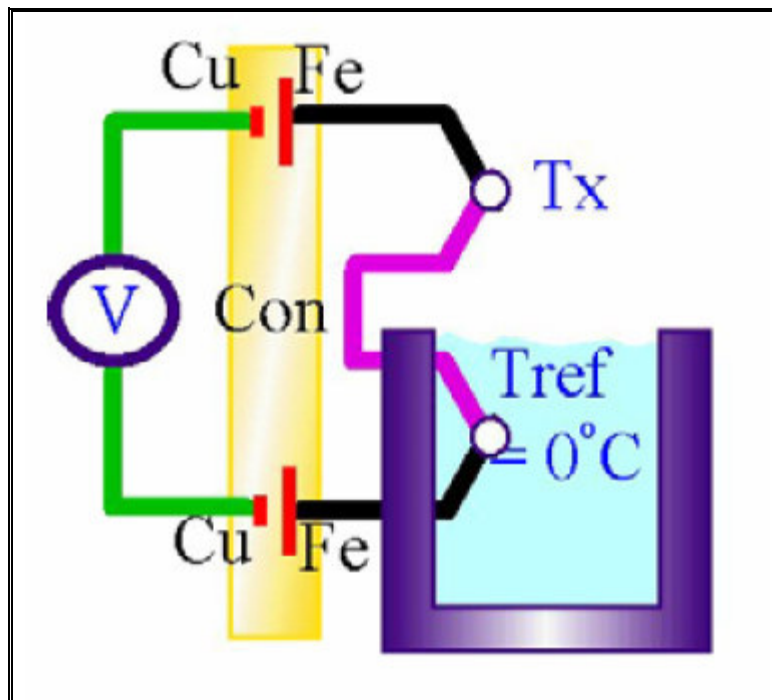


Sensori di temperatura



Modellistica ed ingegneria dei materiali elettrici

Docente: Ing. Giuseppe Acciani

Studente: Nicola Vitti

Politecnico di Bari – A.A. 2004/2005

Indice

1.	Introduzione	1
1.1.	Misure della temperatura – trasmissione del calore	1
1.2.	Caratteristiche di un sensore di temperatura	3
2.	Sensori di temperatura a lamina bimetallica	4
3.	Sensori a variazione di resistenza (RTD)	5
4.	Termistori	9
4.1.	Termistori PTC	11
4.1.1.	Termistori KTY (PTC)	13
4.2.	Termistori NTC	15
5.	Termocoppie	17
5.1.	Compensazione hardware	21
5.2.	Compensazione software	23
5.3.	Tipi di termocoppie	25
5.4.	Assemblaggio delle termocoppie	26
6.	Sensori di temperatura a semiconduttore	27
6.1.	Sensori di temperatura integrati	29
6.1.1.	Principio di funzionamento	31
	Sensore con uscita in corrente	31
	Sensore con uscita in tensione	32
7.	Pirometri	34
7.1.	Pirometro a radiazione totale	34
7.2.	Pirometro ottico	37
8.	Conclusioni	39
	Bibliografia	41

1. Introduzione

Sensori e trasduttori occupano un ruolo di primaria importanza in vasti settori dell'elettronica.

Con tipologie e caratteristiche assai diversificate vengono utilizzati nel campo dell'automazione industriale e del controllo del processo, nel settore automobilistico e consumer, per misurazioni di laboratorio e applicazioni biomediche.

I trasduttori sono dispositivi che convertono una grandezza fisica di ingresso in una grandezza di uscita, solitamente elettrica, legata alla prima da una ben determinata relazione.

Tra i sensori più diffusi ci sono sicuramente quelli di temperatura (25% del mercato mondiale dei sensori) in quanto la misura e il controllo della temperatura è un'operazione molto frequente sia nell'ambito dei processi industriali che nell'ambito di applicazioni più comuni.

1.1. Misure della temperatura – trasmissione del calore

La temperatura è una grandezza scalare rappresentativa dello stato termico di un corpo ossia della sua capacità di trasferire calore ad altri corpi.

L'unità di misura della temperatura nel Sistema Internazionale è il Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

Storicamente il fenomeno fisico sfruttato maggiormente per la misurazione della temperatura è stato quello della dilatazione.

In ambito industriale le specifiche tecniche hanno portato allo sfruttamento di altri fenomeni fisici.

Nel caso di misura a contatto, si rilevano sia le variazioni di resistenza elettrica di materiali conduttori e semiconduttori sia fenomeni termoelettrici (p.e. effetto Seebeck).

Nel caso di misurazioni senza contatto si ricorre, invece, alla misura dell'energia radiante.

Il modo di misurare la temperatura (con o senza contatto) si riflette sulla struttura del sensore.

Innanzitutto la misura della temperatura comporta sempre un trasferimento di calore dal misurando al sensore.

In caso di sensori a contatto il meccanismo di trasferimento sfruttato è quello della conduzione; la legge che regola lo scambio termico è:

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma \cdot A \cdot (T_0 - T)$$

Dove:

$\frac{dQ}{dt}$ è la potenza termica [Watt];

T_0 è la temperatura da misurare dell'oggetto [Kelvin];

T è la temperatura del sensore [Kelvin];

σ è la conducibilità termica dell'interfaccia oggetto-sensore (dipende dalla superficie che separa i due corpi a contatto) $\left[\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \right]$;

A è la superficie di contatto [m^2].

L'inserimento del sensore comporterà sempre una perturbazione delle condizioni di misura iniziali, in quanto si estrarrà una certa quantità di calore dal processo controllato; pertanto, ad un sensore che opera per conduzione termica, saranno richieste una elevata conducibilità termica (elevata velocità di trasferimento di calore) ed un basso calore specifico (limitato assorbimento di calore).

Per una misura effettuata senza contatto, invece, il meccanismo di trasferimento del calore è l'irraggiamento.

Esso è legato alle vibrazioni degli atomi e delle molecole che possiedono un'energia cinetica media legata alla temperatura; tali vibrazioni generano campi elettromagnetici ossia emissione di "luce" regolata dalla legge di Planck:

$$W_{\lambda} = \frac{\varepsilon(\lambda) \cdot c_1}{\pi \cdot \lambda^5 \cdot (e^{c_2 / \lambda \cdot T} - 1)}$$

Dove:

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-12} [\text{W} \cdot \text{cm}^2]$$

$$c_2 = 1,44 [\text{cm} \cdot ^\circ\text{K}]$$

$$0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1 [1 = \text{corpo nero}]$$

Un sensore che misura radiazioni è costituito da un elemento sensibile incapsulato sotto vuoto o in azoto in un involucro che ha una finestra ottica per lasciar passare la luce.

Per aumentare la sensibilità si deve aumentare la superficie dell'elemento sensibile mentre per migliorare il tempo di risposta si deve ridurre lo spessore.

1.2. Caratteristiche di un sensore di temperatura

La scelta di un sensore di temperatura deve essere vagliata con la massima cura: è necessario conoscere tutti i dati relativi alle condizioni ambientali in cui esso dovrà operare, i valori di temperatura che dovrà rilevare, la precisione che dovrà mantenere nel corso del suo esercizio.

In definitiva le caratteristiche su cui si deve focalizzare l'attenzione per decidere quale tipo di sensore di temperatura utilizzare sono:

- 1) **Range di temperatura** (intervallo di temperatura in cui si ha il corretto funzionamento);
- 2) **Sensibilità** (la più piccola variazione del segnale di uscita che si riesce a percepire in seguito ad una variazione del segnale di ingresso);
- 3) **Linearità** (proporzionalità tra la temperatura ed il segnale di uscita);
- 4) **Condizioni di utilizzo** (con o senza contatto, eventuali stress meccanici, ecc.);
- 5) **Tempo di risposta** (tempo necessario affinché l'uscita raggiunga una specificata percentuale, generalmente al 95% o al 98%, del valore finale);
- 6) **Affidabilità** (capacità di funzionare nel tempo);

Inoltre si dovrà tener in considerazione il suo costo la sua reperibilità.

2. Sensori di temperatura a lamina bimetallica

Si tratta di trasduttori meccanici a **dilatazione termica** che si realizzano saldando fra loro due metalli diversi e collocando ad una estremità una lancetta.

Poiché i due metalli hanno coefficienti di dilatazione termica differenti, una variazione di temperatura produce una curvatura S della lamina che dipende dal suo spessore, dalle costanti di elasticità dei materiali e dai corrispondenti coefficienti di espansione termica.

$$S = f(t_A, t_B, K_A, K_B, \alpha_A, \alpha_B)$$

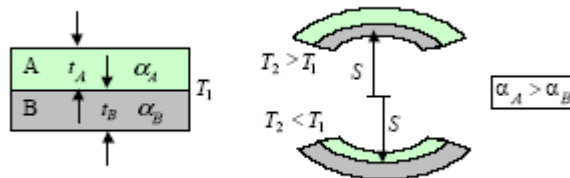


Fig.- Lamina bimetallica.

Tali sensori hanno il pregio di essere economici ed estremamente robusti.

Il loro range di funzionamento è compreso tra -150°C e 500°C .

Tuttavia sono dispositivi poco accurati e lenti, in quanto il tempo di risposta è vincolato alla deformazione di una struttura metallica. Inoltre presentano problemi di isteresi: il sensore può fornire valori di uscita diversi in corrispondenza dello stesso valore di temperatura da misurare.

In base a queste caratteristiche il loro utilizzo è riservato a misure grossolane.

La principale applicazione di un sensore a bimetallo è quella di termostato, un interruttore che apre o chiude dei contatti, in funzione di una temperatura.

In tal modo si può regolare la temperatura non critica di un ambiente, la temperatura nei piccoli elettrodomestici quali forni elettrici, ferri da stiro, ecc.

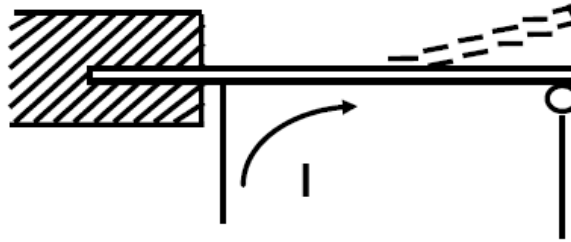


Fig.- Termostato a lamina bimetallica.

3. Sensori a variazione di resistenza (RTD)

Gli **RTD** (Resistance Temperature Detector) o termoresistori sono sensori che sfruttano la proprietà dei metalli di **variare la resistenza elettrica con la temperatura**.

Per un metallo generico in prima approssimazione si può esprimere la legge di variazione della temperatura attraverso la seguente equazione:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 t)$$

Dove:

R_t è la resistenza del termoresistore alla temperatura t [°C]

R_0 è la resistenza del termoresistore alla temperatura di 0°C

α_0 è il coefficiente di temperatura [°C⁻¹] che dipende dal tipo di metallo

t è la temperatura [°C]

α_0 dovrebbe mantenersi costante in realtà varia con la temperatura stessa, perciò si deduce che la termoresistenza è un trasduttore non lineare nei casi in cui vi sono elevate escursioni termiche.

Teoricamente tutti i metalli potrebbero essere impiegati per la realizzazione dei sensori, tuttavia nella pratica le termoresistenze sono costruite esclusivamente con filo di platino (il più usato), rame e nichel per l'alto grado di purezza con cui possono essere ottenuti questi metalli e la buona riproducibilità delle loro caratteristiche elettriche.

Il rame ha un coefficiente di temperatura simile a quello del platino e può essere usato convenientemente (con costi minori rispetto al platino) nel campo di temperatura che varia da -50 °C a 250 °C.

Il nichel può sostituire il platino nel campo di temperatura che varia da -200 °C a 350 °C, presentando inoltre un coefficiente di temperatura di circa 1.5 volte superiore. Ne consegue una maggiore sensibilità del sensore, poiché ad una medesima variazione di temperatura corrisponde una maggiore variazione di resistenza.

I termoresistori di platino possono essere usati a partire da -200 °C e sono i dispositivi più accurati e stabili nel range di temperatura [0 °C; 500 °C] anche se possono misurare temperature fino a 800 °C (in genere per valori maggiori di 600 °C si usano gli RTD al tungsteno).

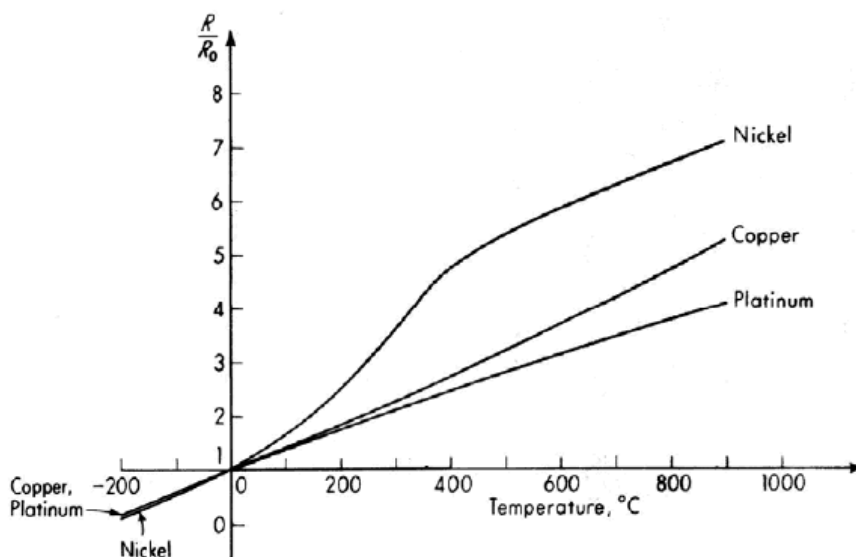


Fig.- Andamento della resistenza normalizzata per RTD di tre tipici metalli.

Nel caso del platino, la relazione che lega il valore di resistenza assunto alla temperatura t [°C] è l'equazione di Callendar Van Dusen:

$$R(t) = R(0) \cdot [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]$$

Si osserva che nell'intervallo di temperatura che va da 0°C a 630°C l'equazione non dipende dalla terza potenza della temperatura ma si riduce all'equazione di Callendar che si compone di un termine lineare e di un termine quadratico che comincia a pesare a temperature piuttosto elevate.

$$R(t)=R(0)\cdot[1+At+Bt^2]$$

Per temperature sotto il punto di congelamento dell'acqua fino a -200°C occorre portare in conto la correzione di Van Dusen e considerare le potenze fino al quarto ordine.

Le RTD al platino sono oggi realizzate o con un avvolgimento a spirale di un sottile filo di platino su un substrato ceramico, oppure per deposizione di un film sottile di platino sempre su un substrato ceramico.

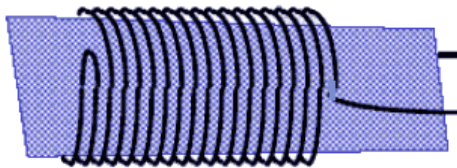


Fig.- Filo avvolto su supporto ceramico.

La stabilità ottenuta nel secondo caso è minore rispetto ad una RTD che utilizzi un filo di platino (tipicamente utilizzata nei laboratori di misura); tuttavia si sostengono costi decisamente inferiori e la termoresistenza presenta anche una velocità di risposta maggiore dovuta alla minore massa di materiale che deve scaldarsi per effettuare la misura.

Il valore nominale della resistenza $R(0)$, alla temperatura di 0°C, viene determinato attraverso la lavorazione della sottilissima lamina per mezzo di un raggio laser; tale valore è pari a 100Ω ragion per cui questi sensori vengono indicati anche con la sigla **Pt100**.

Il coefficiente di temperatura (termine lineare), è definito come la variazione della resistenza dell'RTD in un campo di temperatura da 0°C a 100°C, riferito alla resistenza a 0°C, diviso il range di 100°C, ossia:

$$\alpha_0 = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

Esso dipende da come è realizzato il dispositivo ed è fornito da ciascuna casa produttrice. Esistono tuttavia tre standard con valore fissato di coefficiente di temperatura e sono:

Standard	Coefficiente di temperatura (α_0)
DIN 43760	0.003850
Americano	0.003911
ITS-90	0.003926

Per avere una buona velocità di risposta, cioè per poter eseguire misure di temperatura rapidamente variabili, è necessario che il bulbo e la termoresistenza abbiano piccola inerzia termica ossia in definitiva, piccole dimensioni e buona trasmissione del calore al sensore; tale esigenza va in contrasto con quella di avere elevata sensibilità.

I limiti principali degli RTD sono il loro comportamento non lineare che, però, può essere compensato agevolmente via hardware o via software e, soprattutto, il loro basso valore di resistenza che può determinare pesanti errori di misura.

Infatti essendo sensori ‘passivi’, cioè non generando segnali elettrici ma facendo variare la resistenza, per la lettura necessitano di un segnale di eccitazione di corrente costante, per poter misurare la tensione ai capi:

$$V(t) = R(t) \cdot I_{ecc} \rightarrow R(t) = V(t) / I_{ecc}$$

ove t è la temperatura in $^{\circ}\text{C}$.

Poiché la resistenza $R(t)$ è di basso valore, il suo collegamento alla corrente di eccitazione I_{ecc} va realizzato mediante circuiti a ponte con conseguente aumento di costi.

In caso contrario, con una connessione semplice, si misurerebbe una tensione $V(t)$ determinata in modo rilevante dalle resistenze dei fili di interconnessione.

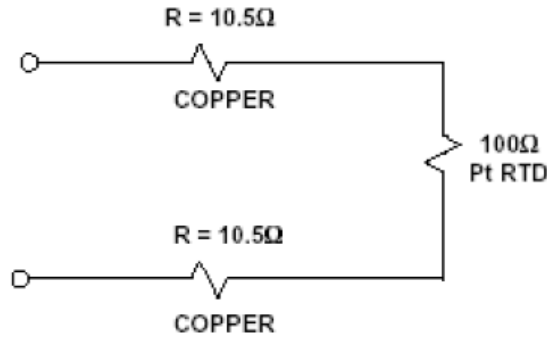


Fig.- Influenza dei fili di interconnessione sulla misura.

Inoltre si dovrà tener conto anche di un errore di autoriscaldamento dovuto alla corrente di eccitazione che per effetto Joule produce un riscaldamento dell'elemento sensibile.

$$P_{diss} = R(t) \cdot I_{ecc}^2$$

Questo determina anche un limite superiore per la scelta del valore della corrente di eccitazione.

D'altra parte una corrente troppo bassa fornisce segnali di tensione troppo bassi e quindi troppo sensibili ai disturbi e al rumore ambiente.

La scelta deve essere operata in modo da ottenere un giusto compromesso tra sensibilità e precisione della misura.

4. Termistori

I termistori (Thermal Resistor) sono dei trasduttori di temperatura che basano il loro funzionamento sulle **proprietà dei semiconduttori di variare la conducibilità elettrica con la temperatura**.

Esistono due modi sostanzialmente diversi di realizzare tali sensori che consistono nell'utilizzare come materiale sensibile il silicio oppure miscele sinterizzate a caldo di ossido di nichel, biossido di manganese e sesquiossido di ferro.

Il principale vantaggio presentato dai termistori nella misura della temperatura è la loro **notevole sensibilità**; ad esempio un termistore che presenta a temperatura ambiente una resistenza di 2250Ω ha una sensibilità di $-100\Omega/^{\circ}\text{C}$; cioè la sua resistenza diminuisce di 100Ω per un aumento di temperatura di 1°C .

Nelle stesse condizioni un RTD ha una sensibilità di soli $0.4\Omega/^{\circ}\text{C}$.

Un altro vantaggio è rappresentato dalle **dimensioni ridotte** del componente, e quindi dalla presenza di una massa termica piccola che permette una **risposta rapida** alle variazioni di temperatura.

Un ulteriore vantaggio presentato dai termistori è la resistenza relativamente elevata del componente; sono presenti in commercio termistori con resistenza a 25°C compresa tra 100Ω e $1\text{M}\Omega$.

L'elevato valore di resistenza del componente permette di ridurre gli effetti della resistenza dei fili di collegamento nella misura della temperatura.

Mentre nel caso degli RTD è necessario realizzare la connessione a quattro fili (a ponte), nel caso di un termistore una connessione a due fili è del tutto adeguata.

Alla notevole sensibilità del termistore corrisponde però una **linearità veramente modesta**; un ulteriore svantaggio è il **campo di lavoro**, o range del sensore, **limitato**.

Tutto questo è dovuto al fatto che il dispositivo è realizzato con materiale semiconduttore che varia le proprie caratteristiche se la temperatura è superiore a quella massima consentita, determinando la decalibrazione del dispositivo.

In genere questi sensori hanno temperature massime pari a qualche centinaio di gradi Celsius.

A questo bisogna aggiungere che i termistori sono **più fragili** rispetto alle termoresistenze o alle termocoppie, pertanto non devono subire sollecitazioni meccaniche e necessitano di una cura particolare nella messa in opera.

In base al coefficiente di temperatura, ossia a come varia la resistenza in corrispondenza di un aumento di temperatura, i termistori si dividono in:

- **PTC** (Positive Temperature Coefficient), che hanno coefficiente **positivo**, per i quali l'aumento di temperatura determina l'aumento della resistenza. Tale caratteristica è presente, però, solo in un determinato campo di temperature, all'esterno del quale il dispositivo torna a presentare un coefficiente di temperatura negativo.
- **NTC** (Negative Temperature Coefficient), che hanno coefficiente **negativo**, per i quali l'aumento di temperatura determina una diminuzione della resistenza.

4.1. Termistori PTC

I termistori PTC sono realizzati con composti quali titanato di bario (BaTiO_3) o soluzioni solide di titanato di bario (BaTiO_3) e titanato di stronzio (SrTiO_3) rese semiconduttori mediante l'aggiunta di opportuni droganti.

Al di sopra della temperatura di Curie tali composti cambiano rapidamente le loro proprietà ferroelettriche con conseguente aumento della resistenza, anche di diversi ordini di grandezza.

In generale i termistori PTC hanno, per basse temperature, un coefficiente negativo o nullo, mentre in un intervallo di temperature superiori ad un certa soglia T_r il coefficiente diventa positivo ed in modulo molto più alto di quello di un NTC, per poi diminuire e ridiventare negativo.

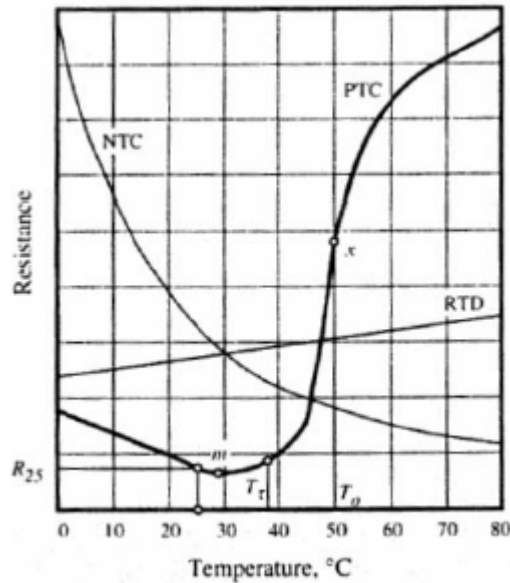


Fig.- Confronto dell'andamento della resistenza tra PTC, NTC, RTD

Nel caso di un termistore PTC è difficile esprimere la relazione fra il valore di resistenza e la temperatura mediante una semplice formula matematica.

Tuttavia i costruttori forniscono un certo numero di punti prestabiliti insieme ai valori di:

- coefficiente di temperatura
- R_{25} resistenza a temperatura ambiente (25 °C)
- R_m valore minimo di resistenza
- T_T temperatura di switch in corrispondenza della quale la resistenza inizia ad aumentare rapidamente

I PTC proprio per la loro proprietà di aumentare rapidamente la resistenza all'aumentare della temperatura sono soprattutto utilizzati come elementi di protezione da sovratemperature o da sovracorrenti.

Un altro utilizzo consiste nel realizzare termostati miniaturizzati per applicazioni microelettroniche, biomediche e chimiche.

I PTC sono impiegati spesso anche nei circuiti di ritardo grazie al loro relativamente lungo tempo di transizione dalla situazione di bassa resistenza a quella di resistenza elevata in seguito a surriscaldamento da passaggio di corrente.

4.1.1. Termistori KTY (PTC)

Un sottogruppo dei termistori PTC è rappresentato dai termistori KTY ideati dalla Siemens e realizzati con l'impiego del **silicio**.

Il vantaggio principale di tali dispositivi consiste nel metodo di misura della resistenza basato sul principio della *spreading-resistance*: con tale tecnica il valore della resistenza misurato (e quindi quello di temperatura ad esso legato) è indipendente dalle dimensioni della zona di silicio in cui si effettua la misura, eliminando di conseguenza gran parte delle tolleranze costruttive legate ad imperfezioni nella fabbricazione.

Nello strato di ossido che riveste il wafer di silicio si effettua un foro metallizzato in cui si va a rilevare il valore della resistenza; si dimostra che, nell'ipotesi di dimensioni del foro ridotte rispetto a quelle del wafer di silicio, tale valore è:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \delta}$$

Dove:

ρ è la resistività del silicio (che dipende dal drogaggio)

δ è il diametro del foro (parametro meccanico)

Per comprendere il meccanismo di funzionamento occorre ricordare che il cristallo di silicio viene **drogato con atomi donori (tipo n) in modo abbastanza intenso**.

In tal modo la conduzione è governata dal numero degli elettroni derivanti dal drogaggio e non dalle coppie elettrone-lacuna del semiconduttore.

L'aumento della temperatura determina un incremento dell'agitazione termica degli atomi di silicio del reticolo cristallino.

Ne consegue sia la generazione di coppie elettrone-lacuna (che incrementa la conduzione) dovuta alla rottura di legami covalenti, sia una maggiore difficoltà nel movimento degli elettroni di conduzione.

Pertanto nel campo di temperatura in cui le coppie elettrone-lacuna sono numericamente poco rilevanti, la resistività del materiale cresce all'aumentare della temperatura poiché la conduzione affidata agli elettroni risulta ostacolata dalle vibrazioni del reticolo.

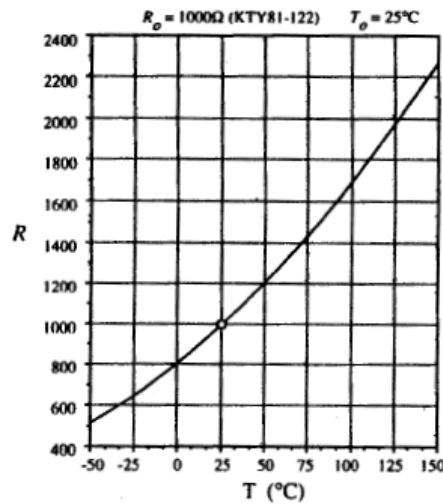


Fig.- Andamento della resistenza di un termistore KTY.

Per i termistori KTY è possibile esprimere la relazione che lega la resistenza alla temperatura mediante la seguente formula:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2)$$

Dove:

R_T è la resistenza alla temperatura T [$^{\circ}\text{K}$]

R_{25} è la resistenza alla temperatura di 25°C

$\alpha = 0.00784$ [$^{\circ}\text{K}^{-1}$]

$\beta = 1.874 \cdot 10^{-5}$ [$^{\circ}\text{K}^{-2}$]

Anche per i termistori KTY esiste il problema dell'autoriscaldamento, anzi, essendo la sensibilità alla temperatura maggiore che nel caso delle Pt100, occorre scegliere in modo accurato la corrente di alimentazione dell'elemento sensibile onde evitare marcate imprecisioni nella misura.

I costruttori forniscono solitamente dei grafici dell'errore di misura in funzione della corrente di alimentazione, nonché il valore consigliato della corrente stessa.

4.2. Termistori NTC

I termistori NTC hanno un coefficiente di temperatura negativo: ad un aumento di temperatura corrisponde una diminuzione di resistenza.

In questi termistori viene sfruttata la caratteristica dei semiconduttori puri di possedere un conducibilità che aumenta al crescere della temperatura, poiché aumenta il numero delle coppie elettrone-lacuna (ossia il numero dei portatori liberi di carica).

I materiali adoperati nella realizzazione degli NTC sono miscele di ossidi di ferro, di cobalto, di manganese e di nichel.

L'andamento della resistenza al variare della temperatura può essere espresso approssimativamente da una funzione esponenziale a due parametri:

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

Dove:

T_0 è la temperatura di riferimento tipicamente pari a 25 °C [298 K]

$R(T_0)$ è la resistenza alla temperatura T_0 di riferimento [Ω]

B è una costante dipendente dalla geometria e dal materiale impiegato; tipicamente essa ha valori compresi tra 2500 e 5700 [°K]

Per ottenere diverse sensibilità alla variazione di temperatura e diversi valori della resistenza di riferimento $R(T_0)$, si variano le proporzioni degli elementi che costituiscono la miscela.

In ogni caso l'analisi dei termistori NTC dimostra una notevole sensibilità rilevabile dai valori del coefficiente α (valori compresi tra -2.3% °K⁻¹ e -4.6% °K⁻¹).

Questo è particolarmente utile in applicazioni in cui è richiesto un livello alto del segnale di uscita su un range relativamente ristretto di temperature.

Di particolare interesse è l'espressione matematica del coefficiente di temperatura pari a:

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

Tale formulazione evidenzia, oltre al segno negativo del coefficiente, la sua dipendenza dalla temperatura e dal parametro costruttivo B (variabile anch'esso con la temperatura).

Spesso i costruttori forniscono anche il valore della costante B mediato tra 25°C e 85°C indicato con $B_{25/85}$ che costituisce un utile riferimento per un'indicazione della sensibilità del termistore.

Per gli NTC esiste, ed è rilevante, il problema dell'autoriscaldamento dell'elemento per effetto della corrente di alimentazione.

A tal proposito i costruttori forniscono un parametro che, indicato con la lettera δ , viene detto *coefficiente di dissipazione* e viene misurato in W/°K.

Esso permette di determinare rapidamente l'autoriscaldamento in funzione della potenza dissipata.

Ad esempio, con δ pari a 7.5 mW/°K e con una potenza dissipata P pari a 10mW si ottiene un autoriscaldamento (ossia un errore sulla misura di temperatura) di:

$$\Delta T = \frac{P}{\delta} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{7.5 \cdot 10^{-3}} = 1.3^\circ K$$

I termistori NTC, essendo economici e versatili, trovano largo impiego nel controllo e nel monitoraggio della temperatura nei processi industriali, nella realizzazione di termometri e termostati elettronici e nei settori di produzione dei beni di largo consumo come, ad esempio, quello degli elettrodomestici.

5. Termocoppie

Le termocoppie sono sensori di temperatura utilizzati per temperature molto elevate (fino a 1800 °C per un certo tipo di termocoppie) che hanno il pregio di essere attivi generando in uscita una tensione senza la necessità di una corrente di eccitazione.

Il loro funzionamento, infatti, si basa sull'effetto termoelettrico che si manifesta in una coppia di metalli saldati ad una estremità.

L'effetto termoelettrico è sostanzialmente dovuto al fatto che in ogni metallo esistono degli elettroni di conduzione e che per ogni tipo di metallo la concentrazione di tali elettroni è una caratteristica del metallo stesso.

In effetti, la struttura atomica diversa per ogni elemento o lega impone intuitivamente una differente concentrazione degli elettroni liberi in ogni materiale solido.

Il metallo è per sua natura neutro e pertanto se esistono elettroni liberi per la conduzione devono esistere altrettanti atomi che hanno perso tali elettroni divenendo ioni positivi.

Gli atomi realizzano la struttura cristallina del solido e pertanto gli ioni che nascono sono fissi nel reticolo cristallino e non possono muoversi, come accade invece agli elettroni di conduzione ('legame metallico').

La temperatura influenza la concentrazione degli elettroni liberi poiché un aumento di temperatura comporta un aumento dell'energia interna del materiale e ciò può provocare la rottura di legami atomici del reticolo cristallino, dando origine a nuovi elettroni liberi per la conduzione.

In una termocoppia due materiali metallici di diversa natura sono uniti mediante saldatura, la quale realizza una continuità tra le strutture cristalline metalliche dei due elementi.

Si supponga che in figura il metallo di sinistra possieda una concentrazione di elettroni maggiore di quello di destra.

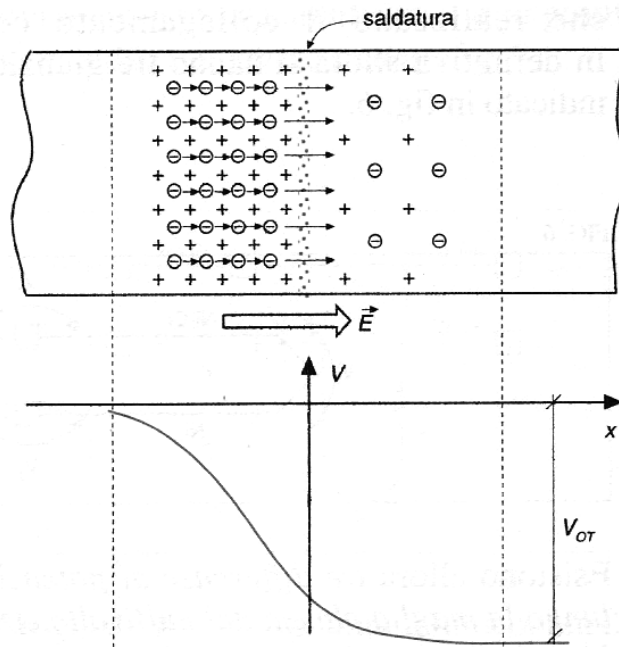


Fig.- Diffusione di elettroni per effetto termoelettrico a cavallo di una giunzione tra due metalli.

Per diffusione spontanea, parte degli elettroni da sinistra andranno verso destra e nella regione di sinistra tenderanno a mancare elettroni liberandosi così degli ioni positivi (rimasti immobili nel reticolo).

Di conseguenza a cavallo della saldatura nasce un campo elettrico E tra ioni positivi a sinistra, non più neutralizzati dai loro elettroni liberi, e gli elettroni fluiti nella zona di destra.

Il campo elettrico (diretto da sx verso dx) tende a compensare il meccanismo di diffusione spontanea degli elettroni liberi da sinistra verso destra costituendo quindi un equilibrio tra i due fenomeni.

Come conseguenza del campo elettrico tra le due regioni esiste una differenza di potenziale che ha segno positivo nella regione in cui si trova maggior concentrazione di elettroni.

Lo svuotamento di elettroni avviene solo in prossimità della saldatura e, quindi, anche il campo elettrico e la differenza di potenziale sono localizzati in prossimità di essa.

Un aumento di temperatura comporta un maggior numero di elettroni che possono transitare per diffusione spontanea nella regione di destra e, quindi, un campo elettrico più intenso.

All'aumentare della temperatura allora cresce la differenza di potenziale tra i due metalli saldati secondo la legge:

$$V_j = S(T_j) \cdot T_j$$

Dove:

V_j è la differenza di potenziale che nasce nella giunzione

$S(T_j)$ è il coefficiente di Seebeck [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$] che dipende dalla temperatura e dalle caratteristiche fisiche della giunzione

Tale effetto viene sfruttato nelle termocoppie che vengono realizzate ponendo due metalli diversi a contatto in modo da formare un anello e portando le due giunzioni o giunti a temperature differenti.

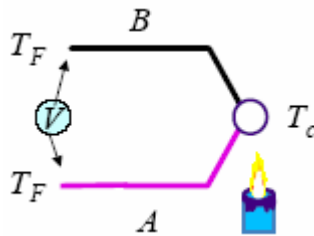


Fig.- Termocoppia

Come mostrato in figura si realizza un circuito costituito da un “giunto caldo” in cui i due metalli (A e B) sono uniti fra loro e un “giunto freddo” in cui i due metalli sono separati.

Il giunto caldo sarà posto in prossimità del punto di cui si vuole misurare la temperatura, mentre ai capi delle estremità del giunto freddo si effettua il prelievo del segnale di tensione che sarà:

$$V = S_{AB} \cdot (T_c - T_f)$$

Dove:

T_c è la temperatura del giunto caldo

T_f è la temperatura del giunto freddo

Per ottenere una trasduzione precisa della temperatura, è quindi indispensabile mantenere costante la temperatura T_f del giunto freddo. Questa esigenza è comunque difficile da soddisfare, in quanto il giunto freddo, oltre ad essere fisicamente costituito da due terminali disgiunti fra loro, si trova normalmente a lavorare a temperatura ambiente.

Una ulteriore fonte di errore deriva dal fatto che ai morsetti della termocoppia si connettono fili di metallo diverso (ad esempio fili di rame per collegare il voltmetro) andando così a costituire nuove giunzioni anch'esse sedi di f.e.m. per effetto Seebeck.

Tali tensioni (V_2 e V_3 diverse tra loro) andranno ad alterare il valore originario della f.e.m. generata dalla termocoppia e quindi la misura della temperatura.

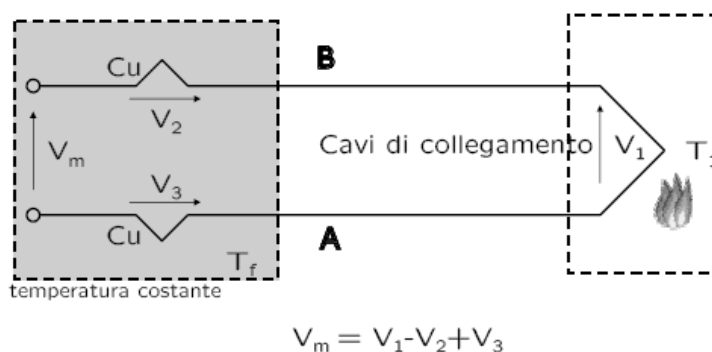


Fig.- Effetto delle giunzioni parassite sulla misura.

Una soluzione che consente di risolvere questi problemi consiste nell'utilizzo di una seconda termocoppia dello stesso tipo connessa in modo che i metalli A siano contigui come in figura.

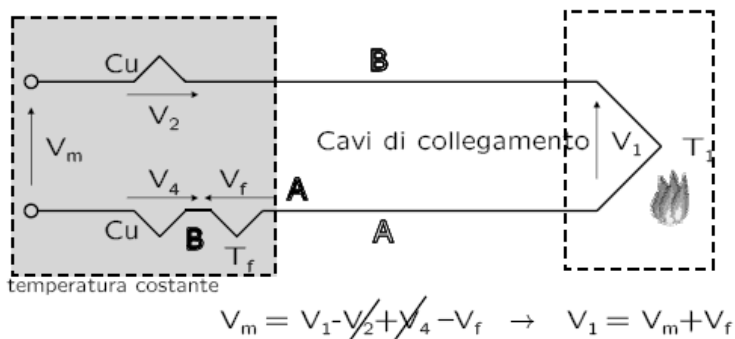


Fig.- Connessione di una seconda termocoppia.

L'effetto delle due giunzioni parassite (ora dello stesso tipo Cu-B) non alterano la misura poiché, a patto che siano tenute alla stessa temperatura, generano f.e.m. V_2 e V_4 uguali ed opposte.

La misura V_m sarà proporzionale alla differenza di temperatura $T_1 - T_f$.

Per svincolare il valore di V_m dalle variazioni di T_f , riferendo la misura a 0°C , si effettua la cosiddetta compensazione del giunto freddo.

La compensazione può essere effettuata in due modi diversi:

- compensazione hardware
- compensazione software

Nel primo caso un apposito circuito genera una tensione pari alla componente dovuta al giunto freddo, in funzione della temperatura a cui esso si trova, e tale tensione viene poi sommata alla tensione generata dalla termocoppia.

Nel secondo caso il calcolatore acquisisce dalla termocoppia sia la tensione generata dalla termocoppia sia la tensione generata da un apposito sensore di temperatura funzione della temperatura del giunto freddo; il programma si incarica quindi, per mezzo di una apposita routine, di realizzare la compensazione, determinando il valore effettivo della temperatura del giunto caldo.

In entrambi i casi la compensazione prevede che si conosca il tipo di termocoppia utilizzata, in quanto il fattore di correzione è funzione della costante di Seebeck che dipende dal tipo di termocoppia.

5.1. Compensazione hardware

Esistono molti tipi di circuiti che possono essere impiegati per realizzare la compensazione hardware del giunto freddo. Uno molto semplice è quello riportato in figura, che fa uso di uno schema a ponte.

Il ponte è costituito da una tensione di alimentazione E , da tre resistenze uguali di valore R e da una resistenza di compensazione R_t che varia con la temperatura del blocco isoterma $T_{\text{iso}} = T_a$.

Il ponte introduce nel circuito di misura una tensione di compensazione e_c che dipende dalle condizioni di squilibrio prodotte dalla resistenza R_t .

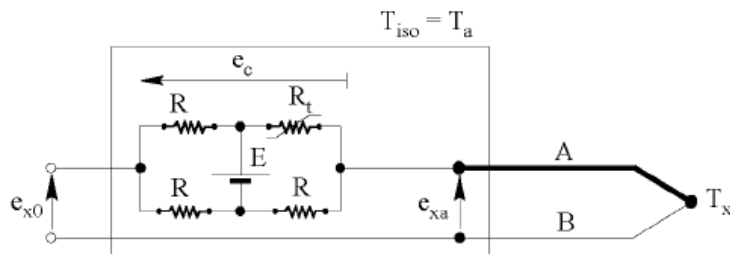


Fig.- Compensazione hardware della giunzione fredda.

La tensione della termocoppia alla temperatura ambiente T_a risulta:

$$e_{xa} = S_{AB} [T_x - T_a]$$

Se facciamo in modo che la tensione di compensazione sia:

$$e_c = S_{AB} [T_a - 0^\circ\text{C}]$$

Allora la tensione totale a vuoto del sistema risulta:

$$e_{x0} = e_{xa} + e_c = S_{AB} [T_x - T_a] + S_{AB} [T_a - 0^\circ\text{C}] = S_{AB} [T_x - 0^\circ\text{C}]$$

In tal modo la tensione e_{x0} totale corrisponde alla temperatura T_x riferita allo zero (0°C).

La resistenza di compensazione R_t è variabile con la temperatura ambiente T_a e pertanto il circuito può provvedere a compensare automaticamente anche le variazioni della temperatura ambiente. La resistenza R_t è a sua volta un sensore di temperatura, che può essere realizzato impiegando, per esempio, un termistore oppure un sensore integrato monolitico.

Non viene usato direttamente il termistore oppure il sensore integrato monolitico, per misurare la temperatura T_x , in quanto il loro campo di lavoro è molto diverso da quello delle termocoppie.

Bisogna infine osservare che le tecniche di compensazione hardware sono veloci (come in genere tutte le elaborazioni analogiche), tuttavia il circuito che le realizza deve essere modificato e adattato per ciascuno dei numerosi tipi di termocoppia.

5.2. Compensazione software

Con i sistemi automatici di acquisizione dati, si preferisce fare la compensazione del giunto freddo mediante procedure software, sfruttando le potenzialità di calcolo dei PC.

Questo metodo di compensazione risulta molto più flessibile in quanto, essendo programmabile, si adatta facilmente a tutte le termocoppie e consente anche di tener conto della non linearità del loro comportamento.

Nella pratica si impiegano dei legami funzionali noti, sia diretto che inverso, fra la tensione e della termocoppia e la temperatura T riferita a 0°C .

Queste funzioni (diretta e inversa) sono date con opportuni sviluppi polinomiali:

$$T = a_0 + a_1 e + a_2 e^2 + \dots + a_n e^n$$

$$e = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + \dots + c_n T^n$$

I coefficienti a_k e c_k che vi compaiono si trovano pubblicati a cura del NIST (National Institute of Standards and Technology) e sono diversi per i vari tipi di termocoppie.

La compensazione software prevede innanzitutto la misura della temperatura ambiente T_a tramite un sensore montato sul blocco isoterma, come indicato in figura.

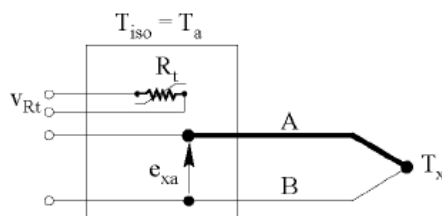


Fig.- Circuito per la compensazione software.

A tale scopo può essere impiegato ancora un termistore R_t , opportunamente alimentato per ottenere la tensione v_{Rt} da acquisire con la scheda, oppure si può impiegare direttamente un sensore di temperatura integrato (IC sensor) con uscita in tensione. La misura della tensione v_{Rt} consente di conoscere il valore della temperatura $T_{iso} = T_a$ rispetto allo 0°C .

Questa temperatura T_{iso} viene convertita dal software nella tensione e_{iso} che avrebbe la termocoppia alla temperatura $T_{iso} = T_a$.

Infine, misurata la tensione della termocoppia e_{xa} e valutata la tensione di riferimento e_{iso} si ricava la tensione totale e_{x0} che la termocoppia avrebbe a 0°C :

$$e_{x0} = e_{xa} + e_{iso} = S_{AB}[T_x - 0^\circ\text{C}]$$

Da questa tensione e_{x0} si può ottenere la temperatura T_x , tramite il loro legame funzionale.

Il metodo non è immediato, ma consente la massima accuratezza, soprattutto se è elevato il grado n del polinomio che viene utilizzato.

Inoltre è possibile tener conto anche della non linearità della termocoppia.

Usualmente, le grandezze in gioco sono espresse: e in (mV) e T in ($^\circ\text{C}$) riferita a (0°C).

I metodi di compensazione software sono molto pratici quando si devono fare molte misure di temperatura con molte termocoppie, anche di diverso tipo. In tali casi la sostituzione della termocoppia con una di altro tipo non comporta la sostituzione di parti circuitali, come nel caso della compensazione hardware, ma solo la variazione di un fattore di proporzionalità in una routine software.

Per i casi in cui non si abbia a disposizione un sistema di acquisizione dati con PC, le termocoppie sono corredate da apposite tabelle fornite dal costruttore, che riportano i rilievi sperimentali della tensione in uscita (in mV) al variare della temperatura del giunto caldo (in $^\circ\text{C}$), avendo posto alla temperatura di 0°C quello freddo.

Queste tabelle corrispondono alla rappresentazione polinomiale del loro comportamento.

5.3. Tipi di termocoppie

Esistono diversi tipi standard di termocoppie, realizzati con diversi materiali allo scopo di ottenere diverse sensibilità e diverse possibilità di utilizzazione.

Essi sono contrassegnati da differenti sigle standard; le più comuni sono:

S – (10% Rodio + Platino) – Platino

R – (13% Rodio + Platino) – Platino

B – (Platino + 30% Rodio) – (Platino + 6% Rodio)

J – Ferro – Costantana

T – Rame – Costantana

K – Cromel – Alumel

E – Cromel – Costantana

Ogni tipo di termocoppia possiede pregi e difetti che ne determinano le condizioni ambientali di utilizzo.

S / R: sono consigliate per temperature fino a 1500°C in atmosfera inerte altrimenti rischiano la rottura; sono caratterizzate da un coefficiente di Seebeck che varia poco con la temperatura e quindi da una linearità piuttosto buona ma sono anche poco sensibili essendo basso il valore del coefficiente.

B: Sono più adatte delle S/R alle temperature più elevate (1700°C) e presentano una maggiore resistenza meccanica.

J: Presentano un elevato coefficiente di Seebeck al di sopra di 540°C; il ferro tende ad ossidarsi per cui l'utilizzo in questo range di temperature è consigliato in ambiente privo di ossigeno.

T: Sono resistenti alla corrosione in atmosfere a forti concentrazioni di umidità; vengono usate per temperature inferiori a 0°C; presentano una non linearità elevata alle temperature maggiori di 200°C ove il rame ossida facilmente.

K: Sono le più largamente impiegate ad alta temperatura (oltre i 550°C) poiché sono molto resistenti in ambienti ossidanti insieme alle termocoppie di platino. Presentano un coefficiente di Seebeck praticamente costante (40µV/°C) nel range di temperatura 0 - 1000°C ed una più elevata sensibilità rispetto alle termocoppie S/R.

E: Presentano un coefficiente di Seebeck elevatissimo a cui corrisponde una migliore sensibilità; Il range di temperatura è piuttosto limitato.

Tipo	Materiali	Coefficiente di Seebeck ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) a 20°C	Range di temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
S/R	(Rh+Pt) – Pt	10	0÷1500
B	(Rh+Pt) – (Rh+Pt)	10	0÷1800
J	Fe – Con	50	0÷760
T	Cu – Con	38	0÷370
K	(Cr+Ni) – (Al+Ni)	40	-200÷1260
E	(Cr+Ni) – Con	59	-200÷900

5.4. Assemblaggio delle termocoppie

La termocoppia è generalmente assemblata in un contenitore metallico in acciaio inox con forma cilindrica, dove le specifiche più importanti sono la lunghezza ed il diametro dell'elemento utile di misura.

Sono inoltre possibili tre diversi assemblaggi tra la termocoppia ed il suo contenitore; quello più diffuso è con "giunto a massa", dove la termocoppia è completamente protetta dal contenitore con cui si trova a diretto contatto, sia termico che elettrico, per non compromettere la velocità di risposta.

Una variante è con "giunto isolato", dove la protezione è sempre completa, ma è presente un isolamento elettrico tra termocoppia e contenitore per evitare l'eventuale influenza di correnti parassite.

Infine, per impieghi prevalentemente di laboratorio, è possibile avere il "giunto esposto", dove la termocoppia fuoriesce completamente dal contenitore di protezione.

In tutti i casi la massa del contenitore viene generalmente collegata a terra.

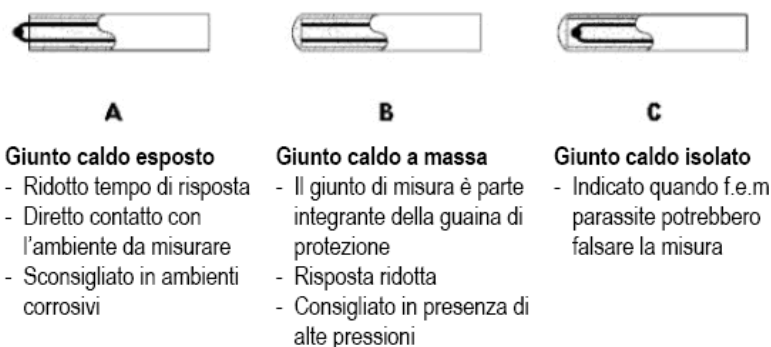


Fig.- Tipi di assemblaggio di termocoppie.

6. Sensori di temperatura a semiconduttore

I sensori di temperatura a semiconduttore basano il loro funzionamento sulle proprietà di giunzioni a semiconduttore (diodi e transistor) di avere una tensione o corrente fortemente dipendente dalla temperatura.

La linearità è particolarmente buona, sull'intero campo di temperature di utilizzo, così come la sensibilità; il costo è contenuto, come per tutti i microcircuiti prodotti su larga scala.

Il limite maggiore di questi trasduttori è determinato dal ristretto range di temperature in cui possono essere utilizzati che resta fissato al di sotto di 150 °C.

Inoltre presentano un tempo di risposta piuttosto elevato e una fragilità meccanica che non permette l'uso in ambienti con presenza di vibrazioni.

I sensori a semiconduttore trovano perciò applicazione soprattutto nel controllo della temperatura di celle frigorifere e, ancor di più, nella misura della temperatura ambiente in generale e per la compensazione del giunto freddo delle termocoppie.

La più semplice realizzazione di un sensore a semiconduttore è ottenuta mediante l'impiego di un diodo.

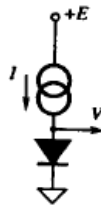


Fig.- Diodo pilotato in corrente.

In un diodo polarizzato direttamente la relazione corrente-tensione (I V) è:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{V}{nV_T}} = I_s \cdot e^{\frac{qV}{nkT}}$$

Dove:

I_s è la corrente inversa di saturazione [dell'ordine dei $10^{-6} \div 10^{-9}$ A] dipendente dalla temperatura

n è una costante empirica dipendente dal tipo di semiconduttore usato [$n=2$ per Si, $n=1$ per il Ge]

V_T è la tensione termica [25 mV alla temperatura di 27 °C]

k è la costante di Boltzmann [$1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K]

q è la carica dell'elettrone

T è la temperatura [°K]

Tale relazione porta alla formulazione inversa pari a:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right)$$

Ricordando che I_s dipende anche dalla temperatura, tramite opportuni passaggi, si arriva a una relazione tensione-temperatura del tipo:

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \cdot (\ln C - \ln I)$$

Dove:

E_g è il gap di energia del materiale

C è una costante del materiale indipendente dalla temperatura

Pertanto, quando la giunzione è alimentata a corrente costante, la tensione varierà linearmente con la temperatura, ottenendo una sensibilità pari a:

$$S = \frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{k}{q} \cdot (\ln C - \ln I)$$

Tipicamente per un diodo al silicio, con corrente pari a 1 mA, il valore di S è -2 mV/°C, ossia la tensione ai suoi capi diminuirà di 2 mV in corrispondenza di un aumento di temperatura di 1 °C.

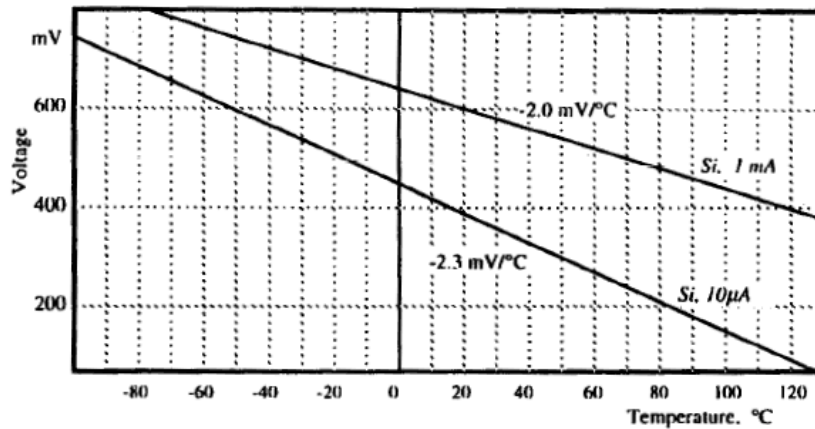


Fig.- Andamento della tensione al variare della temperatura.

Il discorso è equivalente nel caso di un transistor “connesso a diodo” ($V_{BE} = V_{CE}$), per cui è richiesto un opportuno circuito di polarizzazione.

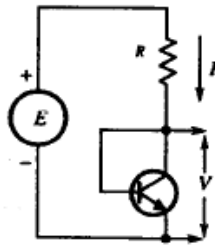


Fig.- Transistor connesso a diodo.

Anche in questo caso, alimentando con corrente costante, si ottiene una variazione lineare della tensione base-emettitore V_{BE} con la temperatura.

6.1. Sensori di temperatura integrati

Partendo da queste semplici configurazioni e sfruttando le proprietà dei semiconduttori vengono realizzati sensori di temperatura più complessi “IC sensor” (Integrated Circuit sensor) che contengono specifici circuiti integrati.

La realizzazione in forma integrata rende possibili numerosi vantaggi, rispetto ai sensori esaminati finora: in particolare, il costruttore può prevedere sul chip tutti i circuiti di

condizionamento richiesti, nonché la preliminare amplificazione del segnale, rendendo questi sensori molto semplici da usare.

Si realizzano trasduttori estremamente lineari con uscita in corrente (es.: AD590 della Analog Device) o tensione (es.: LM35Z della National Semiconductor) in funzione della temperatura a cui sono posti.

Il sensore di temperatura AD590 è un dispositivo a due terminali comandato in tensione che fornisce una corrente proporzionale alla temperatura assoluta [°K]:

$$I = K \cdot T$$

Dove: $K = 1\mu A/^{\circ}K$.

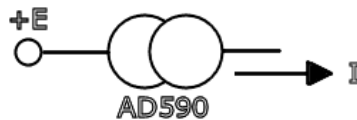


Fig.- Sensore AD590.

Il range di funzionamento è compreso tra $-55^{\circ}C$ e $150^{\circ}C$ e la tensione di alimentazione può variare tra 4V e 30V.

La costante di tempo del dispositivo in aria ferma (convezione naturale) è di circa un minuto e si riduce a 1.4s nel caso di immersione in un fluido elettricamente isolante.

In generale, l'uso dei trasduttori con uscita in corrente è vantaggioso nei collegamenti a grandi distanze (sensori remoti) poiché il segnale in corrente è indipendente dalla lunghezza della linea che collega il trasduttore all'apparato ricevente e presenta una buona immunità ai rumori.

Il sensore di temperatura LM35 è in grado di fornire una tensione V_{out} proporzionale alla temperatura t [°C]:

$$V_{out} = K \cdot t$$

con sensibilità K di 10mV/°C.

Funziona correttamente nel range di temperature da $2^{\circ}C$ a $150^{\circ}C$, è alimentato da una tensione V_s compresa tra 4V e 20V.

Il sensore presenta tre terminali che sono:

+ V_s a cui applicare la tensione di alimentazione

GND a cui applicare la massa

V_{out} da cui prelevare la tensione di uscita.

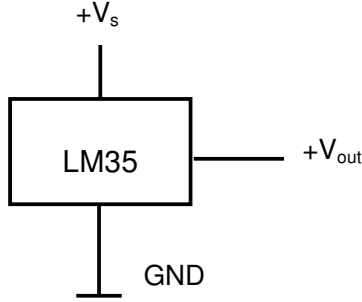


Fig.- Sensore LM35.

6.1.1. Principio di funzionamento

I sensori di temperatura integrati basano il loro funzionamento sulla proprietà dei semiconduttori, e in particolare delle giunzioni P-N e dei transistori, di variare il loro comportamento con la temperatura.

Consideriamo ora due transistori T_1 e T_2 . La differenza fra le loro tensioni V_{BE} sarà:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{Sat1}} \cdot \frac{I_{Sat2}}{I_{C2}} \right)$$

Sensore con uscita in corrente

Supponiamo che i due transistori T_1 e T_2 (per esempio di tipo NPN) formino il circuito di principio rappresentato in figura A e siano attraversati dalla stessa corrente di collettore (quindi $I_{C1} = I_{C2} = I_C$), ottenuta tramite due generatori di corrente.

Supponiamo ancora che per ciascuno dei due transistori T_1 e T_2 si possa ritenere che la corrente di emettitore I_E sia praticamente uguale alla corrente di collettore I_C . Questo fatto corrisponde a dire che I_B sia trascurabile e dunque il parametro $\beta = I_C/I_B$ sia molto alto.

Con tali ipotesi, se la giunzione base-emettitore (EBJ) di T_2 ha un'area che è pari a N volte quella di T_1 , allora anche la corrente di saturazione I_{Sat2} risulta N volte la corrente I_{Sat1} .

Si ottiene dunque:

$$V_{BE1} = V_{BE2} + RI_C \Rightarrow I_{out} = 2I_C = 2 \cdot \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R} = \frac{2}{R} \cdot \frac{kT}{q} \ln N$$

Il sensore ha un'uscita in corrente, proporzionale alla temperatura assoluta in kelvin (sensori PTAT, *proportional to absolute temperature*).

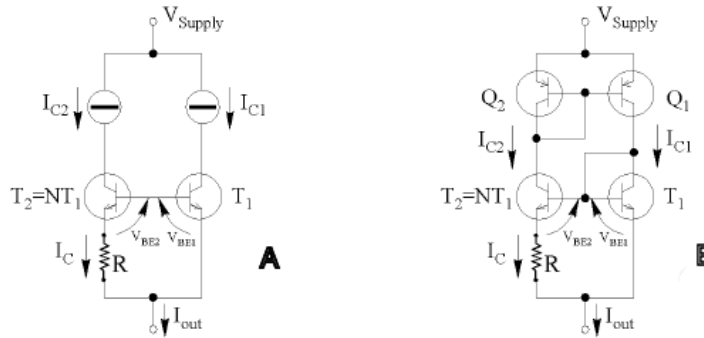


Fig.- Schemi per un sensore di temperatura con uscita in corrente.

Nella figura B è riportato uno schema circuitale più realistico, dove si nota che i generatori delle uguali correnti ($I_{C1} = I_{C2}$) sono stati realizzati con un *current mirror*, formato con i due transistori identici di tipo PNP Q_1 e Q_2 .

Il transistore Q_2 ha la base direttamente connessa al collettore e pertanto si comporta come un semplice diodo (giunzione diretta emettitore-base).

La corrente I_{C2} risulta dunque determinata dalla restante parte del circuito in serie: il transistore T_2 e la resistenza R .

D'altra parte entrambi i transistori Q_1 e Q_2 hanno la stessa tensione emettitore-base e dunque, se Q_1 lavora in zona lineare, deve avere la stessa corrente di collettore di Q_2 . In ciò consiste appunto l'effetto di current mirror ($I_{C1} = I_{C2}$).

Sensore con uscita in tensione

Una modalità di funzionamento sostanzialmente analoga a quella vista può essere ottenuta impiegando i due transistori T_1 e T_2 identici (quindi $I_{Sat1} = I_{Sat2}$) ma facendoli funzionare con un rapporto costante per le correnti di collettore (per esempio $I_{C1} = N \cdot I_{C2}$).

Con riferimento allo schema di principio di figura C, si ha:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln N$$

Pertanto, misurando la differenza fra le tensioni base-emettitore ΔV_{BE} , si ha un'indicazione proporzionale alla temperatura assoluta T (in kelvin); il sensore ha un'uscita in tensione.

Nella figura D è riportato un possibile schema circuitale.

La generazione delle correnti con rapporto costante ($I_{C1} = N \cdot I_{C2}$) è affidata ai due transistori Q_1 e Q_2 .

In particolare, questi hanno la stessa tensione base-emettitore e basterebbe che il transistore Q_1 fosse costituito dal parallelo di N transistori tutti uguali a Q_2 perché la sua corrente di collettore I_{C1} fosse uguale a N volte la corrente I_{C2} del transistore Q_2 .

Lo stesso risultato si ottiene, nei circuiti integrati, facendo Q_1 con un'area pari a N volte quella di Q_2 .

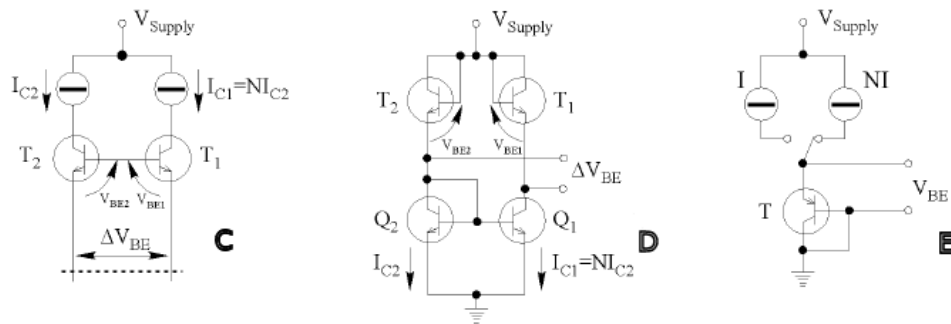


Fig.- Schemi per un sensore di temperatura con uscita in tensione.

La temperatura da misurare è applicata alla coppia dei due transistori identici T_1 e T_2 .

La tensione di interesse ΔV_{BE} viene prelevata con un opportuno amplificatore.

Alcuni sensori con uscita in tensione, per superare le inevitabili differenze costruttive e di comportamento fra i due transistori T_1 e T_2 (che dovrebbero essere identici), impiegano un solo transistore T che viene fatto attraversare dapprima da una corrente I e successivamente da una corrente $N \cdot I$, con una certa frequenza di commutazione (vedi figura E).

Il risultato è equivalente: tuttavia la tensione V_{BE} rilevata in uscita deve essere filtrata in modo da ottenere solo le variazioni ΔV_{BE} e deve essere amplificata con maggior cura.

Alcuni sistemi di monitoraggio delle temperature nelle CPU dei computer si basano su questi dispositivi (TDM, thermal diode monitor).

7. Pirometri

I pirometri sono strumenti utilizzati per la misura di elevate temperature ($> 1000^{\circ}\text{K}$) e basati su una misura dell'energia termica o luminosa irraggiata dal corpo in esame.

Nel *pirometro a radiazione totale* si misura la temperatura d'equilibrio alla quale si porta un assorbitore quando su di esso si fa incidere la radiazione termica proveniente dal corpo in esame.

In questo tipo di pirometro si sfrutta tutto lo spettro di lunghezze d'onda della radiazione emessa dal corpo, pertanto esso è in linea di principio utilizzabile anche a temperature relativamente basse in cui l'emissione luminosa nel visibile è del tutto trascurabile.

Nel *pirometro ottico* invece si confronta l'intensità luminosa della radiazione (nel visibile) proveniente dal corpo in esame con l'intensità luminosa di una lampada campione in cui la temperatura dei filamento (nota per taratura) viene resa uguale alla temperatura incognita del corpo in esame.

Questo tipo di pirometro generalmente misura temperature molto elevate al di sopra di 1500°K .

Entrambi gli strumenti hanno il vantaggio di consentire una misura della temperatura del corpo in esame senza che sia necessario porre a contatto quest'ultimo con l'elemento sensibile e quindi possono essere usati a temperature superiori al punto di fusione di molti metalli.

7.1. Pirometro a radiazione totale

Questo strumento si basa su una applicazione della legge di Stefan Boltzmann ($W=\epsilon\sigma T^4$) ed ha come elementi essenziali: un corpo assorbitore ricoperto di nerofumo in cui è inserita la giunzione di una termocoppia, un sistema di specchi orientabili ed un cannocchiale.

Regolando l'oculare, si mette a fuoco una regione del corpo in esame (sorgente) e contemporaneamente si orientano gli specchi in maniera che la radiazione proveniente dalla sorgente incida sull'assorbitore.

La temperatura a cui si porta l'assorbitore (termicamente isolato dall'involucro dello strumento) è determinata dall'equilibrio tra la potenza termica da esso assorbita e proveniente dalla sorgente (W_s) e dalle pareti dello strumento (W_e) e la potenza da esso irradiata (W_a).

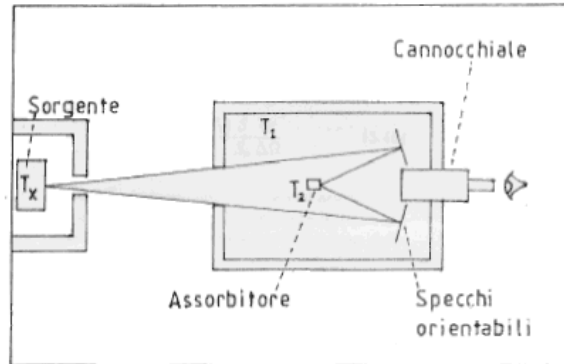


Fig.- Pirometro a radiazione totale.

La potenza W_s proveniente dalla sorgente è data da:

$$W_s = k \cdot S_0 \cdot \sigma \cdot T_x^4 \cdot \left(\frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right)$$

Dove:

T_x è la temperatura assoluta della sorgente

σ è la costante di Stefan Boltzmann,

$\Delta\Omega/4\pi$ è la frazione di angolo solido sotto la quale la sorgente è vista dai pirometro

S_0 è l'area della sorgente

k è un coefficiente che tiene conto della emissività della sorgente e delle eventuali perdite nel tragitto tra la sorgente e l'assorbitore.

La potenza W_e incidente sull'assorbitore e proveniente dalle pareti dello strumento è data da:

$$W_e = \epsilon_1(T_1) \cdot S \cdot \sigma \cdot T_1^4$$

Dove:

$\varepsilon_1(T_1)$ è il coefficiente d'emissività delle pareti dello strumento alla temperatura T_1 (coincidente di norma con la temperatura ambiente),
 S la superficie dell'assorbitore.

All'equilibrio l'assorbitore si trova alla temperatura T_2 ed irraggia una potenza W_a pari a:

$$W_a = \varepsilon_2(T_2) \cdot S \cdot \sigma \cdot T_2^4$$

Dove:

$\varepsilon_2(T_2)$ è il coefficiente di emissività della superficie dell'assorbitore.

In regime stazionario imponiamo la condizione d'equilibrio tra potenza assorbita ed irraggiata è data da:

$$W_e = W_s + W_a$$

da cui ricaviamo:

$$T_x = (a \cdot T_2^4 - b \cdot T_1^4)^{\frac{1}{4}}$$

in cui:

$$a = \frac{\varepsilon_2(T_2)}{k} \cdot \frac{S}{S_0} \cdot \frac{4\pi}{\Delta\Omega} \quad \text{e} \quad b = \frac{\varepsilon_1(T_1)}{k} \cdot \frac{S}{S_0} \cdot \frac{4\pi}{\Delta\Omega}$$

sono le costanti dello strumento.

Dalla misura di T_2 (effettuata dalla termocoppia inserita nell'assorbitore) e di T_1 si può risalire alla temperatura incognita T_x , mediante la precedente relazione ed un'opportuna taratura dello strumento (determinazione delle costanti a e b).

La temperatura di equilibrio T_2 differisce al massimo di 100 – 200 °K dalla temperatura T_1 e pertanto può essere misurata con ottima precisione dalla termocoppia.

Si noti inoltre che la temperatura T_2 varia sensibilmente con l'angolo solido $\Delta\Omega$, pertanto il pirometro durante la taratura e durante le successive misure deve essere posto ad una distanza fissa dalle sorgenti.

Lo strumento è tarato mediante sorgenti le cui temperature sono state preliminarmente misurate con il termometro a termocoppia di tipo S Pt-PtRh (10%Rh) e la

scala dello strumento di lettura della forza elettromotrice della termocoppia inserita nell'assorbitore viene adattata per fornire direttamente la temperatura incognita in gradi kelvin.

Per tarare lo strumento a temperature superiori a quella del punto fisso dell'oro ($T_{Au} = 1337.65 \text{ } ^\circ\text{K}$), si può variare opportunamente l'angolo solido $\Delta\Omega$, allontanando il pirometro dalla sorgente di una quantità nota.

Supponendo di aver tarato il pirometro al punto fisso dell'oro e di aver ottenuto il valore T_2 con la termocoppia, si può determinare la temperatura incognita T_x ($T_x > T_{Au}$) allontanando opportunamente il pirometro dalla sorgente in maniera da ottenere la stessa temperatura T_2 sull'assorbitore.

In questo caso il coefficiente di emissività dell'assorbitore non è sicuramente variato mentre è variato di un fattore noto l'angolo solido.

Si possono quindi scrivere le seguenti relazioni:

$$T_{Au} = (a \cdot T_2^4 - b \cdot T_1^4)^{\frac{1}{4}}$$
$$T_x = (a' \cdot T_2^4 - b' \cdot T_1^4)^{\frac{1}{4}}$$

Dove:

$$a' = (r'/r)^2 \cdot a$$

$$b' = (r'/r)^2 \cdot b$$

r' ed r sono rispettivamente le distanze pirometro-sorgente durante la misura della temperatura T_x e durante la taratura con l'oro.

Determinata in questo modo la temperatura T_x della sorgente si può riportare il pirometro alla distanza prefissata per la taratura e determinare la nuova temperatura di equilibrio T_2' dell'assorbitore da correlare alla temperatura T_x .

7.2. Pirometro ottico

Questo strumento è costituito da un telescopio al cui interno è installata una lampada elettrica ed un filtro in luce rossa, posto tra la lampada e l'oculare.

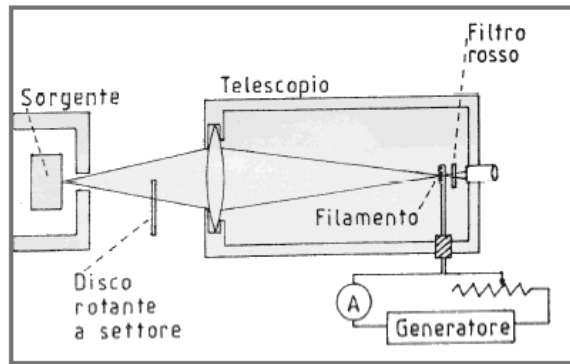


Fig.- Pirometro ottico.

Quando lo sperimentatore mette a fuoco una regione del corpo in esame, l'immagine della sorgente si forma nel piano del filamento della lampada e quest'ultimo, quando è spento, si staglia come una immagine oscura sul fondo luminoso prodotto dalla sorgente.

Alimentando la lampada con una tensione regolabile si può aumentare progressivamente la brillantezza del filamento sino a quando l'osservatore non sia più in grado di distinguere la sagoma del filamento dal fondo luminoso.

Poiché le due sorgenti luminose (immagine della sorgente in esame e filamento della lampada) si trovano alla stessa distanza dall'oculare, devono essere uguali le loro intensità luminose e, nell'ipotesi che gli spettri della radiazione emessa siano identici, la temperatura del filamento deve essere uguale a quella della sorgente reale.

Mediante misure effettuate con sorgenti a temperature note si può tarare l'amperometro che misura la corrente di alimentazione del filamento in maniera che fornisca direttamente il valore della temperatura incognita.

Per la taratura del pirometro ottico a temperature superiori a quella del punto di fusione dell'oro si utilizza un metodo analogo a quello descritto per il pirometro a radiazione totale.

In questo caso il criterio è quello di ridurre l'intensità luminosa della sorgente a temperatura più elevata sino a renderla uguale a quella fornita dalla sorgente campione dell'oro.

Questo è ottenuto interponendo tra la sorgente ed il pirometro un disco in rapida rotazione nel quale è praticata una apertura a settore la cui ampiezza può essere opportunamente variata.

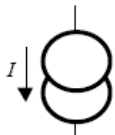
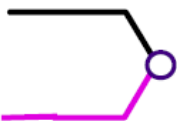
Si tara dapprima lo strumento con la sorgente-campione dell'oro (senza disco), determinando la corrente di alimentazione del filamento della lampada per la condizione di uguale luminosità.

Successivamente, con la sorgente a temperatura più elevata ed avendo interposto il disco, si varia l'apertura del settore, senza modificare la corrente di alimentazione del filamento, sino a riottenere la condizione di ugual luminosità.

8. Conclusioni

Si riporta una tabella riassuntiva dei vantaggi e svantaggi dei sensori di temperatura trattati in questa tesina.

Tabella- Sensori di temperatura a confronto.

 Pirometro	 RTD	 Termistore	 S. Integrato	 Termocoppia
• non invasivo • molto stabile • temperature elevate • range esteso	• sensibile • molto stabile • molto accurato • abbastanza lineare	• veloce • molto sensibile • collegamento a 2 fili	• accurato • economico • lineare	• economico • range esteso • ampia scelta • robusta
• non lineare • costoso	• lento • costoso • collegamento a 4 fili	• non lineare • range limitato • fragile	• range molto limitato • scelta limitata	• non lineare • misure relative • misure difficili

Nella seguente tabella, infine, si riportano le applicazioni più comuni dei sensori di temperatura trattati.

Tabella- Applicazioni dei sensori di temperatura.

Sensori	Applicazioni
RTD	Processi fotochimici Monitoraggio della temperatura di sostanze alimentari
Termistori	Sistemi di riscaldamento Elettronica industriale e di consumo
Termocoppie	Forni ad induzione Forni per uso alimentare
Sensori integrati	Celle frigorifere Compensazioni di temperatura in dispositivi di qualità
Pirometri	Controllo della temperatura di vetro/quarzo fondente Acciaierie

Bibliografia

Ambrosini – Perlasca – Lorenzi – Ocera
Sistemi e tecnologie
Tramontana – 1994

Licata
Sistemi di controllo vol. 3
Thecna – 2002

Biondo – Sacchi
Manuale di elettronica e telecomunicazioni
Hoepli – 1992

Manuale di elettronica, telecomunicazioni, energia nucleare
Edizioni Cremonese – 2004

Panella – Spalierno
Corso di elettronica vol. 3
Edizioni Cupido – 2002

Benedict
Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements
Willey – 1984

Fraden
Handbook of modern sensors
American institute of physics

Consulto di siti web
<http://www.climeg.poliba.it/~misure/Materiale%20didattico/L3/sensori.pdf>
http://www.climeg.poliba.it/~misure/Materiale%20didattico/LS/MMT-II_3L%20misure%20di%20temperatura.pdf