

## Trasduttore PT100 (termoresistenza)

La maggior parte dei trasduttori di temperatura utilizzati in ambito industriale sono di tipo analogico, in quanto sia la temperatura sia le grandezze elettriche di uscita variano con continuità. Per la scelta del trasduttore di temperatura è necessario conoscere tutti i dati relativi alle condizioni ambientali in cui il trasduttore dovrà operare, i valori di temperatura che deve rilevare, la precisione che deve mantenere nel corso del suo esercizio.

Le PT100 sono le termoresistenze più usate in ambito industriale. L'elemento sensibile delle PT100 è costituito mediante deposizione sotto vuoto di platino su un substrato di ceramica e definito al laser.

Il sensore standard consiste di un elemento PT100 protetto da un involucro, con 2 conduttori da 10 mm per facilitare il collegamento.



Fig. 1 – Immagine di una PT100

Le sue dimensioni ridotte, la rapidità di risposta termica e la semplice struttura la rendono economicamente conveniente in diverse applicazioni di misura della temperatura (misura di temperatura in macchine, motori elettrici, refrigeratori, ....).

Il valore della corrente che viene fatta circolare nella termoresistenza viene scelto con molta attenzione; infatti non deve essere troppo elevato, per non introdurre un riscaldamento eccessivo per effetto Joule, che falserebbe la misura; d'altra parte non deve essere troppo piccola perché i segnali di tensione sarebbero troppo bassi e quindi molto sensibili ai disturbi. I valori tipici sono dell'ordine dei milliampere.

Il range di funzionamento teorico va da  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $850^{\circ}\text{C}$ , tuttavia la temperatura reale di funzionamento è determinata dal modo in cui è realizzato l'involucro.

Il trasduttore PT100, o termoresistenza RTD, è una resistenza di precisione il cui valore  $R_T$  è funzione della temperatura  $T$ . La caratteristica  $R_T/T$  è lineare crescente secondo la legge:

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

dove:

- $R_T$  è il valore della resistenza alla temperatura generica  $T$ ;
- $R_0$  è il valore nominale della resistenza a  $0^\circ\text{C}$  (in genere  $100\ \Omega$  per la PT100);
- $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}\ \text{C}^{-1}$  è il coefficiente medio dimensionale;
- $T$  è la temperatura in gradi Celsius.

Per convertire le variazioni di resistenza  $R_T$  in variazioni di tensione  $V_0$  si possono utilizzare semplici circuiti, come il ponte di Wheatstone, o circuiti complessi che alimentano la termoresistenza con intensità di corrente costante  $I$ .

In quest'ultimo caso si utilizzano circuiti con amplificatori operazionali o integrati dedicati. In Fig. 2 è riportato lo schema di un generatore di corrente costante  $I_L$  realizzato con amplificatore operazionale. La resistenza di carico  $R_T$  è la resistenza del trasduttore PT100 ed ha un terminale collegato a massa.

Se  $R_4/R_3 = R_2/R_1$  e l'amplificatore operazionale è ideale (tensione d'ingresso e corrente d'ingresso nulle), l'intensità di corrente  $I_L$  che scorre nella termoresistenza  $R_T$  è costante ed è  $I_L = E/R_3$ . Per modificare i valori di  $I_L$  è necessario modificare i valori di  $R_3$  e  $R_1$  perché deve essere sempre rispettata la condizione di  $R_4/R_3 = R_2/R_1$ .

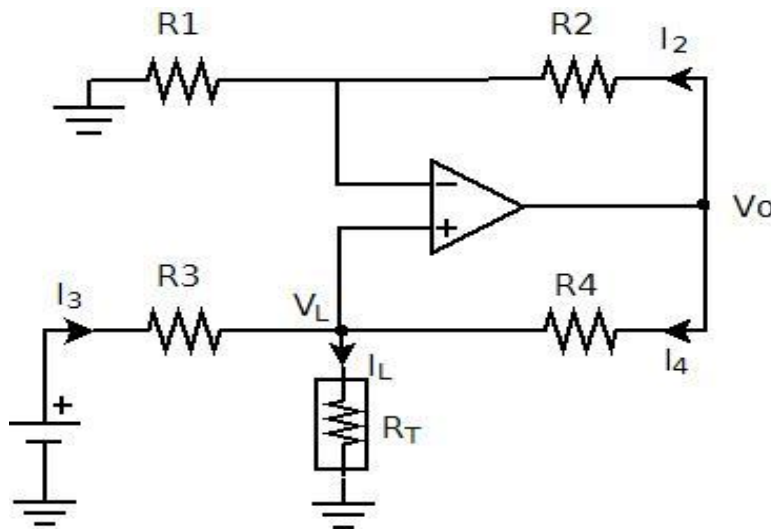


Fig. 2 – Circuito di condizionamento del trasduttore PT100

## Termistori PTC e NTC

I termistori sono anch'essi trasduttori di temperatura a variazione di resistenza. A differenza delle termoresistenze, i termistori sono realizzati con materiali ceramici aventi un elevato valore del coefficiente di temperatura della resistività e si distinguono in PTC (*positive temperature coefficient*) e NTC (*negative temperature coefficient*).

I primi hanno un coefficiente di temperatura positivo e sono caratterizzati da una caratteristica  $R_T/T$  esponenziale crescente all'aumentare della temperatura; i secondi hanno un coefficiente di temperatura negativo e la caratteristica  $R_T/T$  è esponenziale decrescente all'aumentare della

temperatura. Per le migliori caratteristiche metrologiche mostrate da questi ultimi, i sensori di temperatura sono basati esclusivamente sui materiali a coefficiente negativo.

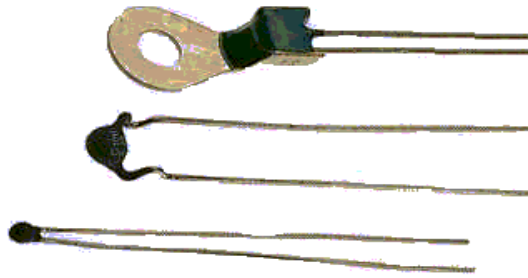


Fig. 3 – Immagine di termistori

Nei termistori NTC la caratteristica  $R_T/T$  è esponenzialmente decrescente secondo la legge:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B \cdot \frac{T_0 - T}{T_0 \cdot T}}$$

dove :

- $R_T$  è la resistenza del termistore NTC alla temperatura generica T;
- $R_0$  è la resistenza del termistore NTC alla temperatura  $T_0 = 20^\circ \text{C}$ ;
- B è la costante dimensionale del termistore compresa fra 2000 K e 5500 K;
- T è la temperatura generica espressa in gradi kelvin;
- $T_0$  è la temperatura di riferimento in gradi kelvin (  $20^\circ \text{C} \rightarrow 293 \text{ K}$  ).

Poiché la caratteristica  $R_T/T$  del trasduttore è esponenziale decrescente, è necessario linearizzare ed invertire la sua pendenza , in modo da rendere la  $R_T$  crescente linearmente all'aumentare della temperatura.

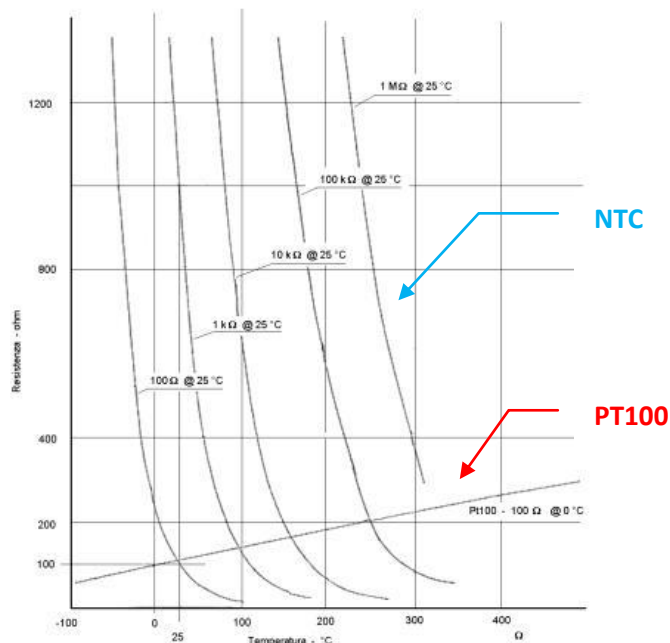


Fig. 4 – Caratteristiche di una PT100 e di termistori NTC

## Termocoppie

Le termocoppie sono trasduttori di temperatura di **tipo attivo**, perché generano autonomamente una tensione senza la necessità di ricorrere a circuiti elettronici, come per le termoresistenze, e inoltre non presentano problemi di autoriscaldamento. Essi sono costituiti da coppie di materiali differenti.



Fig. 5 – Immagine di termocoppia

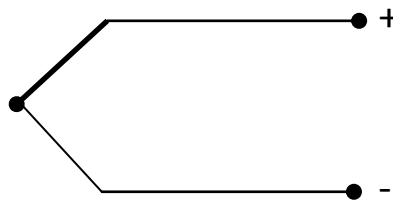


Fig. 6 - Segno grafico della termocoppia

Sono prodotti vari tipi di termocoppie che si differenziano per i materiali costituenti le giunzioni e sono contraddistinti, in base alle norme IEC (o CEI), da una lettera, come ad esempio:

TIPO	METALLI	RANGE DI TEMPERATURA
E	Chromel-Costantana	-50/+900°C
J	Ferro-Costanana	-100/+740°C
K	Chromel-Alumel	-20/+1200°C
T	Rame-Costantana	-180/+380°C

Tab. 1 – Alcuni tipi di termocoppia con i relativi range di funzionamento

Chromel, alumel e costantana sono particolari leghe di metalli. La Chromel è costituita dal 90% nichel e 10% cromo; la costantana è costituita da 40% nichel e 60% rame; l'Alumel è costituita da 95% nichel, 2% manganese, 2% alluminio, 1% silicio. Si utilizzano leghe perché hanno caratteristiche migliori dei metalli semplici (resistenza ad ambienti aggressivi, all'ossidazione).

Il principio di funzionamento è basato sull'effetto Seebeck o effetto termoelettrico.

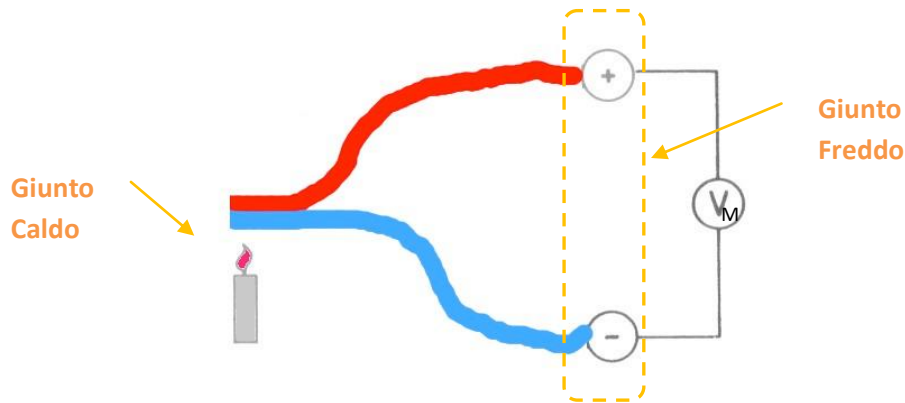


Fig. 7 – Effetto Seebeck

Questo effetto consiste nel fatto che in una coppia di materiali differenti, saldati ad una estremità (**giunto caldo**), si manifesta, tra le estremità libere (**giunto freddo**), una differenza di potenziale che dipende, oltre che dai materiali a contatto, dalle temperature a cui si trovano le due giunzioni, secondo la formula:

$$V_M = \alpha \cdot (T_C - T_F)$$

dove:

- $T_C$  è la temperatura del giunto caldo;
- $T_F$  è la temperatura del giunto freddo;
- $\alpha$  è il coefficiente di proporzionalità di Seebeck [V/°C].

L'andamento della caratteristica della termocoppia non è lineare, a causa della dipendenza di  $\alpha$  della temperatura.

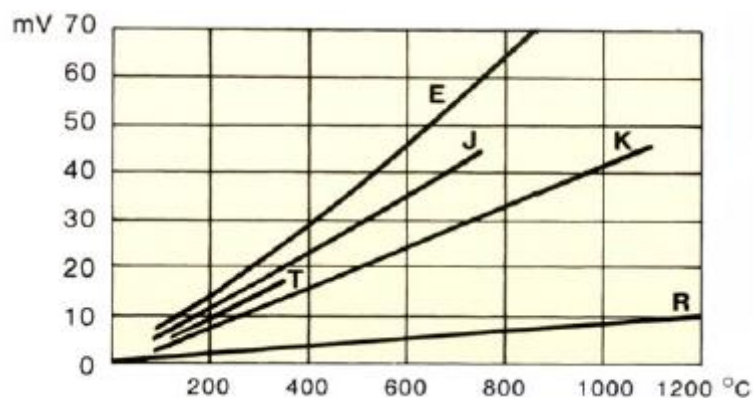


Fig. 7 – Caratteristiche di funzionamento di vari tipi di termocoppie

Essendo il coefficiente  $\alpha$  variabile (e quindi non noto), per ogni tipo di termocoppia il costruttore fornisce una **tabella** in cui sono riportati i valori della differenza di potenziale al giunto freddo e della corrispondente temperatura del giunto caldo. Le tensioni sono calcolate con il giunto freddo a 0 °C, ossia supponendo  $T_F=0$  e quindi  $V_M=\alpha \cdot T_C$ .

T [°C]	V [mV]
-100	-4,632
-60	-2,892
-20	-0,995
0	0,000
20	1,019
40	2,058
60	3,115
80	4,186
100	5,268

Tab. 2 - Esempio di tabella di una termocoppia di tipo "J"

Durante l'utilizzo, il giunto caldo viene sottoposto alla temperatura da misurare. Per poter effettuare una misura diretta della temperatura  $T_C$ , il giunto freddo della termocoppia dovrebbe essere mantenuto alla temperatura di 0 °C, ma tale situazione è difficilmente realizzabile. Normalmente, per evitare complicazioni, il giunto freddo viene sottoposto a temperatura ambiente ( $T_F=T_{\text{ambiente}}$ ) e la misura viene compensata mediante opportuni circuiti elettronici o mediante metodi matematici.

Riscrivendo la relazione ingresso-uscita nella forma:

$$V_M = \alpha \cdot (T_C - T_F) = V_C - V_F$$

da cui si ricava che  $V_C = V_M + V_F$

dove  $V_C$  è la tensione corrispondente, in tabella, alla temperatura  $T_C$  e  $V_F$  è la tensione corrispondente, in tabella, alla temperatura  $T_F$ , una volta misurate  $V_M$  e  $T_F$ , prima di ricavare la temperatura  $T_C$  dalla tabella bisogna aggiungere a  $V_M$  la tensione  $V_F$ .

Facciamo un **ESEMPIO**:

Si supponga di aver misurato in uscita ad una termocoppia di tipo J la tensione  $V_M=2$  mV e la temperatura ambiente  $T_F=20$  °C. Per poter ricavare la temperatura  $T_C$ , dalla Tab. 2 si ricava la tensione  $V_F$  corrispondente a 20 °C, cioè 1,019 mV. Si ricava quindi la tensione  $V_C = V_M + V_F = 2+1,019=3,019$  mV e, sempre dalla Tab. 2, si ricava la corrispondente temperatura  $T_C \approx 60$  °C.

Quando in tabella non è riportato il valore esatto della tensione  $V_C$ , si dovrebbe procedere tramite proporzione considerando i due valori di tensione tra cui è compreso  $V_C$ .

## Trasduttore integrato AD590 (Analog Device)

Il trasduttore di temperatura AD590, prodotto dall'Analog Devices in forma integrata, è realizzato con materiale semiconduttore e trasforma la temperatura assoluta in una corrente ad essa proporzionale. Esso deve la sua enorme diffusione alle caratteristiche di precisione, stabilità e immunità alle interferenze esterne.

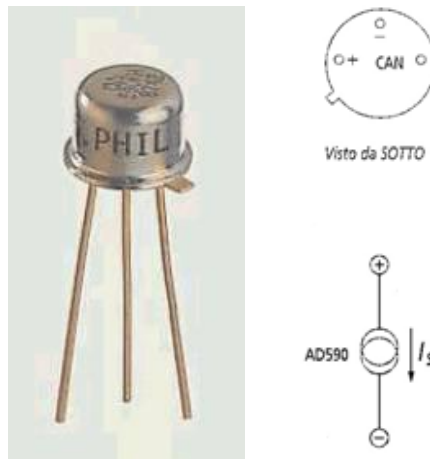


Fig. 8 – Immagine, vista da sotto e simbolo dell'AD590

Come si vede dalla fig. 8, il trasduttore ha tre piedini: il primo, indicato con +, è il morsetto dell'alimentazione (da 4 a 30 V); il secondo, indicato con -, è il morsetto di uscita del segnale in corrente; il terzo, indicato con **CAN**, è il morsetto che va collegato a massa.

La corrente in uscita cresce linearmente con la temperatura secondo la seguente legge:

$$I_S(T) = I_0 + S \cdot T$$

dove:

- $I_0 = 273 \mu\text{A}$  è la corrente a  $0^\circ\text{C}$  ( $273 \text{ K}$ );
- $S = 1 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$  è la sensibilità.

La caratteristica  $I_S/T$  è quindi di tipo lineare:

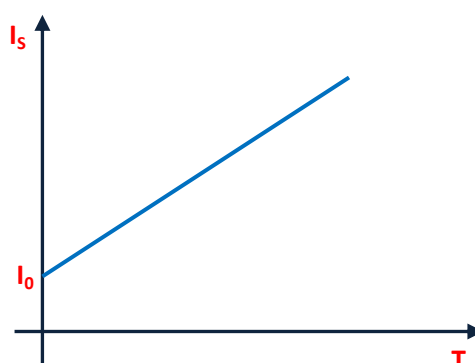


Fig. 9 – Caratteristica  $I_S/T$  dell'AD590

Essendo realizzato con materiale semiconduttore, ha un range di funzionamento piuttosto ridotto. Infatti può misurare temperature da  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Per quanto riguarda il principio di funzionamento, esso sfrutta la legge di variazione della tensione ai capi di una giunzione PN polarizzata direttamente (polo positivo collegato alla regione P e polo negativo collegato alla regione N), che varia di  $2,3\text{ mV}$  ogni  $^{\circ}\text{C}$ . Questa variazione di tensione genera nel circuito del trasduttore una corrente  $I_S$  variabile con la temperatura.

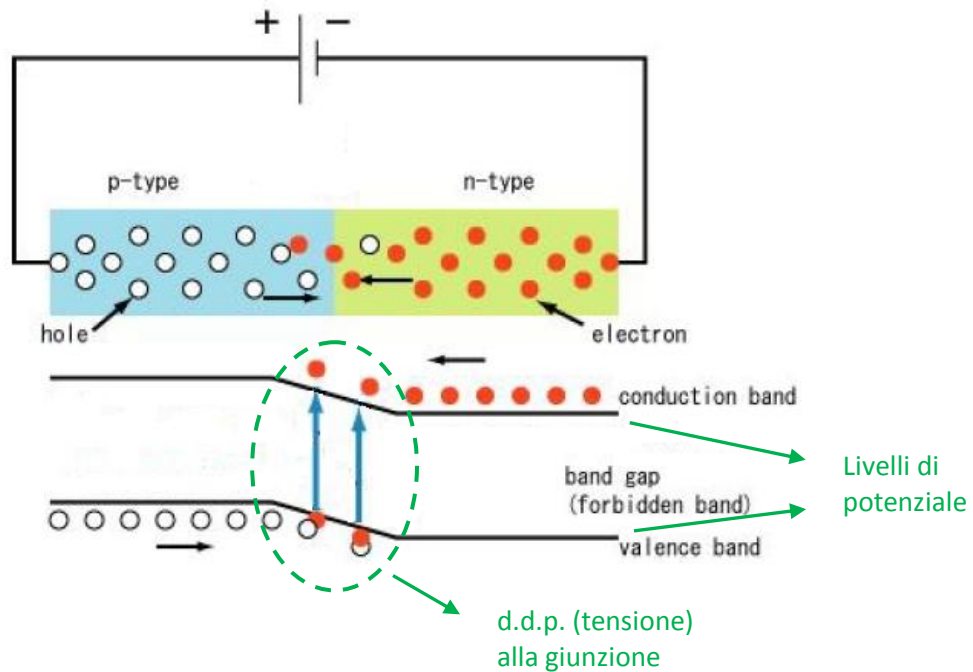


Fig. 10 – Giunzione PN polarizzata direttamente (*hole*=cariche positive, *electron*=cariche negative)

Nelle applicazioni pratiche occorre convertire l'intensità di corrente generata in tensione, per adattare il segnale alle specifiche dei convertitori A/D (analogici/digitali, che saranno oggetto di studio in seguito). Per convertire la tensione in corrente possono essere utilizzati diversi circuiti. Il più semplice è quello riportato in fig. 11, in cui è inserita una resistenza da  $10\text{ k}\Omega$ .

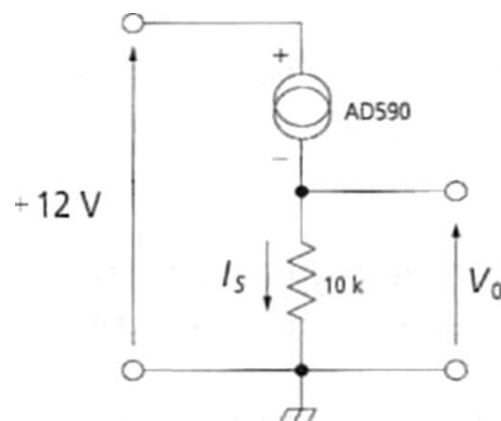


Fig. 11 – Semplice circuito di conversione corrente/tensione per un AD 590



Con questo circuito la misura è influenzata dalla presenza dello strumento di misura all'uscita (che potrebbe assorbire corrente, creando un errore di misura) e inoltre presenta una tensione d'uscita a 0 °C non nulla (offset non nullo).

Per fare in modo che l'errore dovuto all'inserimento dello strumento di misura e l'offset siano nulli, si utilizza il circuito riportato in fig. 12, con le resistenze opportunamente tarate. Se l'amplificatore operazionale è ideale (corrente d'ingresso e tensione d'ingresso nulle) allora anche l'ingresso invertente è collegato virtualmente a massa.

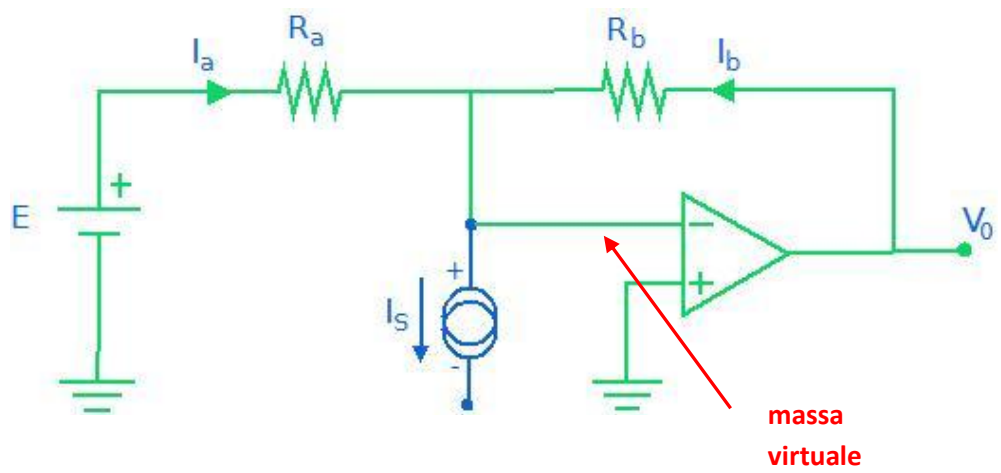


Fig. 12 - Circuito di conversione corrente/tensione per un AD 590