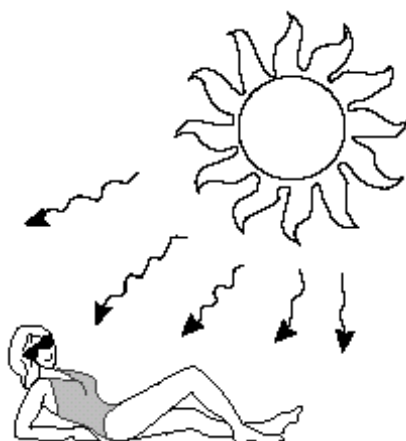


Appunti del corso di Sistemi Elettronici  
Anno scolastico 2016 / 2017  
Classe 5 – B  
Autore Prof. Aniello Celentano

## I Sensori di temperatura

RTD  
KTY Philips  
TD  
AD590  
LM35  
Termistori  
Termocoppie



## I sensori

I sensori sono dispositivi capaci di essere “sensibili” ad una grandezza fisica e di produrre in uscita una grandezza fisica o elettrica senza l’ausilio di fonti di energia esterne.

Ad esempio, si pensi al mercurio in un termometro: il mercurio (elemento costituente il sensore) risente della temperatura producendo un aumento di volume proporzionale alla temperatura rilevata.

Un igrometro a capello (rilevatore di umidità relativa) è costituito da un ciuffetto di capelli ancorati ad una molla.

Per la proprietà dei capelli che si allungano o si accorciano a secondo del grado di umidità, un opportuno sistema di molle permette di trasformare il grado di umidità in uno spostamento proporzionale all’umidità stessa. In definitiva

possiamo dire che il sensore trasforma una grandezza fisica (temperature, umidità . . .) in un’altra grandezza fisica (volume, spostamento. . .) che a sua volta dovrà essere manipolata per poter essere utilizzata elettricamente.



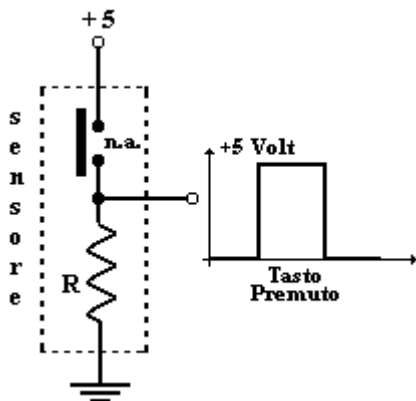
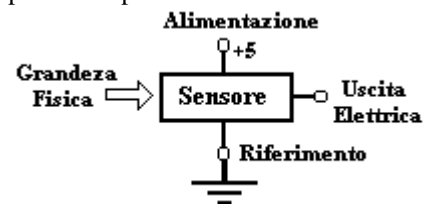
## I trasduttori

Il sensore è un dispositivo in grado di rilevare una data grandezza fisica e di convertirla in un’altra grandezza fisica che risulti più semplice da manipolare e utilizzare per ottenere l’indicazione della grandezza fisica rilevata. Consideriamo come grandezza fisica la temperatura. In generale un sensore di temperatura non fornisce una grandezza elettrica che sia legata alla temperatura rilevata. Occorre far seguire al sensore un dispositivo detto *trasduttore* capace di trasformare la grandezza fisica generata dal sensore di temperatura in un segnale elettrico. Il trasduttore, pertanto, provvede a trasformare una grandezza fisica in una grandezza elettrica assorbendo energia da una batteria esterna al trasduttore stesso.



## Sensori e trasduttori come elemento unico

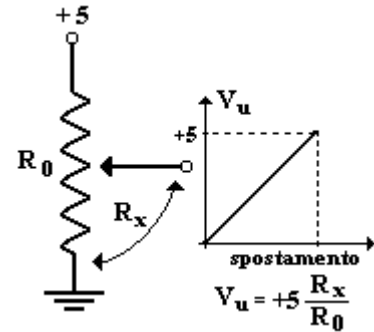
Anche se i sensori ed i trasduttori sono elementi concettualmente diversi, nella pratica li ritroviamo all’interno di uno stesso contenitore o dispositivo. In questo modo nel linguaggio corrente possiamo parlare di un sensore o di un trasduttore indifferentemente, volendo intendere un sistema costituito da un elemento sensibile (sensore) e di un relativo circuito di trasformazione in una grandezza elettrica. Parleremo di un sensore come di un elemento “sensibile” ad una grandezza fisica e che produce in uscita una grandezza elettrica, tensione o corrente se alimentato opportunamente. Si osservi lo schema riportato qui a fianco.



Come esempio, si consideri il sensore raffigurato qui a lato: un interruttore normalmente aperto (n.a.) con una resistenza in serie ed alimentato con un generatore di tensione di + 5 Volt. In questo caso il sensore (il tasto) è “sensibile” alla pressione del dito della mano. Se incapsuliamo la resistenza R all’interno stesso contenitore contenente l’interruttore allora tutto l’insieme Tasto+Resistenza costituisce un sensore sensibile alla pressione del dito della mano. Quando il sensore rileva la pressione del dito genera un impulso di tensione di +5 Volt.

## Classificazione dei sensori

I sensori si classificano in base alla grandezza fisica che devono rilevare. Abbiamo sensori di temperatura, umidità, pressione, gas, luminosità ecc. ecc. Poiché i sensori sono sempre accompagnati da un trasduttore, possiamo classificare i sensori in base al trasduttore che li accompagna. Esistono due tipi di trasduttori: **attivi** e **passivi**. I trasduttori attivi forniscono direttamente in uscita una grandezza elettrica. E' il caso delle *termocoppie* e delle celle *fotovoltaiche* che senza ausilio di batterie generano una tensione in uscita proporzionale alla temperatura rilevata. I trasduttori passivi richiedono una alimentazione esterna per poter fornire in uscita la grandezza elettrica. Si pensi, ad esempio, ad un potenziometro che se opportunamente alimentato la rotazione del cursore genera un segnale elettrico proporzionale alla rotazione del cursore. Si osservi lo schema riportato a lato.

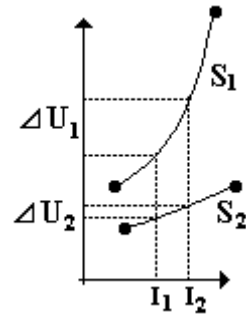


## Parametri principali dei trasduttori

Il parametro più importante dei trasduttori è la **caratteristica di trasferimento**, ossia la relazione matematica che esiste tra grandezza fisica di ingresso e la grandezza elettrica fornita in uscita. La rappresentazione grafica di questa caratteristica può essere di diverso tipo. Una retta indica che esiste una proporzionalità tra la grandezza fisica di ingresso e la grandezza elettrica disponibile in uscita. L'inclinazione di tale retta indica una dipendenza crescente o decrescente. Generalmente la caratteristica di trasferimento non è una retta ma, bensì, una curva, spesso un arco di un'iperbole o un andamento di tipo esponenziale (tipo  $e^x$ ).

Un secondo parametro importante dei trasduttori è il **range di funzionamento**: l'intervallo dei valori che può assumere la grandezza fisica per i quali il costruttore garantisce la validità della caratteristica di trasferimento.

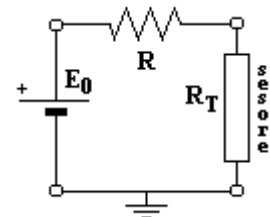
Non tutti i trasduttori sono ugualmente sensibili. La **sensibilità** è la capacità di fornire un'uscita tanto più grande quanto più è piccola la sollecitazione di ingresso. Osserviamo le caratteristiche di uscita dei due sensori  $S_1$  ed  $S_2$  riportate qui a lato. A parità di variazione di sollecitazione di ingresso, ossia  $\Delta I = I_2 - I_1$ , il sensore  $S_1$  presenta una sensibilità maggiore. Infatti  $\Delta U_1 > \Delta U_2$



## Linearizzazione della caratteristica di trasferimento

In genere la caratteristica di trasferimento dei trasduttori non è lineare. Per i trasduttori a variazione di resistenza, ossia quella classe di trasduttori che presentano un'uscita in funzione di una resistenza variabile, è possibile linearizzare la caratteristica. In altre parole, si può fare in modo che nell'intervallo dei valori di applicazione l'uscita del trasduttore è lineare.

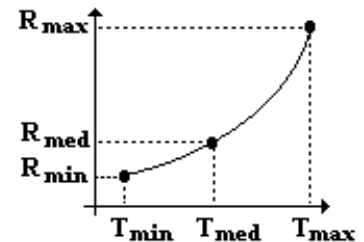
Per fissare le idee si pensi ad una termoresistenza  $R_T$  la caratteristica di trasferimento del sensore è riportata di qui di seguito. Si osservi lo schema elettrico riportato qui a lato in cui un generatore di tensione alimenta il sensore  $R_T$  tramite la resistenza  $R$ . Questa resistenza, in serie alla resistenza  $R_T$  del sensore permette di linearizzare la caratteristica d'uscita del sensore stesso, ossia di ottenere un'uscita che sia proporzionale alla temperatura rilevata, minimizzando l'effetto della non linearità del sensore. Vediamo come calcolare il valore della resistenza  $R$ .



L'obiettivo è quello di linearizzare la caratteristica di uscita nell'intervallo di temperatura  $[T_{min}, T_{max}]$  in cui la resistenza del sensore assume i valori  $[R_{min}, R_{max}]$ .

Calcolando la resistenza media  $R_{med}$  alla temperatura media  $T_{med}$  si determinano i valori  $(R_{med} - R_{min})$  e  $(R_{max} - R_{med})$ . Imponendo che queste variazioni  $\Delta R$  siano uguali tra loro si determina un'equazione di primo grado in cui l'incognita è  $R$ . Risolvendo questa equazione si determina il valore di  $R$ .

Calcoliamo i valori di tensione ai capi della termoresistenza nei punti  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  e nel punto  $T_{med}$ . In questi punti il valore di resistenza assunto dal sensore è  $R_{min}$ ,  $R_{max}$  ed  $R_{med}$ . La tensione d'uscita, ai capi del sensore, è:



$$V_{min} = \frac{R_{min}}{R + R_{min}} E_0 ; V_{med} = \frac{R_{med}}{R + R_{med}} E_0 ; V_{max} = \frac{R_{max}}{R + R_{max}} E_0$$

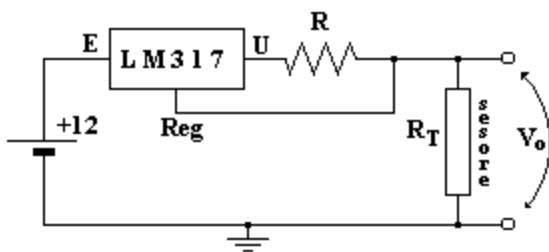
In queste tre espressioni dobbiamo determinare il valore della resistenza R di linearizzazione. Imponiamo che  $(V_{med}-V_{min}) = (V_{max}-V_{med})$  e risolviamo questa equazione rispetto all'incognita R. Il risultato è:

$$R = \frac{R_{med}(R_{min} + R_{max}) - 2R_{min}R_{max}}{R_{min} + R_{max} - 2R_{med}}$$

Chiaramente quando la caratteristica di uscita del sensore nell'ambito del range di funzionamento può essere approssimata come lineare non occorre calcolare ed inserire la resistenza di linearizzazione. Si osservi che la resistenza di linearizzazione è funzione delle resistenze  $R_{min}$ ,  $R_{med}$ , ed  $R_{max}$ , ossia dell'intervallo di temperatura in cui si è scelto di operare.

## Le termoresistenze RTD (Resistance Temperature Detector)

Le termoresistenze RTD sono dei sensori di temperatura che presentano una caratteristica di trasferimento molto lineare in un ampio intervallo di valori di temperatura. Generalmente la caratteristica di trasferimento può essere espressa dalla relazione  $R_T = R_0(1+\alpha T)$  dove  $R_0$  è il valore assunto dal sensore alla temperatura di riferimento di 0°C, ed  $\alpha$  è un coefficiente caratteristico del sensore. E' del tutto evidente che per questi sensori non si richiede la linearizzazione: la caratteristica di trasferimento è una retta.



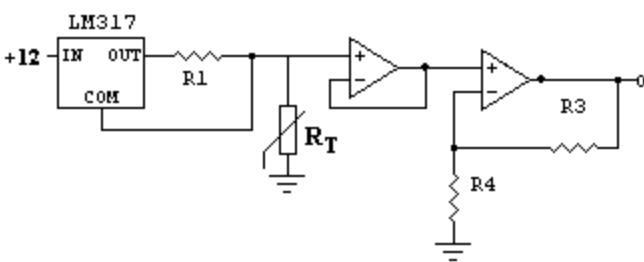
Valori tipici  $R_0$  ed  $\alpha$  sono 100  $\Omega$  a 0°C per  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}$ . Vediamo alcuni circuiti per il controllo di queste termoresistenze. Il circuito proposto qui a fianco permette di controllare il sensore con una corrente costante. Infatti lo stabilizzatore LM317 ha il terminale di regolazione Reg collegato ai capi della resistenza R per cui la tensione ai capi della resistenza R è 1,2 Volt. La corrente che passa nel sensore è  $I = 1,2/R$  dipendente dal valore di R. Fissiamo R in modo che la corrente sia  $I = 1$  mA. Vediamo quali valori assume l'uscita se la temperatura varia tra 30°C e 75°C.

Sulla base della legge di variazione della resistenza si ha:

$$V_0(30^\circ\text{C}) = 100 \cdot (1 + 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot 30) \cdot 1 \text{ mA} = 0,115 \text{ Volt}$$

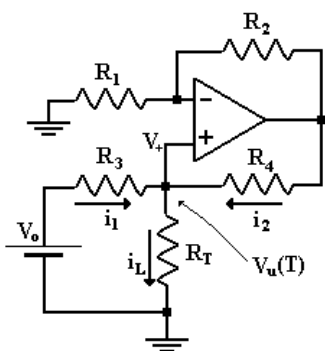
$$V_0(75^\circ\text{C}) = 100 \cdot (1 + 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot 75) \cdot 1 \text{ mA} = 0,129 \text{ Volt}$$

I valori assunti dall'uscita possono essere ulteriormente amplificati per poter eseguire un qualunque controllo su di essi. Per esempio si può fare in modo che il valore a 75°C assuma il valore di 5 Volt semplicemente facendo seguire un amplificatore non invertente che amplifica circa  $V_0/V_i = 5/0,129 = 38$  volte. Si osservi lo schema riportato qui a lato.



Uno stabilizzatore LM317 in configurazione di generatore di corrente costante alimenta una termoresistenza  $R_T$ . La tensione ai capi della termoresistenza viene inviata ad un amplificatore non invertente (secondo operazionale) tramite un adattatore di impedenza (primo operazionale). Scegliendo le resistenze  $R_3 = 37 \text{ K}\Omega$  ed  $R_4 = 1 \text{ K}\Omega$  si ha un guadagno di circa 38 volte. Quindi, quando la termoresistenza rileva una temperatura di 75°C si ha un'uscita di circa 5 Volt.

Un altro semplice circuito che permette di generare una corrente costante con cui alimentare il sensore di temperatura è il seguente. Dimostriamo che la corrente  $i_L$  che circola nel sensore è indipendente dalla resistenza del sensore e dipende dal rapporto delle resistenze  $R_1/R_2$  ed  $R_3/R_4$ .



Osserviamo che rispetto a  $V_+$  il circuito è un amplificatore non invertente, per cui possiamo scrivere:

$$V_{op} = (1 + R_2/R_1) \cdot V_+ \quad (\text{Guadagno amplificatore})$$

$$i_1 = (V_o - V_+)/R_3$$

$$i_2 = (V_{op} - V_+)/R_4$$

$$i_L = i_1 + i_2 = V_o/R_3 - V_+/R_3 + V_{op}/R_4 - V_+/R_4$$

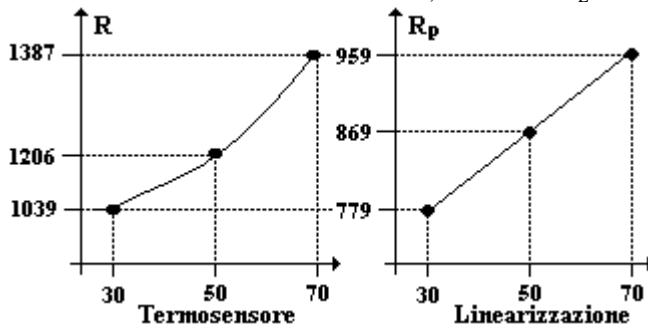
In quest'ultima espressione, sostituendo ad  $V_{op}$  l'espressione trovata, si giunge alla condizione che se vale  $R_2/R_1 = R_4/R_3$  la corrente  $i_L$  dipende solo dal rapporto  $V_o/R_3$ , ossia è costante.

## I termosensibili KTY della Philips

Un altro tipo di sensore di temperatura è il KTY della Philips, tipo il KTY82-250 (si consulti la pagina web [www.Semiconductors.Philips.Com](http://www.Semiconductors.Philips.Com)). Questo termosensibile permette di avere una *variazione di resistenza* in funzione della temperatura, in un ampio range di valori (-55°C / 180°C).

La caratteristica di trasferimento in genere viene fornita o tramite tabella di valori oppure come una relazione analitica che ne approssima la caratteristica. In genere per questo sensore l'espressione  $R_T = R_0 [ 1 + a (T - T_a) + b (T^2 - T_a^2) ]$  fornisce con buona approssimazione la caratteristica di trasferimento. I coefficienti a e b sono caratteristici del sensore e generalmente valgono  $a = 0,7635 \cdot 10^{-2}$  e  $b = 1,731 \cdot 10^{-5}$ , mentre  $R_0 = 1000 \Omega$  e  $T_a = 25^\circ\text{C}$ .

La caratteristica di trasferimento non è di tipo lineare per cui è necessario calcolare la resistenza di linearizzazione. Supponiamo di voler linearizzare la caratteristica in un range di valore tra 30°C e 70°C. Calcoliamo le resistenze alle temperature  $T_{30}$ ,  $T_{50}$  e  $T_{70}$  che sono, rispettivamente, la temperatura minima, media e massima. In queste temperature i valori assunti dalla resistenza del termosensibile sono  $R_{30} = 1039 \Omega$ ,  $R_{50} = 1206 \Omega$ ,  $R_{70} = 1387 \Omega$ . Calcoliamo, quindi, il valore assunto dalla resistenza di linearizzazione, che risulta  $R_L = 3114 \Omega$ . Calcoliamo adesso la resistenza equivalente parallelo



che si ottiene mettendo la resistenza  $R_L$  in parallelo al termosensibile. Si può facilmente calcolare  $R_{P30} = 779 \Omega$ ,  $R_{P50} = 869 \Omega$ ,  $R_{P70} = 959 \Omega$ . È facile vedere che  $R_{P50} - R_{P30} = R_{P70} - R_{P50}$  che indica una maggiore linearizzazione rispetto ai valori calcolati in precedenza. La situazione descritta appare chiara dai due grafici riportati qui a lato. Nel primo grafico sono riportati i valori forniti dal termosensibile, mentre nel grafico a fianco sono riportati i valori che si ottengono mettendo la resistenza di linearizzazione in parallelo al termosensibile.

**Si consiglia lo studente di eseguire il seguente esercizio.**

Si realizzi una procedura in Basic affinché, fornendo due valori di temperatura T-Min e T-Max, la procedura permetta di calcolare le resistenze del sensore alle temperature date, ossia R-Minima, R-Media ed R-Massima. Inoltre la procedura deve fornire il valore della resistenza di linearizzazione e calcolare l'indice di linearizzazione

$$\alpha = (R_{\text{med}} - R_{\text{min}}) / (R_{\text{max}} - R_{\text{med}}) * 100 \%$$

Calcolato, quindi, il valore R-Lin, ossia il valore della resistenza di linearizzazione, la procedura deve calcolare i valori dei paralleli delle due resistenze, R-Lin e la resistenze del sensore, alle temperature indicate e calcolare l'indice di linearizzazione.

Vedere cosa succede all'indice di linearizzazione quando, di volta in volta, si allarga il range dei valori delle temperature [T-Min, T-Max]. Si realizzi sempre prima il flowchart della procedura.

Qui di seguito viene riportato la procedura richiesta.

```

a = 7.635 * 10 ^ -3 'Primo coefficiente per il calcolo di R(T)
b = 1.731 * 10 ^ -5 'Secondo coefficiente per il calcolo di R(T)
R0 = 1000          'Valore della resistenza in Ohm a 25 °C
Ta = 25           'Valore della temperatura ambiente

PRINT "Calcolo della resistenza di linearizzazione del sensore KTY della Philips"

INPUT "Valore della T-minima = ", Tmin
INPUT "Valore della T-massima = ", Tmax

'Calcola R
Tmed = (Tmin + Tmax) / 2
Rmin = R0 * (1 + a * (Tmin - Ta) + b * (Tmin ^ 2 - Ta ^ 2))
Rmed = R0 * (1 + a * (Tmed - Ta) + b * (Tmed ^ 2 - Ta ^ 2))
Rmax = R0 * (1 + a * (Tmax - Ta) + b * (Tmax ^ 2 - Ta ^ 2))

'Calcola Rlin
Rlin = (Rmed * (Rmin + Rmax) - 2 * Rmin * Rmax) / (Rmin + Rmax - 2 * Rmed)

'Calcola i paralleli
Rpmin = (1 / Rlin + 1 / Rmin) ^ (-1)
Rpmed = (1 / Rlin + 1 / Rmed) ^ (-1)
Rpmax = (1 / Rlin + 1 / Rmax) ^ (-1)

PRINT "*** Parametri ***"

PRINT "a = ", a
    
```

```

PRINT "b = ", b
PRINT "Ro = ", R0
PRINT "Ta = ", Ta

PRINT "T Minima = ", Tmin
PRINT "T Media = ", Tmed
PRINT "T Massima = ", Tmax

PRINT "R Minima = ", Rmin
PRINT "R Media = ", Rmed
PRINT "R Massima = ", Rmax
PRINT "R Lineariz. = ", Rlin
PRINT "Indice di linearizzazione ", (Rmed - Rmin) / (Rmax - Rmed) * 100, " %"

PRINT "Rp Minima = ", Rpmin      'Resistenza parallelo Rmin-R(T)
PRINT "Rp Media = ", Rpmed
PRINT "Rp Massima = ", Rpmax

PRINT "Indice di linearizzazione ", (Rpmed - Rpmin) / (Rpmax - Rpmed) * 100, " %"

END
    
```

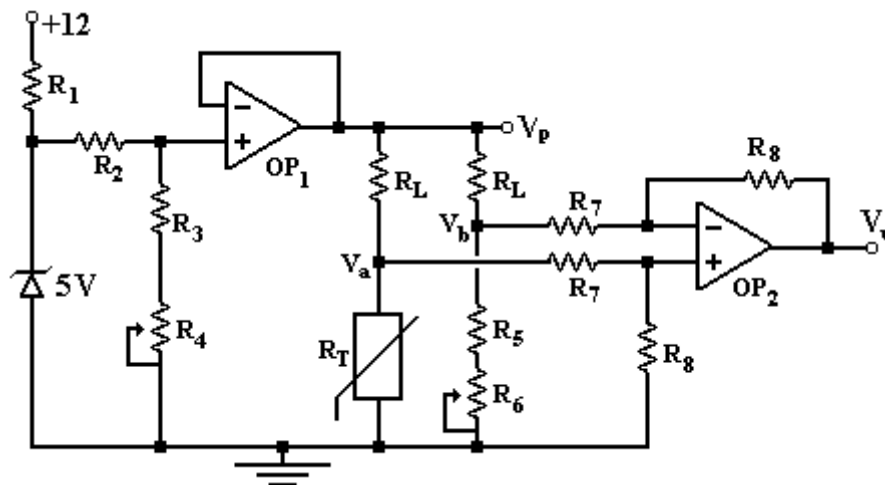
Una tipica applicazione dei sensori KTY della Philips è quella in cui il sensore è usato all'interno di un ponte di Wheatstone bilanciato. Si osservi il circuito riportato di seguito che permette di avere un controllo della temperatura tra 30°C e 70°C. Il circuito è progettato affinché a 70 °C si ha un'uscita di +5 Volt.

Concettualmente il circuito può essere diviso in tre blocchi:

- Un blocco che permette di ottenere una tensione di riferimento  $V_p$  per alimentare il ponte. Questo blocco è costituito dal diodo Zener, dal partitore  $R_2$ - $R_3$ - $R_4$  e dall'adattatore di impedenza costituito dal primo operazionale.
- Il secondo blocco è costituito dal ponte  $R_L$ - $R_T$ - $R_5$ - $R_6$  in cui  $R_T$  è l'elemento termosensibile ed  $R_L$  è la resistenza di linearizzazione.
- Il terzo blocco è costituito dall'amplificatore operazionale in configurazione differenziale in cui l'uscita è  $V_u = (V_+ - V_-) \cdot R_8 / R_7$ .

Il primo blocco deve essere configurato in modo che la tensione  $V_p$  del ponte deve erogare una corrente di 1 mA per evitare fenomeni di autoriscaldamento del termosensore. Poiché nel ramo  $R_L$ - $R_T$  deve passare 1 mA, e poiché  $R_L$  è la resistenza di linearizzazione del sensore, calcolando la resistenza totale  $R_T + R_L$  e moltiplicata per 1 mA otteniamo la tensione  $V_p$  che deve alimentare il ponte. Facendo un discorso a ritroso, si dimensionano le resistenze  $R_2$ - $R_3$ - $R_4$ . La resistenza  $R_1$  si osservi che è di polarizzazione dello Zener. Il blocco C) deve essere configurato affinché l'uscita sia la tensione che occorre per un dato scopo (Blocco di condizionamento).

Riprendiamo l'esempio del controllo tra 30-70°C. Determiniamo la tensione  $V_p$ . Nel ramo  $R_L$ - $R_T$  deve passare 1 mA, per cui  $V_p = (3100 + 1000) \cdot 10^{-3} = 4,1$  volt. Regolando il trimmer  $R_6$  si deve fare in modo che il ponte sia bilanciato, ossia  $V_a = V_b$ . Avendo determinato in precedenza le resistenze  $R_{30} = 1000 \Omega$  e  $R_{70} = 3100 \Omega$ , si ha  $V_b = 0,1$  volt (sempre!) mentre  $V_a = 0,1$  volt a 30°C e  $V_a = 1,2$  volt a 70°C. In questo modo l'amplificatore differenziale deve amplificare:  $V_u / V_i = 5 / (1,2 - 0,1) = R_8 / R_7 = 4,5$ . Pertanto può essere scelto una  $R_8 = 4500 \Omega$  ed una  $R_7 = 1000 \Omega$ .



## Sensori TD

Questo tipo di sensore termico è costituito da un substrato di silicio sul quale vengono fatti depositare vapori di Ferro-Nichel. La caratteristica di trasferimento è espressa dalla relazione:

$$R_T = R_0(1 + aT + bT^2)$$

In questa relazione i coefficienti a e b sono rispettivamente  $a=3,83 \cdot 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$  e  $b=4,64 \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C}^2)$ . La costante  $R_0$  è il valore alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  ed  $R_T$  è la resistenza del sensore alla generica temperatura T espressa in  $^\circ\text{C}$ . Questo tipo di sensore può lavorare in un ampio range di valori, del tipo  $-40^\circ\text{C}$  a  $150^\circ\text{C}$ . Tutti gli schemi elettrici proposti in precedenza possono essere utilizzati con questo sensore. Rispetto ai sensori RTD hanno una variazione di resistenza molto più ampia.

*(Suggerimento per lo studente. Si provi a realizzare una procedura in Basic che permetta di ricavare la resistenza  $R_T$  fornendo il valore della temperatura T espressa in  $^\circ\text{C}$ )*

## I Termistori

Il termine Termistore deriva dall'inglese Thermistor che è un acronimo di **Thermally-Sensitive-Resistor**. Sono sensori di temperatura permettono di avere una variazione di resistenza in funzione della temperatura sfruttando la tecnologia dei semiconduttori drogati. Si distinguono in NTC (Negative Temperature Coefficient) e termistori PTC (Positive Temperature Coefficient). I primi hanno un coefficiente di temperatura negativo che significa che la resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura. Al contrario, i PTC sono termistori con un coefficiente di temperatura positivo: la resistenza aumenta all'aumentare della temperatura.

La legge di variazione degli NTC è:

$$R_T = R_0 \exp\left[k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

In questa espressione  $R_0=1000 \Omega$  è la resistenza tipica alla temperatura ambiente di  $20^\circ\text{C}$ . La costante  $k=3350 \text{ }^\circ\text{K}$  è una costante dimensionale espressa in gradi Kelvin. La temperatura T è anch'essa espressa in  $^\circ\text{K}$  e la temperatura  $T_0$  è la temperatura ambiente di  $20^\circ\text{C}$ . A titolo di esempio calcoliamo il valore  $R_T$  alla temperatura di  $50^\circ\text{C}$ .

$$R_T = 1000 * \exp\left[3530 * \left(\frac{1}{273,15 + 50} - \frac{1}{273,15 + 20}\right)\right] = 1000 * \exp(-1,12) = 327 \Omega$$

Anche per questi componenti possono essere utilizzati tutti i circuiti esposti in precedenza.

## Le termocoppie

Le termocoppie sono sensori di temperatura costituiti da due metalli di composizione omogenea e di diversa natura. Se i due metalli sono uniti per un'estremità, **giunto caldo**, e questo punto è sottoposto ad una temperatura T, ai capi delle altre due estremità è presente una forza elettromotrice (f.e.m.) proporzionale alla temperatura T e rilevabile con un millivoltmetro. Se le due estremità libere sono saldate tra di loro, **giunto freddo**, allora si genera una corrente rilevabile con un microamperometro. In entrambi i casi, estremità libere o saldate, si genera una grandezza elettrica proporzionale alla differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo. Questo effetto elettrico fu scoperto del fisico tedesco Seebeck, detto appunto effetto Seebeck. I due metalli fanno capo a due fili con polarità + e – per permettere di rilevare la grandezza elettrica. Si osservi la tabella riportata qui a lato.

Le termocoppie sono codificate in base al range di temperatura in cui operano ed ai metalli che costituiscono il giunto caldo. Nella tabella la colonna P indica la polarità del metallo. Si osservi che le termocoppie lavorano in un ampio intervallo di valori di temperatura: da –200 °C a 2000 °C.

Tipo	Metalli (lega)	P	Temp. (°C)
<b>B</b>	Platinum - Rhodium 30%	+	1370 / 1700
	Platinum - Rhodium 6%	-	
<b>C</b>	Tungsten - Rhenium 5%	+	1650 / 2315
	Tungsten - Rhenium 26%	-	
<b>E</b>	Chromel	+	95 / 900
	Constantan	-	
<b>J</b>	Iron	+	95 / 760
	Constantan	-	
<b>K</b>	Chromel	+	95 / 1260
	Alumina	-	
<b>N</b>	Nicrosil	+	650 / 1260
	Nisil	-	
<b>R</b>	Platinum - Rhodium 13%	+	870 / 1450
	Platinum	-	
<b>S</b>	Platinum - Rhodium 10%	+	980 / 1450
	Platinum	-	
<b>T</b>	Copper	+	-200 / 350
	Constantan	-	

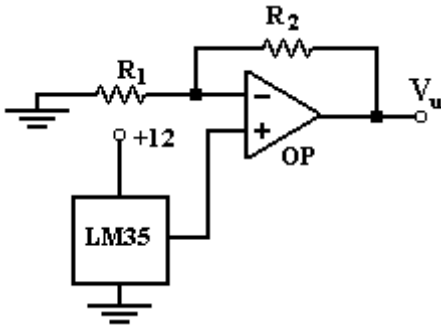


## Il trasduttore di temperatura LM35

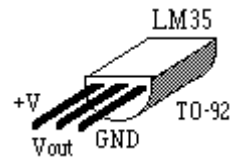
Questo integrato è un sensore di temperatura semplice da usare ed economico. Ha una risposta lineare in un ampio range di valori. Vediamo le principali caratteristiche di questo sensore.

- 1) Bassa impedenza d'uscita
- 2) Tensione di alimentazione tra 4 volt e 30 volt
- 3) Range di temperatura  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$
- 4) Uscita in tensione uguale a  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
- 5) Corrente d'uscita uguale a  $10\text{ mA}$
- 6) Tensione d'uscita tra  $-1$  e  $6\text{ volt}$

Da queste principale caratteristiche si vede che questo integrato richiede una semplice alimentazione, esempio 5 volt, e la caratteristica di uscita può essere espressa come  $V_T = 10^{-3} * T$ , con T in  $^{\circ}\text{C}$ . E' del tutto evidente che per questo integrato occorre sempre un circuito di condizionamento che porti i valori di tensione di uscita a livelli che occorrono nello specifico progetto.

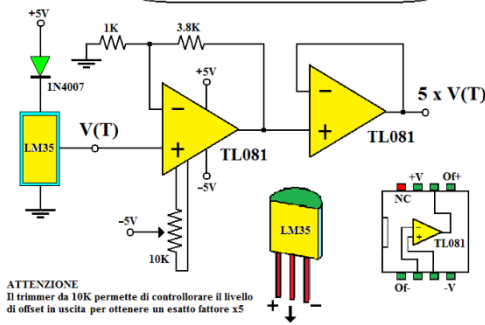


Per una analisi completa dei datasheet si consulti il sito della National ([www.National.com](http://www.National.com)) e si rintracci l'integrato LM35. Un semplice circuito di condizionamento è riportato qui a lato. Il livello di tensione in uscita dall'integrato LM35 viene amplificato di un fattore costante  $(1+R_2/R_1)$ . Si osservi che l'impedenza "vista" dal sensore è infinita (ingresso operativo), diversamente occorre un adattatore di impedenza. Qui a lato è riportato il package TO-92 del sensore LM35 con la corretta piedinatura.



### Condizionamento del segnale analogico LM35

Circuito verificato su breadboard, Aprile 2015



ATTENZIONE  
Il trimmer da 10K permette di controllare il livello di offset in uscita per ottenere un esatto fattore x5

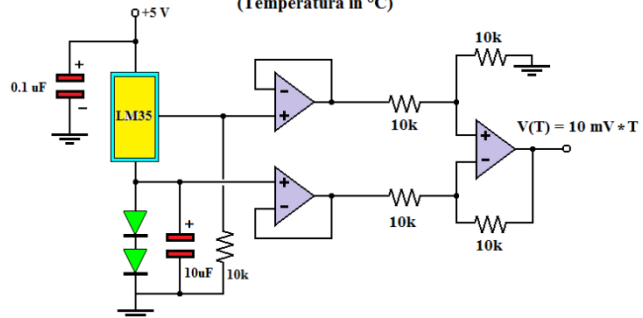
Poiché questi sensori sono molto delicati e sensibili alle inversioni di polarità, è opportuno inserire un diodo per evitare le inversioni di polarità accidentali. Lo schema che segue mostra come inserire il diodo di protezione sull'ingresso di alimentazione. Lo schema permette di condizionare il segnale dell'integrato LM35 moltiplicandone il valore x5.

Un altro schema interessante è quello che segue con il quale è possibile misurare le temperature sotto lo zero.

Per l'analisi di quest'ultimo schema si tenga presente che l'uscita del sensore LM35 è riferita al terminale che generalmente si pone a massa e che nello schema che segue è posto ai capi della serie dei due diodi

### Controllo di temperatura con LM35

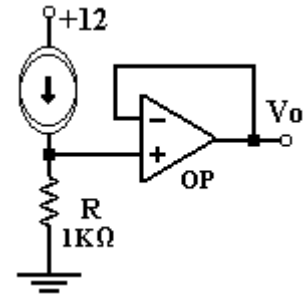
(Temperatura in  $^{\circ}\text{C}$ )



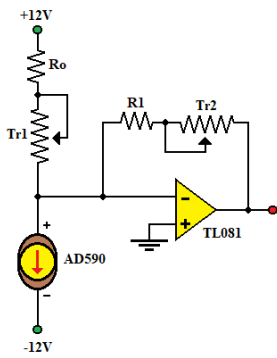
## Il trasduttore AD590

Questo trasduttore si presenta anch'esso in forma integrata a due terminali. Il trasduttore funziona in modo da fornire una **corrente proporzionale** alla temperatura espressa in °K, in particolare fornisce  $1\mu\text{A}/^\circ\text{K}$ . Qui a lato è rappresentato un tipo circuito di utilizzo. La resistenza R è una resistenza di precisione di 1000 Ohm la cui caduta di tensione è funzione della temperatura. L'adattatore di impedenza è d'obbligo per non alterare la resistenza R "vista" dal sensore. L'uscita dell'operazionale, pertanto, può essere espressa come  $V_o = 1 \text{ mV} / ^\circ\text{K} * T$ , dove T è la temperatura espressa in °K.

Ad esempio possiamo calcolare:  $V_o(T=30^\circ\text{C}) = (273,15+30) * 10^{-3} = 303,15 \text{ mV}$ .



Un altro semplice circuito che permette di utilizzare questo sensore è quello riportato nello schema che segue. Questo circuito permette di monitorare un range di temperatura  $T_1 - T_2$ . In particolar modo alla temperatura  $T_1$  vogliamo che l'uscita del circuito si porti ad un valore di soglia  $V_{s1}$  di 0 Volt e alla temperatura  $T_2$  vogliamo che il valore di soglia sia  $V_{s2}$  di 5 Volt (livelli TTL).



I due trimmer presenti nel circuito,  $T_{r1}$  e  $T_{r2}$ , permettono di effettuare una regolazione fine delle resistenze  $R_o$  ed  $R_1$  per cui possono essere non considerati nell'analisi del circuito.

Osservando il circuito, si vede che il potenziale di massa, valore di soglia  $V_{s1}$ , applicato al morsetto + dell'operazionale, tramite il morsetto - fa sì che il sensore AD590 sia sottoposto ad una tensione di 12 volt garantendone il funzionamento. Allo stesso modo la resistenza  $R_o$  è sottoposta ad una tensione di 12 volt. Bisogna fare in modo che alla temperatura  $T_1$ , soglia minima, la corrente che scorre nella resistenza  $R_o$  deve essere tale da garantire il potenziale di massa (0 volt) a tutta la linea che entra nel morsetto - dell'operazionale, solo in questo modo l'uscita dell'operazionale è nulla. Pertanto alla temperatura  $T_1$  la corrente generata dal sensore è

$$I_{T1} = 10^{-6} T_1 = 10^{-6} (276,14 + T_1) \quad (T_1 \text{ in } ^\circ\text{C})$$

Questa è anche la corrente che scorre in  $R_o$ . Pertanto la resistenza  $R_o$  è data da:

$$R_o = 12 / I_{T1} = 12 / [ 10^{-6} * (276,14 + T_1) ]$$

Vediamo cosa succede alla temperatura  $T_2 > T_1$ . In questo caso la corrente generata dal sensore è:

$$I_{T2} = 10^{-6} T_2 = 10^{-6} * (276,14 + T_2) \quad (T_2 \text{ in } ^\circ\text{C})$$

Dato che  $T_2 > T_1$ , sarà anche  $I_{T2} > I_{T1}$ . Ciò significa che lo scarto di corrente  $I_{T2} - I_{T1}$  non potendo arrivare dalla alimentazione +12 Volt deve essere generata dall'operazionale, in particolare dall'uscita. Tale scarto di corrente attraversa  $R_1$  portando l'uscita dell'operazionale ad un livello più alto, rispetto alla condizione con  $T_1$ . Pertanto l'uscita dell'operazionale si porta alla tensione:

$$V_{out} = R_1 * (I_{T2} - I_{T1}) = R_1 * 10^{-6} * (T_2 - T_1) \quad (T_1, T_2 \text{ in } ^\circ\text{C})$$

Questo risultato ci permette di impostare l'uscita dell'operazionale alla temperatura  $T_2$ . Infatti per avere un'uscita alla tensione di soglia  $V_{s2}$  dobbiamo impostare:

$$V_{out} = V_{s2} \Rightarrow R_1 = V_{s2} / [ 10^{-6} * (T_2 - T_1) ]$$

Sia  $R_o$  che  $R_1$  devono essere realizzate come somma di una resistenza con in serie un trimmer opportuno per poter centrare il valore teorico calcolato.