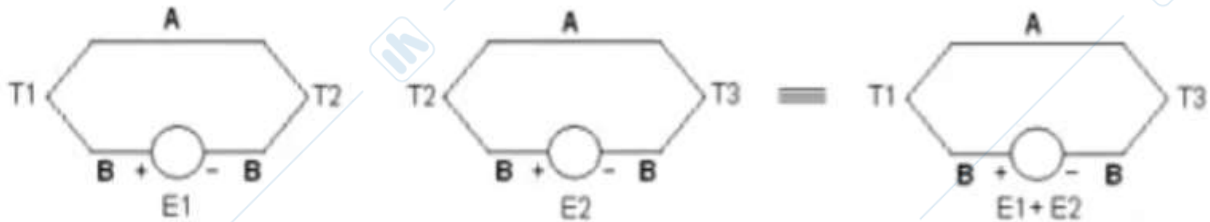
Legge 4

“Data una termocoppia composta dai materiali A e C per la quale registro una forza elettromotrice $E(ac)$ e una seconda termocoppia composta dai materiali C e B sulla quale registro una f.e.m. pari a $E(cb)$, se creo una terza termocoppia con A e B la f.e.m. che registro è pari a $E(ac) + E(cb)$ ”



Legge 5

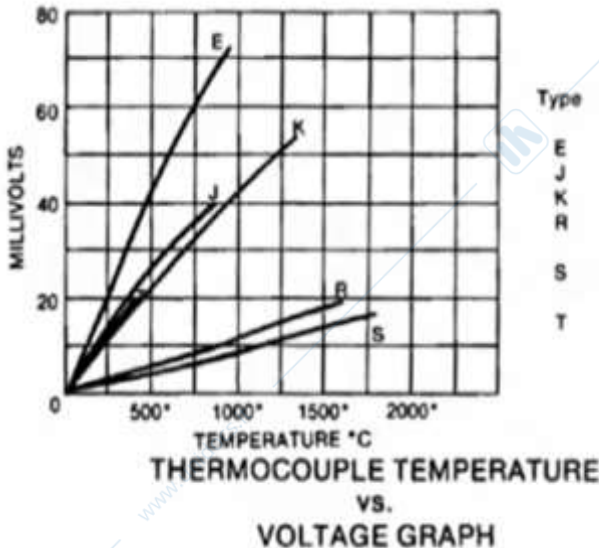
“Se data una termocoppia composta da A e B, registro per una differenza di temperatura $T_2 - T_1$ una f.e.m. E_1 e per una differenza di temperatura $T_2 - T_3$ una f.e.m. E_2 ottengo che se potessi applicare la termocoppia alla differenza di temperatura $T_3 - T_1$ avrei $E_3 = E_1 + E_2$ ”



Queste leggi sono molto utili perché si permettano di costruire al meglio una termocoppia e determinare anche alcuni procedimenti per la lettura della termocoppia.

Le termocoppie come abbiamo detto sono però normate, come i materiali che le compongano per cui quando me ne invento una personale devo essere in grado di definirla. In alternativa quando faccio una

misurazione devo indicare la termocoppia usate chiamandola con il nome di normativa.

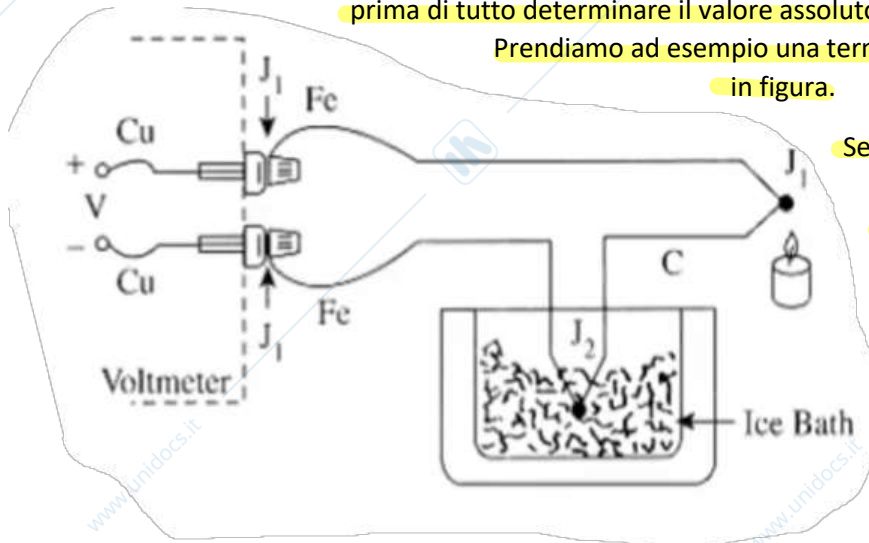


Notare però come la termocoppia abbia variazioni molto piccole sulla temperatura, dell'ordine dei $10-40 \mu V$ e quindi dobbiamo avere degli ottimi strumenti di misura della corrente e poche interferenze elettromagnetiche.

Temperatura riferita a un T nota – Sistema del giunto freddo

Per poter determinare la temperatura assoluta al giunto caldo sfruttando una termocoppia dobbiamo prima di tutto determinare il valore assoluto della temperatura al giunto freddo.

Prendiamo ad esempio una termocoppia ferro-costantana come quella in figura.



Se applicassi la termocoppia solo alla candela quello che registrerei è la differenza di temperatura tra la fiamma e l'ambiente. La temperatura di assoluta rispetto allo 0°C quindi sarà data dalla somma della temperatura assoluta dell'ambiente (giunto freddo) più la ΔT registrata dalla termocoppia (giunto caldo).

Per determinare però la temperatura assoluta del giunto freddo?

Sfruttando la legge 5, quello che possiamo fare è collegare in serie due termocoppie, sempre di ferro costantana, in modo tale che però si abbia, un giunto freddo in ambiente, un giunto freddo di riferimento immerso in un bagno di acqua e ghiaccio all'equilibrio (che sappiamo essere a 0°C) e un giunto caldo di fiamma.

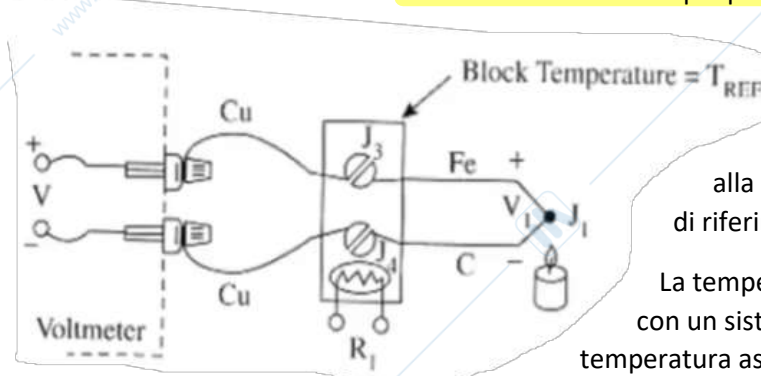
Collegandole, la prima termocoppia registrerà una f.e.m. corrispondente alla ΔT candela – ambiente mentre la seconda la registra corrispondente alla differenza tra ghiaccio e ambiente. Queste poi andando via sullo stesso cavo si vanno a sommare e verrà quindi letta sul voltmetro la f.e.m. corrispondente alla temperatura assoluta di fiamma.

Ma allora, ogni volta che voglio una T assoluta devo portarmi dietro una vaschetta di ghiaccio e acqua?

Certo che no e vediamo quindi la soluzione a giunto isoterma.

Temperatura riferita a un T nota – Sistema del giunto isoterma

Soluzione sicuramente più pratica è quella di rimpiazzare la vaschetta di



ghiaccio con un sistema isoterma che prendiamo come riferimento e di aumentare o diminuire il segnale che riceviamo di una quantità energia pari alla f.e.m. che si genererebbe tra la temperatura di riferimento e quella assoluta.

La temperatura del blocco isoterma viene misurato con un sistema superiore che rende direttamente la temperatura assoluta.

Geometria della termocoppia

Le termocoppie di tipo industriale sono sonde preassemblate dove i due fili si trovano all'interno di una guaina metallica di elevata resistenza, riempita di un opportuno isolante, solitamente ossido di magnesio. La geometria della giunzione però solitamente è variabile in funzione di quello di cui abbiamo bisogno.

Ad esempio, se la misura che dobbiamo fare è difficilmente inquinata dall'ambiente esterno, allora per diminuire il tempo di lettura legato all'inerzia termica ci basta andare a fare un **giunto caldo esposto**. Come struttura risulta però anche molto fragile in quanto i fili sono veramente molto sottili e quindi poco adatta a applicazioni industriali pesanti o ambienti corrosivi.

La giunzione può essere in alternativa protetta da una guaina. In questo tipo di realizzazione il giunto di misura è parte integrale della guaina di protezione e di conseguenza il tempo di risposta è abbastanza ridotto. In questo modo abbiamo protetto il giunto, senza ridurre l'inerzia e diminuendo disturbi di tipo elettrico. Ovviamente però non abbiamo protetto il giunto dall'interferenza dell'ambiente.

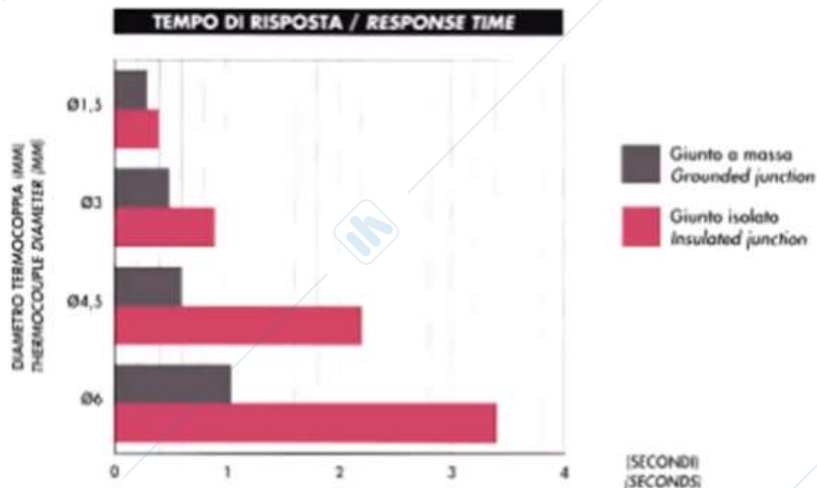
La giunzione protetta viene quindi per alcune tipologie di misure completamente isolata in modo tale da garantire la più bassa influenza possibile dell'ambiente, una riduzione degli dei disturbi e un aumento delle proprietà meccaniche a discapito però di una perdita di rapidità nella lettura a causa dell'aumento dell'inerzia.



Il filo di una termocoppia deve essere sottile in quanto si desidera che questo abbia una bassa inerzia termica in modo tale che raggiunga la temperatura di equilibrio con la grandezza che vogliamo misurare il più velocemente possibile. Questo porta quindi a delle fragilità intrinseche nel filo stesso ovviamente che anche alla minima sollecitazione meccanica potrebbe rompersi, ma non solo. I frequenti sbalzi termici a cui viene sottoposto il filamento della termocoppia producono comunque sollecitazioni meccaniche che a fatica possono portare alla rottura dello strumento. Per questo motivo sappiamo che i nostri strumenti hanno una durata di vita finita che permette al massimo un certo numero di misurazioni. Quando andiamo a scegliere quindi una termocoppia e i materiali di cui è composta dobbiamo pensare quindi anche in funzione del ciclo di vita. Se dovessi costruire ad esempio un sensore che registri la temperatura interna di un motore che raggiunge al massimo i 300°C ad esempio potrei scegliere tra una resistenza strettamente adatta al range di misurazione che voglio effettuare, ma che avrà una durata inferiore oppure una che resiste anche a temperature più alte e che quindi ha costi più elevati, ma che durerà molto di più rispetto a quella di classe inferiore. La resistenza meccanica della termocoppia non dipende poi solo dai materiali come abbiamo detto, ma anche dalla geometria del giunto caldo per cui nella scelta dobbiamo tenere conto dei seguenti parametri:

- **materiale:** che ci indica la resistenza meccanica e termica della nostra termocoppia di base
- **geometria:** la quale può proteggere più o meno la nostra termocoppia, più una termocoppia è protetta maggiore sarà la sua inerzia termica.
- **durata di vita desiderata del nostro strumento:** la quale influenza le scelte precedenti, la durata di vita invece viene valutata sulla base di quanto si vuole spendere al massimo per la sostituzione dei sensori e in funzione di dove deve essere collocata la termocoppia. Il sensore che misura la temperatura interna di un reattore nucleare, ad esempio, è preferibile che si debba sostituirlo solo dopo molti anni di servizio perciò deve durare molto.
- **inerzia termica desiderata:** sceglieremo materiale e geometria della termocoppia anche in funzione di quanto desidero avere velocemente la mia risposta.

Per misurare l'inerzia termica in funzione dello spessore del filamento della geometria si ricorre a una prova normata che valuta dopo quanto tempo la termocoppia raggiunge il 63,2% del salto termico che deve fare se immersa in acqua che si muove a 0,4 m/s.



Si prende il 63,2% del salto termico perché come sappiamo l'equilibrio termico perfetto in realtà è asintotico.

Taratura

Solitamente la maggior parte delle termocoppie arriva già tarata con un'apposita certificazione. Il problema è che questi certificati hanno una scadenza per cui dobbiamo andare solitamente a ritrarle. La

normativa **UNI 4768** indica quindi come eseguire la taratura la quale varia però in funzione del range di temperatura e dei materiali della termocoppia.

Identificazione delle termocoppie

Le termocoppie vengono nominate utilizzando delle lettere alfabetiche e la loro resistenza termica al variare del range di T è sempre indicata da normativa, la quale ci indica quindi il diametro minimo consigliato.

Tipo di termocoppia	Materiale del tipo di termocoppia	
S	Platino — 10% Rodio	vs. Platino
R	Platino — 13% Rodio	vs. Platino
B	Platino — 30% Rodio	vs. Platino - 6% Rodio
J	Ferro	vs. Rame-Nichel
T	Rame	vs. Rame-Nichel
K	Nichel — 10% Cromo	vs. Nichel - 6% Alluminio
E	Nichel — 10% Cromo	vs. Rame-Nichel

Tipo di termocoppia	Diametro dei fili in mm				
	3,2	1,6	0,8	0,5	0,3
	Limite massimo di temperatura °C				
S				1 450	
R				1 450	
B				1 700	
J	750	590	480	370	370
T		350	260	200	200
K	1 250	1 090	980	970	870
E	900	650	540	430	430

La termocoppia solitamente più comune e quella più usata in ambito industriale è quella di tipo K.

Ogni termo coppia, o meglio ogni materiale poi, era definito da un coefficiente di Seebeck che come abbiamo visto non è costante, ma è una funzione non lineare che veniva determinata sperimentalmente attraverso l'uso di polinomi interpolanti. I coefficienti del polinomio interpolante per il coefficiente di

Seebeck per ogni materiale normato da termocoppia sono quindi a loro volta normati e definiti in apposite tabelle.

Qui di seguito si riporta ad esempio la norma del polinomio per la termocoppia K.

Campo di temperatura	Polinomio
-270 a 0 °C	$E = \sum_{i=0}^{10} a_i t^i \quad [\mu V]$ <p>dove:</p> $a_0 = 0$ $a_1 = 3,947\,543 \times 10^1$ $a_2 = 2,746\,525 \times 10^{-2}$ $a_3 = -1,656\,541 \times 10^{-4}$ $a_4 = -1,519\,091 \times 10^{-6}$ $a_5 = -2,458\,167 \times 10^{-8}$ $a_6 = -2,475\,792 \times 10^{-10}$ $a_7 = -1,558\,528 \times 10^{-12}$ $a_8 = -5,972\,992 \times 10^{-15}$ $a_9 = -1,268\,880 \times 10^{-17}$ $a_{10} = -1,138\,280 \times 10^{-20}$
0 a 1372 °C	$E = \sum_{i=0}^8 a_i t^i + 125 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-127}{65} \right)^2 \right] \quad [\mu V]$ <p>dove:</p> $a_0 = -1,853\,306 \times 10^1$ $a_1 = 3,891\,834 \times 10^1$ $a_2 = 1,864\,515 \times 10^{-2}$ $a_3 = -7,870\,237 \times 10^{-5}$ $a_4 = 2,283\,579 \times 10^{-7}$ $a_5 = -3,570\,023 \times 10^{-10}$ $a_6 = 2,993\,291 \times 10^{-13}$ $a_7 = -1,284\,985 \times 10^{-16}$ $a_8 = 2,223\,997 \times 10^{-20}$

Ovviamente ogni termocoppia ha anche la sua precisione e tolleranze di misura che viene normata al variare della scelta dei materiali e della geometria.

La normativa, infine, si occupa anche di scegliere il colore dei cavi, della copertura del giunto e la lunghezza massima che i cavi di trasmissione del segnale possono raggiungere.

Potenziali cause di errore con termocoppie

Le principali cause di errore che possiamo fare nell'andare a leggere una temperatura con una termocoppia sono dovute alle piccole forze elettromotrici in gioco. Se infatti la termocoppia è connessa con uno strumento non adatto potremmo non riuscire a leggere il segnale, così come se inavvertitamente scambiamo i poli dell'elettrodo o il cavo di trasmissione ha una perdita di potenza. Per risolvere la maggior parte di questi problemi è sufficiente avere cavi di trasmissione sottili, puri, montati correttamente e soprattutto schermati con apposite guaine.

Tra gli errori dovuto invece alla termocoppia abbiamo la disomogeneità della composizione dei materiali, un allungamento dei cavi dovuto ad un ancoraggio imperfetto e alle vibrazioni, la decalibrazione progressiva e i disturbi elettrici nel sistema di misura.

Termometri a resistenza

Ovviamente le termocoppie non sono gli unici strumenti che abbiamo a disposizione per la misurazione della temperatura. I secondi strumenti più usati in assoluto sono le **termoresistenze** che ora andremo ad analizzare nel dettaglio. Come sappiamo dai corsi di Fisica 2, una resistenza varia la sua R in funzione della temperatura e ovviamente variando la R varia anche la caduta di potenziale che registriamo ai capi di quest'ultima. Andando quindi a selezionare appositi materiali, i quali devono rispettare dei requisiti di stabilità e linearità nella variazione di R in funzione di T , possiamo andare ad utilizzare questi materiali come elementi sensibili per la misurazione della temperatura.

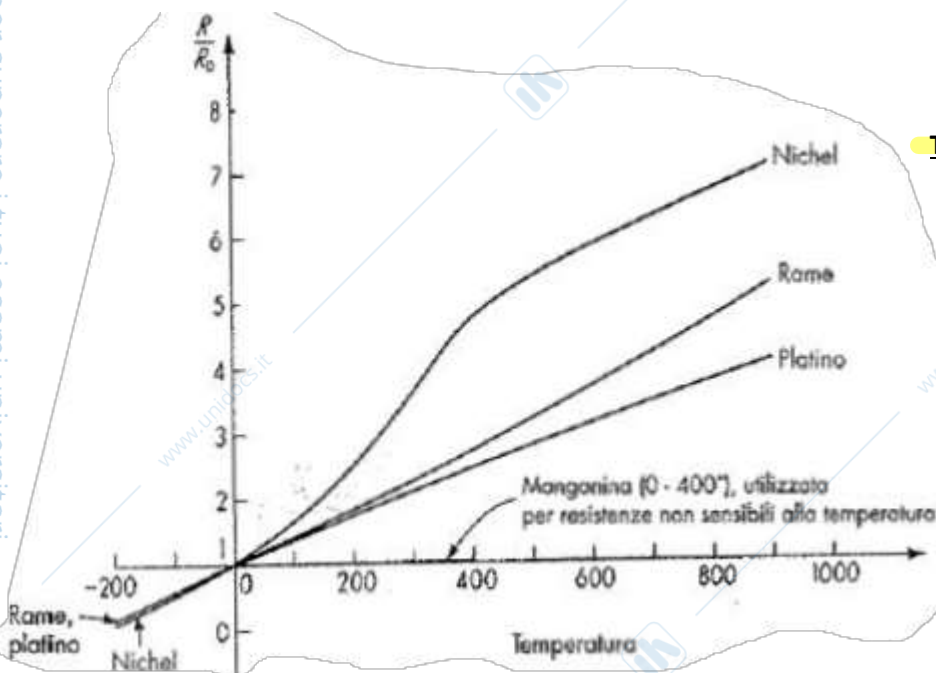
I materiali possono essere divisi generalmente in **conduttori** e si parla quindi di **termoresistenze o semiconduttori** per cui abbiamo i così detti **termistori**.

Come strumento hanno un segnale molto più forte, per cui sono generalmente più facili da leggere e talvolta anche più precisi delle termocoppie vista la loro anche alta sensibilità. Hanno però una pecca, **sono strumenti passivi**, per cui non adatte a tutte le tipologie di misurazione soprattutto quelle in ambiente infiammabile o esplosivo.

A livello matematico, approssimando con un polinomio interpolante i dati sperimentali possiamo quindi esprimere la relazione tra R e T come:

$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n)$$

e andare a graficare l'andamento di R/R_0 per alcuni materiali come:



Termoresistenze

Gli elementi sensibili sono costituiti da un gran numero di forme differenti, e solitamente, soprattutto per la misurazione della temperatura di fluidi le resistenze sono avvolte all'interno di un bulbo che li protegge da gas e fluidi nocivi.

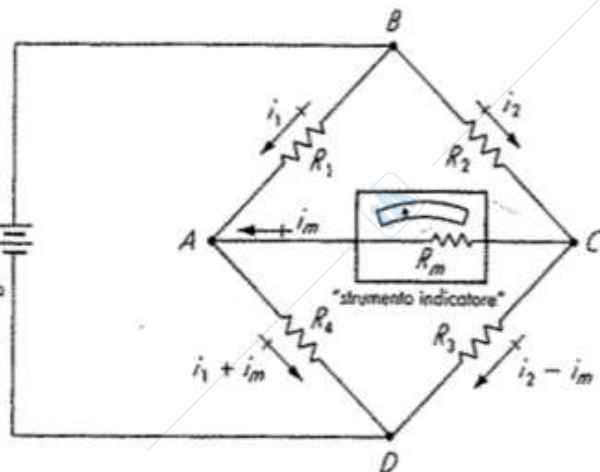
Ovviamente le sonde si dividano quindi in **aperte o chiuse in funzione della presenza più o meno del bulbo** e dobbiamo

aspettarci tempi di risposta diversi. La termoresistenza

chiusa oltre tutto presenta anche un'altra pecca legata all'auto riscaldamento della resistenza stessa per effetto Joule. Quando la resistenza è chiusa, lo scambio termico sarà più basso e l'effetto dell'auto riscaldamento sarà maggiore.

Le termoresistenze solitamente non sono mai delle resistenze singole ma piuttosto dei circuiti sui quali passa una corrente alimentata dall'esterno. Tali circuiti hanno forme differenti in funzione della tipologia di misura che devo fare (ad esempio per la misura di T di una superficie conviene avere un circuito planare), ma hanno alla fine sempre un elemento comune, **i circuiti sono tutti a ponte di Wheatstone**.

Un ponte di Wheatstone non è altro che un circuito così fatto:



dove abbiamo 4 resistenze ai lati e una a ponte, dove quelle ai lati sono messe a coppie di due in serie e le due coppie a loro volta sono poi tra loro in parallelo.

Se tutte e 4 le resistenze sono uguali il ponte è all'equilibrio e nel cavo AC quindi non abbiamo il passaggio di corrente, ma se anche una sola delle resistenze esterne cambia, il ponte si sbilancia per cui registreremo un passaggio di corrente nel cavo che funge da amplificatore di segnale. In funzione della caduta di potenziale AC posso quindi determinare la temperatura.

Il ponte di Wheatstone può essere gestito in realtà in due modi diversi, a deflessione e ad azzeramento.

Nel primo caso la lettura delle tensioni da un'indicazione sulla temperatura, mentre nel secondo caso andiamo ad inserire una resistenza regolabile nel circuito che in funzione della regolazione imposta per riequilibrare il tutto ci dà un'indicazione su T.

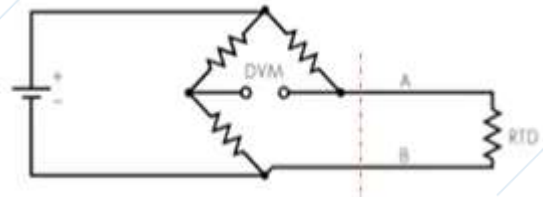
Metodi di misura con i termometri a resistenza

Esistono ovviamente diversi metodi di misurazione e collegamento del circuito all'elemento sensibile. La scelta di un metodo rispetto ad un altro è dettata esclusivamente dall'utilizzo della misura e dalla precisione richiesta.

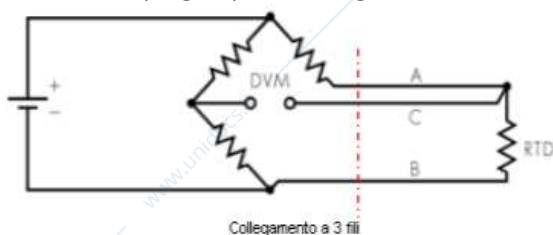
I collegamenti possono essere eseguiti a:

- 2 fili
- 3 fili
- 4 fili voltamperometrica

La tecnica a due fili è in assoluto la più semplice e meno precisa. Viene utilizzata nei casi in cui la misurazione non deve essere troppo precisa, per cui il collegamento della termoresistenza viene effettuato con fili di lunghezza ridotta e bassa resistività. Esaminando il circuito equivalente si nota infatti come la resistenza elettrica sia la somma della resistenza sensibile e della resistenza dei conduttori usati per il collegamento. L'errore che si introduce è dunque legato alla resistenza dei fili di collegamento che per tale motivo vengano presi corti e con bassa resistività. Tali strumenti ovviamente sono anche i meno costosi ovviamente.



La tecnica a tre fili invece visto il rapporto qualità della misura prezzo, è in assoluto la più usata nel campo industriale. Con questa tecnica di misura infatti vengono eliminati gli errori provocati dalla resistenza dei conduttori impiegati per il collegamento della termoresistenza. All'uscita del ponte di misura è presente



una tensione dipendente unicamente dalla variazione della resistenza del termometro a resistenza e quindi dalla sola temperatura.



La tecnica a 4 fili voltamperometrica fornisce invece la miglior interpretazione della temperatura in quanto due fili registrano la differenza di potenziale direttamente ai capi della resistenza valutando così istantaneamente la temperatura. Visti i costi viene poco usata in ambito industriale e impegnata solo in laboratorio. Analizzando il circuito possiamo chiaramente vedere come la ΔV dipenda solo ed esclusivamente dalla caduta di potenziale ai capi del termoresistore e pertanto gli unici errori possibili sono quelli legati alla variazione dell'intensità di corrente e alla precisione della lettura della caduta di potenziale.

Ovviamente tutta la componente legata all'auto riscaldamento rimane indipendentemente dalla tipologia di termocoppia.

Problemi e possibili errori

Le principali cause di errore sono ancora ovviamente, l'auto riscaldamento, lo scarso isolamento elettrico dell'elemento sensibile ed infine l'errore dovuto alla non sufficiente profondità di immersione dell'elemento sensibile.

L'auto riscaldamento dell'elemento sensibile è un errore che possiamo però studiare e che si ha, in fase di misura, quando la resistenza viene attraversata da una corrente troppo elevata che, per l'effetto Joule, ne fa aumentare la temperatura (un elemento di platino da 450Ω ad esempio, percorso da 25 mA presenta un errore di auto riscaldamento di 0.1°C). Per ovviare al problema dell'auto riscaldamento si può usare un'eccitazione a impulsi non simmetrici in modo da non avere un aumento di T continuo per effetto Joule.

Per quanto riguarda l'isolamento invece, abbiamo bisogno di calibrarlo in maniera accurata. Arrivando a misurare oggetti anche $600-700^\circ\text{C}$ ovviamente l'isolamento non può essere fatto in plastica in quanto altrimenti fonderebbe. Dobbiamo andare ad utilizzare o cavi minerali (che hanno però un costo elevato) o bulbi metallici, i quali però conducano corrente. Queste protezioni possono essere viste come resistenze in parallelo a quella sensibile che ne va influenzare quindi la misurazione della caduta di potenziale.

L'abbassamento della resistenza di isolamento può verificarsi per l'utilizzo della sonda con temperature troppo elevate, in presenza di forti vibrazioni o per l'influenza di agenti fisici o chimici

Particolarmente importante è anche la **profondità di immersione dell'elemento sensibile**. Questa, a differenza delle termocoppie la cui misura può considerarsi puntiforme, se non è adeguata, può arrecare errori nella misura anche nell'ordine parecchi gradi $^\circ\text{C}$. Questo è dovuto al fatto che la guaina, solitamente metallica, con cui viene protetto l'elemento sensibile dissipa calore in maniera proporzionale alla differenza di temperatura presente tra la zona calda e quella fredda; si è quindi in presenza di un gradiente termico su parte della lunghezza della guaina. La profondità di immersione dovrà quindi essere sufficiente per fare in modo che l'elemento sensibile posto all'interno della guaina, non sia sottoposto a questo gradiente termico. La profondità minima, quindi, viene definita dalle dimensioni della resistenza e dalla tipologia di misura.

Classi di tolleranza per le termoresistenze

Le termoresistenze vengono classificate in funzione del materiale che le compone e della loro classe. Ogni termoresistenza viene indicata con il simbolo chimico del conduttore con la quale la vado a costruire e accompagno il simbolo con il valore della resistenza che il materiale presenta a 0°C . Per cui, quando scrivo ad esempio Pt 100, significa che la termoresistenza si fatta è composta da platino e che presenta una resistenza di 100Ω a 0°C .

Temperatura (°C)	Tolleranza			
	Classe A		Classe B	
	(± °C)	(± Ω)	(± °C)	(± Ω)
-200	0.55	0.24	1.3	0.56
-100	0.35	0.14	0.8	0.32
0	0.15	0.06	0.3	0.12
100	0.35	0.13	0.8	0.30
200	0.55	0.20	1.3	0.48
300	0.75	0.27	1.8	0.64
400	0.95	0.33	2.3	0.79
500	1.15	0.38	2.8	0.93
600	1.35	0.43	3.3	1.06
650	1.45	0.46	3.6	1.13
700	—	—	3.8	1.17
800	—	—	4.3	1.28
850	—	—	4.6	1.34

Ogni termoresistenza poi si divide in classi di accuratezza, denominata con le lettere alfabetiche a partire dalla A (classe migliore) e via a scendere.

Ovviamente le classi migliori hanno tolleranze migliori, ma anche costi più alti. In ogni caso si ribadisce l'elevata accuratezza della termoresistenza che anche ad alte temperature raggiunge al massimo nelle classi peggiori un errore di 5°C su un T=850°C. La tabella in questione fa riferimento a una Pt 100.

Termistori

I termistori sono oggetti molto moderni, fatti come abbiamo detto all'inizio con materiali semiconduttori. Il principio di funzionamento è il solito delle termoresistenze, ma rispetto a queste sono molto più sensibili. Se quindi già una termocoppia è 6-7 volte più accurata di una termocoppia, con un termistore arriviamo a 100 volte l'accuratezza.

Questo perché la legge con cui variano la loro resistenza in funzione della temperatura è esponenziale e ha formula:

$$R = R_0 \exp \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

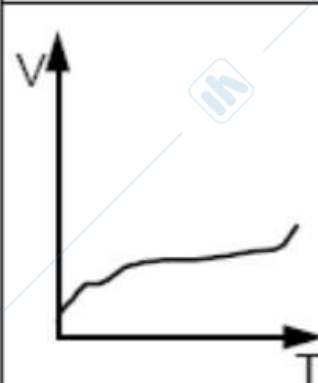
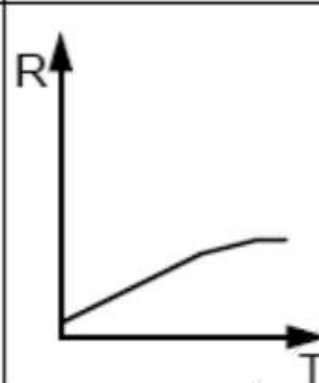
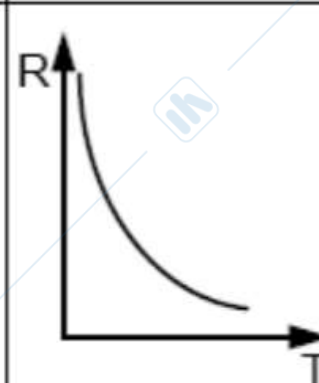
con T_0 temperatura di riferimento del calcolo di R_0 , in generale $T=298,15^\circ\text{C}$.

Le prime leghe termoconduttori erano fatti di manganese o cobalto in polvere legate con un elemento basso fondente che mi permettesse di dare una forma qualsiasi al sensore tramite uno stampo e di andare ad integrarlo sulle componenti stesse della macchina. Questa tecnica produttiva ad oggi migliorata, mi permette ancora di sistemare effettivamente questi sensori però dove voglio dandogli qualsiasi forma io desidero e sistemandoli nei componenti. Come strumenti sono molto più sensibili, di conseguenza anche più veloci. Il loro range di funzionamento è ampissimo a vanno dai -200°C fino ai 1000°C in quanto alcuni di questi semiconduttori fondano a temperature molto elevate. Ovviamente se sono fatti in elementi di lega con quindi, polveri di semiconduttori in una matrice metallica la T massima si abbassa e scende a fino 650°C nel caso si usi l'argento.

Spesso i termistori sono talmente accurati che vengono usati anche per creare o realizzare sistemi di termostazione di precisione (come, ad esempio, per misurare la T di giunto freddo delle termocoppie).

Questi oggetti visti comunque la loro complicazione nella produzione hanno un costo elevato, se prodotti singolarmente. Il costo può essere ovviamente abbassato invece se avviamo una produzione in serie o chiediamo un gran numero di pezzi ad un'azienda.

Pro e contro dei vari sistemi

	Termocoppie	RTD	Termistori
			
Pro	autoeccitante semplice robusto poco costoso ampio range temp.	molto stabile molto accurato molto lineare	molto sensibile veloce molto accurato
Contro	non lineare bassa tensione di usc. serve una temp. di rif. bassa sensibilità	costoso serve rif. di corrente autoriscaldamento	non lineare range limitato di T serve rifer. di corrente autoriscaldamento

Errori di lettura della temperatura non dovuti allo strumento

Indipendentemente dal tipo di sensore utilizzato tutte le volte che vogliamo misurare la temperatura stazionaria di un fluido si sommano sostanzialmente tre tipologie di errore:

- Conduzione del sensore verso pareti o superfici fredde.
- Irraggiamento verso pareti calde o fredde (non in equilibrio termico col sensore (si ricorre a sonde schermate)).
- Incompleto recupero dell'energia cinetica

Errori di conduzione

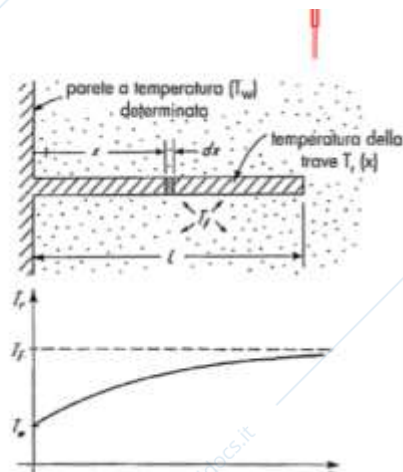
Supponendo che la temperatura della sbarra T_r sia funzione solo di x e che il fluido con temperatura T_f costante e uniforme scambi calore per convezione con la sbarra l'equazione che lega lo scambio termico sarà:

$$\frac{d^2 T_r}{dx^2} - \frac{hC}{kA} T_r = -\frac{hC}{kA} T_f$$

h : coeff. di scambio convettivo
 C : circonferenza della sbarra
 k : conducibilità termica della sbarra
 A : area della sezione

L'errore sulla temperatura risulta:

$$T_r - T_f = \frac{T_w - T_f}{\cosh \sqrt{\frac{hC}{kA}} L}$$



L'errore commesso può essere ridotto se:

- riesco a controllare la T di parete
- L, la lunghezza del sensore è molto grande
- h grande, per cui il fluido si muove veloce
- k piccolo, per cui lo scambio termico tra la sonda e il supporto è scarso
- C/A grande, per cui un r piccolo nel caso di sonda circolare.

Per quanto riguarda l'irraggiamento invece sappiamo che per evitare l'influenza di quest'ultimo abbiamo bisogno dell'inserimento di alcuni schermi.

Nel caso della misura della temperatura totale, sarebbe necessario raggiungere rapidamente, nei pressi del sensore, velocità nulla per avere il completo recupero dell'energia cinetica ($T_0 = T + \frac{1}{2}c^2/c_p$ per un gas). Ciò formerebbe nelle vicinanze del sensore una zona dove la trasmissione del calore attraverso il gas si effettuerebbe con il meccanismo della conduzione, notoriamente poco efficiente nei gas. In tale situazione, è molto difficile ottenere l'equilibrio termico desiderato tra flusso e sensore, in quanto, come abbiamo precedentemente visto, esistono meccanismi preferenziali di scambio termico per conduzione (attraverso l'asta della sonda, costituita da materiale strutturale a conducibilità più elevata) e di irraggiamento dal sensore verso pareti sensibilmente più fredde (fino a 600°C nelle turbine a gas) o verso zone più calde (irraggiamento verso la fiamma proveniente dalla camera di combustione).

Da quanto visto la soluzione ottimale risulta quindi l'accettazione di un compromesso, ovvero la rinuncia al recupero totale dell'energia cinetica, ai fini della creazione intorno al sensore di un ambiente a velocità bassa ma controllata che consenta un efficiente scambio di calore tra flusso e sensore. Ciò si ottiene con l'adozione di sonde schermate, nelle quali lo schermo ha la doppia funzione di effettuare un controllo di velocità (e di garantire una buona insensibilità angolare) e di ridurre l'irraggiamento dal sensore verso le pareti.