

2 Sensori e trasduttori

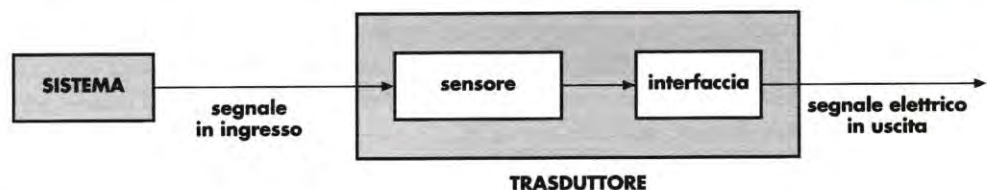
Dalla Norma UNI 4546 ricaviamo le seguenti definizioni:

Trasduttore: un mezzo tecnico che compie su un segnale d'ingresso una certa elaborazione, trasformandolo in un segnale elettrico d'uscita.

Sensore: un particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con il sistema misurato.

In base a queste definizioni possiamo schematizzare un trasduttore come in [figura 1](#).

Figura 1
Struttura di un trasduttore



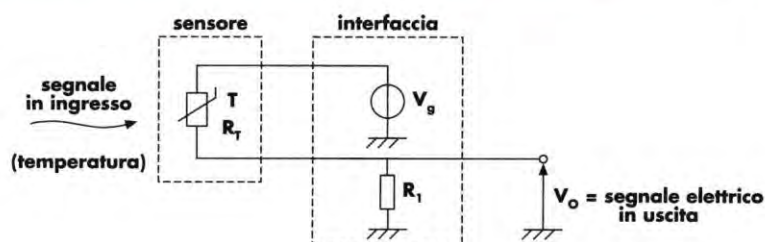
Il segnale di ingresso rappresenta la variazione di una grandezza fisica a cui, sulla base di una convenzione nota, è associata una informazione.

Questo segnale viene rilevato dal sensore che produce una grandezza di natura diversa rispetto al segnale in ingresso ma che può essere elaborata dall'interfaccia per produrre il segnale elettrico di uscita. Questo significa che la trasformazione del segnale (gran-

dezza) d'ingresso, nel segnale elettrico di uscita può avvenire con diversi passaggi uno di seguito all'altro; ognuno dei quali è rappresentato da un blocco funzionale.

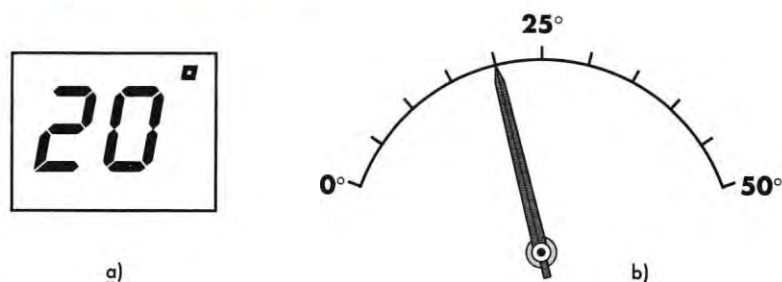
Ad esempio in un termometro a termoresistenza abbiamo come *sensore* la termoresistenza che trasforma le variazioni di temperatura (segnale d'ingresso proveniente dal sistema) in variazioni di resistenza; a esso segue una *interfaccia* (circuito) che trasforma le variazioni di resistenza in variazioni di tensione (segnale elettrico in uscita). Vedi figura 2.

Figura 2
Trasduttore di temperatura con termoresistenza



Il segnale elettrico fornito dal trasduttore può essere elaborato, secondo le esigenze, da un opportuno circuito elettronico per ottenere un numero che rappresenta la temperatura misurata. Questo numero può essere rappresentato mediante un visualizzatore a display (figura 3a) o essere ricavato in base alla posizione di un indice che si muove su una scala graduata (figura 3b).

Figura 3
Visualizzazione della grandezza misurata



I segnali elettrici forniti da un trasduttore hanno il vantaggio di poter essere:

- amplificati;
- trasmessi a distanza;
- registrati (memorizzati);
- elaborati attraverso circuiti elettronici.

Grazie alle caratteristiche dei segnali elettrici che essi forniscono; i trasduttori sono utilizzati in due importanti applicazioni della tecnologia che sono:

- monitoraggio di grandezze fisiche;
- rilevazione di informazioni in un sistema da tenere sotto controllo.

La prima applicazione è schematizzata in figura 4. In essa è rappresentato un sistema ad anello aperto in cui il trasduttore rileva una grandezza fisica e la converte in un segnale elettrico (grandezza elettrica). Questo segnale, dopo essere elaborato, viene inviato al sistema di visualizzazione che può essere un indice che si muove su una scala graduata, un display, un monitor di PC.

Figura 4
Monitoraggio di una grandezza fisica

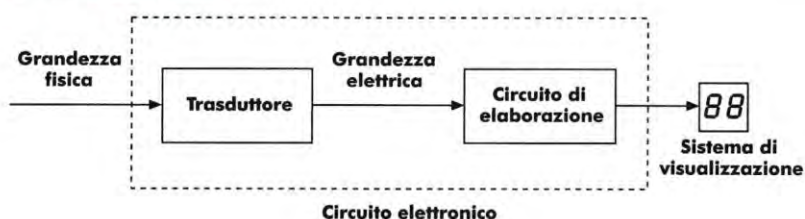
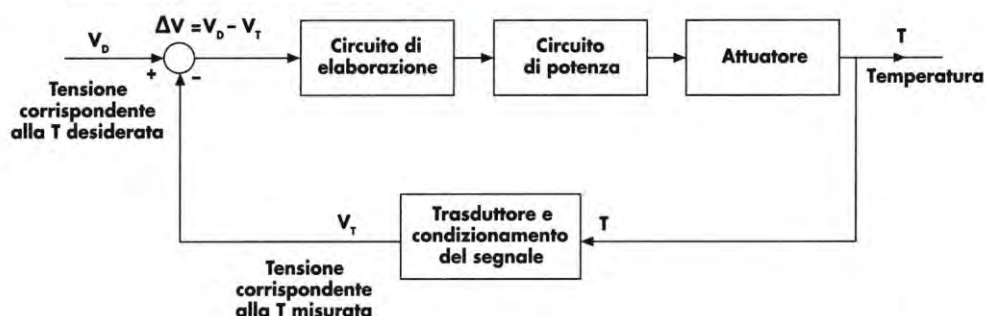


Figura 5
Controllo della
temperatura di
un forno



In questo caso si tratta di un sistema ad anello chiuso in cui il trasduttore fa parte della catena di retroazione (feedback). La grandezza “temperatura” che deve essere controllata, viene rilevata dal trasduttore, il segnale fornito da quest’ultimo viene elaborato da un circuito di condizionamento in modo da ottenere dei valori di tensione adatti a essere confrontati con la tensione V_D che rappresenta la temperatura desiderata. Il nodo di confronto sottrae la tensione V_T che rappresenta la temperatura del forno dalla tensione V_D e fornisce una tensione errore $\Delta V = V_D - V_T$. La catena di andata formata da circuito di elaborazione, circuito di potenza e attuatore ha il compito di agire sul forno per: aumentarne la temperatura se $\Delta V > 0$ cioè la temperatura del forno è inferiore a quella desiderata e diminuirla in caso contrario.

I trasduttori possono essere classificati in base a diversi criteri, che tengono conto delle caratteristiche che si vogliono mettere in evidenza.

Classificazione dei trasduttori

Classificazione in base	Trasduttore...
... alla grandezza fisica rilevata	... di temperatura, di velocità, di forza, di spostamento, di pressione, di umidità, di radiazione luminosa, di deformazione ecc.
... al tipo di legame fra ingresso e uscita	... lineare, esponenziale, logaritmico ecc.
... alla tipologia di grandezze in gioco	... analogico, digitale
... alla grandezza elettrica fornita	... che fornisce una variazione di resistenza, di tensione, di corrente, di capacità, di induttanza
... al riferimento della variazione della grandezza d'uscita	... assoluto (fornisce il valore assoluto), incrementale (fornisce le variazioni del valore)



I **trasduttori primari** sono quelli in cui la grandezza di uscita dipende in modo diretto dalla grandezza di ingresso. Il legame tra le due grandezze si basa su un particolare fenomeno fisico. I **trasduttori secondari** sono tutti quelli in cui la grandezza di uscita non dipende direttamente dalla grandezza d'ingresso ma da una grandezza fisica intermedia che, a sua volta, dipende dall'ingresso.

Questo significa che nei trasduttori secondari la grandezza fisica d'ingresso produce una grandezza intermedia che, a sua volta, ne produce un'altra e così via fino ad arrivare alla grandezza di uscita.

Nella maggior parte delle applicazioni in cui si utilizzano i trasduttori sono necessarie operazioni di condizionamento del segnale, che si prefiggono lo scopo di ottenere segnali

Segnali elettrici standard

Parametri dei trasduttori

standard utilizzabili facilmente con apparecchiature commerciali. Le norme ANSI e DIN prevedono i seguenti segnali elettrici standard:

- segnale in corrente da 0 A a 20 mA;
- segnale in corrente da 4 mA a 20 mA;
- segnale in tensione da 0 V a 5 V;
- segnale in tensione da 0 V a 10 V.

Per definire completamente il comportamento del trasduttore è necessario conoscere, oltre al tipo di grandezze in ingresso e in uscita, anche una serie di parametri che vengono descritti di seguito.

Precisione. È il massimo scostamento tra il valore della grandezza d'ingresso e il valore desumibile mediante la grandezza di uscita. Viene, generalmente, fornita in valore percentuale rispetto al fondo scala.

Funzione di trasferimento. È il legame (in forma analitica, grafica o tabulata) che definisce come varia la grandezza di uscita al variare della grandezza d'ingresso: $U = f(I)$; in cui U è la grandezza di uscita e I la grandezza d'ingresso. È preferibile una funzione di tipo lineare, definibile in modo univoco mediante una costante di proporzionalità: $U = k \cdot I$.

Linearità. È la prerogativa di un trasduttore di fornire un legame di proporzionalità fra ingresso e uscita in tutto il campo di valori per cui viene usato. L'errore di linearità è la massima differenza fra l'andamento teorico (retta) e l'andamento reale (curva) della funzione di trasferimento.

Off set. È il valore che assume la grandezza di uscita quando quella di ingresso ha il valore zero. Se la funzione di trasferimento è del tipo $U = U_0 + k \cdot I$, il termine U_0 rappresenta l'off set, cioè il valore dell'uscita quando l'ingresso $I = 0$. Se l'off set è nullo, la funzione di trasferimento assume la forma $U = k \cdot I$, che è il tipo di funzione più richiesto in quanto fornisce uscita nulla con ingresso nullo e il suo grafico è una retta passante per l'origine.

Stabilità. È l'attitudine di un trasduttore a mantenere invariata la funzione di trasferimento al variare del tempo, della temperatura, dell'umidità ecc.

Sensibilità. È il rapporto fra la minima variazione apprezzabile del segnale in uscita e la corrispondente variazione della grandezza d'ingresso.

Ripetibilità. È il grado di concordanza tra i risultati di successive misurazioni dello stesso misurando effettuate nelle stesse condizioni di misura. In pratica succede che il trasduttore può fornire, in uscita, risultati diversi pur applicando in ingresso lo stesso valore. Questo comportamento può essere dovuto all'invecchiamento e al fatto che il trasduttore è influenzabile dalle condizioni ambientali (temperatura, pressione, umidità ecc.)

Isteresi. È la differenza fra i valori forniti in uscita dal trasduttore in corrispondenza dello stesso valore in ingresso, se questo viene raggiunto attraverso un aumento oppure una diminuzione della grandezza sotto misura.

Campo di misura. È l'escursione fra i valori minimo e massimo rilevabili.

Risoluzione. È la minima variazione della grandezza d'ingresso che produce variazioni apprezzabili della grandezza d'uscita.

Tempo di risposta. È il tempo che impiega l'uscita a variare in seguito a una variazione istantanea dell'ingresso.

Un buon trasduttore ha:

- funzione di trasferimento lineare;
- alta sensibilità;

- ampio campo di misura;
- bassa risoluzione;
- piccola costante di tempo;
- assenza di isteresi.

3 Sensori e trasduttori di temperatura



I **sensori di temperatura** sono dispositivi che convertono una variazione di temperatura in una grandezza fisica da cui si può ottenere un segnale elettrico per realizzare un trasduttore di temperatura.

I sensori e trasduttori di temperatura più diffusi sono:

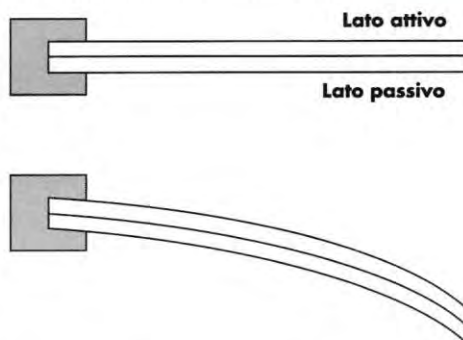
- interruttore termico a lamina bimetallica;
- termoresistenze;
- termistori;
- termocoppie;
- trasduttori di temperatura a semiconduttore;
- trasduttori a circuiti integrati.

Lamina
bimetallica

L'interruttore termico a **lamina bimetallica** è formato da due lamine metalliche saldate, attaccate come indicato in **figura 6**.

I materiali che costituiscono le due lamine hanno un coefficiente di dilatazione termica diverso. Quando il bimetallo è sottoposto a un aumento di temperatura, una lamina si allunga di più e l'altra di meno; per questo il bimetallo si incurva. Questa deformazione è utilizzata per intervenire sul contatto di un interruttore e provocarne l'apertura. Fra le applicazioni di tale meccanismo ricordiamo gli interruttori automatici magnetotermici, e la regolazione della temperatura nei ferri da stiro.

Figura 6
Interruttore
bimetallico



Termoresistenze

Le **termoresistenze** (*Resistance Temperature Detector*, RTD) sono sensori il cui funzionamento si basa sulla proprietà che hanno i materiali conduttori di aumentare la propria resistenza con l'aumentare della temperatura. In genere la relazione che lega la variazione di temperatura a quella di resistenza non è lineare ma per i conduttori metallici vale la relazione approssimata:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

1

in cui:

- R_T è il valore della resistenza alla temperatura T ;
- R_0 è il valore della resistenza alla temperatura di 0°C ;
- α è il coefficiente di temperatura (ha un valore diverso per ogni materiale);
- ΔT è il salto di temperatura ($\Delta T = T - T_0$).

La formula precedente è una relazione approssimata in quanto il valore di α non è costante ma varia al variare della temperatura; da ciò si deduce che con la termoresistenza si ottiene un trasduttore non lineare e quindi, nei casi in cui sono previste elevate escursioni termiche, è necessario ricorrere a circuiti di linearizzazione capaci di compensare in modo accettabile la non linearità della funzione di trasferimento. È opportuno ricordare che in commercio esistono circuiti integrati che consentono di effettuare sia questa compensazione sia altre operazioni di elaborazione del segnale. In genere per ottenere una variazione di tensione (segnale elettrico) come conseguenza di una variazione di resistenza è necessario far circolare nella termoresistenza una corrente costante. In questo modo le variazioni di resistenza provocate dalle variazioni di temperatura producono una variazione di tensione sulla termoresistenza. Occorre precisare che, avendo α un valore molto piccolo, anche le variazioni di tensione sono valori molto piccoli, per cui è necessario procedere all'amplificazione del segnale ottenuto. I materiali utilizzati per la fabbricazione delle termoresistenze sono il rame, il nichel e il platino; quest'ultimo è adatto per misurare temperature comprese fra -200°C e $+800^{\circ}\text{C}$. Nella tabella 1 sono riportati i valori di resistenza al variare della temperatura per termoresistenze al nichel (Ni) e al platino (Pt). La termoresistenza al platino è denominata commercialmente Pt100.

Tabella 1
Caratteristiche
delle termo-
resistenze
al nichel e al
platino

Termoresistenze al nichel				Termoresistenze al platino		
Temperatura	R	Tolleranza	Tolleranza	R	Tolleranza	Tolleranza
[$^{\circ}\text{C}$]	[W]	[W]	[$^{\circ}\text{C}$]	[W]	[W]	[$^{\circ}\text{C}$]
-220	—	—	—	10,41	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$
-200	—	—	—	18,53	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$
-100	—	—	—	60,20	$\pm 0,3$	$\pm 0,7$
-60	69,5	$\pm 1,0$	$\pm 2,1$	76,28	$\pm 0,22$	$\pm 0,54$
-40	79,1	$\pm 0,7$	$\pm 1,47$	84,21	$\pm 0,18$	$\pm 0,46$
-20	89,3	$\pm 0,4$	$\pm 0,83$	92,13	$\pm 0,14$	$\pm 0,38$
0	100,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	100,00	$\pm 0,10$	$\pm 0,3$
20	111,3	$\pm 0,24$	$\pm 0,38$	107,80	$\pm 0,13$	$\pm 0,36$
40	123,0	$\pm 0,38$	$\pm 0,56$	115,54	$\pm 0,16$	$\pm 0,42$
60	135,3	$\pm 0,52$	$\pm 0,74$	123,24	$\pm 0,19$	$\pm 0,48$
80	148,2	$\pm 0,66$	$\pm 0,92$	130,91	$\pm 0,22$	$\pm 0,54$
100	161,7	$\pm 0,8$	$\pm 1,1$	138,50	$\pm 0,25$	$\pm 0,6$
120	175,9	$\pm 0,92$	$\pm 1,2$	146,07	$\pm 0,29$	$\pm 0,72$
140	190,9	$\pm 1,05$	$\pm 1,3$	153,59	$\pm 0,33$	$\pm 0,84$
160	206,7	$\pm 1,17$	$\pm 1,4$	161,06	$\pm 0,37$	$\pm 0,96$
180	223,1	$\pm 1,3$	$\pm 1,5$	168,48	$\pm 0,41$	$\pm 1,08$
200	—	—	—	175,84	$\pm 0,45$	$\pm 1,2$
300	—	—	—	212,03	$\pm 0,65$	$\pm 1,8$
400	—	—	—	247,06	$\pm 0,85$	$\pm 2,4$
500	—	—	—	280,93	$\pm 1,00$	$\pm 3,0$
600	—	—	—	313,65	$\pm 1,20$	$\pm 3,6$
700	—	—	—	345,21	$\pm 1,35$	$\pm 4,2$
800	—	—	—	375,61	$\pm 1,45$	$\pm 4,8$

Termistori e loro applicazioni



I **termistori** rappresentano una categoria di resistori caratterizzati da una forte dipendenza dalla temperatura.

Essi si dividono in due grandi categorie che prendono il nome di:

- **PTC** (*Positive Temperature Coefficient*);
- **NTC** (*Negative Temperature Coefficient*).

PTC

I **PTC** hanno un coefficiente di temperatura positivo; ciò significa che a un aumento di temperatura corrisponde un aumento di resistenza. I materiali più usati per la costruzione dei PTC sono: titanato di bario, titanato di stronzio e silicio policristallino. Il comportamento di un PTC è definito dalla seguente relazione in cui A , B , C , sono delle costanti:

$$R_T = A + C \cdot e^{B \cdot T} \quad 2$$

Nella relazione **3** è riportato il coefficiente di temperatura:

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = \frac{B \cdot C \cdot e^{B \cdot T}}{A + C \cdot e^{B \cdot T}} \quad 3$$

Come si può notare nella relazione **2** il valore della resistenza aumenta esponenzialmente con l'aumentare della temperatura; tuttavia questo comportamento è valido solo entro un campo di temperature comprese fra T_S e T_F come si vede nella **figura 7**. Da questo grafico si può notare come, per basse temperature, la resistenza diminuisce con l'aumentare della temperatura (la curva presenta pendenza negativa); poi la pendenza subisce una graduale inversione e si entra in una gamma di temperature in cui la resistenza aumenta con l'aumentare della temperatura in modo che piccoli aumenti di temperatura comportano forti variazioni della resistenza.

La temperatura di riferimento T_S , denominata *temperatura di Curie* o *switching temperature*, rappresenta la temperatura a cui la resistenza raddoppia il valore assunto a 25 °C. Vengono di seguito riportati i parametri commerciali di un PTC:

Tolleranza	5%
Resistenza di riferimento	$R_S = 100 \, \Omega$
Temperatura di riferimento	$T_S = 80 \, ^\circ\text{C}$
Resistenza finale a 125 °C	$R_F = 50 \, \text{k}\Omega$
Temperatura finale	$T_F = 125 \, ^\circ\text{C}$
Tensione di esercizio	30 Vmax

Figura 7 Variazione della resistenza al variare della temperatura in un PTC

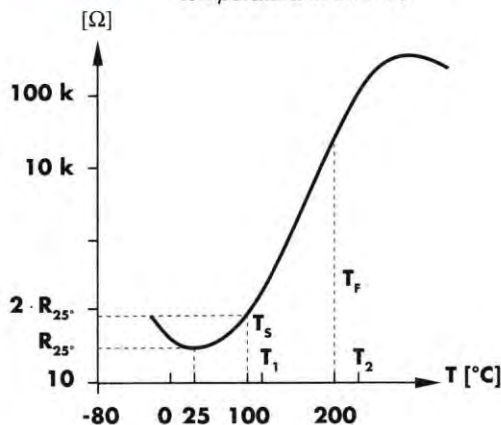
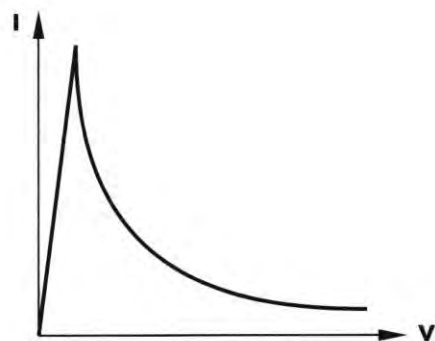


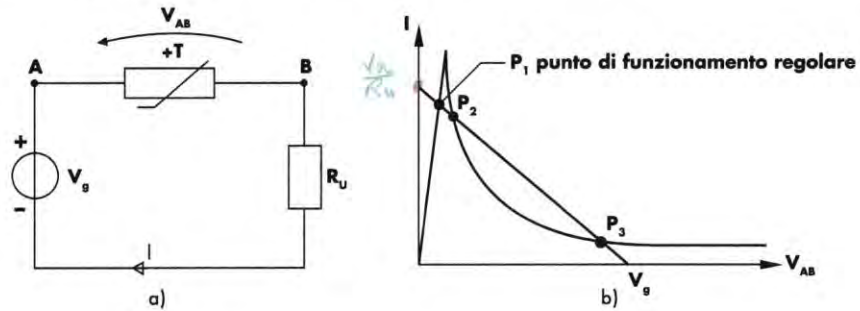
Figura 8 Caratteristica I-V di un PTC



Caratteristica I-V

Figura 9
Comportamento circuitale di un PTC: circuito (a); punti di funzionamento (b)

La **figura 8** riporta la tipica caratteristica tensione-corrente di un PTC. Come si può notare, per piccoli valori di tensione, il comportamento è simile a quello di un tipico resistore, cioè la corrente aumenta con l'aumentare della tensione applicata, oltre un certo valore di tensione l'aumento di temperatura produce un forte aumento della resistenza e quindi una drastica diminuzione della corrente.



Nella **figura 9** si può vedere un circuito che comprende un generatore V_g , un utilizzatore R_u e un PTC; a fianco è riportato il grafico delle caratteristiche I-V del PTC e del rimanente circuito. Come si può facilmente vedere, il circuito può funzionare in tre possibili condizioni, rappresentate rispettivamente, dai punti P_1 , P_2 e P_3 .

Applicazioni del PTC

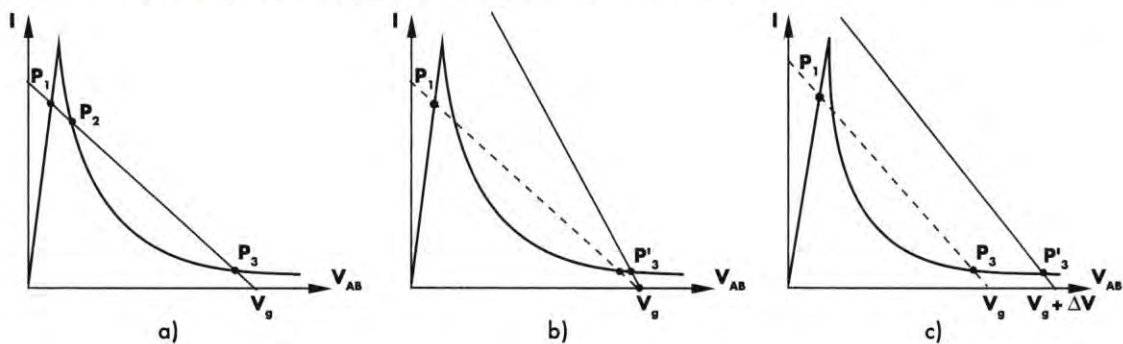
Il punto P_2 è instabile, cioè, pur rappresentando una condizione di funzionamento possibile, basta un minimo disturbo per allontanare il funzionamento dal punto P_2 e portarlo a P_3 , che è stabile. I termistori PTC vengono frequentemente utilizzati come dispositivi di protezione contro gli aumenti di corrente o di tensione.

Nella **figura 10** sono riportate due condizioni di funzionamento anormale del circuito della figura 9, oltre a quella di funzionamento regolare. Nella **figura 10b** si vede come una eccessiva diminuzione della resistenza R_u (rotazione della retta) sposta il funzionamento da P_1 a P'_3 , caratterizzato da bassa corrente. Anche ripristinando il carico regolare, il punto di funzionamento rimane vicino a P_3 e per ripristinare le condizioni di funzionamento corrispondenti a P_1 occorre interrompere il circuito, cioè annullare la corrente e poi richiuderlo.

La **figura 10c** riporta una anomalia causata da un aumento ΔV della tensione del generatore. In questo caso la retta trasla verso destra della quantità ΔV portando il funzionamento nel punto P'_3 a bassa corrente.

Figura 10

Variazione del punto di funzionamento per un PTC: funzionamento regolare (a); diminuzione della resistenza di carico (b); aumento della tensione di alimentazione (c)



NTC

Gli NTC hanno un coefficiente di temperatura negativo, per cui a un aumento di temperatura corrisponde una diminuzione della resistenza. I materiali adoperati per la costruzione degli NTC sono miscele di ossidi di ferro, di cobalto, di cromo, di man-

ganese e di nichel.

Il comportamento di un NTC è definito dalla relazione seguente:

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

4

in cui:

T = temperatura in [K];

R_T = resistenza alla temperatura T misurata in [Ω];

R_0 = resistenza alla temperatura di riferimento T_0 in [Ω];

B = costante dipendente dalla geometria e dal materiale; B ha valori compresi fra 2500 K e 5700 K.

Il coefficiente di temperatura, come si vede dalla espressione riportata di seguito, è negativo e decresce con l'aumentare della temperatura:

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

5

Contrariamente ai PTC la relazione caratteristica è valida per una vasta gamma di temperature che comprende anche valori sotto lo zero.

Di seguito vengono elencati i parametri caratteristici di un NTC commerciale.

Resistenza a 25 °C	47 k Ω
Coefficiente B	3300 K
Dissipazione di potenza	0,6 W a 25 °C
Tolleranza	20%
Fattore di dissipazione	5 mW/°C
Costante termica di tempo	30 s
Temperatura di funzionamento:	
– alla dissipazione massima	da 0 °C a 55 °C
– alla dissipazione zero	da -25 °C a 155 °C

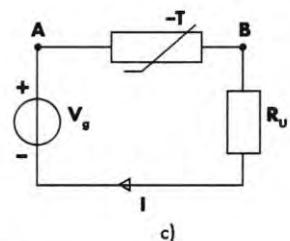
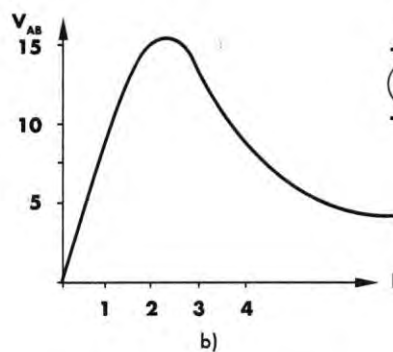
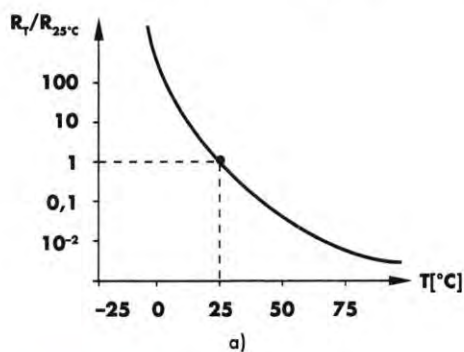
Applicazioni degli NTC

La figura 11a mostra come varia il valore della resistenza rapportato al valore a 25 °C col variare della temperatura di un NTC. Nella figura 11b si può, invece, vedere la tipica caratteristica corrente-tensione.

Gli NTC trovano frequentemente applicazione come dispositivi di compensazione nei confronti della temperatura oppure come sensori di temperatura.

Figura 11

Comportamento di un NTC: variazione della resistenza al variare della temperatura (a); caratteristica I-V (b); circuito applicativo (c)



Termocoppie

Le termocoppie sono costituite da due lamine di materiale conduttore saldate a una estremità.

Il principio di funzionamento di una termocoppia si basa sull'effetto Seebeck-Peltier, o effetto termoelettrico, che si manifesta su una coppia di metalli di natura diversa saldati

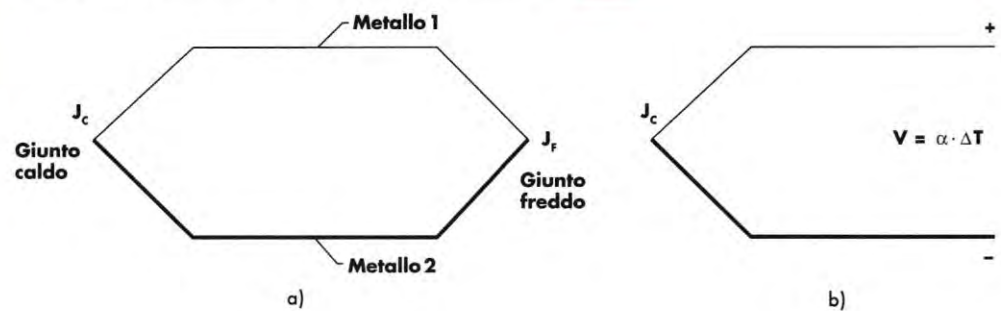
alle estremità. Con riferimento alla **figura 12a**, che rappresenta la struttura base di una termocoppia, se riscaldiamo l'estremità denominata *giunto caldo* J_C in modo che raggiunga la temperatura T_C maggiore di quella T_F del *giunto freddo* J_F , allora nelle due lamine circola una corrente elettrica la cui intensità aumenta con l'aumentare della differenza fra la temperatura T_C del giunto caldo e quella T_F del giunto freddo. Se il giunto freddo viene aperto (**figura 12b**), la corrente si annulla perché il circuito è aperto ma c'è una tensione V fra i terminali che prima formavano il giunto freddo. Questa tensione aumenta con l'aumentare della differenza di temperatura $\Delta T = T_C - T_F$. Il legame fra V e ΔT può essere espresso dalla seguente formula:

$$V = \alpha(T_C - T_F) \quad \text{oppure:} \quad V = \alpha \cdot \Delta T$$

6

in cui α è il coefficiente di Seebeck, espresso in $[\mu V/^{\circ}C]$.

Figura 12
Struttura
di una
termocoppia



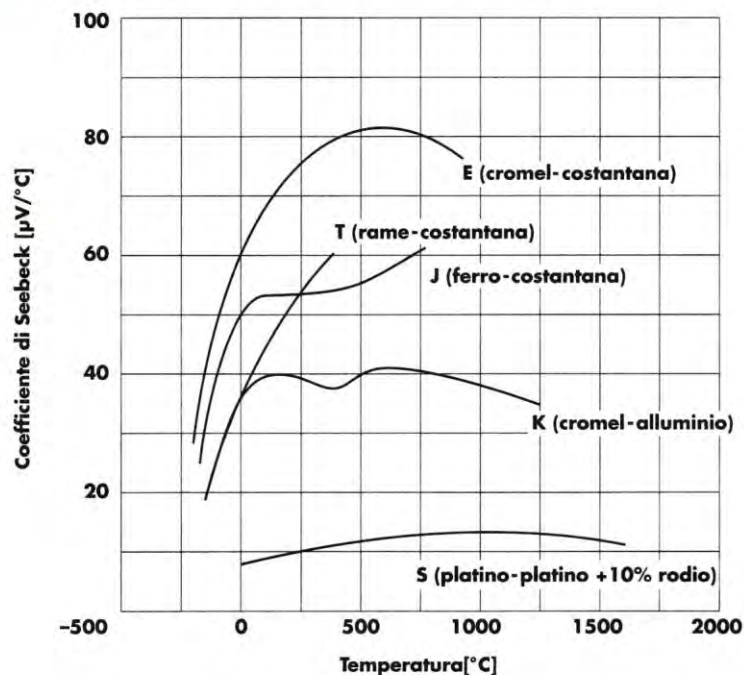
Occorre tuttavia notare che α non è costante ma varia al variare della temperatura per cui la relazione che descrive il comportamento di una termocoppia non è lineare come potrebbe suggerire la formula **6**.

Le termocoppie vengono classificate in base ai materiali utilizzati e le più diffuse sono:

- E (cromel-costantana);
- T (rame-costantana);
- J (ferro-costantana);
- K (cromel-alluminio);
- S (platino-platino + 10% rodio).

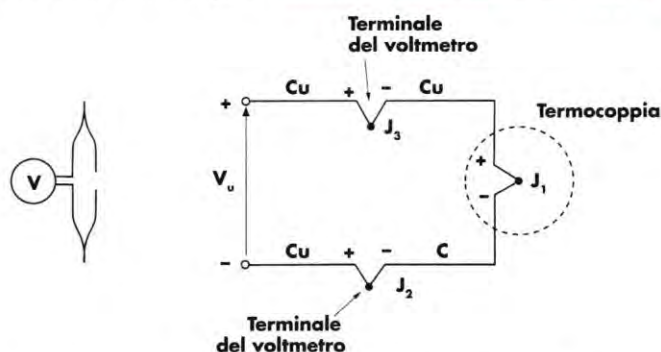
La **figura 13** mostra l'andamento del coefficiente di Seebeck.

Figura 13
Confronto tra
diversi tipi di
termocoppia



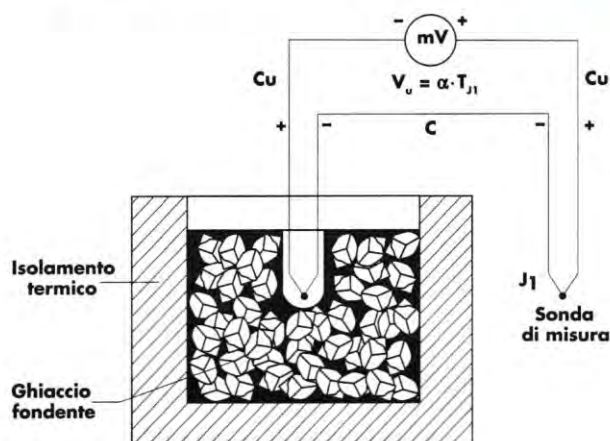
**Circuiti di
compensazione
per termocoppie**

Figura 14
Misura di
temperatura
con una
termocoppia



Per risolvere il problema della misura si possono utilizzare due termocoppie di tipo Cu-C; una utilizzata come riferimento (ad esempio può essere immersa nel ghiaccio fondente) mentre l'altra è posta nel punto in cui si vuole misurare la temperatura. A tale proposito si faccia riferimento allo schema riportato in **figura 15**.

Figura 15
Compensa-
zione con
 $T_F = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$



In questo modo, quando si effettua il collegamento del voltmetro, si realizzano due termocoppie Cu-C il cui effetto complessivo si annulla e, quindi, la tensione misurata dal voltmetro è proporzionale alla differenza fra la temperatura del giunto caldo e quella del giunto freddo: $V = \alpha (T_C - T_F)$. Se la temperatura del giunto freddo è $T_F = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la formula può essere scritta come:

$$V = \alpha \cdot T_C$$

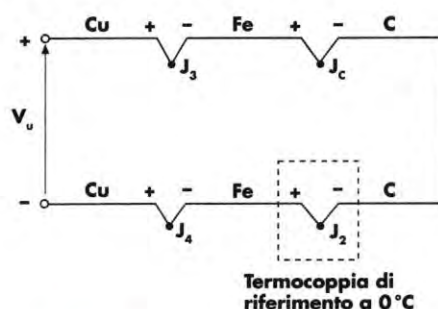
7

In tale condizione la formula traduce una semplice proporzionalità fra la temperatura T_C da misurare e la tensione V fornita dalla termocoppia. Tuttavia la soluzione appena proposta presenta due forti vincoli: primo perché impone l'uso di una termocoppia rame-costantana, secondo perché è necessario tenere il giunto freddo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se, infatti,

si usassero termocoppie ferro-costantana si presenterebbe la situazione di **figura 16** in cui J_3 e J_4 , essendo a temperatura diversa da J_2 , introdurrebbero un errore nella misura.

Figura 16

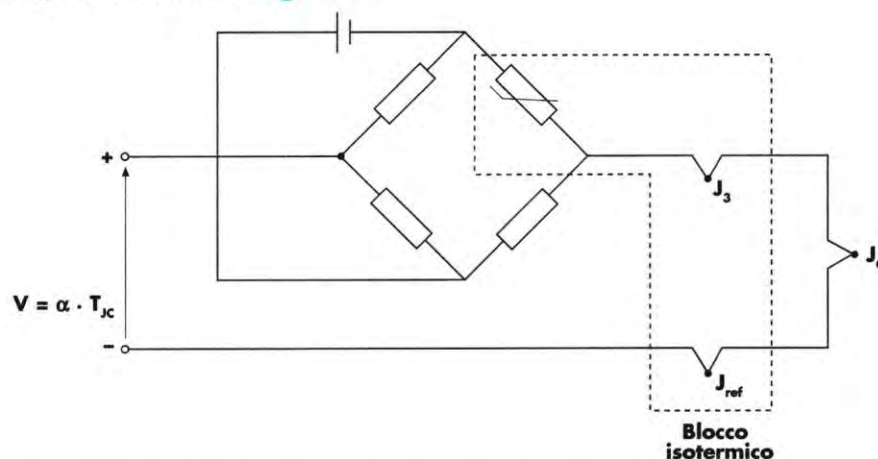
Termocoppia Fe-C



Gli inconvenienti appena descritti possono essere risolti introducendo un blocco isoteramico, come indicato in **figura 17**.

Figura 17

Circuito di compensazione



Se la temperatura T_F del giunto freddo è diversa da zero, la formula che fornisce il valore della tensione è:

$$V = \alpha (T_C - T_F) = \alpha \cdot T_C - \alpha \cdot T_F \quad 8$$

A eliminare il termine $\alpha \cdot T_F$, in modo che si possa ottenere la proporzionalità diretta $V = \alpha \cdot T_C$, provvede un ponte di resistenze in cui la resistenza variabile cambia il suo valore con la temperatura, producendo uno sbilanciamento del ponte e quindi aggiungendo una tensione di valore pari al termine $\alpha \cdot T_F$ per cui:

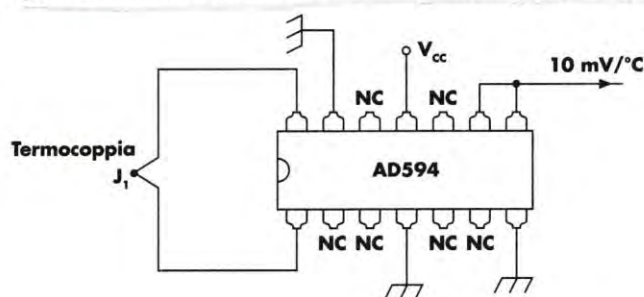
$$V = \alpha \cdot T_C - \alpha \cdot T_F + \alpha \cdot T_F \quad \text{cioè:} \quad V = \alpha \cdot T_C \quad 9$$

Circuiti di compensazione integrati

In molti casi la soluzione di **figura 10** risulta piuttosto artificiosa e impegnativa dal punto di vista circuitale. Come alternativa è possibile utilizzare **circuiti di compensazione integrati** come l'AD594, che consentono di effettuare misure utilizzando una sola termocoppia. Il circuito di compensazione relativo al punto di zero è interno all'integrato, che contiene anche un circuito di amplificazione e di linearizzazione. La **figura**

Figura 18

Compensazione con AD594



18 mostra un esempio di applicazione dell'AD594. Il circuito fornisce una tensione linearizzata ($10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$) per temperature comprese fra 0°C e 300°C ; l'integrato è utilizzabile per termocoppie ferro-costantana e cromel-alluminio.

Trasduttori di
temperatura
integrati

I **trasduttori di temperatura integrati** sono componenti di produzione abbastanza recente che contengono al loro interno sia l'elemento sensibile alla temperatura sia il circuito di amplificazione e linearizzazione. L'elemento sensibile è generalmente una giunzione P-N polarizzata inversamente, in cui l'aumento di temperatura produce un aumento della corrente inversa. Due esempi di sensori di temperatura integrati sono l'AD590 e l'LM35.

AD590

Il trasduttore **AD590** è un circuito integrato utilizzabile per temperature comprese fra $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e può essere alimentato con tensioni comprese fra 4 V e 30 V. Esso fornisce una corrente che è legata alla temperatura mediante la relazione:

$$I = k \cdot T$$

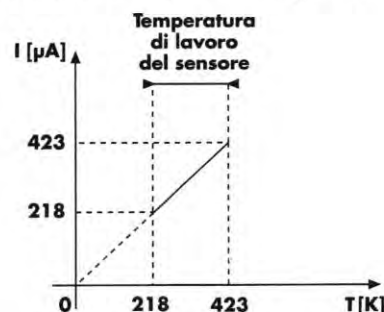
10

in cui T è la temperatura espressa in Kelvin.

La **figura 19** mostra la caratteristica corrente/temperatura di un AD590. Si noti come la caratteristica sia una retta che, se estrapolata, passa per l'origine a 0 K. In particolare il sensore fornisce una corrente di $273\text{ }\mu\text{A}$ alla temperatura di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273 K).

Figura 19

Caratteristica
corrente-
temperatura
(I-T) del
sensore
AD590



In **figura 20** è riportato un circuito applicativo per l'AD590. La corrente I fornita dall'AD590 passa nella resistenza R producendo ai suoi capi una tensione $V_R = R \cdot I$ che ha il valore $V_R = 2,73\text{ V}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_R = 3,73\text{ V}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alla tensione di riferimento va assegnato il valore $V_{ref} = 3,41\text{ V}$. In tali condizioni il circuito fornisce una tensione:

$$V_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{ref} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_R$$

11

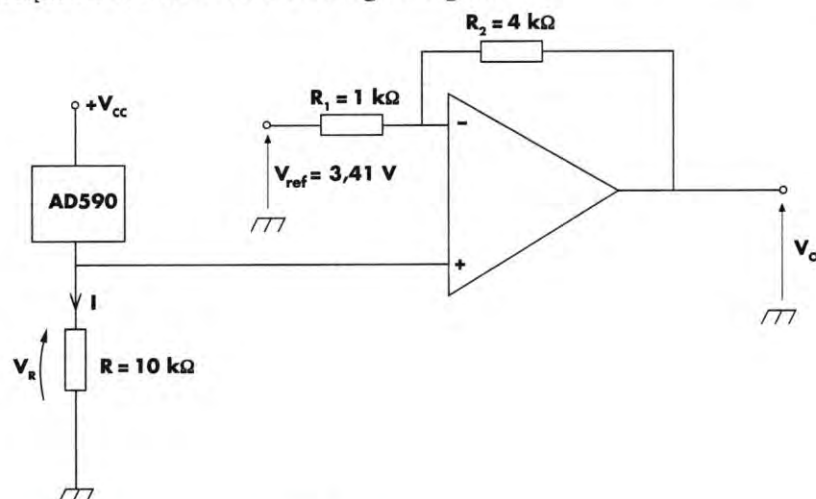
Sostituendo i valori delle varie grandezze e risolvendo, si ricava che:

- a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V_O = -4 \cdot 3,41 + 5 \cdot 2,73$ $V_O = 0\text{ V}$
- a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V_O = -4 \cdot 3,41 + 5 \cdot 3,73$ $V_O = 5\text{ V}$

Il valore di 5 V, oltre a essere un segnale standard, è anche un valore di fondo scala molto frequente nei convertitori analogico-digitali

Figura 20

Circuito di
condiziona-
mento per
AD590



LM35

Il trasduttore LM35 è un circuito integrato utilizzabile per temperature variabili da -55°C a $+155^{\circ}\text{C}$ e fornisce una tensione in uscita che dipende dalla temperatura.

La funzione di trasferimento è rappresentata dalla relazione:

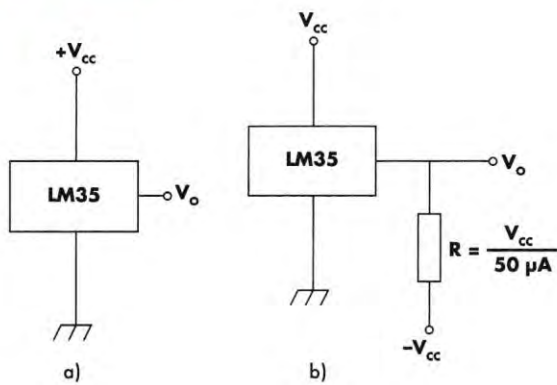
$$V = k \cdot T$$

12

in cui T è la temperatura espressa in $^{\circ}\text{C}$ e k è una costante di proporzionalità il cui valore è $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. L'integrato può essere alimentato con una tensione compresa fra 4 V e 20 V . Nella **figura 21** sono riportati due circuiti applicativi: quello di **figura 21a** va utilizzato per temperature comprese fra 2°C e 150°C ; quello di **figura 21b** è utilizzabile per temperature comprese fra -55°C e $+150^{\circ}\text{C}$. La **figura 22** mostra la caratteristica tensione/temperatura dell'LM35.

Figura 21

Circuiti con LM35

**Figura 22**

Caratteristica V-T dell'LM35

