

Tesina

**ANALISI SUI SENSORI:  
I SENSORI DI TEMPERATURA**

Laureando: ALBERTO PICCO

Relatore: Prof. ALVISE MASCHIO

**Corso di laurea in Ingegneria Elettronica**

26/03/2010

Anno Accademico 2009-2010



# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>2. IL SENSORE.....</b>	<b>3</b>
2.1. DEFINIZIONI .....	3
2.2. IL SENSORE NELLA CATENA DI MISURA.....	3
2.3. ELEMENTI DI CARATTERIZZAZIONE DEL SENSORE.....	5
2.3.1. LA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO .....	5
2.3.2. LE GRANDEZZE DI INFLUENZA .....	5
2.3.3. LE TIPOLOGIE DEI SEGNALI .....	6
2.3.4. I CAMPI DI VARIABILITA' DEI SEGNALI.....	6
2.3.5. LE INCERTEZZE NEL FUNZIONAMENTO DEL SENSORE.....	7
2.4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL SENSORE.....	8
2.4.1. CARATTERISTICHE GENERALI.....	8
2.4.2. CARATTERISTICHE IN REGIME STAZIONARIO .....	9
2.4.3. CARATTERISTICHE IN REGIME DINAMICO .....	12
<b>3. SENSORI DI TEMPERATURA RESISTIVI .....</b>	<b>15</b>
3.1. A FILAMENTO METALLICO: TERMORESISTORI .....	15
3.1.1. FUNZIONAMENTO .....	15
3.1.2. Pt100.....	16
3.1.3. STRUTTURA.....	19
3.2. A SEMICONDUTTORE: TERMISTORI.....	20
3.2.1. FUNZIONAMENTO .....	20
3.2.2. MATERIALI E STRUTTURA .....	22
3.3. SOLUZIONI CIRCUITALI .....	23
3.3.1. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A DUE FILI .....	23
3.3.2. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A TRE FILI .....	25
3.3.3. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A QUATTRO FILI .....	25
3.3.4. METODO VOLT-AMPEROMETRICO.....	25
3.4. RTD E TERMISTORI A CONFRONTO .....	27

<b>4. SENSORI DI TEMPERATURA A SEMICONDUETTORE .....</b>	<b>29</b>
4.1. FUNZIONAMENTO .....	29
4.2. SOLUZIONI CIRCUITALI .....	31
4.3. SENSORI DI TEMPERATURA INTEGRATI.....	34
<b>5. TERMOCOPPIE.....</b>	<b>37</b>
5.1. FUNZIONAMENTO .....	37
5.2. MATERIALI E TIPI DI TERMOCOPPIE .....	39
5.3. TECNOLOGIE COSTRUTTIVE.....	43
5.4. MISURAZIONE DELLA TENSIONE D'USCITA .....	46
<b>6. CONCLUSIONI.....</b>	<b>51</b>

# 1. INTRODUZIONE

I dispositivi che permettono di interfacciare il mondo fisico con un sistema di misura sono detti *trasduttori*. La loro funzione è quella di estrarre l'informazione d'interesse dalla grandezza fisica (misurando) a cui è collegato e, tramite un apposito sistema di condizionamento del segnale, trasferirla a un parametro del segnale di uscita (generalmente un segnale elettrico). La relazione tra il misurando e il parametro del segnale di uscita deve essere nota con sufficiente accuratezza e viene determinata attraverso un'operazione di taratura, così l'informazione di misura risulta associata a un parametro del segnale di uscita e può essere acquisita mediante dispositivi elettronici.

Un trasduttore, illustrato in Fig.1, è composto da:

- *sensore*: elemento sensibile alla grandezza fisica da misurare, estrae l'informazione dalla grandezza fisica e la trasferisce sotto forma di segnale;
- *sistema di condizionamento*: modifica e ottimizza le caratteristiche del segnale proveniente dal sensore per successivi dispositivi di elaborazione

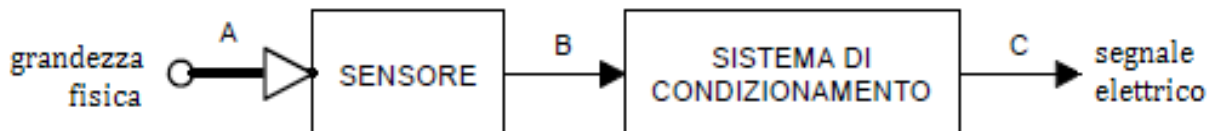


Fig. 1

Da un punto di vista strettamente funzionale, un utilizzatore potrebbe sembrare più orientato a conoscere le caratteristiche d'insieme del trasduttore, mentre la conoscenza dei principi di funzionamento del sensore ha maggior importanza per il costruttore. Va tenuto presente, però, che molte caratteristiche metrologiche dei trasduttori (robustezza, accuratezza, affidabilità, ecc.) dipendono dal principio fisico in base al quale il sensore modifica il proprio funzionamento, quindi per un impiego corretto di un trasduttore è utile comprendere il modo di operare del corrispondente sensore.



## 2. IL SENSORE

### 2.1. DEFINIZIONI

Il sensore svolge il compito di trasformare la grandezza fisica d'interesse (il misurando) in un'altra grandezza fisica, della stessa specie o di specie diversa, più adatta all'elaborazione che deve essere effettuata dagli elementi successivi della catena di misura.

L'informazione connessa con la grandezza fisica d'interesse evolve attraverso il sensore sotto forma di segnale: alle variazioni di quest'ultimo è associata l'informazione d'interesse secondo una convenzione nota.

Con riferimento alla Fig.2, si definisce *segnale d'ingresso*  $x(t)$  al sensore il segnale che porta l'informazione connessa alla grandezza fisica d'interesse, generalmente nella forma originaria; si definisce *segnale d'uscita*  $y(t)$  dal sensore il segnale, generalmente di natura diversa dalla grandezza fisica d'interesse, che il sensore fornisce ai successivi elementi della catena di misura. Caratteristica fondamentale del sensore è quella di trasferire l'informazione d'interesse dal segnale d'ingresso al segnale d'uscita senza alcuna alterazione (nei limiti delle incertezze connesse alla bontà del sensore).



Fig. 2

### 2.2. IL SENSORE NELLA CATENA DI MISURA

Nel suo funzionamento, il sensore interagisce con più sistemi fisici a esso esterni. Con riferimento alla fig.3, è possibile individuare:

- il *sistema misurato*, cioè il sistema fisico dal quale proviene l'informazione d'interesse attraverso il segnale d'ingresso;
- il *sistema utilizzatore*, cioè il sistema al quale il sensore fornisce l'informazione attraverso il suo segnale d'uscita;
- il *sistema ausiliario*, cioè il sistema che può essere utilizzato dal sensore per il suo funzionamento (ad esempio, il sistema d'alimentazione del sensore);
- il *sistema ambiente*, cioè tutto ciò che, esterno alla catena di misura e alla grandezza fisica d'interesse, può interagire con il sensore (ad esempio, sorgenti d'interferenze non riconducibili ai sistemi precedentemente esaminati).

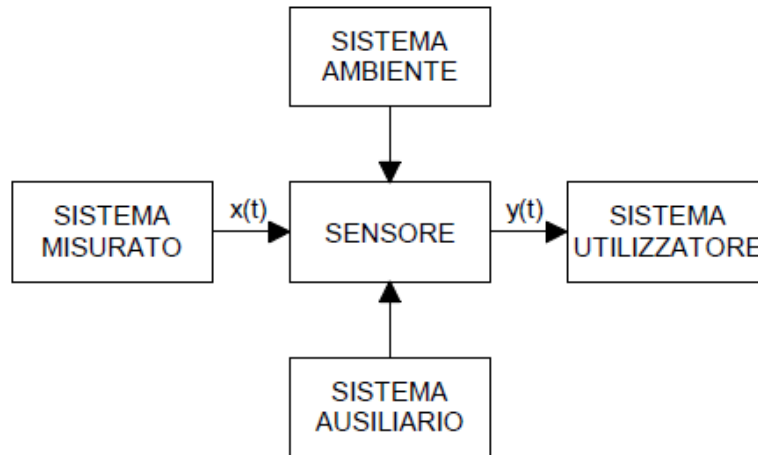


Fig. 3

L'interconnessione del sensore con i sistemi che lo circondano comporta anche uno scambio di energia fra essi. Escludendo le interazioni fra sensore e sistema ambiente (in quanto si tende a minimizzare lo scambio d'energia fra essi in modo da limitare le interferenze) è possibile individuare le seguenti interazioni:

- *interazione sensore-sistema misurato*: per tale interazione, si parla di *consumo* del sensore se il flusso di energia è dal sistema misurato al sensore, mentre si parla di *stimolo* o *eccitazione* del sistema misurato se il flusso d'energia è dal sensore al sistema misurato; entrambi i tipi di interazioni possono provocare grossolani errori di misura nel caso che l'energia ad essi connessa non sia trascurabile rispetto all'energia globale del sistema misurato (*modificazione del misurando*);
- *interazione sensore-sistema utilizzatore*: tale interazione, di tipo biunivoco, può essere vista dal lato del sensore e da quello del sistema utilizzatore; dal punto di vista del sensore, il sistema utilizzatore costituisce un *carico* e, in quanto tale, non deve alterare in modo inaccettabile il funzionamento del sensore stesso; dal punto di vista del sistema utilizzatore, il sensore costituisce la *sorgente di eccitazione* e, in quanto tale, non deve indurre perturbazioni al di fuori dei limiti entro i quali è garantito il normale funzionamento del sistema stesso;
- *interazione sistema ausiliario-sensore-sistema misurato*: tale interazione, in effetti, può avvenire alternativamente fra sistema ausiliario e sensore o fra sistema misurato e sensore e riguarda essenzialmente l'energia di cui il sensore ha bisogno per il suo funzionamento; nel caso di interazione sistema ausiliario-sensore, il sensore riceve tale energia dal sistema ausiliario, mentre il sistema misurato fornisce solo il segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, il sensore è detto *passivo*; nel caso di interazione sistema misurato-sensore, l'energia per il funzionamento del sensore è trasferita dal sistema misurato insieme al segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, si ricade nel caso relativo al consumo del sensore e lo stesso è detto *attivo*.



## 2.3. ELEMENTI DI CARATTERIZZAZIONE DEL SENSORE

### 2.3.1. LA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Nel funzionamento, il sensore è caratterizzato dalla sua *funzione di trasferimento*, cioè dal legame che unisce il segnale d'ingresso  $x(t)$  con il segnale d'uscita  $y(t)$ :

$$y(t) = f(x(t)) \quad (1)$$

### 2.3.2. LE GRANDEZZE DI INFLUENZA

Come visto in precedenza, il sensore è connesso, oltre che al sistema misurato e al sistema utilizzatore, anche ad altri sistemi che possono interagire con esso. Inoltre, altre grandezze fisiche non d'interesse appartenenti sia al sistema misurato sia al sistema utilizzatore possono influenzare il funzionamento del sensore. Tali interazioni possono essere riassunte introducendo le cosiddette *grandezze d'influenza*, cioè tutte le grandezze fisiche attinenti al sistema misurato (ad esclusione del misurando) ed agli altri sistemi interconnessi con il sensore che ne influenzano significativamente il funzionamento. Di conseguenza, la funzione di trasferimento del sensore (1), dal punto di vista più generale, va scritta come segue:

$$y(t) = f(x(t) + g_1(t) + g_2(t) + \dots + g_n(t)) \quad (2)$$

dove le funzioni  $g_i(t)$  rappresentano i segnali corrispondenti alle  $i$  grandezze d'influenza.

Tale relazione, in generale, è di difficile definizione, data la variabilità e l'aleatorietà delle grandezze d'influenza. Si operano quindi le seguenti semplificazioni:

- viene trascurata la dipendenza dal tempo delle grandezze d'influenza, ovvero si suppongono costanti durante il tempo in cui il sensore opera la trasformazione del segnale d'ingresso nel segnale d'uscita;
- si separa la dipendenza funzionale del segnale d'uscita dal segnale d'ingresso e dall'insieme delle grandezze d'influenza;
- si suppone trascurabile la dipendenza delle grandezze d'influenza dal misurando (in modo da non includere, fra le grandezze d'influenza, il misurando stesso);
- si suppone che le grandezze d'influenza siano tra loro indipendenti nei confronti del funzionamento del sensore.

In tal modo, la relazione (2) diviene:

$$y(t) = f(x(t)) + h_1(g_1) + h_2(g_2) + \dots + h_n(g_n) \quad (3)$$

essendo  $h_i$  la funzione che lega l'uscita del sensore alla singola grandezza d'influenza  $g_i$  ritenuta costante e indipendente dalle altre. Tali funzioni  $h_i$  vengono dette *funzioni d'influenza*.

Una grandezza d'influenza particolare è il tempo di funzionamento, inteso come invecchiamento o alterazione dei componenti che costituiscono il sensore. Tale grandezza d'influenza solitamente viene trattata separatamente dalle altre, poiché relativa a fenomeni con dinamica enormemente più lenta rispetto a quella delle altre grandezze d'influenza (temperatura, vibrazioni, campi elettromagnetici, ecc.).

### 2.3.3. LE TIPOLOGIE DEI SEGNALI

In generale, il segnale d'ingresso al sensore coincide con il misurando e l'informazione d'interesse è il valore che quest'ultimo assume, in una certa unità di misura. Il segnale d'uscita, invece, è generalmente di natura diversa e trasferisce l'informazione d'interesse in funzione della sua tipologia. In generale, si parla di:

- *segnali analogici* quando l'informazione d'interesse è associata direttamente ai valori assunti dalla grandezza che costituisce il segnale; in tal caso, l'informazione può coincidere con il valore stesso della grandezza (valore istantaneo) o essere associato ad una particolare funzione definita in un certo intervallo di tempo (ad esempio, valore medio, valore efficace, frequenza, ecc.);
- *segnali digitali* quando l'informazione è associata a un insieme (*parola*) costituito da una combinazione (*codice*) di grandezze elementari (*simboli*); in tal caso, la parola digitale è di tipo parallelo se, nella trasmissione dell'informazione, ad ogni simbolo è associato un canale di trasmissione, mentre è di tipo seriale se tutti i simboli costituenti la parola sono trasmessi mediante un unico canale.

### 2.3.4. I CAMPI DI VARIABILITA' DEI SEGNALI

Il funzionamento di un sensore dipende innanzi tutto dai valori assunti dal segnale d'ingresso, in termini sia quantitativi sia qualitativi. Dal punto di vista quantitativo, la relazione (1) che fissa la funzione di trasferimento del sensore, è sufficiente a caratterizzarne il funzionamento. Tuttavia, dal punto di vista qualitativo, il funzionale  $f$  che determina la funzione di trasferimento del sensore può dipendere dalla dinamica del segnale d'ingresso, per cui la funzione di trasferimento può essere formulata in maniera differente secondo l'ampiezza del segnale d'ingresso (ad esempio, nel caso delle termoresistenze, per piccole variazioni di temperatura può essere sufficiente una funzione di trasferimento di tipo lineare, mentre per variazioni più ampie è necessario adoperare funzioni di trasferimento di tipo quadratico o di ordine maggiore). Viene quindi introdotto il *campo di misura*, che definisce i limiti entro i quali può variare la grandezza d'ingresso affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fissate; viene, inoltre, definito il *campo di sicurezza*, solitamente più ampio del campo di misura, che definisce i limiti di variazione del segnale d'ingresso entro i quali il sensore non viene danneggiato.

Riguardo al segnale d'uscita, è possibile definire il *campo di normale funzionamento* del sensore come il campo dei valori del segnale d'uscita in

corrispondenza dei valori del segnale d'ingresso all'interno del campo di misura; inoltre, si individuano i *valori estremi* del segnale d'uscita come i valori più elevati assunti da quest'ultimo quando il segnale d'ingresso varia all'interno del campo di sicurezza.

Ovviamente, il funzionamento del sensore secondo la funzione di trasferimento è garantito solo all'interno del campo di misura per il segnale d'ingresso e, corrispondentemente, all'interno del campo di normale funzionamento per il segnale d'uscita. Al di fuori di tali limiti, ma all'interno del campo di sicurezza, la funzione di trasferimento può risultare alterata, mentre al di fuori del campo di sicurezza si produce la rottura del sensore.

### 2.3.5. LE INCERTEZZE NEL FUNZIONAMENTO DEL SENSORE

Il funzionamento del sensore in una catena di misura va ovviamente caratterizzato anche nei confronti delle incertezze conseguenti al suo impiego. Infatti, il sensore trasferisce un'informazione relativa ad una grandezza fisica che, nella maggior parte dei casi, è costituita dalla misura stessa della grandezza in esame. In tal caso, va senz'altro tenuta presente l'*incertezza intrinseca del segnale d'ingresso*, che dipende sia dalla *definizione del misurando* sia dallo *stato del sistema misurato*.

Vanno inoltre portate in conto le *grandezze d'influenza* che agiscono sul sensore e che possono indurre incertezze sulla misura della grandezza fisica d'interesse. Ancora, vanno tenute presenti le incertezze legate alla definizione del *modello* del sensore e dei sistemi che interagiscono con esso, cioè alla definizione della funzione di trasferimento del sensore che, come visto in precedenza, è fatta assumendo alcune semplificazioni riguardo alle grandezze d'influenza.

Infine, va tenuta presente l'*incertezza intrinseca del segnale d'uscita*.

## 2.4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL SENSORE

### 2.4.1. CARATTERISCTICHE GENERALI

Principio di funzionamento: è il principio fisico mediante il quale il sensore trasforma il segnale d'ingresso nel corrispondente segnale d'uscita; è opportuno che tale principio di funzionamento sia noto, in modo da utilizzare correttamente il sensore.

Misurando (measurand): è, come detto, la grandezza d'interesse; oltre alle grandezze già introdotte in precedenza (campo di misura, campo di sicurezza), è possibile definirne la *specie*, ovvero la natura della grandezza fisica d'interesse;

Uscita (output): anche in questo caso, oltre alle grandezze già introdotte in precedenza (campo di normale funzionamento, valori estremi), è possibile definire la *specie*, ovvero la natura della grandezza che costituisce il segnale d'uscita, la *potenza erogabile (output power)*, ovvero il valore limite della potenza che il sensore può fornire al sistema utilizzatore entro il quale il sensore può funzionare secondo le specifiche fornite (a volte, in modo equivalente, si parla di corrente massima erogabile, se il segnale di uscita è una tensione, o di tensione massima in uscita, o di valore *massimo dell'impedenza di carico (load impedance)* se il segnale di uscita è una corrente), *l'impedenza di uscita (output impedance)*, ovvero il valore dell'impedenza equivalente presentata dal sensore ai morsetti d'uscita.

Alimentazione ausiliaria (auxiliary supply): è il valore della tensione o dell'intensità di corrente che deve essere fornita da una sorgente esterna per consentire il corretto funzionamento del sensore (in questo caso, di tipo passivo).

Condizioni operative (operating conditions): con questo termine si definisce l'insieme delle condizioni a cui risulta soggetto il sensore; tali condizioni possono essere oggetto di particolari prescrizioni che riguardano la taratura, il funzionamento normale e in condizioni di sovraccarico, la conservazione in magazzino; esse generalmente comprendono i campi di valore in cui devono essere mantenute le grandezze d'influenza: di conseguenza, è possibile definire, analogamente a quanto fatto per il misurando, un *campo di sicurezza di una grandezza d'influenza* (campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza durante l'uso del sensore affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche) ed un *campo di magazzino di una grandezza d'influenza (storage conditions)* (campo nel quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza quando il sensore è a riposo, in condizioni di immagazzinamento, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche).

Vita (life): è la durata minima garantita di funzionamento del sensore in condizioni di piena validità delle sue caratteristiche metrologiche; essa può essere specificata in modi diversi, secondo il tipo di sensore e, per lo stesso sensore, secondo l'informazione che si vuole dare; solitamente è possibile fare riferimento al *numero di cicli (cycling life)* (numero di escursioni del misurando da un estremo all'altro del

campo di misura o fra due limiti diversamente specificati), al *tempo di funzionamento (operating life)* (intervallo di tempo nel quale il sensore è in funzione; di regola si specifica se si intende *funzionamento continuo (continuous rating)* oppure *intermittente (intermittent rating)*), il *tempo di magazzino (storage life)* (intervallo di tempo che il sensore trascorre in magazzino, senza funzionare, a determinate *condizioni di magazzino (storage conditions)*).

*Caratteristiche fisiche (physical characteristics)*: con questo termine si intende l'insieme delle caratteristiche connesse con le *dimensioni (dimensions)* (dimensioni fisiche esterne del sensore), il *peso (weight)* (peso del sensore e dei suoi eventuali accessori), il *montaggio (mounting)* (modalità con cui il sensore viene collegato al sistema misurato (viti, flange, collanti, ecc.) e al sistema utilizzatore (spine, connettori, ecc.)), i *materiali di costruzione (materials of construction)* (materiali usati in prevalenza nella costruzione delle varie parti del sensore (acciaio inossidabile, plastica, ecc.)), gli *accessori (accessories)* (apparecchiature ausiliarie che sono opportune, o necessarie, per il corretto funzionamento del sensore).

## 2.4.2. CARATTERISTICHE IN REGIME STAZIONARIO

### FUNZIONE DI CONVERSIONE

*Funzione di taratura*: l'impiego del sensore richiede ovviamente che se ne conosca la "*funzione di conversione*", cioè la relazione che lega il segnale di ingresso a quello di uscita o, quando è possibile, la sua inversa. In realtà, a causa delle inevitabili incertezze, per nessuno dei due segnali si può parlare di "valore", ma bisogna introdurre il concetto di "*fascia di valore*", cioè

*l'insieme di valori che rappresenta, nella sua globalità, la grandezza in questione, senza che nessuno di essi abbia più peso degli altri.*

Si preferisce dunque parlare di "*funzione di taratura*", definita come (facendo riferimento alla relazione inversa)

*la relazione che permette di ricavare da ogni valore della grandezza di uscita la corrispondente fascia di valore del misurando.*

L'informazione completa viene di solito fornita specificando separatamente (in forma grafica, tabulare, o analitica) dove si colloca la fascia di valore, mediante un punto situato in posizione intermedia nella fascia, e l'ampiezza della fascia stessa. Si distinguono dunque i due seguenti tipi d'informazione:

a) *Curva di taratura (calibration curve)*: è la relazione biunivoca (o almeno univoca) tra ogni valore della grandezza di uscita e il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando. Quando la curva di taratura è rettilinea, cioè esiste una relazione di proporzionalità fra uscita e misurando, essa viene espressa di regola con un coefficiente chiamato *costante di taratura (calibration factor)*;

b) *Incertezza di taratura (calibration uncertainty)*: è la larghezza della fascia di valore; può essere specificata: in valore *assoluto*, con la stessa unità di misura del misurando, in valore *relativo*, rapportandola al valore del punto intermedio della fascia a cui è associata, in valore *ridotto*, rapportandola a un determinato valore del campo di misura, di solito il limite superiore.

In modo più o meno equivalente si parla molto spesso di *errore (error, uncertainty)*, o di *fascia (o banda) di errore (error band)*, sempre con riferimento a un determinato valore dell'uscita.

A volte ancora si introduce il concetto di *precisione (accuracy)*, espresso di solito in termini di incertezza relativa.

*Sensibilità (sensitivity)*: può essere definita con riferimento un punto qualsiasi della curva di taratura e coincide con l'inverso della pendenza della curva stessa.

Nel caso particolare in cui la curva di taratura è rettilinea, è l'inverso della costante di taratura. Essa è dunque espressa, come unità di misura, con riferimento alle unità di misura del misurando e della grandezza di uscita; ad esempio, in un sensore di temperatura con uscita in tensione, in volt/°K.

*Linearità (linearity)*: è un'indicazione di quanto la curva di taratura si discosta dall'andamento rettilineo. E' specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Si definiscono dunque tanti tipi di linearità quanti sono i modi di scegliere la retta di riferimento. In particolare, le definizioni più interessanti sono le seguenti:

- *linearità riferita allo zero (Zero based linearity)*: la retta di riferimento passa per l'estremo inferiore della curva di taratura, corrispondente all'estremo inferiore del campo di misura, ed è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti;

- *linearità riferita agli estremi (End point linearity)*: la retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura;

- *linearità secondo i minimi quadrati (Least squares linearity)*: la retta di riferimento è quella che corrisponde al valor minimo della somma dei quadrati degli scostamenti;

- *linearità indipendente (independent linearity)*: la retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti.

*Risoluzione (resolution)*: E' la variazione del valore del misurando che provoca una variazione nel valore della grandezza di uscita pari all'incertezza dell'uscita e può essere espressa in valore assoluto, in valore relativo o in valore ridotto.

Far riferimento all'incertezza dell'uscita corrisponde in pratica a considerare la minima variazione apprezzabile; la risoluzione rappresenta dunque la capacità del

seniore a funzionare come rivelatore differenziale nell'intorno di un determinato valore del misurando.

E' il caso di ricordare che quando il sensore funziona intorno allo zero, al termine risoluzione si preferisce spesso il termine *soglia (threshold)*, intendendo così il valore minimo del misurando che fornisce un'uscita apprezzabilmente diversa da zero (si suppone che a misurando nullo corrisponda uscita nulla). A volte si definisce anche *l'uscita con misurando nullo (zero-measurand output, oppure offset)*, termine che non ha bisogno di precisazioni.

*Ripetibilità (repeatability)*: questo parametro specifica l'attitudine del sensore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando è applicato all'ingresso lo stesso misurando più volte consecutivamente, nelle stesse condizioni operative. La ripetibilità è di regola espressa con le medesime modalità dell'incertezza di taratura.

### **CONDIZIONI DI RIFERIMENTO DELLE GRANDEZZE D'INFLUENZA**

Tutte le caratteristiche metrologiche fin qui menzionate sono garantite quando ogni grandezza d'influenza è contenuta entro una determinata fascia di valori. Si definiscono dunque le "*condizioni di riferimento*" (*reference operating conditions*) come

*l'insieme delle fasce di valore delle grandezza d'influenza in corrispondenza delle quali sono valide le specificazioni metrologiche riassumibili nella funzione di taratura.*

### **FUNZIONI DI INFLUENZA (OPERATING INFLUENCE) E CONDIZIONI DI NORMALE FUNZIONAMENTO (NORMAL OPERATING CONDITIONS)**

Molto spesso è interessante conoscere il comportamento del sensore al di fuori delle condizioni di riferimento appena definite; si definisce dunque, per ogni grandezza d'influenza, la relativa *funzione d'influenza*, cioè l'informazione su come agisce una determinata grandezza d'influenza su una delle caratteristiche metrologiche.

Questa funzione può essere fornita con una curva, o con uno o più valori numerici, ciascuno dei quali, in un determinato campo di valori, esprime la *sensibilità (sensitivity)* della caratteristica metrologica considerata rispetto alle variazioni della grandezza d'influenza. Tipica è la sensibilità termica (*thermal sensitivity*).

Per esempio, si può esprimere l'effetto della tensione della sorgente di alimentazione ausiliaria sulla costante di taratura mediante un coefficiente del tipo  $-0,1\%/V$ , volendo significare che l'aumento di un volt nella tensione provoca una diminuzione della costante di taratura pari a  $0,1\%$ .

Per ogni grandezza d'influenza, associato al concetto di funzione d'influenza c'è ovviamente quello del suo campo di validità, che va sotto il nome di *campo di*

*normale funzionamento (normal operating range)*. Infine, all'insieme di questi campi si assegna il nome di "*condizioni di normale funzionamento*".

### 2.4.3. CARATTERISTICHE IN REGIME DINAMICO

#### NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

Un tipo di informazione molto ricca è la *risposta in frequenza (frequency response)*, in quanto dà indicazioni sulle variazioni della sinusoidale di uscita quando il misurando, sinusoidale e di ampiezza costante, varia entro un determinato campo di frequenze. In pratica si forniscono curve in cui si riportano, in funzione della frequenza, il rapporto fra l'ampiezza dell'uscita e l'ampiezza del misurando (curva del modulo) e lo sfasamento fra la sinusoidale di uscita e quella che costituisce il misurando (curva di fase). Di solito, per ampliare il campo riportato in diagramma, e non perdere troppo in capacità di lettura nella zona dei bassi valori, si usano scale logaritmiche, specialmente per l'asse delle frequenze. Molto spesso ci si limita a fornire una sintesi delle informazioni contenute nelle curve della risposta in frequenza. In particolare si definiscono le seguenti grandezze:

- *Campo di frequenze di non distorsione (Frequency range)*: è il campo di frequenze nel quale la curva di risposta in modulo non esce da una fascia di tolleranza prefissata, la cui ampiezza dipende dal grado di distorsione ammesso. Di solito, con una dizione abbreviata, si parla semplicemente di campo di frequenze del sensore. Il campo di frequenza è delimitato dalla frequenza di taglio inferiore e dalla frequenza di taglio superiore.

- *Frequenza di risonanza (Resonant frequency)*: è la frequenza alla quale la curva di risposta in modulo presenta un massimo. Quando il sensore è rappresentato da un sistema di grado superiore al terzo, potrebbe presentare più di una frequenza di risonanza; in tal caso si suole fornire l'indicazione della più bassa.

#### NEL DOMINIO DEL TEMPO

Di solito sono dati i seguenti tipi di informazioni:

a) *Riposta al gradino (step response)*: è la risposta del sensore a una variazione a gradino del misurando. Costituisce un'informazione sul comportamento dinamico del sensore molto ricca di indicazioni. Anche in questo caso, però, come nel caso della risposta in frequenza, si è soliti fornire indicazioni sintetiche, costituite da un numero limitato di valori numerici.

- *Sovraelongazione (overshoot)*: è definita solamente quando l'uscita, durante il transitorio, va al di là del valore di regime. E' data dalla differenza fra il valore massimo e quello di regime dell'uscita, riferita, di regola, al valore di regime;

- *tempo morto (dead time)*: è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera un determinato valore di soglia al di sotto del quale viene considerata trascurabile;



- *tempo di salita (rise time)*: fissate due frazioni del valore di regime dell'uscita, una relativamente piccola (ad esempio, 5%, 10%), l'altra relativamente elevata (ad esempio 90%, 95%), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui l'uscita supera il primo valore e l'istante in cui supera per la prima volta il secondo;
- *tempo di risposta (response time)*: è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera per la prima volta una determinata frazione, relativamente elevata (ad esempio, 90%, 95%), del valore di regime. Spesso viene chiamato *costante di tempo (time constant)* il tempo di risposta corrispondente a una frazione del valore di regime pari al 63%;
- *tempo di assestamento (settling time)*: fissata una fascia di valore intorno al valore di regime dell'uscita (ad esempio 5%), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita entra, per non uscirne più, nella suddetta fascia di valore;
- *frequenza delle oscillazioni di assestamento (ringing frequency)*: è la frequenza delle oscillazioni smorzate che si verificano quando il sistema è sottosmorzato;
- *fattore di smorzamento (damping factor)*: viene definito, nel caso di sistema oscillante, cioè sottosmorzato, come il rapporto fra la minore e la maggiore di due sovraelongazioni successive, nell'ipotesi che tale rapporto sia indipendente dalla coppia di sovraelongazioni considerate. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del sensore mediante un sistema del secondo ordine; in tal caso questo fattore di smorzamento coincide con l'omonimo coefficiente.

b) Risposta libera (natural response): è il modo in cui l'uscita del sensore evolve nel tempo, partente da un valore iniziale non nullo, in assenza di misurando. Essa coincide dunque con l'evoluzione libera  $y_1(t)$ . Questa particolare risposta è interessante perché pone in luce i modi del sistema.

Di solito non si riporta la risposta libera sotto forma di diagramma in funzione del tempo, perché l'informazione sarebbe inutilmente ridondante, ma ci si limita a fornire, nel caso in cui il sistema presenti un modo pseudoperiodico, cioè delle oscillazioni smorzate, la cosiddetta *frequenza libera, o frequenza naturale (natural frequency)*, che non è altro che la frequenza del termine sinusoidale.

Il numero dei modi dipende dall'ordine del sistema. Si possono quindi avere più di una frequenza naturale. In pratica, però, interessa sempre la frequenza naturale di valore più basso; d'altronde è abbastanza raro che un sensore debba essere rappresentato con un sistema di ordine superiore al secondo.

A volte si definisce anche la *frequenza naturale a smorzamento nullo (natural undamped frequency)*, che non ha riscontro con una condizione di funzionamento reale, ma è il valore teorico che assumerebbe la frequenza naturale, se il sistema non fosse per nulla smorzato. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del sensore mediante un sistema del secondo ordine; in tal caso questo fattore di smorzamento coincide con l'omonimo coefficiente.

c) Limite di velocità (velocity limit): è il valore limite della velocità di variazione del misurando, al di là del quale l'uscita non è in grado di variare con la stessa velocità con cui varia il corrispondente misurando.

d) Tempo di recupero (recovery time): è l'intervallo di tempo richiesto, dopo un evento specificato (per esempio, un sovraccarico, una variazione a gradino nell'alimentazione ausiliaria, un corto circuito sull'uscita), affinché il sensore riprenda a funzionare secondo le caratteristiche specificate.

## **RUMORE (NOISE)**

E' una variazione del segnale non correlata ad alcuna informazione. E' di solito fornito in valore efficace, precisando la banda di frequenze entro la quale viene preso in considerazione.

Si può parlare di rumore sul misurando e di rumore sull'uscita, ma, mentre il rumore sul misurando riguarda esclusivamente lo stato del misurando stesso, cioè la sua capacità di convogliare un'informazione, quando si vuole caratterizzare un sensore si fa l'ipotesi che il rumore sia presente solo sull'uscita; la sua entità costituisce evidentemente un'importante indicazione sulla capacità del sensore di non inquinare l'informazione che proviene dal misurando.

L'entità del rumore è una grandezza fornita frequentemente, soprattutto quando si prevede che il misurando possa variare velocemente nel tempo (cioè corrisponda a una banda di frequenze abbastanza ampia); in ogni caso, però, la risoluzione è un'informazione sintetica che dovrebbe conglobarne l'effetto.

## 3. SENSORI DI TEMPERATURA RESISTIVI

### 3.1. A FILAMENTO METALLICO: TERMORESISTORI

#### 3.1.1. FUNZIONAMENTO

I sensori di temperatura resistivi a filamento metallico, spesso indicati con la sigla RTD (*Resistance Temperature Detector*) e chiamati anche termoresistori, basano il loro funzionamento sulla dipendenza della propria resistività dalla temperatura.

In un materiale conduttore un aumento della temperatura provoca un aumento dell'agitazione termica degli atomi, che a sua volta ostacola il movimento degli elettroni di conduzione.

La temperatura influenza anche le dimensioni geometriche del materiale in esame, provocando quindi un'ulteriore variazione di resistenza, che può essere non trascurabile:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

dove  $\rho$  è la resistività elettrica del materiale,  $l$  è la lunghezza del conduttore e  $s$  la sua sezione.

Per un componente RTD il legame fra resistenza e temperatura si può approssimare, in un dato intervallo di temperatura, mediante uno sviluppo polinomiale del tipo:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots]$$

dove  $R_0$  è la resistenza del RTD alla temperatura  $T_0$ , che spesso si suppone pari a  $0^\circ\text{C}$ , e  $\Delta T = T - T_0$  è lo scostamento della temperatura rispetto al riferimento  $T_0$ .

I parametri  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ... assumono valori che dipendono dal materiale con cui il termo resistore viene realizzato.

La precedente equazione può essere troncata ad un certo grado polinomiale ed è tanto più valida quanto minore è lo scostamento della temperatura  $T$  dalla temperatura di riferimento  $T_0$ . Ovviamente, i termini di grado più elevato hanno maggior peso all'aumentare dello scostamento  $\Delta T$ .

Affinché l'influenza della temperatura sia sufficientemente marcata in modo da poter utilizzare questi dispositivi come sensori di temperatura, vengono utilizzate per la loro realizzazione particolari leghe, o miscele, che conferiscono le prestazioni che interessano, sia come sensibilità alla temperatura, sia come intervallo di temperatura nel quale possono essere impiegati.

Nelle applicazioni pratiche in cui non viene richiesta un'accuratezza molto spinta e il campo di temperatura è abbastanza limitato, si può arrestare lo sviluppo al primo termine e considerare il comportamento del RTD lineare con la temperatura. In questo caso si ha:

$$R_T = R_0[1 + \alpha\Delta T]$$

Nei limiti entro i quali tale approssimazione è accettabile, il coefficiente di temperatura è quindi circa pari ad  $\alpha$ .

Il valore di  $\alpha$ , espresso in  $K^{-1}$ , dipende dal materiale. Ad esempio, per il platino  $\alpha = 0.00385K^{-1}$ , per il rame  $\alpha = 0.0043K^{-1}$  e per il nichel  $\alpha = 0.00681K^{-1}$ . Da Questi valori e dal grafico di fig.4, che mostra la relazione tra il rapporto della resistenza  $R=R_T$  con la resistenza di riferimento  $R_0$  e la temperatura, si deduce che il nichel offre la maggior sensibilità alla temperatura, ma il campo di validità del suo comportamento lineare è molto ristretto, mentre il materiale più usato è il platino che offre una maggior linearità in un vasto intervallo di temperatura.

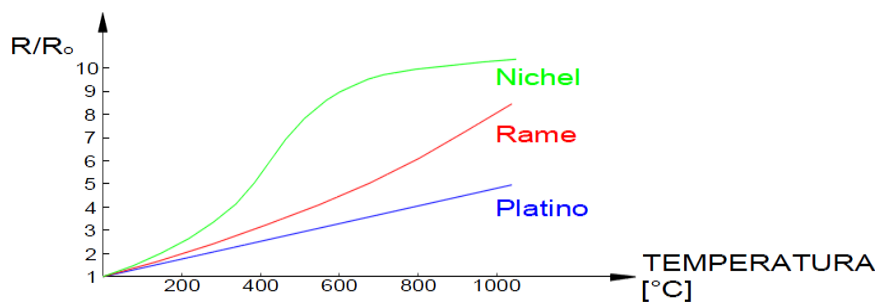


Fig.4

### 3.1.2. Pt100

Il materiale più usato per costruire gli RTD è il platino perché, come visto in precedenza, ha un vasto intervallo di temperatura in cui la sensibilità alla temperatura è molto lineare.

La resistenza dei termo resistori in platino, alla temperatura di riferimento, può variare da 25  $\Omega$  a 200  $\Omega$  secondo le modalità costruttive che vengono adottate.

Sono molto utilizzati i sensori RTD al platino aventi la resistenza nominale alla temperatura di riferimento pari a 100  $\Omega$ , convenzionalmente indicati con la sigla **Pt100**.

Nel caso del platino la relazione tra resistenza e temperatura viene descritta dall'equazione di *Callendar-Van Dusen* (che viene corretta in base alla IPTS-68):

$$R = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

dove:

R = resistenza alla temperatura t ( $^{\circ}C$ );

$R_0$  = resistenza a  $0^{\circ}C$ ;

t = temperatura in  $^{\circ}C$ ;

A, B, C sono coefficienti ricavati sperimentalmente dalle misure di  $R_0, R_{100}, R_{260}$ .

L'equazione di Callendar-Van Dusen vale per l'intervallo di temperatura compreso tra  $-200\text{ }^\circ\text{C}$  e  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , mentre per il range di temperature che va da  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a  $661\text{ }^\circ\text{C}$  la funzione di trasferimento del platino non dipende dalla potenza terza e si riduce alla sola equazione di Callendar:

$$R = R_0[1 + At + Bt^2]$$

I valori dei vari coefficienti e le formule per calcolarli sono mostrati in Fig.5.

**CALENDAR-VAN DUSEN CONSTANTS†**

<b>Alpha, <math>\alpha</math> (<math>^\circ\text{C}^{-1}</math>)</b>	.003850 $\pm$ .0001
<b>Delta, <math>\delta</math> (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	1.4999 $\pm$ 0.007
<b>Beta, <math>\beta^*</math> (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	0.10863
<b>A (<math>^\circ\text{C}^{-1}</math>)</b>	$3.908 \times 10^{-3}$
<b>B (<math>^\circ\text{C}^{-2}</math>)</b>	$-5.775 \times 10^{-7}$
<b>C (<math>^\circ\text{C}^{-4}</math>)*</b>	$-4.183 \times 10^{-12}$

\*Both  $\beta = 0$  and  $C = 0$  for  $T > 0\text{ }^\circ\text{C}$

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100} \qquad B = \frac{-\alpha \cdot \delta}{100^2} \qquad C_{T < 0} = \frac{-\alpha \cdot \beta}{100^4}$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \qquad \delta = \frac{R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot 260) - R_{260}}{4.16 \cdot R_0 \cdot \alpha}$$

$$\beta = \text{Constant for } T < 0\text{ }^\circ\text{C}$$

Fig.5

Lo standard internazionale IEC751 definisce due classi per gli RTD al platino da  $100\Omega$ , le classe A e B con i parametri mostrati in fig.6.

Parameter	IEC 751 Class A	IEC 751 Class B
$R_0$	$100\Omega \pm 0.06\%$	$100\Omega \pm 0.12\%$
Alpha, $\alpha$	$.00385 \pm .000063$	$.00385 \pm .000063$
Range	$-200\text{ }^\circ\text{C}$ to $650\text{ }^\circ\text{C}$	$-200\text{ }^\circ\text{C}$ to $850\text{ }^\circ\text{C}$
Res., $R_T^*$	$\pm (.06 + .0008 T  - 2E-7T^2)$	$\pm (.12 + .0019 T  - 6E-7T^2)$
Temp, T	$\pm (0.3 + 0.002 T )\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm (0.3 + 0.005 T )\text{ }^\circ\text{C}$

\*Units are  $\Omega$ s. Values apply to  $100\Omega$  Pt RTDs only. Scale by ratio of the  $R_0$ s to apply to other ice point resistances.

Fig.6

Nelle tabelle di Fig.7 sono mostrati i valori di resistenza e di tolleranza per le due classi della Pt100 alle varie temperature.

Classi di tolleranza termometri a resistenza Pt100 per classi A e B secondo IEC 60751				
Temperatura °C	Tolleranza			
	Classe A		Classe B	
	+ / - °C	+ / - Ohm	+ / - °C	+ / - Ohm
-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

Valori di resistenza	
Temp.°C	Pt 100 Ohm
-200	18.52
-150	39.72
-100	60.26
-50	80.31
0	100.0
50	119.4
100	138.51
150	157.33
200	175.33
250	194.10
300	212.05
350	229.72
400	247.09
450	264.18
500	280.98
550	297.49
600	313.71
650	329.64
700	345.28
750	360.64
800	375.70

Fig.7

Dalla tabella con i valori di resistenza si può ricavare il grafico in Fig.8.

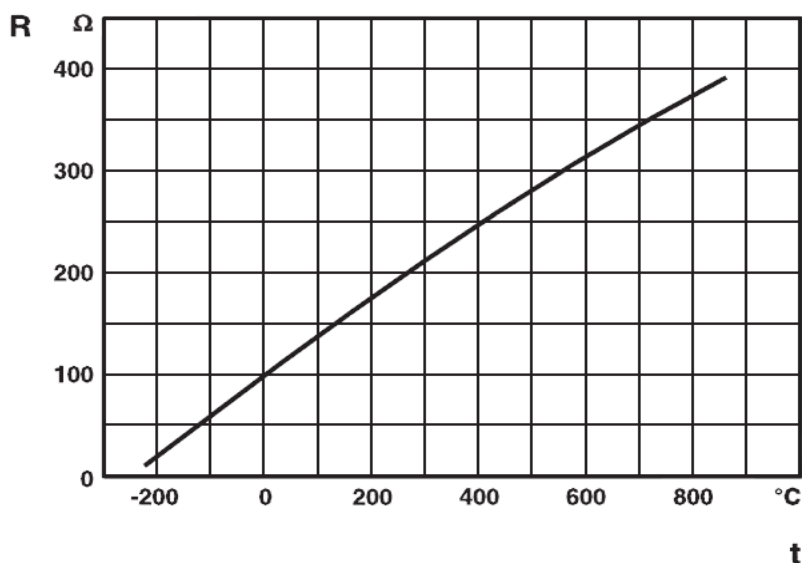


Fig.8

### 3.1.3. STRUTTURA

La resistenza sensibile alle variazioni di temperatura viene applicata su un supporto adatto, sotto forma di un avvolgimento di misura.

Questo avvolgimento di misura può essere fuso in vetro o incorporato in una massa ceramica. Per soddisfare i moderni requisiti rivolti a misure più precise e valori di resistenza più alti, vengono applicati sottilissimi strati di platino anziché fili su di un substrato di ceramica (Fig.9).

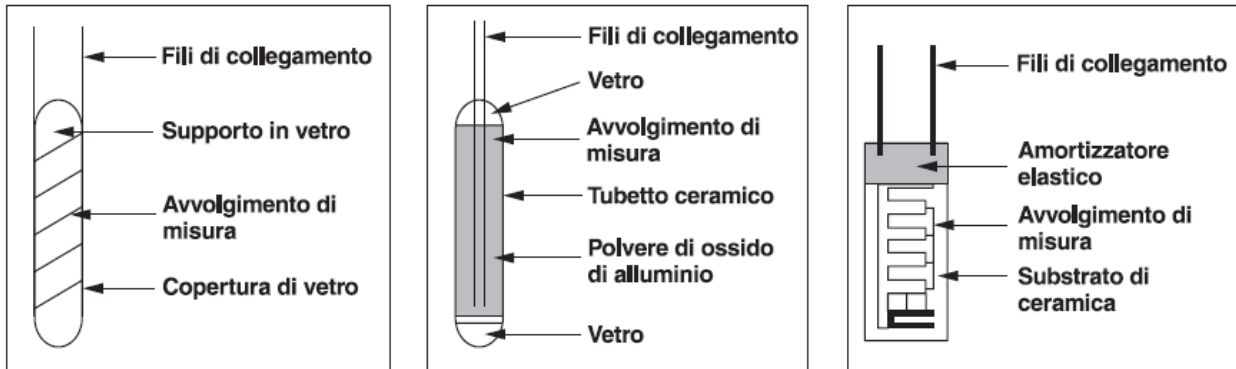


Fig.9

Per proteggere questi resistori di precisione dalle sollecitazioni meccaniche (pressione, portata dei fluidi) e dall'azione degli agenti chimici, vengono installati abitualmente in appositi tubi di protezione (inserti di misura). In questo modo viene garantita anche la possibilità di sostituzione del sensore senza la necessità d'interrompere il processo.

Poiché i termometri a resistenza appartengono alla categoria dei termometri di contatto (il resistore di precisione deve assumere la temperatura del mezzo del quale occorre effettuare la misura), è necessario adattare le armature di protezione agli scopi di utilizzo e alle condizioni di installazione (Fig.10).

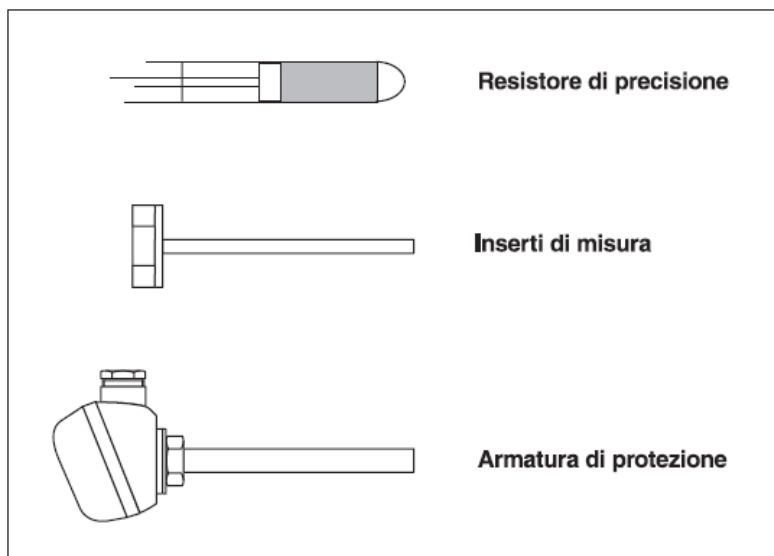


Fig.10

## 3.2. A SEMICONDUCTORE: TERMISTORI

### 3.2.1. FUNZIONAMENTO

Il termistore è un sensore che trasforma variazioni di temperatura in variazioni di resistenza, ma a differenza delle termoresistenze, l'elemento sensibile è un semiconduttore.

La dipendenza della resistenza di un termistore dalla temperatura è influenzata non solo dalla variazione delle sue dimensioni fisiche, ma anche da altri fattori quali il tipo di drogante e l'entità della drogatura cui il materiale semiconduttore è sottoposto. Con un'opportuna scelta della drogatura è possibile aumentare la sensibilità del termistore, ottenendo così una sensibilità alla temperatura molto maggiore di quella ottenibile con un metallo.

I termistori possono essere divisi in due categorie, basate sull'andamento della resistenza all'aumentare della temperatura: NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient) mostrati in fig.11.

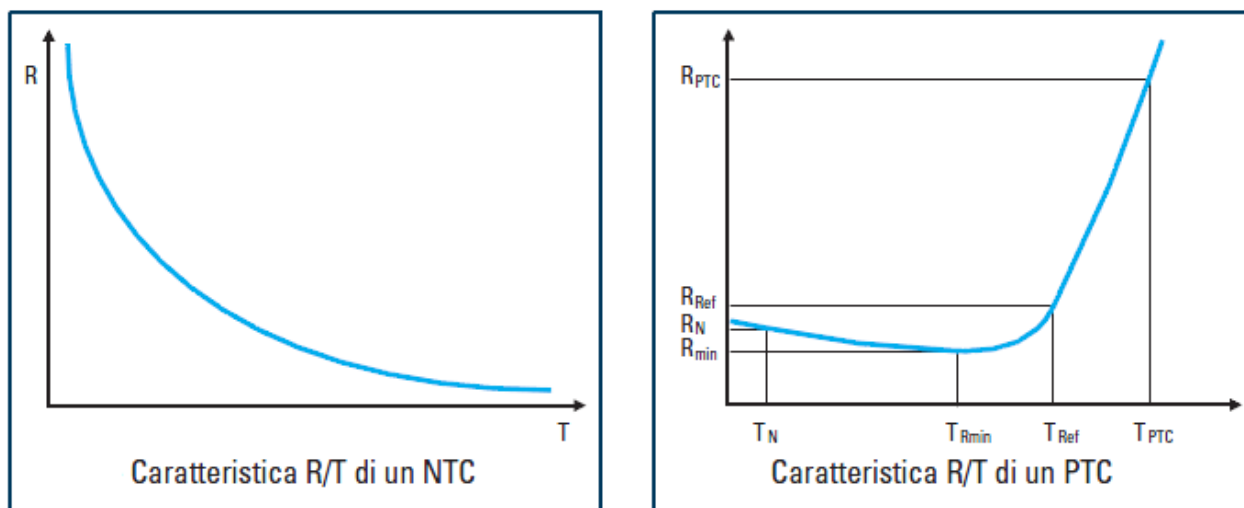


Fig.11

#### NTC

Nei componenti NTC il legame fra temperatura e resistenza può essere espresso con l'equazione di Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3$$

dove:

T è la temperatura (in kelvin);

R è la resistenza (in ohm);

A, B, C sono i coefficienti di Steinhart-Hart che variano secondo il tipo e modello del termistore e il range di temperatura scelto.



L'equazione di Steinhart-Hart offre una buona precisione, infatti, l'errore commesso è generalmente inferiore a 0,002 °C.

In un campo ristretto di temperatura si può usare un'equazione semplificata detta "equazione B" o "beta value", praticamente è l'equazione di Steinhart-Hart trascurando il termine di 3° grado:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left( \frac{R}{R_0} \right)$$

risolta rispetto la R:

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

dove:

T è la temperatura in kelvin;

T<sub>0</sub> è la temperatura di riferimento (di solito 25°C=298,15°K);

R è la resistenza alla temperatura T;

R<sub>0</sub> è la resistenza di riferimento (resistenza alla temperatura di riferimento);

il parametro B è costante in prima approssimazione e di solito ne viene indicato l'intervallo di temperatura in cui è valida e la sua tolleranza in % (ad esempio B<sub>25/85</sub> ± 2% indica che B tra 25 °C e 85 °C ha un errore massimo di ± 2%); detta anche temperatura caratteristica alcuni costruttori forniscono il suo valore in °K, il suo valore può variare da 2000K a 5000K a seconda del materiale.

Il coefficiente di temperatura α risulta pari a -B/T<sup>2</sup>.

## PTC

Nei componenti PTC la resistenza aumenta esponenzialmente con la temperatura non appena superato il valore T<sub>Ref</sub> del materiale, che corrisponde in prima approssimazione alla "Temperatura di Curie TC", mentre prima di tale temperatura il valore resistivo mostra un andamento leggermente decrescente con la temperatura (fig.11).

Il valore resistivo nel campo di ripida variazione della resistenza è definito da:

$$R = R_{Ref} e^{\alpha(T-T_{Ref})}$$

dove α è il coefficiente di temperatura che, per valori di R>R<sub>Ref</sub>, può essere approssimativamente ritenuto costante.

### 3.2.2. MATERIALI E STRUTTURA

I termistori sia NTC che PTC sono componenti ceramici costituiti da una struttura policristallina ottenuta per sinterizzazione di ossidi metallici e non, opportunamente miscelati.

I dispositivi NTC sono ottenuti dalla sinterizzazione di ossidi metallici drogati come  $Mn_2O$ ,  $NiO$ ,  $Co_2O_3$ ,  $Cu_2O$ ,  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ , mentre i dispositivi PTC sono realizzati con materiale ceramico a base di titanio e bario con aggiunte di piombo o zirconio, in commercio esistono anche PTC costituiti da silicio drogato, generalmente con boro, con una concentrazione dell'ordine dei  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  che hanno una caratteristica resistenza-temperatura più regolare.

I vantaggi della sinterizzazione risiedono nella possibilità di utilizzare sensori di qualunque forma e dimensioni e con costanti di tempo bassissime (dovute alle piccole dimensioni); lo schema generale di un termistore è mostrato in fig.12.

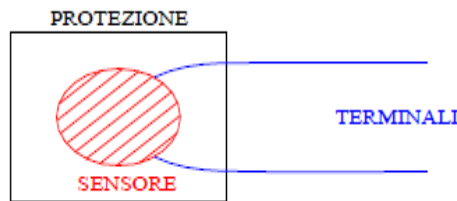


Fig.12

La geometria dei termistori può variare da produttore a produttore, ma le forme più utilizzate e comuni sono mostrati nella fig.13:

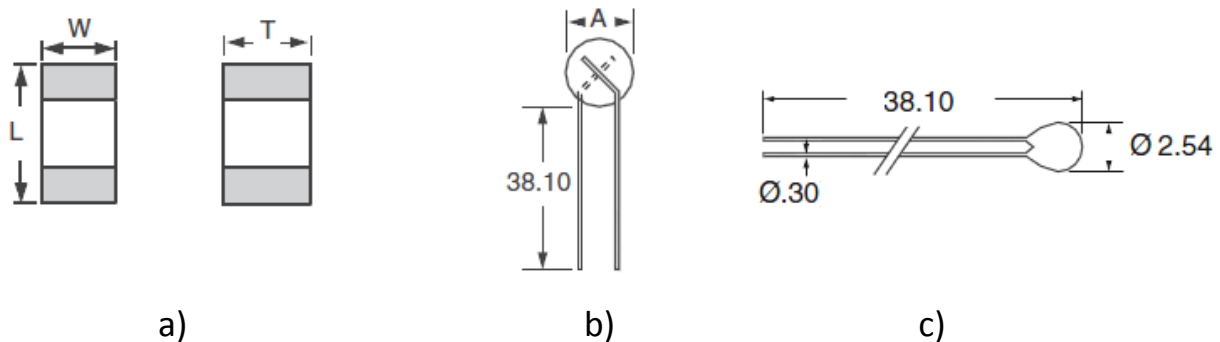


Fig.13

- termistore a chip ceramico con le seguenti dimensioni: lunghezza  $1 < L < 2$  mm, larghezza  $0,5 < W < 1,25$  mm e spessore  $0,6 < T < 1,3$  mm;
- termistore a disco rivestito di materiale epossidico con diametro A che varia da 2,79 a 12,19 mm;
- termistore a sfera incapsulato in materiale epossidico.

### 3.3. SOLUZIONI CIRCUITALI

La misura della resistenza dell'elemento sensibile viene effettuata con il metodo a ponte o con il metodo volt-amperometrico.

Ci sono vari metodi a ponte, ad esempio il "ponte di Siemens" e il "ponte di Mueller", ma sono tutti riconducibili al ponte di Wheatstone. I collegamenti nei vari circuiti cambiano a seconda di quanti reofori ha la termoresistenza, le varie configurazioni sono mostrate in fig.14, mentre per i termistori esiste solo la configurazione a due terminali.

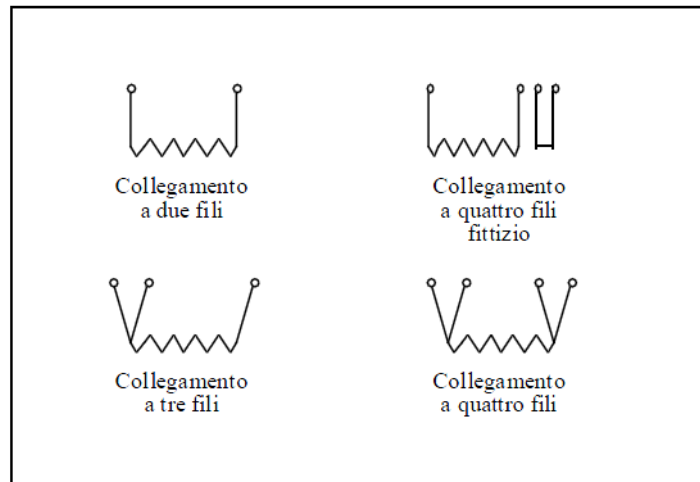


Fig.14

#### 3.3.1. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A DUE FILI

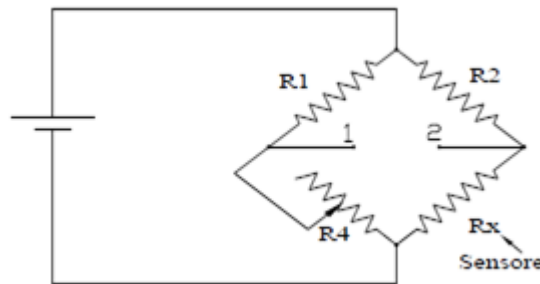


Fig.15

Il sensore viene inserito in un ramo del ponte (fig.15). Secondo tale applicazione il ponte di Wheatstone è bilanciato: tale bilanciamento è realizzato utilizzando la resistenza variabile  $R_4$ . Verificata la correttezza del bilanciamento mediante un galvanometro, si ricava il valore della resistenza  $R_x$  da cui la temperatura  $T_x$ .

La variazione di resistenza viene così indicata:

$$R_x = R_0 + \Delta R = R_0 \left( 1 + \frac{\Delta R}{R_0} \right) = R(1 + \delta)$$

con  $\delta$  che è la variazione relativa di R.

Le tensioni  $V_1$  e  $V_2$  risultano:

$$V_1 = \frac{V}{2} \quad V_2 = V \frac{R(1 + \delta)}{R + R(1 + \delta)}$$

Per calcolare la variazione di resistenza viene misurata la caduta di tensione  $\Delta V = V_{12}$  e risulta:

$$\Delta V = \frac{V}{4} \cdot \frac{\delta}{1 + \frac{\delta}{2}}$$

tale relazione risulta non lineare, ma se consideriamo  $\delta \ll 1$  risulta:

$$\Delta V = \frac{V}{4} \cdot \delta$$

da cui si ricava un parametro importante come la sensibilità del ponte:

$$S = \frac{d\Delta V}{d\delta} = \frac{V}{4}$$

In questo tipo di connessione la lunghezza dei fili che collegano il sensore ( $R_x$ ) al circuito di misura può essere elevata (fig.16) e ciò costituisce una resistenza aggiuntiva. Inoltre possono esservi gradienti termici lungo i fili: il ponte di Wheatstone è sensibile alle variazioni di resistenza che ne conseguono e la misura sarà alterata.

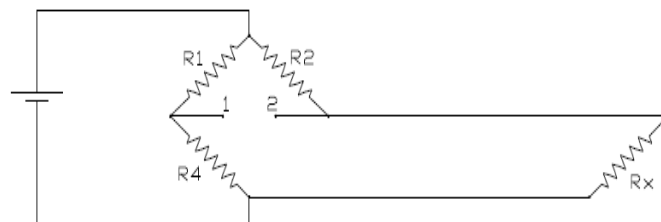


Fig.16

Si avrà:

$$R_x = R_{\text{TRASDUTTORE}} + R_{\text{FILI}}$$

e affinché la misura sia corretta, dovrà risultare:

$$R_{\text{FILI}} \ll R_{\text{TRASDUTTORE}}$$

condizione difficile da realizzare per elevate lunghezze dei fili. Questo problema può essere in parte risolto utilizzando circuiti con connessioni a tre fili.

3.3.2. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A TRE FILI

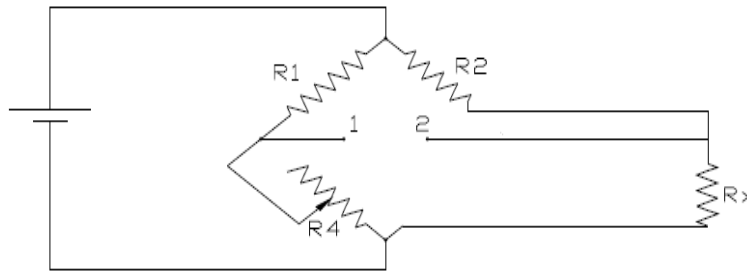


Fig.17

Tale configurazione risulta autocompensata perché la resistenza dei fili di collegamento è connessa a due rami adiacenti del ponte. Sono quindi eliminate sia le variazioni di resistenza dovute alla lunghezza dei fili che quelle dovute ai gradienti termici.

3.3.3. PONTE DI WHEATSTONE CON CIRCUITO A QUATTRO FILI

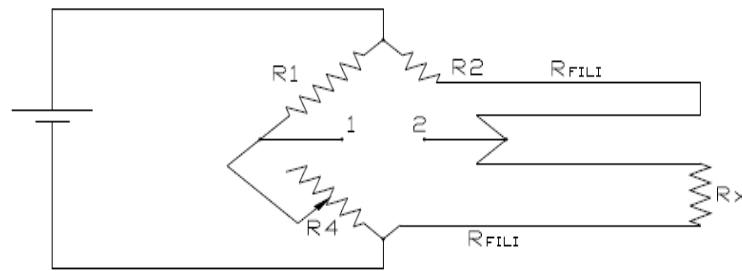


Fig.18

In tale tipo di connessione due fili bilanciano la presenza dei fili di collegamento del trasduttore ma non sono collegati a nessun dispositivo; il loro percorso deve essere lo stesso di quello dei fili di collegamento. Questa soluzione è tuttavia poco usata.

3.3.4. METODO VOLT-AMPEROMETRICO

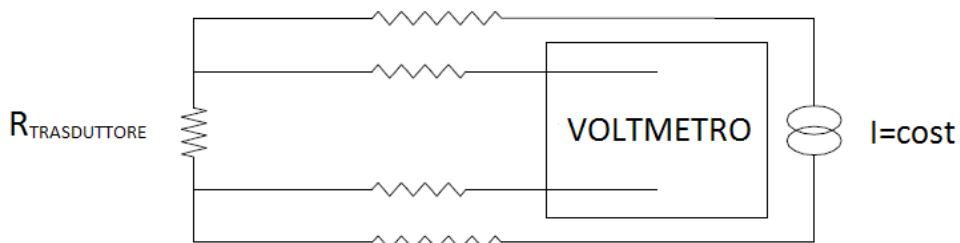


Fig.19

Secondo questo metodo di misura la variazione di resistenza è misurata come caduta di potenziale che si ha nel trasduttore in seguito ad un passaggio di corrente d'intensità nota.

Il circuito di misura è costituito da un generatore di corrente costante, un voltmetro e il trasduttore (fig.19).

Le resistenze dei fili di collegamento non influiscono sulla misura dato che nel circuito di "alimentazione" impongono una corrente mentre nei collegamenti del voltmetro non circola corrente, quindi il voltmetro leggerà una tensione pari a:

$$E_{OUT} = R_{TRASDUTTORE} \times I$$

L'intensità di corrente è nota e costante, e si ricava facilmente  $R_{TRASDUTTORE}$ .

Il legame tensione-resistenza in questo caso è lineare.

### 3.4. RTD E TERMISTORI A CONFRONTO

Quando usare le RTD:

- Quando precisione e stabilità sono l'obiettivo principale dell'applicazione
- Quando va mantenuta la precisione su un ampio intervallo di temperatura
- Quando la misurazione su un'area piuttosto che su un punto migliora il controllo
- Quando è desiderabile un alto livello di standardizzazione

Quando usare i termistori:

- Quando l'applicazione richiede un'alta risoluzione su un intervallo stretto
- Quando il basso costo è una considerazione primaria
- Quando si richiede rilevazione su un punto singolo o miniaturizzazione

#### **RTD**

Vantaggi:

- Lineari su un ampio intervallo operativo
- Ampio intervallo operativo di temperatura
- Intercambiabilità su un ampio intervallo
- Migliore stabilità ad alte temperature

Svantaggi:

- Bassa sensibilità
- Costi maggiori
- Non misura punti singoli
- Influenzata da urti e vibrazioni
- Richiede funzionamento a tre o quattro cavi
- Può essere influenzata dalla resistenza di contatto

#### **Termistori**

Vantaggi:

- Risposta rapida ( $1 \div 10$ s)
- Piccole dimensioni
- L'alta resistenza elimina molti dei problemi legati alla resistenza dei cavi
- Solido, non influenzato da urti o vibrazioni
- Costo inferiore

Svantaggi:

- Non lineare
- Intervallo ristretto per ciascuna unità
- Intercambiabilità limitata, salvo che non si usino elementi accoppiati

**Principali applicazioni**

**RTD:** condizionamento dell'aria e raffreddamento, fornaci, forni e griglie, produzione tessile, lavorazione delle materie plastiche, lavorazioni petrolchimiche, microelettronica, misura di temperatura di aria, gas e liquidi, misura delle temperature dei gas di scarico.

**Termistori:** termometri per febbre e respiratori, fast food, macchine per caffè, termostati, controllo emissione, lavorazione fotografica, dispenser di colla a caldo, attrezzature per laboratori, processi che richiedono un'alta risoluzione su un intervallo ristretto, processi che richiedono miniaturizzazione.



## 4. SENSORI DI TEMPERATURA A SEMICONDUCTORE

### 4.1. FUNZIONAMENTO

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 più semplice realizzazione di un sensore a semiconduttore è ottenuta mediante l'impiego di un diodo (fig.20).

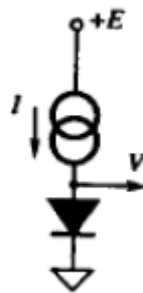


Fig.20

In un diodo polarizzato direttamente la relazione corrente-tensione 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 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 ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C);

$T$  è la temperatura in °K.

Esplicitando la tensione da tale relazione si ottiene:

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

Ricordando che  $I_s$  dipende 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 l'energy gap del materiale;

$C$  è una costante del materiale indipendente dalla temperatura.

Pertanto, quando la giunzione è alimentata a corrente costante, la tensione varia 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 -2mV/°C, ossia la tensione ai suoi capi diminuirà di 2 mV in corrispondenza di un aumento di temperatura di 1°C.

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.21).

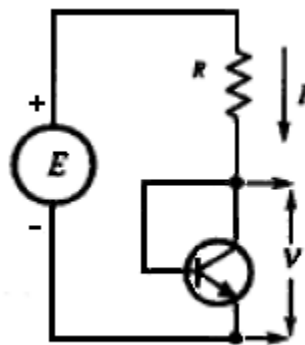


Fig.21

Anche in questo caso, alimentando il transistor con corrente costante, si ottiene una variazione lineare della tensione  $V_{BE}$  con la temperatura.

## 4.2. SOLUZIONI CIRCUITALI

I sensori di temperatura a semiconduttore si possono realizzare collegando tra loro transistor con aree diverse in modo da avere delle correnti di saturazione proporzionali tra loro.

Ci sono moltissime configurazioni possibili, ma si possono dividere in due grandi categorie:

- sensori con uscita in corrente;
- sensori con uscita in tensione;

Questi sensori basano il loro funzionamento dalla seguente relazione che lega la tensione base-emettitore di due transistor  $T_1$  e  $T_2$ :

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

### 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 22A 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:

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

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

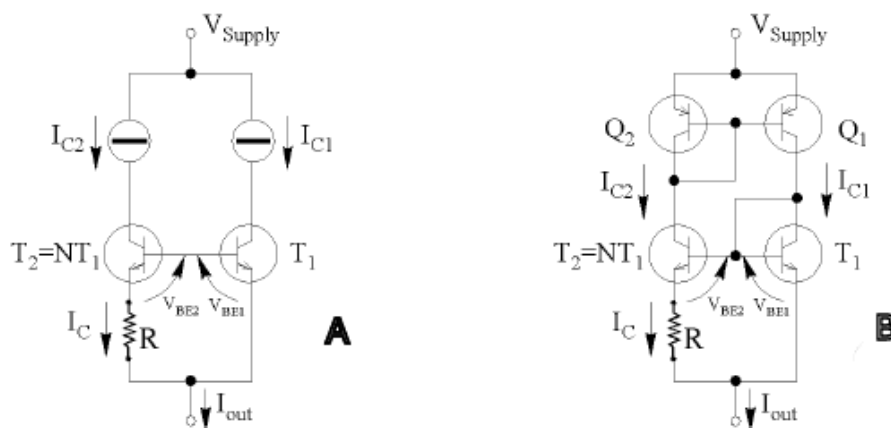


Fig.22

Nella figura 22B è riportato uno schema circuitale più realistico, dove i generatori di correnti di collettore ( $I_{C1}=I_{C2}$ ) sono stati realizzati con un *current mirror*, formato da due transistor identici di tipo PNP  $Q_1$  e  $Q_2$ .

Il transistor  $Q_2$  ha la base direttamente connessa al collettore e quindi si comporta come un semplice diodo (giunzione emettitore-base direttamente polarizzata).

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

D'altra parte entrambi i transistor  $Q_1$  e  $Q_2$  hanno la stessa tensione base-emettitore e dunque, se  $Q_1$  lavora in zona lineare, deve avere la stessa corrente di collettore di  $Q_2$  (effetto 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 transistor  $T_1$  e  $T_2$  identici ( $I_{Sat1}=I_{Sat2}$ ), 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 23, si ha:

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

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

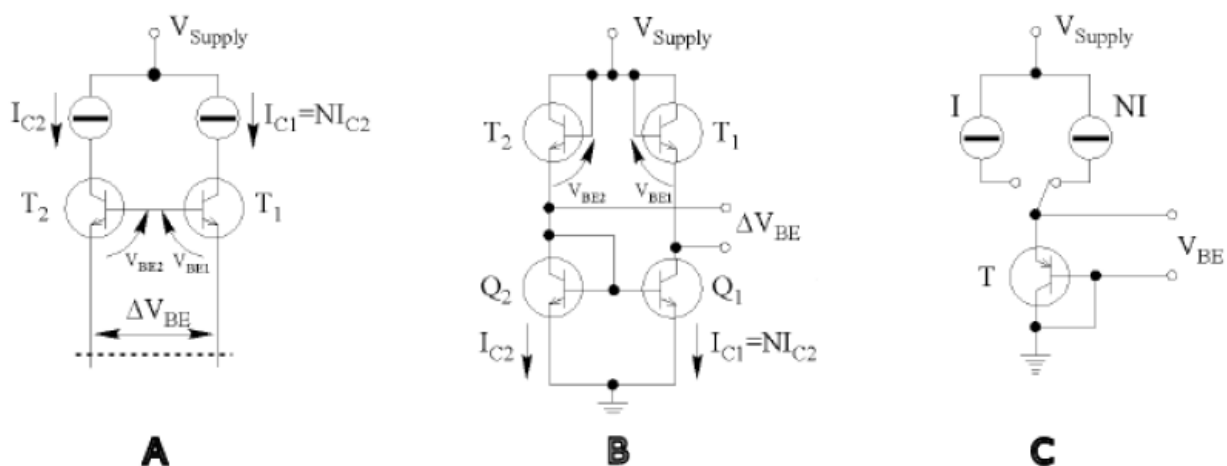


Fig.23

Uno schema circuitale più realistico è riportato nella figura 23B in cui la generazione delle correnti con rapporto costante ( $I_{C1}=N \cdot I_{C2}$ ) è affidata ai due transistor  $Q_1$  e  $Q_2$ .

In particolare, questi hanno la stessa tensione base-emettitore e quindi basterebbe che il transistor  $Q_1$  fosse costituito dal parallelo di  $N$  transistor uguali a  $Q_2$  per avere la corrente di collettore del transistor  $Q_1$   $I_{C1}$  uguale a  $N$  volte la corrente  $I_{C2}$  del transistor  $Q_2$ .

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

La temperatura da misurare è applicata alla coppia dei due transistor identici  $T_1$  e  $T_2$ , mentre la tensione d'interesse  $\Delta V_{BE}$  viene prelevata con un opportuno amplificatore.

Alcuni sensori con uscita in tensione, per superare le inevitabili differenze costruttive e di comportamento fra i due transistor  $T_1$  e  $T_2$  (che dovrebbero essere identici), impiegano un solo transistor  $T$  che viene fatto attraversare dapprima da una corrente  $I$  e successivamente da una corrente  $N \cdot I$ , con una certa frequenza di commutazione (figura 23C).

Il risultato è equivalente: tuttavia la tensione  $V_{BE}$  rilevata in uscita deve essere filtrata in modo da ottenere solo le variazioni di  $\Delta V_{BE}$  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).

### 4.3. 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 agli altri sensori esaminati: in particolare, il costruttore può prevedere sul chip tutti i circuiti di condizionamento richiesti, tra i quali la preliminare amplificazione del segnale, rendendo questi amplificatori molto semplici da usare.

Come si è visto in precedenza si possono realizzare trasduttori estremamente lineari con uscita in corrente o tensione in funzione alla temperatura a cui sono posti.

Prendiamo in considerazione due dei più comuni e usati trasduttori di temperatura integrati: AD590 della Analog Devices (sensore con uscita in corrente) e LM35 della National Semiconductor (sensore con uscita in tensione).

#### AD590

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

$$I = K \cdot T$$

dove  $K = 1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$ .

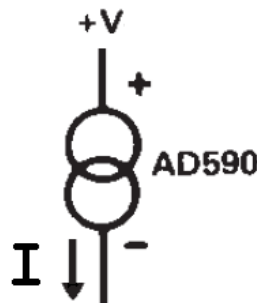


Fig.24

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

La costante di tempo del dispositivo in aria ferma (convezione naturale) è di circa un minuto e si riduce a  $1.4\text{ s}$  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 buona immunità ai rumori.

**LM35**

Questo sensore presenta 3 terminali: l'alimentazione +V<sub>s</sub>, il riferimento di massa GND e la tensione d'uscita proporzionale alla temperatura.

La legge che lega la tensione V<sub>out</sub> e la temperatura è:

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

Dove k=10mV/°C ed è la sensibilità del sensore.

Nella sua configurazione di base (figura 25) il sensore viene essere alimentato con una tensione continua tra 4 V e 20 V e può misurare correttamente la temperatura nel range da 2 °C a 150 °C.

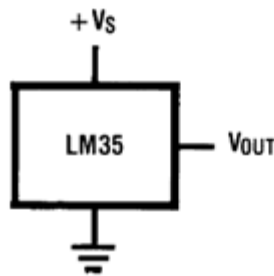


Fig.25

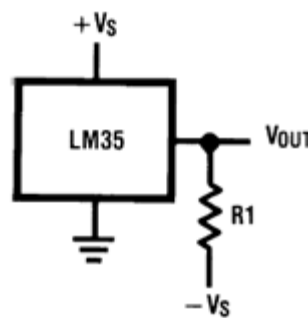


Fig.26

Nella configurazione "Full-Range" (figura 26) il sensore, alimentato con una tensione compresa tra 4 V e 30 V, può misurare una temperatura compresa tra -55 °C e 150 °C. Scelta R<sub>1</sub> = -V<sub>s</sub>/50µA, la tensione d'uscita risulterà:

<b>V<sub>out</sub></b> = +1.500mV	a	+150°C
+250mV	a	+25°C
-550mV	a	-55°C

Questo componente non ha bisogno di calibrazioni esterne e tipicamente ha una precisione di ¼ °C intorno alla temperatura ambiente (25°C) e di ¾ °C nel range di temperatura tra -55°C e 150°C.





## 5. TERMOCOPPIE

### 5.1. FUNZIONAMENTO

La prima osservazione (nel 1821) dell'effetto su cui si basa la realizzazione delle termocoppie è dovuta a Thomas Johann Seebeck (Tallin 1770 – Berlino 1831). Si considerino due conduttori realizzati con metalli (o leghe metalliche) diversi, indicati genericamente con A e B e si supponga di realizzare un circuito chiuso utilizzando questi materiali, come indicato in figura 27. Si vengono così a formare due giunzioni  $J_1$  e  $J_2$ . Si verifica sperimentalmente che, se queste due giunzioni sono portate a due temperature diverse  $T_1$  e  $T_2$ , nel circuito chiuso si manifesta una circolazione di corrente. La corrente diventa nulla se si rendono uguali le due temperature.

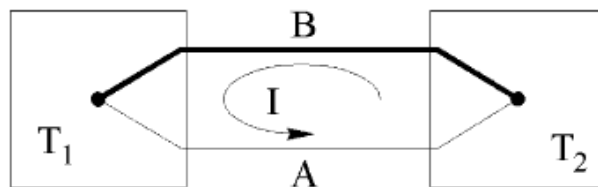


Fig.27

La circolazione di tale corrente è dovuta al generarsi di una forza elettromotrice  $E_{AB}$ , che è funzione sia della natura dei materiali A e B, sia della differenza di temperatura  $\Delta T = T_1 - T_2$  e può essere espressa in modo funzionale nella forma:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = f(A, B, \Delta T)$$

È possibile definire una sensibilità alle variazioni come:

$$S_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT}$$

Dove  $S_{AB}$  è detto coefficiente di Seebeck ed è espresso in V/K o più comunemente, data l'entità delle grandezze in gioco, in  $\mu V/K$ .

Questo coefficiente è dato dalla differenza tra i coefficienti di Seebeck dei due materiali, cioè:  $S_{AB} = S_A - S_B$ . Per un singolo materiale, il coefficiente di Seebeck è a sua volta definito come la differenza di potenziale tra due punti di un conduttore, tra i quali esista una differenza di temperatura uniforme di 1K. Va tenuto presente che il coefficiente di Seebeck, per intervalli di temperatura estesi, non è costante, ma dipende dalla temperatura stessa in modo fortemente non lineare.

Si considerino nuovamente due barrette, dei materiali A e B rispettivamente, le cui estremità siano mantenute a temperature differenti  $T_1$  e  $T_2$ . Si supponga di unire le due barrette a una sola estremità, formando la giunzione  $J_1$  a temperatura  $T_1$ , come indicato in figura 28. In questo caso il sistema è interessato da un flusso di calore, ma dal punto di vista elettrico il circuito è aperto.

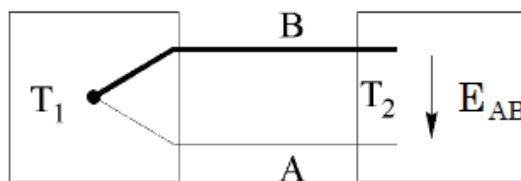


Fig.28

Poiché, per effetto della diffusione, la concentrazione degli elettroni non è omogenea lungo il conduttore, all'interno di questi si crea un campo elettrico  $e$ , di conseguenza, ai loro capi si sviluppa una differenza di potenziale (effetto Thomson).

Entrambi i materiali sono sottoposti allo stesso gradiente termico, ma le differenze di potenziale che si vengono a creare sono diverse (a causa della differente concentrazione di elettroni liberi  $e$ , di conseguenza, della diversa diffusione nei due materiali). La differenza di potenziale tra le due estremità libere è uguale alla f.e.m.  $E_{AB}$  che dà luogo alla circolazione di corrente nell'effetto Seebeck: questa struttura prende il nome di termocoppia.

Si noti che se le due barrette sono realizzate con lo stesso materiale, anche in presenza di un gradiente termico non si rileva alcuna d.d.p. poiché gli effetti nelle due barrette si compensano.

Oltre all'effetto Seebeck, fenomeno principale nello studio delle termocoppie, ci sono altri due effetti di minor importanza, ma sempre relativi al fenomeno della termoelettricità, come l'effetto Peltier e l'effetto Thomson, precedentemente citato.

L'effetto Peltier descrive l'assorbimento o la cessione di calore che avviene in un giunto di materiali diversi, mentre l'effetto Thomson descrive sempre uno scambio di calore, ma che avviene quando un conduttore, lungo il quale c'è un gradiente di temperatura, è percorso da corrente.

Entrambi questi effetti, nei materiali usati nella costruzione delle termocoppie, sono sufficientemente piccoli da poter essere trascurati.

## 5.2. MATERIALI E TIPI DI TERMOCOPPIE

In generale, un buon materiale termoelettrico deve avere un'elevata conducibilità elettrica e una bassa conducibilità termica.

Come osservato in precedenza, il valore della f.e.m. termoelettrica generata è funzione sia dal tipo dei due materiali A e B, sia dalla differenza di temperatura tra il punto dove si hanno la giunzione  $J_1$  e le estremità delle due barrette opposte a essa, supposte entrambe alla stessa temperatura, fra cui si rileva  $E_{AB}$ .

Per caratterizzare il fenomeno della termoelettricità si dovrebbero quindi fornire delle tabelle o grafici nei quali siano riportati, in funzione della temperatura, i valori delle f.e.m. generate da ogni possibile combinazione di materiali. Un modo più semplice ed efficace consiste nel definire un ordinamento dei materiali termoelettrici.

Con riferimento alla figura 28, si supponga di misurare il valore della f.e.m.  $E_{AB}$ . Il segno della f.e.m. dipende dalla natura dei materiali usati: se  $E_{AB}$  è positiva si dice che il materiale A è positivo rispetto al materiale B. La possibilità di ordinare i materiali termoelettrici in funzione del segno della f.e.m. generata, ottenendo così una tabella nella quale ogni materiale è positivo rispetto a quelli che lo seguono e negativo rispetto a quelli che lo precedono, è data dalla proprietà dell'elemento intermedio.

Questa proprietà afferma che in un circuito elettrico composto da un numero qualsiasi di materiali diversi, la f.e.m. complessiva è nulla se tutto il circuito si trova alla stessa temperatura. Conseguenza di ciò è che, se sono note le f.e.m. generate dalla giunzione di uno dei due materiali A o B con un materiale di riferimento C, indicate rispettivamente con  $E_{AC}$  ed  $E_{CB}$ , la f.e.m. generata dalla giunzione tra A e B è la somma algebrica delle f.e.m. riferite al materiale C, secondo la relazione:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AC}(T_1, T_2) + E_{CB}(T_1, T_2)$$

Da un punto di vista concettuale, questa relazione corrisponde a scomporre la termocoppia di figura 28 in due termocoppie in serie, dove in ognuna delle quali un lato è formato dal materiale di riferimento, come schematizzato in figura 29.

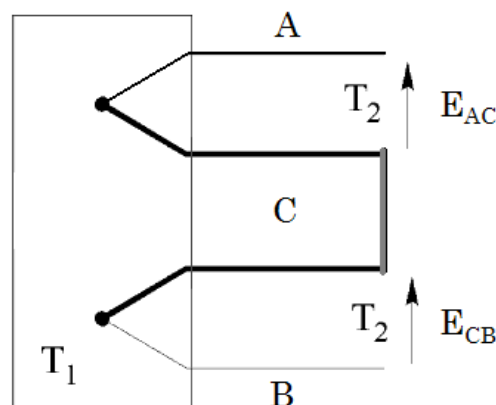


Fig.29

Per convenzione internazionale il materiale di riferimento è il platino e il valore della f.e.m. generata dalla giunzione del platino con un altro materiale, quando all'estremità di misura la temperatura è 0°C, è fornito in forma grafica o tabellare.

Un esempio dell'ordinamento di alcuni materiali usati nelle termocoppie (sia metalli sia leghe) è riportato nella tabella seguente.

<b>Materiale</b>	<b>Composizione</b>
Antimonio	-
Chromel	90% Ni, 10% Cr
Ferro	-
Rame	-
Argento	-
Pt-ρ	platino-rodio (varie percentuali)
Platino	-
Cobalto	-
Alumel	94%Ni, 3%Mn, 2%Al, 1%Si
Nichel	-
Costantana	60%Cu, 40%Ni
Bismuto	-

Nella scelta dei materiali per la realizzazione delle termocoppie è ovviamente conveniente usare dei materiali quanto più discosti nella tabella precedente in modo che, a parità di salto termico, si abbia un valore di f.e.m. più elevato. Esistono altre esigenze da soddisfare, come il campo di temperatura impiegato, il costo e l'ambito applicativo.

Le termocoppie di uso corrente sono convenzionalmente individuate da una lettera, secondo una designazione definita dalla *Instrumentation, Systems and Automation Society* (ISA) e riconosciuta dagli standard di riferimento.

Di seguito sono riportati i diversi tipi di termocoppie e le loro caratteristiche.

#### *Termocoppie tipo S – Platino / Platino rodato (10% Rh)*

È la termocoppia utilizzata in passato per definire la IPTS'68 da 630,74°C a 1064,43°C.

Essa, come tutte le termocoppie costituite da metalli nobili, presenta un'elevata precisione specie nel campo sopra i 500°C, inoltre sotto tale temperatura fino a 0°C garantisce un'incertezza inferiore a  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Ne è comunque sconsigliato l'uso per valori non elevati della temperatura a causa del basso valore del potere termoelettrico. Questa termocoppia viene usata in atmosfera inerte o ossidante per la sua forte inerzia chimica e per la sua elevata stabilità alle alte temperature.

Per contro teme molto le atmosfere riducenti e quelle con presenza di vapori metallici (vapori di ferro), che comportano un cambiamento delle caratteristiche del Platino. La scarsa resistenza alle temperature elevate in atmosfere riducenti è comunque una caratteristica comune a tutti i materiali per termocoppie; è possibile però ovviare a tale inconveniente usando opportune guaine di protezione realizzate di solito con un doppio strato di porcellana internamente e metallo esternamente. La presenza di dette guaine in sensori per applicazioni industriali provoca, per l'inerzia termica da esse introdotta, un peggioramento delle loro caratteristiche dinamiche. Ultimo svantaggio comune anch'esso a tutte le termocoppie costituite di metalli nobili è l'elevato costo dei fili costituenti la coppia.

#### *Termocoppia tipo R – Platino / Platino rodiato (13% Rh)*

Presenta le stesse caratteristiche della tipo S da cui è derivata dopo l'adozione della IPTS '68 per adeguare le risposte dei vecchi strumenti di lettura non adatti all'uso dei fili di platino molto puro immessi sul mercato negli anni '60. E' quindi una termocoppia destinata ad andare in disuso.

#### *Termocoppie Tipo B - Platino Rodiato 30% / Platino Rodiato 6%*

E' molto adatta a lavorare a temperature elevate dell'ordine dei 1700°C. Presenta le stesse caratteristiche dei tipi R ed S ed è inoltre adatta a lavorare anche sotto vuoto.

#### *Termocoppia tipo T - Rame / Costantana*

E' una termocoppia molto usata nel campo - 184÷370°C, dove può essere adoperata anche in alternativa alle termocoppie a base Platino in quanto garantisce incertezze dello stesso ordine di grandezza  $\pm 1^\circ\text{C}$ . E' molto usata per il suo basso costo e per il suo elevato potere termoelettrico e per questo è l'unica termocoppia per la quale nelle norme vengono garantiti valori al di sotto di 0°C. La limitazione superiore del campo di applicazione è dovuta alla rapida ossidazione del rame alle elevate temperature.

#### *Termocoppie tipo J – Ferro / Costantana*

E' la termocoppia più diffusa nelle applicazioni industriali nel campo 0÷750°C, per la sua elevata capacità di adattarsi ad atmosfere sia riducenti che ossidanti, per il suo elevato potere termoelettrico e ovviamente per il suo basso costo. E' meno precisa della termocoppia tipo T per il fatto che il ferro è di solito ottenuto con un grado di omogeneità minore del rame e questo fa nascere nell'interno del filo f.e.m. parassite dovute a gradienti di temperatura che come già detto inficiano la precisione di misura. Si noti che i fili di costantana per le due termocoppie T e J sono di solito diversi e quindi non sono intercambiabili tra loro.

#### *Termocoppia tipo K - Chromel (90% Ni, 10% Cr) / Alumel (94%Ni, 3%Mn, 2%Al, 1%Si)*

E' una termocoppia nata per sostituire le termocoppie a metallo nobile alle elevate temperature, infatti può essere utilizzata fino a 1260°C con un'incertezza di  $\pm 2^\circ\text{C}$  in atmosfere inerti o ossidanti. Presenta però problemi di riproducibilità e di stabilità;

recentemente né é stata proposta, infatti, la sostituzione con la tipo N (non ancora normalizzata). Il campo tipico di applicazione é in tutte le applicazioni elettroniche. E' una termocoppia che, ultima nata, va rapidamente affermandosi per il suo elevato potere termoelettrico. Usata nel campo 0-870°C con precisione  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  ha le stesse limitazioni della coppia tipo T.

E' utile infine sottolineare che oltre alle citate termocoppie normalizzate è possibile trovare sul mercato anche tipi differenti come ad esempio la termocoppia tipo N (Nicrosil/Nisil) riconosciuta in ambito IEC, la termocoppia di tipo E (chromel/costantana) che genera il valore di f.e.m. più alto tra tutti i tipi di termocoppia nel proprio campo di funzionamento (-200 ÷ 900 °C), le termocoppie W3 (Tungsteno Renio 3% / Tungsteno Renio 25%) e W5 (Tungsteno Renio 5% / Tungsteno Renio 26%), la coppia Cobalto-Oro/Rame usata per temperature molto basse o la termocoppia Tungsteno/Molibdeno usata per le temperature elevatissime.

Di queste termocoppie non sempre esistono tabelle del potere termoelettrico in funzione della temperatura ed è quindi necessario tararle di volta in volta.

### 5.3. TECNOLOGIE COSTRUTTIVE

La termocoppia "nuda" su descritta difficilmente viene utilizzata senza un adeguato rivestimento di protezione. Inoltre la varietà dei problemi di misura ha portato nel tempo ad una molteplicità di soluzioni costruttive delle termocoppie.

Una termocoppia é, infatti, caratterizzata oltre che dal tipo di coppia termoelettrica, dalle dimensioni dei termoelementi, dal tipo d'isolamento dei termoelementi (elettrico, chimico e meccanico) e infine dal tipo di giunto di misura (tipo di saldatura e isolamento elettrico del giunto).

I termoelementi, cioè i singoli conduttori, si presentano solitamente in forma di fili di diametro standard (0,3-0,5-0,8-1,6-2,3-3,2 mm) avvolti su rocchetti o matasse secondo il diametro. Per contenere le tolleranze in quelle indicate dalle norme, é necessario accoppiare i fili secondo la fornitura del produttore.

A parte le differenti dimensioni dei fili, che come già accennato influiscono sulla maggiore o minore resistenza e durata della termocoppia, una notevole importanza riveste il tipo d'isolamento e di protezione della termocoppia. Da tali caratteristiche dipende, infatti, l'applicabilità della termocoppia in ambienti chimicamente non inerti, specie ad elevate temperature.

La termocoppia viene generalmente rivestita di una guaina flessibile o di un materiale ceramico resistente ad elevate temperature. Questo rivestimento serve sia per garantire un adeguato isolamento elettrico dei fili tra loro e con l'ambiente circostante sia per proteggere i termoelementi dall'attacco chimico. Sotto i 1000°C la resistenza d'isolamento dovrebbe essere superiore a 1M $\Omega$ , mentre per temperature superiori possono essere tollerate resistenze dell'ordine di 1/10 di M $\Omega$ .

Per basse e medie temperature (inferiori ai 300÷400°C) vengono generalmente impiegate guaine isolanti flessibili a base di teflon, cloruro di polivinile, nylon, ecc. (vedi tabella di figura 30), mentre per elevate temperature sono disponibili isolanti flessibili a base di fibre ceramiche, fibre di vetro, fibre di silice e amianto, oppure isolanti a base di polveri di ossidi refrattari compattati (ossidi di alluminio, berillio, magnesio).

Materiale	T [°C]	Resistenz a Abrasion	Solventi	Acidi	Basi	Fiamma	Umidità
Clor di polivinile	-40÷104	buona	discreta	buona	buona	buona	buona
Nylon	-53÷149	ottima	buona	scarsa	buona	scarsa	buona
Kapton	-268÷316	ottima	buona	buona	buona	buona	ottima
Teflon (PFA)	-268÷260	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima
Teflon (FEP)	-268÷204	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima
Gomma silicone	-78÷200	discreta	discreta	scarsa	buona	scarsa	buona
Amianto	-78÷538	buona	ottima	ottima	ottima	ottima	scarsa
Fibra di Vetro	-78÷482	scarsa	ottima	ottima	ottima	ottima	discreta
Refrasil	-78÷871	scarsa	ottima	buona	buona	ottima	scarsa
Nextel	-18÷1427	discreta	ottima	buona	buona	ottima	discreta
MgO	<1650	scarsa	discreta	scarsa	buona	ottima	buona
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1540	scarsa	buona	ottima	buona	ottima	buona
BeO	<2315	scarsa	buona	buona	ottima	ottima	buona

Fig.30

Oltre al materiale isolante si usa un pozzetto termometrico (Fig.31) in acciaio inox, inonel, molibdeno, tantalio o lega di platino per proteggere ulteriormente la termocoppia e l'isolante da agenti meccanici (elevata pressione) e chimico-fisici.

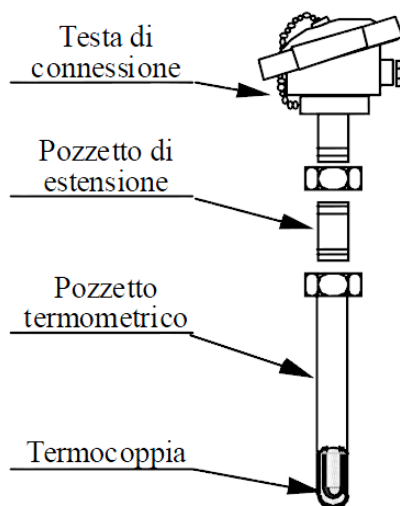


Fig.31

Anche l'isolamento elettrico del giunto di misura riveste una notevole importanza. I principali tipi di giunzioni sono (Fig.32):

- a) a giunto esposto;
- b) a giunto a massa;
- c) a giunto isolato.



Un giunto esposto risulta economico e comporta un tempo di risposta estremamente ridotto. Lo svantaggio principale consiste nel rapido deterioramento se esposto ad agenti corrosivi e nella necessità di un ingresso di f.e.m. differenziale.

Un giunto a massa é realizzato saldando direttamente il giunto caldo della termocoppia sul pozzetto termometrico, pertanto pur essendo, come il giunto esposto, soggetto a loop contro terra, presenta il vantaggio di essere parzialmente protetto da agenti esterni.

Un giunto isolato, infine, é costruito in modo tale da essere completamente isolato dal pozzetto termometrico. Ciò limita fortemente l'insorgere di loop contro terra e l'influenza di f.e.m. parassite, inoltre aumenta la reiezione al rumore del sensore. Per contro aumenta il costo della termocoppia e il suo tempo di risposta.

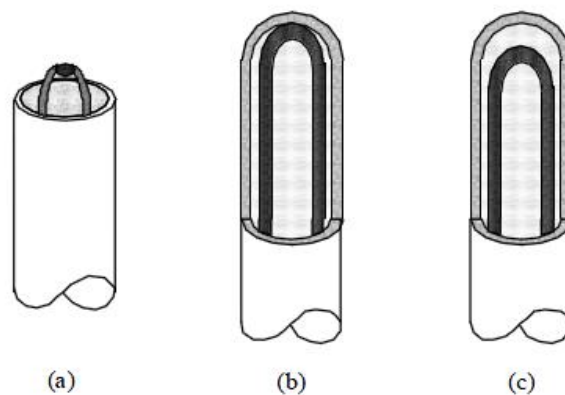


Fig.32

## 5.4. MISURAZIONE DELLA TENSIONE D'USCITA

Per misurare la tensione prodotta da una termocoppia, faremo uso di un voltmetro ad alta impedenza, come rappresentato nello schema della Fig.33A. Nella figura osserviamo che la termocoppia (A-B) ha una giunzione  $J_x$  (chiamata **giunzione calda**) alla temperatura incognita  $T_x$  mentre l'altra giunzione  $J_{ref}$  (chiamata **giunzione fredda o di riferimento**) si trova alla temperatura di riferimento  $T_{ref}$ . La tensione ai terminali della termocoppia sarà dunque:  $e = S_{AB}(T_x - T_{ref})$  e la misureremo portando i terminali del metallo A sulle bocche d'ingresso (Hi e Lo) del voltmetro. Poiché, le bocche e i circuiti interni dello strumento sono realizzati in rame, si formeranno in ingresso allo strumento due nuove giunzioni  $J_{Hi}$  e  $J_{Lo}$ , di tipo Cu-A, necessarie ma indesiderate, che potrebbero introdurre tensioni spurie.

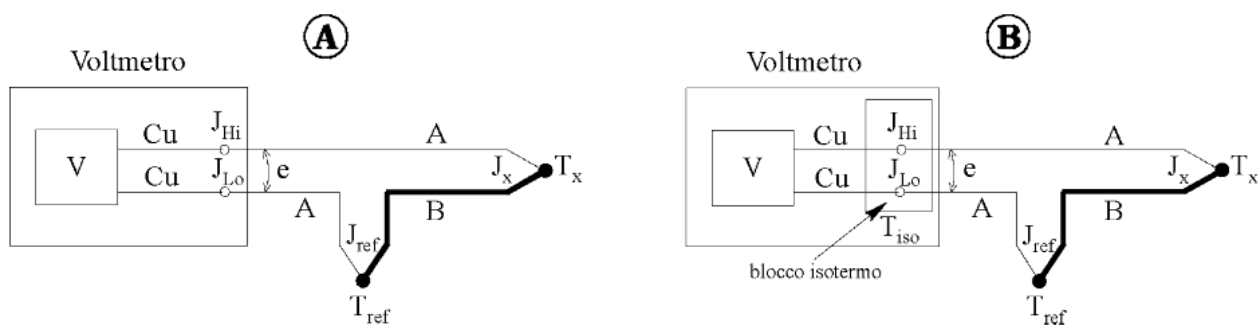


Fig.33

Con riferimento a quest'aspetto, vale la seguente regola empirica denominata come: *Legge dei metalli intermedi* (precedentemente citata).

Inserendo nel circuito della termocoppia (A-B) un terzo metallo (il rame Cu, nel circuito di Fig.33A), se le due nuove giunzioni (Cu-A) si trovano entrambe alla stessa temperatura, allora la tensione totale e della termocoppia rimane invariata, essendo i due contributi in tensione uguali e opposti. Tale proprietà consente di inserire il voltmetro nel circuito della termocoppia, senza modificarne le condizioni.

Uno schema che traduce in pratica quanto detto può essere visto in Fig.33B, dove è stato realizzato il blocco isoterma che racchiude le due giunzioni ( $J_{Hi}$  e  $J_{Lo}$ ) alla temperatura  $T_{iso}$ .

Ne consegue che, se la giunzione  $J_{ref}$  viene portata nel blocco isoterma alla temperatura  $T_{iso}$  (Fig.34A), la temperatura incognita  $T_x$  risulta riferita alla temperatura  $T_{iso} = T_a = T_{ref}$ .

Ci troviamo dunque nella situazione in cui sia la giunzione  $J_{Lo}$ (Cu-A) sia la giunzione  $J_{ref}$ (A-B) si trovano alla stessa temperatura e, in queste condizioni, il loro contributo complessivo in tensione (per estensione della legge empirica dei metalli intermedi) risulta pari a quello della giunzione (Cu-B) alla temperatura  $T_{iso} = T_a$ .

Ne consegue che i circuiti di figura 34 sono equivalenti.

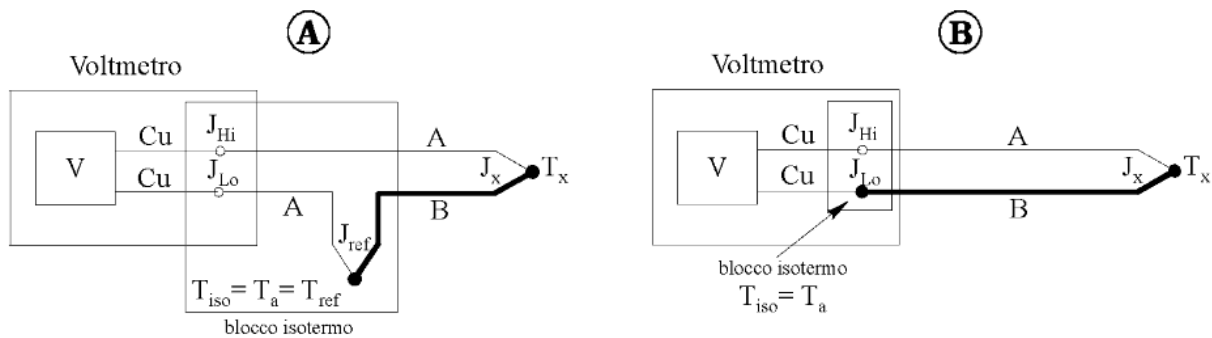


Fig.34

Utilizzando questi schemi di misura viene fornita un'indicazione della temperatura incognita  $T_x$  riferita alla temperatura  $T_{ref}$ . Se volessimo delle misure rispetto allo zero ( $0^\circ\text{C}$ ) si dovrebbe immergere la giunzione  $J_{ref}$  (Fig.33) o le due giunzioni  $J_{Hi}$  e  $J_{Lo}$  (Fig.34B) in un recipiente contenente il ghiaccio fondente. Chiaramente questo non è pratico e quindi si adottano delle tecniche di compensazione del giunto freddo.

Queste tecniche si basano su una legge empirica denominata *Legge delle temperature intermedie*:

si consideri una termocoppia (A-B), che sviluppa la tensione  $e_{12}$  quando le giunzioni si trovano alle temperature  $T_1$  e  $T_2$  mentre sviluppa la tensione  $e_{23}$  quando le giunzioni si trovano alle temperature  $T_2$  e  $T_3$ . Allora, quando le due giunzioni si trovano alle temperature  $T_1$  e  $T_3$  la tensione misurata risulta  $e_{13} = e_{12} + e_{23}$ .

A rigore, tale regola vale solo se, nel campo delle variazioni d'interesse per le temperature, si può ritenere costante il coefficiente di Seebeck  $S_{AB}$ .

In tale ipotesi, risulta allora possibile fare misure di temperatura riferite allo zero, anche se la giunzione fredda si trova alla temperatura ambiente  $T_a$ .

La compensazione può essere realizzata sia con tecniche hardware sia software.

### Compensazione Hardware

Uno dei più comuni circuiti per la compensazione hardware della giunzione fredda è uno schema a ponte (fig.35) costituito da una tensione di alimentazione  $E$ , tre resistenze di ugual valore  $R$  e da una resistenza di compensazione  $R_t$  che varia con la temperatura del blocco isoterma  $T_{iso}=T_a$ .

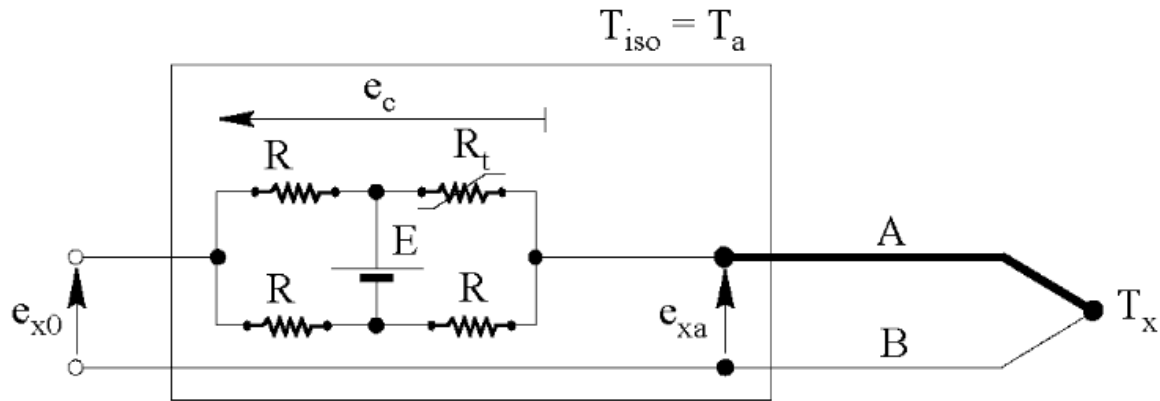


Fig.35

La termocoppia (A-B) genera una tensione  $e_{xa}$  relativa alla temperatura  $T_x$  riferita alla temperatura  $T_a$  e risulta:

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

Il ponte introduce la tensione  $e_c$  legata al valore della resistenza di compensazione  $R_t$ . Regoliamo il valore di resistenza in modo da avere la tensione  $e_c$  pari a:

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

In questo modo la tensione da misurare  $e_{x0}$  sarà:

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

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

La tensione  $e_{x0}$  corrisponde alla temperatura  $T_x$  riferita allo zero ( $0^\circ\text{C}$ ).

Al variare della temperatura  $T_a$  basta variare il valore di  $R_t$  o più semplicemente si colloca al posto della resistenza  $R_t$  un sensore di temperatura, un termistore o un sensore integrato, in modo che il circuito provvede automaticamente a compensare tale variazione.

Va ricordato che circuito per la compensazione va adattato per ciascuno dei vari tipi di termocoppie.

### Compensazione Software

Questo tipo di compensazione sfrutta le potenzialità di calcolo dei PC e l'acquisizione dati tramite sistemi automatici e risulta più semplice e flessibile, poiché si adatta a tutti i tipi di termocoppie e consente di tener conto delle non linearità del loro comportamento.

Infatti, la relazione tra temperatura e f.e.m. generata può essere descritta tramite opportuni sviluppi polinomiali del tipo:

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

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

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

Il circuito di misura per la compensazione software (Fig.36) prevede l'uso di un altro sensore che generi una tensione  $V_{Rt}$  relativa alla tensione  $T_a = T_{iso}$  riferita allo  $0^\circ\text{C}$ . A tale scopo è possibile usare una termoresistenza o un termistore opportunamente alimentati o direttamente un sensore di temperatura integrato con uscita in tensione. Una volta acquisita questa tensione e quindi la temperatura del blocco isoteramico  $T_{iso}$ , il software calcola la tensione  $e_{iso}$  che avrebbe la termocoppia alla temperatura  $T_{iso} = T_a$ .

Una volta acquisita la tensione  $e_{xa}$  e valutata la tensione  $e_{iso}$ , si ricava la tensione totale della termocoppia  $e_{x0}$  riferita alla temperatura  $0^\circ\text{C}$  che risulta:

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

Da tale tensione si può ottenere la temperatura incognita  $T_x$  tramite il loro legame funzionale e risulterà più precisa quanto più alto è il grado del polinomio utilizzato.

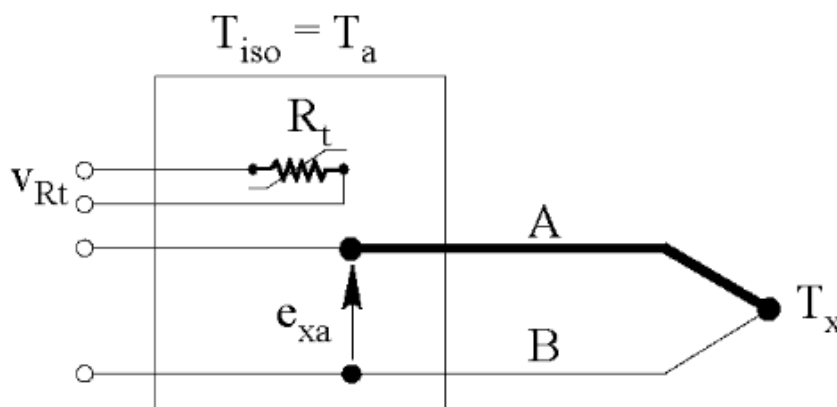


Fig.36

I metodi di compensazione software sono molto usati quando si utilizzano diversi tipi di termocoppie per effettuare molte misure. In questi casi le termocoppie

vengono collegate a una morsettiera isoterma e, tramite un multiplexer, vengono applicate in successione al voltmetro o a un qualsiasi sistema di acquisizione dati.

In generale le termocoppie sono corredate da apposite tabelle, fornite dai costruttori, in cui riportano i rilievi sperimentali della tensione d'uscita (in mV) al variare del giunto caldo (in °C), avendo posto alla temperatura di 0°C quello freddo. Queste tabelle corrispondono alla rappresentazione polinomiale del loro comportamento e risultano utili se non si hanno a disposizione sistemi di acquisizione dati con PC.

## 6.CONCLUSIONI

Nelle tabelle sottostanti sono riassunti i pro e contro dei tipi di sensori di temperatura descritti e le principali applicazioni.

	Termoresistenza RTD	Termistore	Sensore Integrato	Termocoppia
Pro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• molto stabile</li> <li>• molto accurato</li> <li>• abbastanza lineare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• veloce</li> <li>• molto sensibile</li> <li>• collegamento a 2 fili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• accurato</li> <li>• economico</li> <li>• lineare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• economico</li> <li>• range esteso</li> <li>• ampia scelta</li> <li>• robusta</li> </ul>
Contro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lento</li> <li>• poco sensibile</li> <li>• costoso</li> <li>• collegamento a 4 fili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non lineare</li> <li>• range limitato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• range limitato</li> <li>• scelta limitata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non lineare</li> <li>• misure relative</li> <li>• misure difficili</li> </ul>

Sensore	Applicazione
Termoresistenza RTD	Processi fotochimici, monitoraggio temperatura sostanze alimentari
Termistore	Sistemi di riscaldamento, elettronica industriale e di consumo, telecomunicazioni
Sensore Integrato	Celle frigorifere, compensazione di temperatura in dispositivi di qualità, sistemi di monitoraggio delle CPU
Termocoppia	Forni ad induzione, forni per uso alimentare





# BIBLIOGRAFIA

Dispense e datasheet di riferimento:

- “Dispense di misure per l’automazione e la produzione industriale, Seconda Parte”, L. Benetazzo, C. Narduzzi, G. Giorgi, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2008;
- “Misure di temperatura”, Complementi di misure, Nicola Locci, 2005;
- “Dispense di fondamenti di metrologia meccanica: Le termocoppie”, Paolo Vigo, 2005;
- Digi-Key Catalog IT091 Pages 2445-2446, Digi-Key Catalog Department, 2009;
- “Speciale Termistori”, Distar Focus, Epcos, November 2006;
- “RTD e Termistori”, pag 109-115, Watlow, 2005;
- “Termometri a resistenza e termocoppia”, Rosemount, Emerson Process Management, 2001;
- “Platinum RTDs Temperature Sensors Resistance”, pag136-137, Honeywell, 2004;
- Datasheet “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”, National Semiconductor, November 2000.

Testi di riferimento:

- “Manual on The use of Thermocouples in Temperature Measurement” by ASTM, Ed. ASTM;
- “Termodinamica applicata” by A. Cavallini, L. Mattarolo, Ed. CLEUP;
- “Principles and application of electrical engineering” by G. Rizzoni, Ed. Irwin;
- “Physical metallurgy principles” by Robert E. Reed-Hill, Reza Abbaschian, Ed. PWS;
- “Enciclopedia delle lavorazioni meccaniche” by G. Spur, T. Stoferle, Ed. Tecniche Nuove;
- “Elements of materials science and engineering” by L. Van Vlack, Ed. Addison-Wesley.

Siti di riferimento:

- <http://www.temperatures.com>, sito ufficialmente riconosciuto nel campo delle misure di temperatura;
- <http://www.termotech.com/>, per la parte relative agli ambienti di utilizzo e alle normative;
- [http://www.tempro.com/Sensors/metal\\_sheathed\\_MITC.htm](http://www.tempro.com/Sensors/metal_sheathed_MITC.htm), per alcuni riferimenti relativi alle normative internazionali;
- <http://www.goodfellow.com/>, per quanto riguarda le proprietà delle leghe che costituiscono le termocoppie.