

### Sensori di temperatura integrati

La moderna tecnologia dei circuiti integrati ha determinato già da qualche anno l'immissione sul mercato di trasduttori, finalizzati alla misura delle più diverse grandezze fisiche, che incorporano, oltre il sensore vero e proprio, circuiterie più o meno consistenti per l'amplificazione del segnale del sensore, la sua normalizzazione e la sua linearizzazione. I sensori integrati di temperatura sono tra i più diffusi di questa relativamente recente generazione di trasduttori; ne analizzeremo qui alcuni tipi, scelti al solito per la loro facile reperibilità, economicità e semplicità d'uso.

#### *Analog Devices AD590*

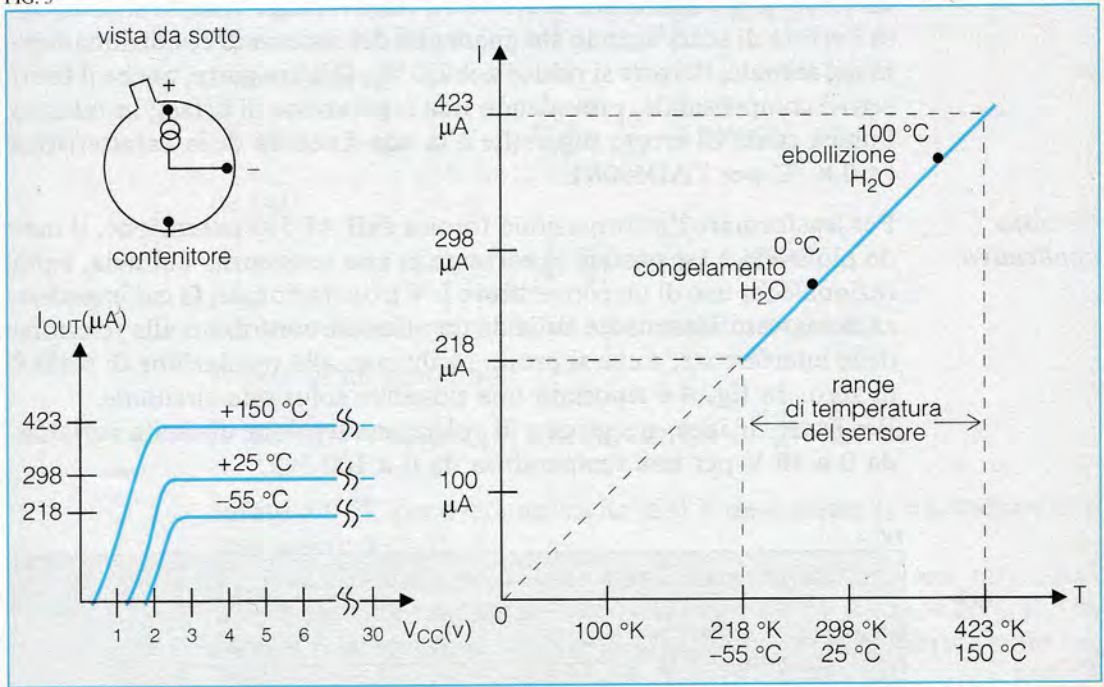
*È un  
generatore  
di corrente*

Funzionalmente è un bipolo che si comporta come un generatore di corrente ad alta impedenza; la corrente generata è proporzionale alla temperatura assoluta:

$$I = k \cdot T \quad (T \text{ in } ^\circ\text{K})$$

con la costante di proporzionalità  $k$  che ha il valore nominale di  $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$ : la corrente in  $\mu\text{A}$  coincide numericamente, entro i limiti di errore, con la temperatura in gradi kelvin (fig. 3).

FIG. 3



Il principio fisico utilizzato è sostanzialmente la dipendenza dalla temperatura della  $V_{BE}$  nei transistori a giunzione; il range utile va da  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $218\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) a  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $423\text{ }^{\circ}\text{K}$ ), con una tensione di alimentazione ai capi del bipolo fra 4 e 30 V indifferentemente.

#### Utilità del funzionamento in corrente

Il funzionamento in corrente presenta il vantaggio di rendere il sistema di misura insensibile a cadute di tensione; permette pertanto di porre il sensore molto lontano dall'apparato di misura. Inoltre, sempre per l'intrinseca insensibilità a variazioni di tensione, la *reiezione* ai disturbi è molto elevata.

Poiché il sensore ha una massa molto ridotta, la sua velocità di risposta è piuttosto alta: le versioni in contenitore metallico TO-52 (secondo suffisso H) hanno una costante di tempo termica in aria ferma di circa 60 s (la costante termica è il tempo impiegato per adeguarsi a circa il 63% del salto di temperatura ambientale — vedere vol. 2°, app. 2 —: a circa 3 costanti di tempo l'equilibrio termico è praticamente raggiunto); questo valore scende di molto in aria in movimento, e ancor più se il sensore deve misurare la temperatura di un corpo solido con cui è mantenuto in contatto.

L'AD590 è disponibile in varie versioni, distinte da un primo suffisso I/J/K/L/M, che si differenziano per precisione (e per prezzo). Le principali cause di imprecisione sono un errore di scala (il valore di  $k$  differisce dal valore nominale  $1\text{ }\mu\text{A}/^{\circ}\text{K}$ ) e un errore di offset (la caratteristica  $I/T$  non passa esattamente per  $0$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ ). Ad esempio l'AD590K ha

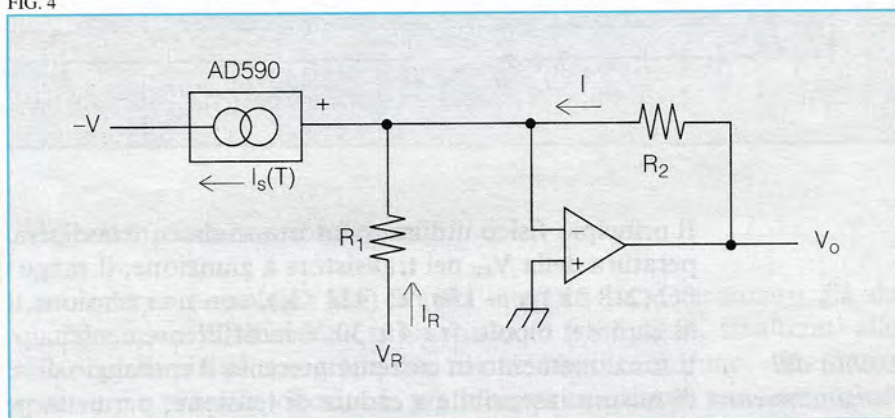
un errore non calibrato di  $\pm 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$  su tutto il range utile; se si compensa l'errore di scala agendo sul guadagno del sistema di condizionamento del segnale, l'errore si riduce a  $\pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . D'altra parte, anche il fuori zero è compensabile, prevedendo una regolazione di offset; in tal caso l'unica causa di errore superstite è la non-linearità della caratteristica ( $\pm 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  per l'AD590K).

### Circuito applicativo

Per trasformare l'informazione fornita dall'AD590 in tensione, il modo più ovvio è far passare la corrente in una resistenza. Tuttavia, è più razionale far uso di un convertitore I/V a operazionale, la cui impedenza di ingresso idealmente nulla dà un ulteriore contributo alla reiezione delle interferenze, e che si presta facilmente alla regolazione di scala e di zero. In fig. 4 è riportata una possibile soluzione circuitale.

Per fissare le idee, si suppone di volere una tensione di uscita variabile da 0 a 10 V per una temperatura da 0 a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

FIG. 4



Per avere uscita 0 a  $273 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) si deve *togliere* una corrente  $I_R$  di  $273 \mu\text{A}$  nominali dalla corrente  $I_S(T)$  generata dal sensore. La differenza fra le due correnti si ottiene semplicemente facendole convergere con versi opposti nel nodo di ingresso invertente dell'operazionale. Nell'ipotesi di un operazionale ideale in retroazione negativa, l'ingresso invertente è a massa virtuale e non assorbe corrente; pertanto, con riferimento alla figura 4:

$$I = I_S(T) - I_R, \quad I = \frac{V_o}{R_2}, \quad I_R = \frac{V_R}{R_1}$$

da cui:

$$\frac{V_o}{R_2} = I_S(T) - \frac{V_R}{R_1} \Rightarrow V_o = R_2 \cdot \left[ I_S(T) - \frac{V_R}{R_1} \right] \quad (3)$$

d'altra parte:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta T} = R_2 \cdot \frac{\Delta I_s(T)}{\Delta T} = R_2 \cdot k$$

e deve essere:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta T} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ V/}^\circ\text{C}$$

da cui:

$$R_2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta T} = \frac{0,1}{10^{-6}} = 100 \text{ k}\Omega$$

(va bene 82 k $\Omega$  + trimmer 50 k $\Omega$  multigiri in cermet).

A zero gradi centigradi:

$$I_s (0 \text{ }^\circ\text{C}) \equiv I (273 \text{ }^\circ\text{K}) = 273 \text{ }\mu\text{A} \Rightarrow \frac{V_R}{R_1} = 273 \text{ }\mu\text{A}$$

Infatti a 0  $^\circ\text{C}$  per avere un'uscita di 0 V deve essere  $I_s = I_R$  (notare che deve essere  $V_R > 0$ ).

$V_R$  deve essere rigorosamente stabilizzata, infatti una sua variazione  $\Delta V_R$  determina una variazione della corrente in  $R_1$   $\Delta I_R = \Delta V_R / R_1$ ; in termini relativi:  $\Delta I_R / I_R = \Delta V_R / V_R$ . Poiché  $I_R = k \cdot 273$ , l'errore sullo zero di temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) è dato da:

$$\frac{k \cdot \Delta T_o}{k \cdot 273} = \frac{\Delta V_R}{V_R} \Rightarrow \Delta T_o = \frac{\Delta V_R}{V_R} \cdot 273$$

A titolo d'esempio, se  $\Delta V_R / V_R = \pm 1\% = \pm 0,01$  l'errore di temperatura è  $\Delta T_o = \pm 2,73 \text{ }^\circ\text{K} = \pm 2,73 \text{ }^\circ\text{C}$ , che è evidentemente inaccettabile, essendo ben al di sotto della precisione intrinseca del sensore.

Per stabilizzare  $V_R$  useremo allora uno stabilizzatore integrato di bassa potenza 78L05, che fornisce una tensione nominale di 5V.

Deve allora essere:

$$R_1 = \frac{V_R}{I_s (273 \text{ }^\circ\text{K})} = \frac{5}{273 \cdot 10^{-6}} \approx 18,3 \text{ k}\Omega$$

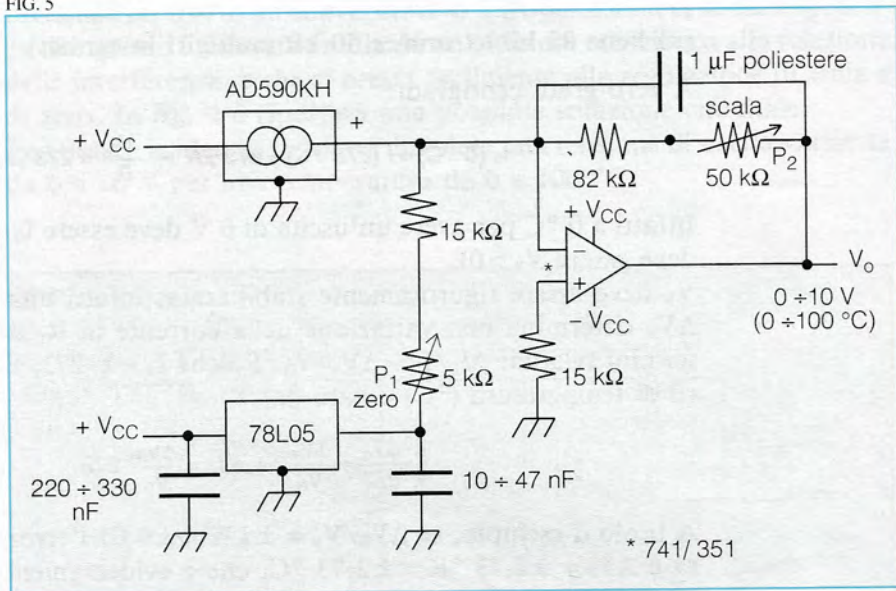
(15 k $\Omega$  + trimmer 5 k $\Omega$  multigiri in cermet).

La tensione negativa  $-V$  coincide, a causa della massa virtuale, con quella di alimentazione del sensore. Può come si è visto essere compresa fra  $-4 \text{ V}$  e  $-30 \text{ V}$ , e non richiede di essere stabilizzata; è conveniente derivarla dall'alimentazione dell'operazionale ( $\pm 15 \text{ V}$ , per permettere con sicurezza lo swing di uscita richiesto). Lo schema definitivo sarà quindi quello di fig. 5.

Il condensatore di retroazione è stato aggiunto per dare al sistema una caratteristica passa basso con taglio a  $\approx 1,5 \text{ Hz}$  (verifica lasciata al lettore), per evitare interferenze, specie dalla rete elettrica. Per la taratura, se non si dispone di un termometro campione, si può portare la sonda (opportunamente isolata!) a contatto con una mistura di acqua e

ghiaccio fondente (0 °C) e tarare lo zero con P<sub>1</sub>; poi metterla in acqua bollente (100 °C) e regolare P<sub>2</sub> per il fondo scala.  
 Un esercizio interessante sarebbe calcolare l'errore introdotto dalle variazioni con la temperatura di V<sub>R</sub>, nonché dei parametri di offset V<sub>OS</sub> e I<sub>OS</sub> dell'operazionale.  
 Per ulteriori informazioni sull'AD590 si consultino i data sheets (pag. 78).

FIG. 5



National LM34/LM35

**Hanno l'uscita in tensione**

È una famiglia di sensori integrati di precisione, con uscita in tensione, racchiusi in contenitori tipo transistor di piccola potenza a 3 terminali; forniscono un segnale del tipo:

$$V = k \cdot T$$

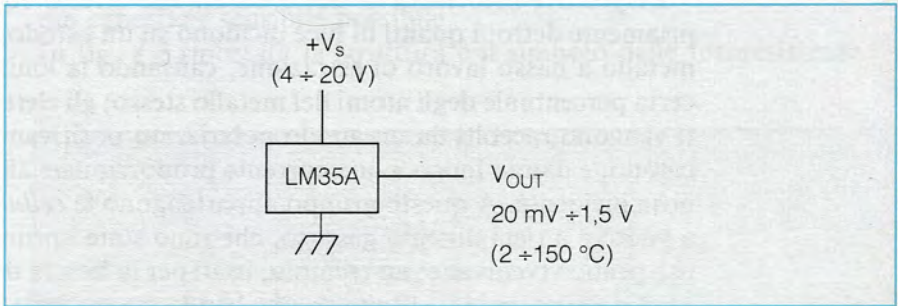
dove il significato di T e il valore di k dipendono dal tipo:

T	k	tipo
temperatura in gradi Fahrenheit (°F)	10 mV/°F	LM34
temperatura in gradi Celsius (°C)	10 mV/°C	LM35

Ciascun tipo è disponibile in diverse versioni, che si distinguono per range utile di temperatura e precisione.

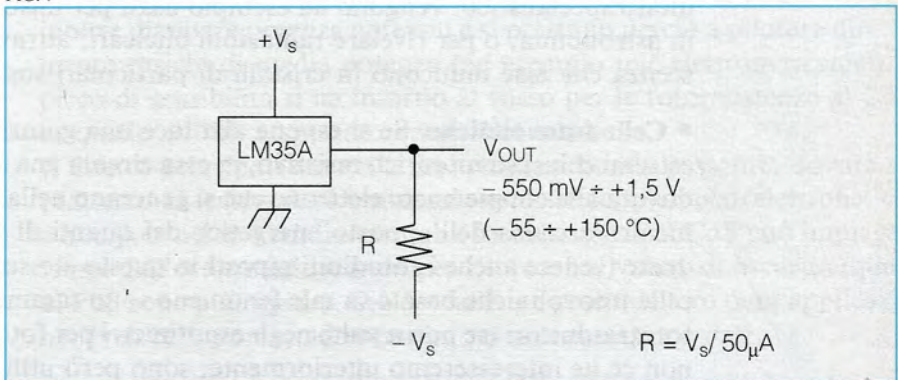
A titolo d'esempio, consideriamo il sensore in scala °C LM35A: il range di temperatura va da  $-55\text{ °C}$  a  $+150\text{ °C}$ , con una precisione non calibrata di  $\pm 1\text{ °C}$  (molto elevata!). Per misure nella porzione non negativa del range, la disposizione base è molto semplice ed è riportata in fig. 6.

FIG. 6



Per sfruttare completamente il range utile, ed avere quindi anche uscite negative, è sufficiente collegare al terminale di uscita una resistenza di pull-down verso un'alimentazione negativa come in fig. 7.

FIG. 7



Queste due disposizioni valgono per tutti i tipi della famiglia; per i particolari vedere data sheets e relative application notes (pag. 72).

La National produce anche dei sensori con uscita in tensione proporzionale alla temperatura assoluta in °K (LM135/235/335, funzionalmente equivalenti a diodi zener la cui  $V_z$  cresce linearmente con T a una pendenza di  $10\text{ mV}/\text{°K}$ .

Questi sensori sono anche dotati di un terminale ausiliario di calibrazione.