

# Linearizzazione caratteristiche trasduttori a variazione di resistenza

Un trasduttore di ottima qualità deve avere una caratteristica ingresso/uscita lineare e crescente. La funzione  $U = f(I)$  che la rappresenta deve essere quella di una retta affinché il rilievo della grandezza fisica sia molto accurata in modo che il sistema di misura sia a elevata precisione.

Poiché quasi tutti i trasduttori a variazione di resistenza come i trasduttori di temperatura, di luminosità ecc. non presentano caratteristiche lineari, è necessario provvedere alla loro linearizzazione con elementi passivi.

Il metodo per linearizzare consiste nel rendere uguale la pendenza (tangente alla curva) della caratteristica in ogni punto  $P$  (figura 1.1). Tale condizione si ottiene collegando i punti estremi del range di funzionamento con una retta che rappresenta la **caratteristica ideale** del trasduttore.

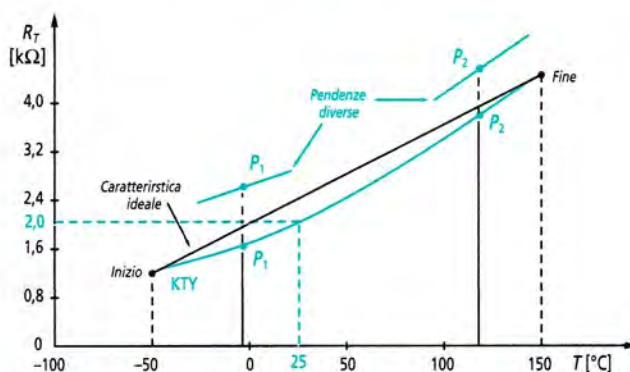


figura 1.1

## 1.1

## Linearizzazione con componenti passivi

Considerata la caratteristica di un trasduttore di temperatura della serie KTY, si vuole quantificare la non linearizzazione del trasduttore KTY81-122 nei due differenti range di funzionamento riportati nella **tabella 1.1**.

tabella 1.1 Trasduttore KTY81-122

Range: +10 °C ≤ T ≤ 40 °C				Range: -50 °C ≤ T ≤ 100 °C			
T [°C]	R Tip. [Ω]	ΔR [Ω]	%	T [°C]	R Tip. [Ω]	ΔR [Ω]	%
+10	895	-	-	-50	520	-	-
+25	1010	115	11,3	+25	1010	490	48,5
+40	1134	124	12,2	+100	1713	703	69,6

Dall'analisi dei valori della tabella si evidenzia che se il range di funzionamento è limitato (10 °C ÷ 40 °C), la caratteristica può considerarsi lineare ma se si estende il campo d'impiego (-50 °C ÷ 100 °C) la caratteristica non lo è più, come mostrano le diverse variazioni percentuali della resistenza  $\Delta R$  rispetto alla temperatura media  $T = 25$  °C.

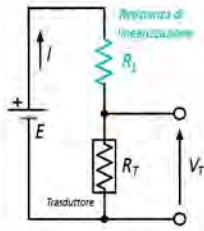


figura 1.2

Per linearizzare la caratteristica si collega una resistenza  $R_L$  in serie alla resistenza  $R_T$  del trasduttore e si alimenta il circuito in tensione (figura 1.2).

Lo schema proposto converte i valori della resistenza  $R_T$ , dipendenti dalle variazioni termiche, in valori di tensioni  $V_T$  generando la caratteristica tensione/temperatura utilizzabile nelle applicazioni pratiche. Il dimensionamento della resistenza di linearizzazione  $R_L$  si ottiene rendendo identiche le variazioni di tensione  $\Delta V_T$  rispetto alla temperatura  $T_{med}$  (figura 1.3).

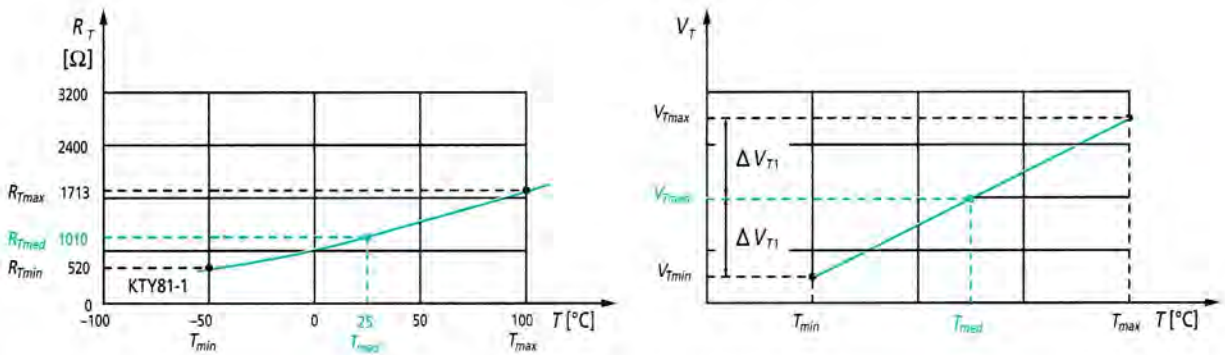


figura 1.3

Dallo schema elettrico di figura 1.2 si determinano i valori di  $\Delta V_{T1}$  e  $\Delta V_{T2}$  e dalla loro uguaglianza si ricava la resistenza di linearizzazione  $R_L$ . Si ha:

$$\Delta V_{T1} = V_{Tmed} - V_{Tmin} = \left( \frac{R_{Tmed}}{R_L + R_{Tmed}} - \frac{R_{Tmin}}{R_L + R_{Tmin}} \right) \cdot E \quad [1.1]$$

$$\Delta V_{T2} = V_{Tmax} - V_{Tmed} = \left( \frac{R_{Tmax}}{R_L + R_{Tmax}} - \frac{R_{Tmed}}{R_L + R_{Tmed}} \right) \cdot E \quad [1.2]$$

$$R_L = \frac{R_{Tmed} \cdot (R_{Tmin} + R_{Tmax}) - 2 \cdot R_{Tmin} \cdot R_{Tmax}}{R_{Tmin} + R_{Tmax} - 2 \cdot R_{Tmed}} \quad [1.3]$$

Poiché la resistenza  $R_L$  dipende solo dai valori delle resistenze  $R_{Tmin}$ ,  $R_{Tmed}$  e  $R_{Tmax}$  la [1.3] può essere utilizzata per tutti i trasduttori a variazione di resistenza indipendentemente dal tipo di grandezza fisica rilevata.

Per i trasduttori NTC, la Siemens consiglia la formula:

$$R_L = R_{Tmed} \cdot \frac{B - 2 \cdot T_{med}}{B + 2 \cdot T_{med}} \quad [1.4]$$

dove  $B$  è la costante del termistore NTC espressa in Kelvin. Si può osservare che la resistenza di linearizzazione, calcolata con la [1.4], è indipendente dal range di funzionamento della temperatura.



Si tenga presente che la linearizzazione si può ottenere collegando la resistenza  $R_L$  anche in parallelo a quella del trasduttore (figura 1.4), poiché il collegamento parallelo deriva da quello serie secondo il teorema di Norton.

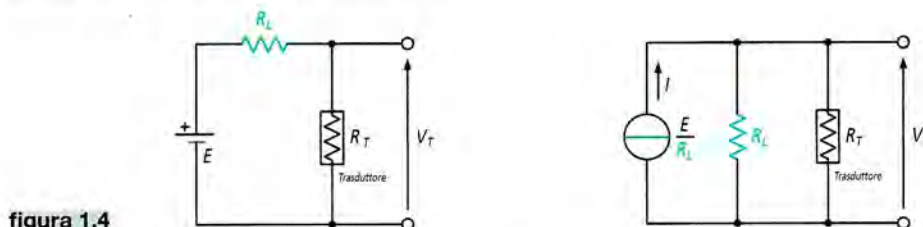


figura 1.4

La figura 1.5 mostra qualitativamente il processo di linearizzazione che subisce la caratteristica del trasduttore di temperatura. La caratteristica linearizzata  $R_{L//T}/T$ , presenta una lieve non linearità che si riduce sempre di più limitando il range di lavoro.

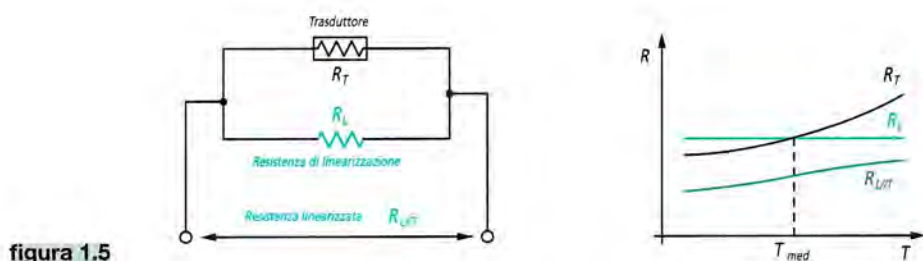


figura 1.5

### esempio 1.1

Si calcoli la resistenza di linearizzazione  $R_L$  per la caratteristica del trasduttore di temperatura KTY81-122 nel range di temperatura compreso tra  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

I valori delle resistenze del trasduttore KTY81-22 sono ( $\rightarrow$  Tabella 2.5 della Unità 2 del presente modulo):

$$R_{Tmin} = 520\ \Omega \quad R_{Tmed\ (25\ ^{\circ}\text{C})} = 1010\ \Omega \quad R_{Tmax} = 1713\ \Omega$$

Applicando la [1.3] si ha:

$$R_L = \frac{R_{Tmed} \cdot (R_{Tmin} + R_{Tmax}) - 2 \cdot R_{Tmin} \cdot R_{Tmax}}{R_{Tmin} + R_{Tmax} - 2 \cdot R_{Tmed}} = \frac{1010 \cdot (520 + 1713) - 2 \cdot 520 \cdot 1713}{520 + 1713 - 2 \cdot 1010} = 2224,46\ \Omega$$

La configurazione in parallelo tra la resistenza di linearizzazione  $R_L$  e quella del trasduttore  $R_T$  fornisce i seguenti valori.

$$R_{Eq-min}(R_L // R_{Tmin}) = \frac{R_L \cdot R_{Tmin}}{R_L + R_{Tmin}} = \frac{2224,46 \cdot 520}{2224,46 + 520} = 421,47\ \Omega$$

$$R_{Eq-med}(R_L // R_{Tmed}) = 694,61\ \Omega \quad R_{Eq-max}(R_L // R_{Tmax}) = 967,75\ \Omega$$

$$\Delta R = 694,61 - 421,47 = 273,14\ \Omega$$

$$\Delta R = 967,75 - 694,61 = 273,14\ \Omega$$

Poiché le variazioni  $\Delta R$  di resistenza in più e in meno rispetto alla  $R_{Eq-Tmed}$  sono identiche e uguali a  $273,14\ \Omega$ , si conclude che il circuito proposto linearizza molto bene la caratteristica del trasduttore.

# Trasduttori di temperatura

Le tecniche di rilevamento dei trasduttori di temperatura sono basate su diversi principi fisici come la dilatazione dei corpi (termometro a mercurio), l'effetto termico (lamina bimetallica), l'effetto termoelettrico (termocoppie). In commercio esistono molti trasduttori a variazione di resistenza costruiti con metalli speciali (termoresistenze) o con semiconduttori.

## 2.1 Termoresistenza RTD



figura 2.1

La termoresistenza, o RTD (*Resistance Temperature Detector*, rilevatore di temperatura a resistenza), è un trasduttore di temperatura a variazione di resistenza (figura 2.1). È costruito con materiali metallici come platino, nichel, tungsteno, ecc. ed è molto utilizzato in applicazione industriale.

La termoresistenza PT100 è un trasduttore di precisione costruito in pellicola di platino ed è un dispositivo robusto, economico con dimensioni contenute. Ha una caratteristica  $R/T$  lineare in un vasto range ed è tarata con raggio laser (figura 2.2).

La resistenza  $R_T$  è una funzione lineare e crescente della temperatura  $T$  anche per valori negativi [2.1].

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad [2.1]$$

dove:

- $R_T$  è il valore della resistenza alla temperatura generica  $T$ ;
- $R_0 = 100 \, \Omega$  è il valore nominale della resistenza alla temperatura  $T = 0 \, ^\circ\text{C}$ ;
- $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$  è una costante dimensionale;
- $T$  è la temperatura generica in gradi Celsius.

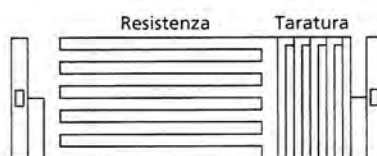


figura 2.2 Termoresistenza al platino PT100.

Per convertire le variazioni di resistenza  $R_T$  in variazioni di tensione  $V_u$  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 figura 2.3 (vedi pagina seguente) è riportato lo schema di un generatore di corrente costante  $I_L$  realizzato con l'amplificatore operazionale CA3140. La resistenza di carico  $R_T$  è la resistenza del trasduttore PT100 e ha un terminale collegato a massa.

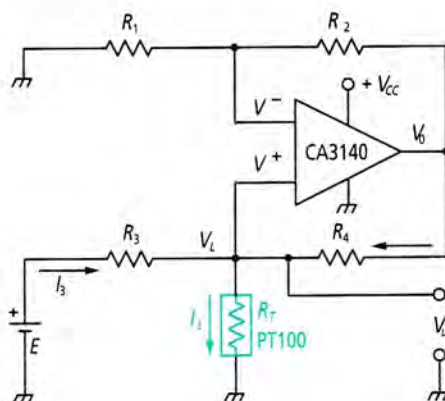


figura 2.3

Se è  $R_4/R_3 = R_2/R_1$  e l'amplificatore operazione è ideale, l'intensità di corrente  $I_L$  che scorre nella termoresistenza  $R_T$  è costante ed è  $I_L = E/R_3$ .

Per modificare il valore della  $I_L$  è necessario modificare i valori di  $R_3$  e di  $R_1$  perché deve essere sempre rispettata la condizione  $R_4/R_3 = R_2/R_1$ .

### Utilizzando Multisim

Si disegna con Multisim lo schema di figura 2.4 con  $V_1 = 5\text{ V}$  e  $R_3 = 5\text{ k}\Omega$  per fissare a  $1\text{ mA}$  l'intensità di corrente  $I_L$  che attraversa il trasduttore di temperatura HEL-775-AT0.

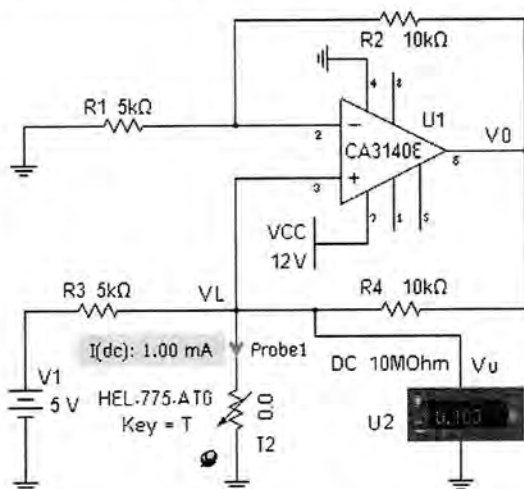


figura 2.4

La Probe misura il valore costante della intensità di corrente nella PT100 al variare del valore della termoresistenza, il voltmetro rileva la tensione  $V_u$  sulla PT100. Incrementando (con il tasto  $t$ ) e diminuendo (con il tasto  $T$ ) il valore della temperatura  $T$ , anche per valori negativi, nel range da  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  a  $+150\text{ }^\circ\text{C}$  si costruisce la **tabella 2.1**. La misura visualizzata nella **figura 2.4** è riferita alla temperatura  $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .

tabella 2.1

$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	-55	...	0	...	50	...	100	...	150
$R_T$ [ $\Omega$ ]	78,32		100		119,396		138,503		157,321
$V$ [mV]	78		100		120		139		158

Quando il range di funzionamento è esteso, la legge di variazione della resistenza in funzione della temperatura  $T$  si discosta dalla linearità poiché il coefficiente  $\alpha$  non è costante (**tabella 2.2**). In tal caso le applicazioni di precisione necessitano di circuiti di linearizzazione.



Poiché nella pratica è necessario eseguire una conversione resistenza/tensione, di seguito si propongono alcuni schemi di convertitori  $R_T/V$ . Il convertitore  $R_T/V$  utilizza un generatore di corrente di precisione REF200 (Burr-Brown) in grado di erogare un'intensità di corrente di riferimento, rigorosamente costante, uguale a  $200 \mu\text{A}$  (figura 2.5).

L'intensità di corrente di compensazione che attraversa la resistenza di precisione  $R_{\text{OFFSET}}$  ( $100 \Omega \pm 0,1\%$ ) elimina la tensione d'offset. Il circuito elettrico proposto fornisce una tensione  $V_0 = (R_T - R_{\text{OFFSET}}) \cdot 200 \mu\text{A} = \Delta R \cdot 200 \mu\text{A}$  con  $V_0 = 0 \text{ V}$  per  $T = 0^\circ\text{C}$ . Ad esempio, se  $T = 50^\circ\text{C}$ , essendo  $R_T = 119,39 \Omega$  (tabella 2.2) la tensione d'uscita è:

$$V_0 = 19,39 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 3,878 \text{ mV}$$

tabella 2.2 Caratteristiche del trasduttore PT100.

Materiale: platino  
Resistenza:  $100 \Omega \pm 0,1\%$  a  $0^\circ\text{C}$   
Coefficiente di temperatura medio  $\alpha : 3,85 \cdot 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1}$

[°C]	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
0,00	100,00	100,78	101,56	102,34	103,12
10,00	103,90	104,68	105,46	106,24	107,02
20,00	107,79	108,57	109,35	110,12	110,90
30,00	111,67	112,45	113,22	113,99	114,77
40,00	115,54	116,31	117,08	117,85	118,62
50,00	119,39	120,16	120,93	121,70	122,47
60,00	123,24	124,01	124,77	125,54	126,31
70,00	127,07	127,84	128,60	129,37	130,13
80,00	130,89	131,66	132,42	133,18	133,94
90,00	134,70	135,46	136,22	136,98	137,74
100,00	138,50	139,26	140,02	140,77	141,53
110,00	142,29	143,04	143,80	144,55	145,31
120,00	146,06	146,81	147,57	148,32	149,07
130,00	149,82	150,57	151,33	152,08	152,83
140,00	153,57	154,32	155,07	155,82	156,57
150,00	157,31	158,06	158,81	159,55	160,30

Nella figura 2.6 è proposto lo schema funzionale di un circuito elettrico che fornisce una tensione d'uscita  $V_{AB}$  lineare ma non riferita a massa.

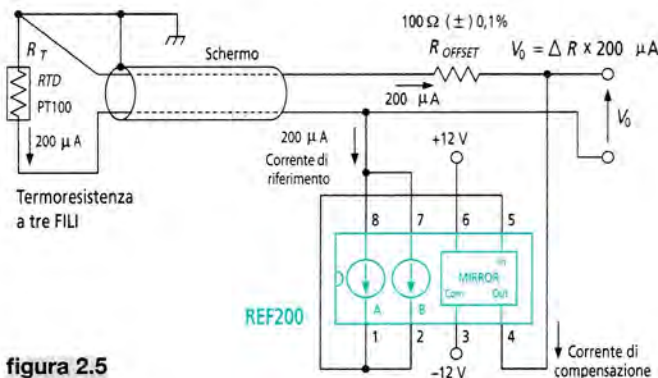


figura 2.5

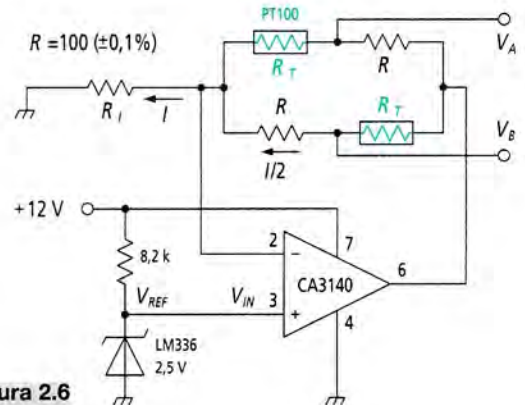


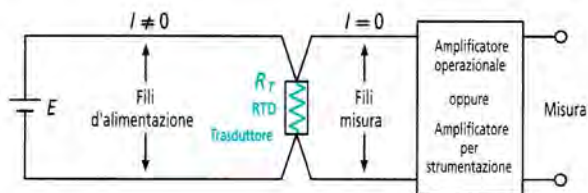
figura 2.6

Se l'A.O. è ideale ( $V^+ = V^-$ ) si ha  $I = V_{REF}/R_I$ . Ricordando che:  $R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) = R_0 + \alpha \cdot T \cdot R_0 = R_0 + \Delta R$  e poiché  $R = R_0$ , si ricava:

$$V_A = R_I \cdot I + (R_0 + \Delta R) \cdot \frac{I}{2} \quad V_B = R_I \cdot I + R_0 \cdot \frac{I}{2}$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{\Delta R}{2} \cdot I = \frac{\Delta R}{2} \cdot \frac{V_{REF}}{R_I}$$

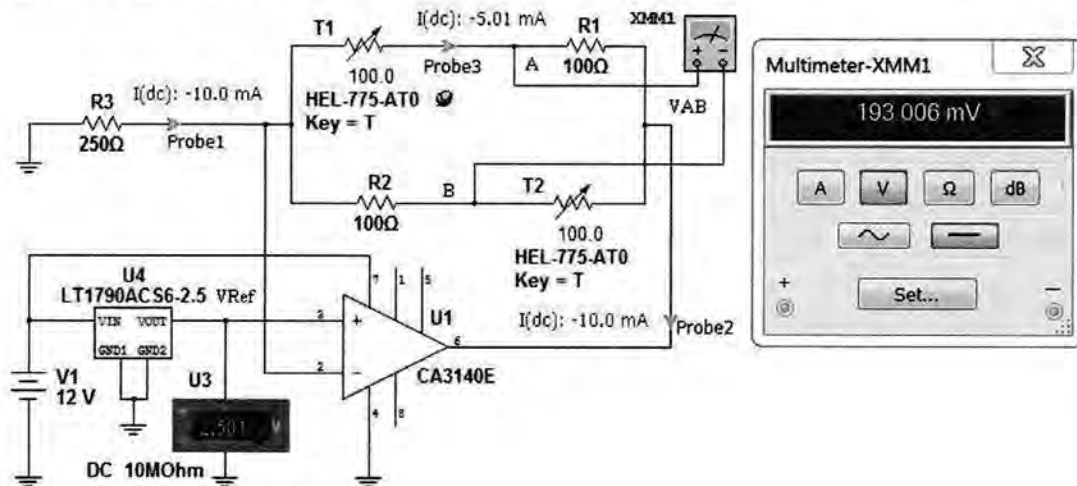
Sebbene la tensione d'uscita calcolata sia lineare del tipo  $V_{AB} = m \cdot \Delta R$ , la caratteristica *resistenza/tensione*, ottenuta dallo schema di **figura 2.6**, è affetta da una lieve non linearità propria del trasduttore PT100. Tale non linearità può essere ridotta utilizzando campi di funzionamento contenuti o provvedendo a una linearizzazione via hardware o software. Se la termoresistenza è posta a distanza dal sistema di controllo, i fili di collegamento introducono una resistenza aggiuntiva nella conversione *resistenza/tensione*. Le termoresistenze a 3 fili (**figura 2.5**) e a 4 fili (**figura 2.7**) risultano particolarmente adatte a eliminare l'errore dovuto alla resistenza dei fili di collegamento in modo da dare la massima accuratezza della misura. La RTD a 4 fili è costituita da due fili per alimentazione e da due fili per la misura (**figura 2.7**). L'errore è trascurabile se l'intensità di corrente sui fili di misura è ridotta quasi a zero con l'ausilio di un A.O.



**figura 2.7**

### ■ Utilizzando Multisim

Si disegna con Multisim lo schema di **figura 2.8** dove il dispositivo U4 fornisce la tensione di riferimento uguale a 2,5 V e  $R_3 = 250 \Omega$  e fissa l'intensità di corrente  $I = 2,5/250 = 10$  mA misurata dalla Probe 1.



**figura 2.8**

La Probe 3 misura il valore costante della intensità di corrente nella PT100 al variare del valore della termoresistenza (il segno meno indica che il verso reale opposto rispetto a quello indicato dalla freccia), il voltmetro rileva la tensione  $V_{AB}$  sulla PT100. Incrementando (tasto  $I$ ) e diminuendo (tasto  $T$ ) il valore della temperatura  $T$  contemporaneamente sui due trasdut-



tori, anche per valori negativi, nel range da  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  si costruisce la **tabella 2.3**. La misura visualizzata nella **figura 2.8** è riferita alla temperatura  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La tensione  $V_{AB}$  visualizzata dal multimetro è data dalla relazione:

$$V_{AB} = \frac{\Delta R}{2} \cdot I = \frac{\Delta R}{2} \cdot \frac{V_{REF}}{R_3} = \frac{\Delta R}{2} \cdot \frac{2,5}{250} = \frac{\Delta R}{2} \cdot 10^{-3} \text{ V dove: } \Delta R = R_0 \cdot \alpha \cdot T = R_T - R_0$$

tabella 2.3

$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-55	...	0	...	50	...	100	...	150
$R_T$ [ $\Omega$ ]	78,32		100		119,396		138,503		157,321
$\Delta R$ [ $\Omega$ ]	-21,68		0		19,396		38,503		57,321
$V_{AB}$ [mV]	-98,712		0		97,228		193,006		287,336

## 2.2 Trasduttore KTY

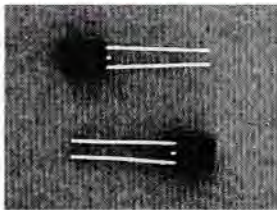


figura 2.9

I trasduttori di tipo KTY **figura 2.9**, prodotti dalla Philips, sono realizzati con silicio drogato di tipo  $n$  e basano il loro principio di funzionamento sulla dipendenza della resistività del semiconduttore dalla temperatura. Presentano un coefficiente di temperatura positivo, hanno dimensioni contenute e una struttura a tronco di piramide. Questa particolare struttura genera una caratteristica resistenza/temperatura crescente non lineare e dipendente dal verso della corrente che percorre il trasduttore. Per rendere la caratteristica  $R/T$  indipendente dal verso della corrente, la Philips costruisce trasduttori KTY *doppi* (struttura a doppio tronco di piramide). La resistenza  $R_T$  è una funzione esponenziale crescente della temperatura  $T$ .

$$R_T = R_a \cdot e^{\alpha(T-T_a)} \quad [2.2]$$

- $R_T$  è la resistenza del trasduttore alla temperatura generica  $T$ .
- $R_a$  è la resistenza del trasduttore alla temperatura ambiente  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- $\alpha$  è il coefficiente dimensionale dipendente dalla temperatura (**figura 2.10**).

Le curve caratteristiche  $R_T/T$  di **figura 2.10** sono ricavate con la [2.2]: la curva *a* con  $\alpha = 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ K}$ , le curve *b* con  $\alpha = 0,82 \cdot 10^{-2} \text{ K}$  ( $T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e  $0,75 \cdot 10^{-2} \text{ K}$  ( $T > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Le caratteristiche principali di un trasduttore KTY81, con struttura a doppio tronco di piramide, sono riportate nella **tabella 2.4**.

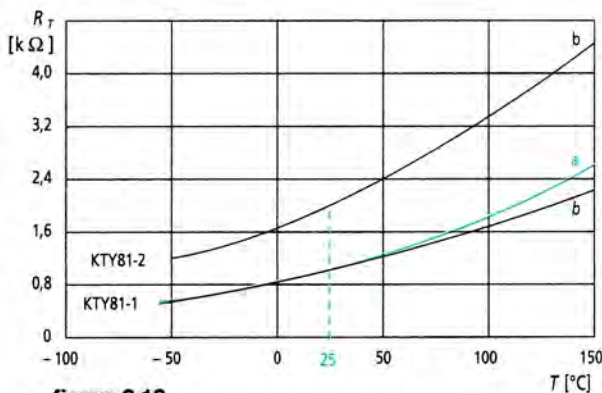


figura 2.10

tabella 2.4

Caratteristiche trasduttore serie KTY81		
	Valori	U. misura
Intensità di corrente di lavoro (max)	1	mA
Tolleranza	$\pm 2$	%
KTY81-1 valore nominale resistenza	1000	$\Omega$
KTY81-2 valore nominale resistenza	2000	$\Omega$
Coefficiente di temperatura $\alpha$ (medio)	$0,75 \cdot 10^{-2}$	$\text{K}^{-1}$
Campo d'impiego di temperatura	$-55 \div +150$	$^{\circ}\text{C}$



### ■ Trasduttore KTY81-122

Il trasduttore di temperatura KTY81-122, con contenitore plastico, ha un valore resistivo tipico di  $1010\ \Omega$  alla temperatura  $T$  di  $25\ ^\circ\text{C}$  quando è percorso da una intensità di corrente  $I = 1\ \text{mA}$ . Presenta un coefficiente di temperatura positivo, una caratteristica crescente non lineare (figura 2.11) e risulta adatto per le misure e nei sistemi di controllo.

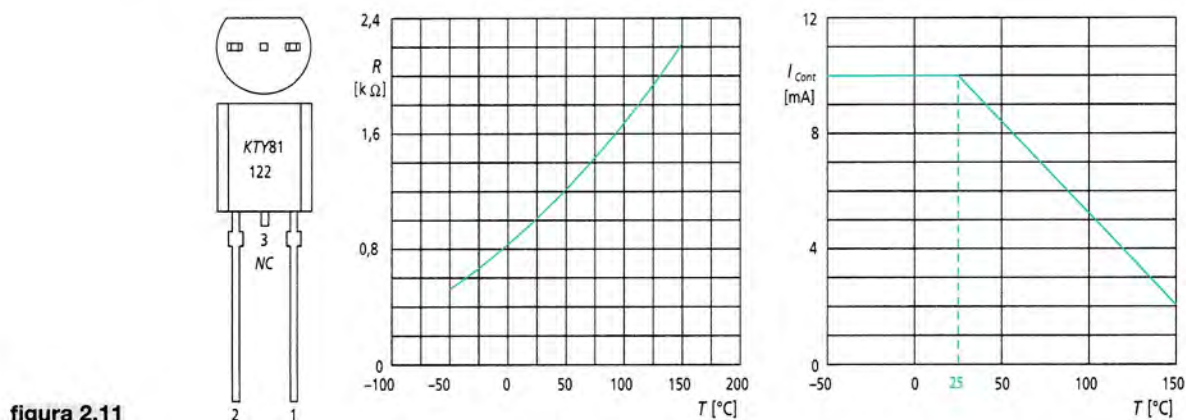


figura 2.11

Nella **tabella 2.5** sono riportati i valori della resistenza e il coefficiente di temperatura in funzione della temperatura.

tabella 2.5

Valori trasduttore temperatura KTY81-122 [ $I_{\text{cont}} = 1\ \text{mA}$ ]						
Temperatura		Coeff. Temp. [%/K]	Resistenza [ $\Omega$ ]			Errore Temp. [K]
[°C]	[°F]		Min	Tipica	Max	
-50	-58	0,98	505	520	535	± 2,92
-40	-40	0,96	558	573	588	± 2,74
-30	-22	0,93	615	630	645	± 2,55
-20	-4	0,91	676	690	705	± 2,35
-10	14	0,88	741	755	769	± 2,14
0	32	0,85	810	823	836	± 1,91
10	50	0,83	883	895	907	± 1,67
20	68	0,80	960	971	982	± 1,41
25	77	0,79	1000	1010	1020	± 1,27
30	86	0,78	1039	1050	1062	± 1,39
40	104	0,75	1120	1134	1148	± 1,64
50	122	0,73	1204	1221	1238	± 1,91
60	140	0,71	1291	1312	1332	± 2,19
70	158	0,69	1382	1406	1430	± 2,49
80	176	0,67	1477	1505	1533	± 2,80
90	194	0,65	1574	1607	1639	± 3,12
100	212	0,63	1676	1713	1750	± 3,46
110	230	0,61	1780	1823	1855	± 3,83
120	248	0,58	1886	1934	1982	± 4,33
125	257	0,55	1938	1989	2041	± 4,66
130	266	0,52	1989	2044	2098	± 5,07

Se il range di funzionamento della temperatura è molto limitato, la caratteristica  $R_T/T$  può ritenersi quasi lineare, mentre se esso è esteso la caratteristica non è lineare ed è necessario utilizzare circuiti di linearizzazione.

Per la conversione temperatura/resistenza/tensione si possono utilizzare i circuiti di **figura 2.12**, dove con  $R_L$  si è indicata la **resistenza di linearizzazione** collegata in parallelo a quella del trasduttore.

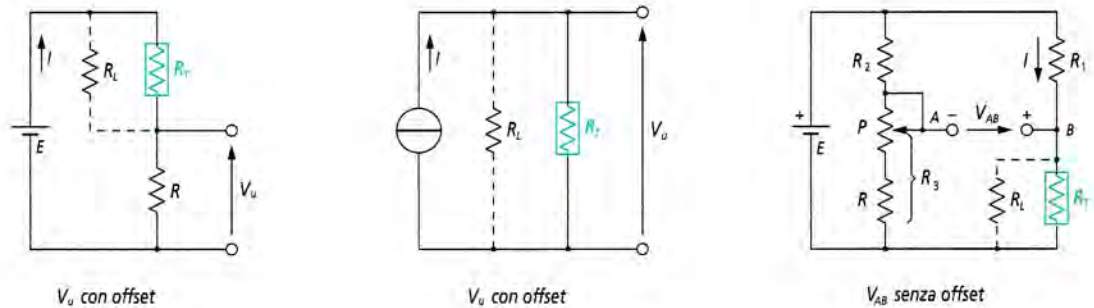


figura 2.12

### esempio 2.1

Utilizzando il trasduttore KTY81-122 dello schema a ponte di Wheatstone della **figura 2.12** (riportato in **figura 2.13**), si dimensionano:

- la resistenza di linearizzazione  $R_L$  nel range di temperatura  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- le resistenze  $R_1$  e  $R_3$  alla temperatura di  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

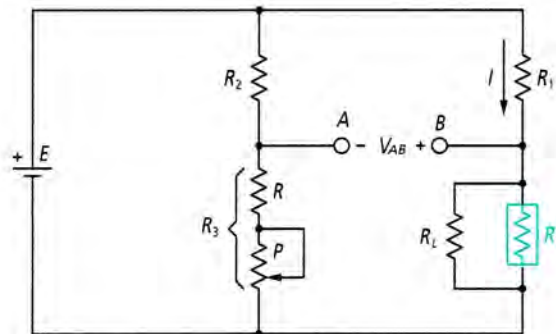


figura 2.13

Posti  $E = 5\text{ V}$ ,  $R_2 = 5,6\text{ k}\Omega$  e l'intensità di corrente massima  $I = 1\text{ mA}$  per  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , si dimensiona il valore della resistenza  $R_1$  e quello della  $R_3$  che bilancia il ponte alla temperatura  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (offset).

Dalla **tabella 2.5** si ha:

$$R_{T_{\min}} (T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 823\text{ }\Omega$$

$$R_{T_{\text{med}}} (T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1221\text{ }\Omega$$

$$R_{T_{\max}} (T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1713\text{ }\Omega$$

$$R_L = \frac{R_{\text{med}} \cdot (R_{\min} + R_{\max}) - 2 \cdot (R_{\min} \cdot R_{\max})}{R_{\min} + R_{\max} - 2 \cdot R_{\text{med}}} = \frac{1221 \cdot (823 + 1713) - 2 \cdot (823 \cdot 1713)}{823 + 1713 - 2 \cdot 1221} = 2945,29\text{ }\Omega$$

$$R_L = 3\text{ k}\Omega \text{ (Val. Comm.)}$$



$$R_1 = \frac{E}{I} - \frac{R_T(0^\circ\text{C}) \cdot R_L}{R_T(0^\circ\text{C}) + R_L} = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3}} - \frac{823 \cdot 3000}{823 + 3000} = 4354,18 \, \Omega \quad (\text{Val. Comm. } 4,3 \, \text{k}\Omega)$$

$$R_3 = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_{T\min} \cdot R_L}{R_{T\min} + R_L} = \frac{5600}{4300} \cdot \frac{823 \cdot 3000}{823 + 3000} = 839,13 \, \Omega \quad (820 \, \Omega + \text{trimmer } 50 \, \Omega)$$

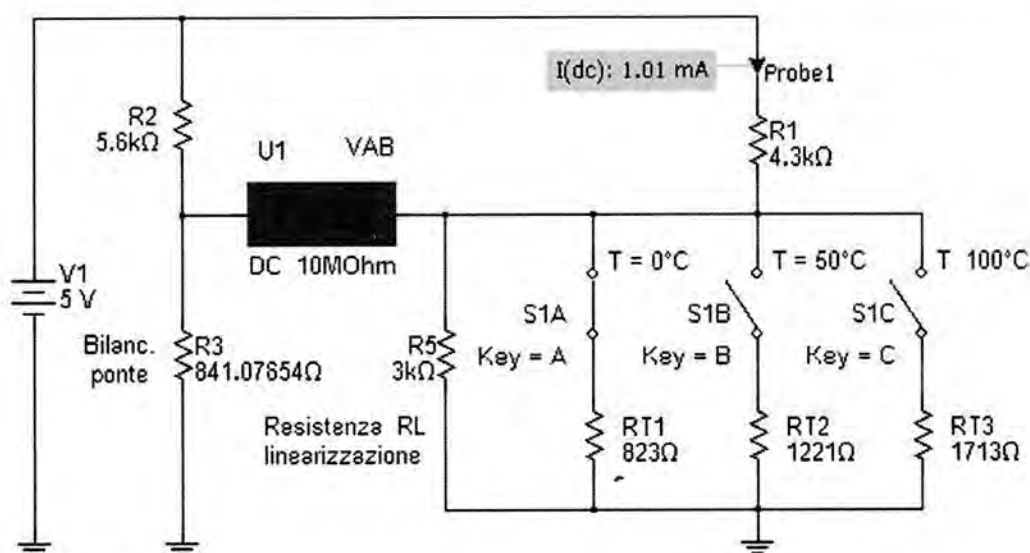
Si calcola il parallelo tra la resistenza  $R_T(50^\circ\text{C})$  e la resistenza di linearizzazione  $R_L$  alla temperatura  $T = 0^\circ\text{C}$ :

$$R_T(50^\circ\text{C}) // R_L = \left( \frac{R_T(50^\circ\text{C}) \cdot R_L}{R_T(50^\circ\text{C}) + R_L} \right) = \left( \frac{1221 \cdot 3000}{1221 + 3000} \right) = 867,80 \, \Omega$$

$$V_{AB}(50^\circ\text{C}) = \left( \frac{R_T(50^\circ\text{C}) // R_L}{R_T(50^\circ\text{C}) // R_L + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \cdot E = \left( \frac{867,80}{867,80 + 4300} - \frac{839,13}{839,13 + 5600} \right) \cdot 5 = 0,188 \, \text{V}$$

### ■ Utilizzando Multisim

Si disegna con Multisim lo schema di **figura 2.14** sostituendo il trasduttore (non disponibile su Multisim) con tre resistenze riferite alle temperature: minima, media e massima.



**figura 2.14**

Si fissa  $R_3 = 841,07654 \, \Omega$  per azzerare il ponte e si attiva la simulazione. Chiudendo un solo interruttore S1 alla volta si costruisce la **tabella 2.6**.

**tabella 2.6**

T	[°C]	0	50	100
$R_T$	[Ω]	823	1221	1723
$\Delta R_T$	[Ω]	-	398	492
$V_{AB}$	[V]	$4,61 \cdot 10^{-9}$	0,187	0,358
$\Delta V_{AB}$	[V]	-	0,187	0,171

## 2.3 Termistori



figura 2.15

I termistori (Thermistor: **THERM**ally sensitive res**ISTOR**) sono trasduttori di temperatura a semiconduttore drogato. La quantità di drogaggio fissa il coefficiente di temperatura (figura 2.15). La variazione della resistenza all'aumentare della temperatura può essere crescente (PTC) o decrescente (NTC). Le caratteristiche *resistenza/temperatura* di entrambi presentano una elevata non linearità. Sono utilizzati come rivelatori e come dispositivi per compensare le variazioni di resistenze dovute ad escursioni termiche. La legge di variazione della resistenza con la temperatura di un termistore NTC (figura 2.16) è:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad [2.3]$$

- $R_T$  è il valore nominale del trasduttore NTC alla temperatura generica  $T$ .
- $A$  e  $B$  sono costanti dipendenti dal materiale con  $2000 \text{ K} < B < 5500 \text{ K}$ .
- $T$  è la temperatura generica espressa in gradi Kelvin.

Dette  $R_{Ta}$  e  $R_T$  le resistenze rispettivamente alla temperatura di riferimento  $T_a = 293 \text{ K}$  ( $20^\circ \text{C}$ ) (se diversa è fornita dal costruttore) e alla temperatura generica  $T$ , dalla [2.3] si ricava:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad R_{Ta} = A \cdot e^{\frac{B}{Ta}}$$

$$R_T = R_{Ta} \cdot e^{B \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{Ta} \right)} = R_{Ta} \cdot e^{B \cdot \frac{Ta - T}{Ta \cdot T}} \quad [2.4]$$

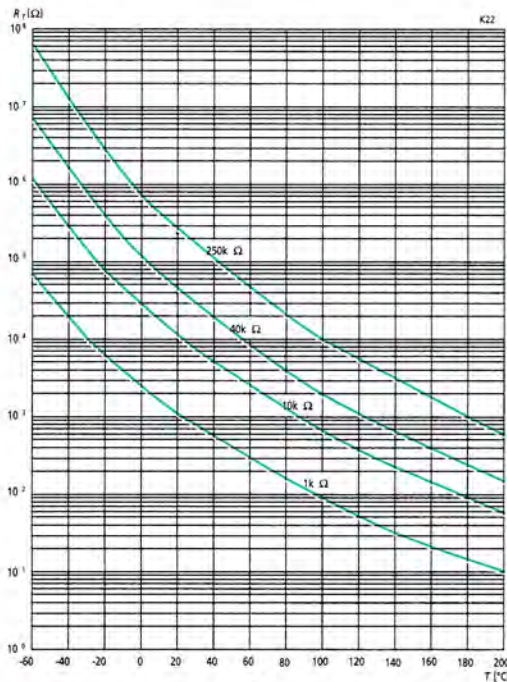


figura 2.16

### esempio 2.2

Si linearizzi la caratteristica  $R/T$  del termistore NTC-K 25 (tabella 2.7) della Siemens nel range di temperatura  $0^\circ \text{C} \div 100^\circ \text{C}$ .

tabella 2.7

Tipo	$R [\Omega]$	Tolleranza	$B [\text{K}]$	Colore	Codice
K 25 - 1k	1000	20 %	3530	Violetto	Q 63 025 - K102 - M

Si calcolano i valori delle resistenze  $R_{Tmin}$ ,  $R_{Tmed}$  e  $R_{Tmax}$ .

$$T_{min} = (0^\circ \text{C} \Rightarrow 273 \text{ K}) \Rightarrow R_{Tmin} = 2417 \Omega \quad [\Delta R\% = -641\%]$$

$$T_{med} = (50^\circ \text{C} \Rightarrow 323 \text{ K}) \Rightarrow R_{Tmed} = 326 \Omega$$

$$T_{max} = (100^\circ \text{C} \Rightarrow 373 \text{ K}) \Rightarrow R_{Tmax} = 75 \Omega \quad [\Delta R\% = +76,9\%]$$



Dalla [1.3], si ha:

$$R_L = \frac{R_{Tmed} \cdot (R_{Tmin} + R_{Tmax}) - 2 \cdot R_{Tmin} \cdot R_{Tmax}}{R_{Tmin} + R_{Tmax} - 2 \cdot R_{Tmed}} = \frac{326 \cdot (75 + 2417) - 2 \cdot 75 \cdot 2417}{75 + 2417 - 2 \cdot 326} = 244 \, \Omega$$

La linearizzazione della caratteristica può essere verificata mediante un collegamento parallelo (figura 2.17) tra la resistenza del trasduttore  $R_T$  e quella di linearizzazione  $R_L$  e calcolando i valori delle resistenze equivalenti alle diverse temperature:

$$R_{eqTmin}(0 \, ^\circ\text{C} \Rightarrow 273 \, \text{K}) = \frac{R_{Tmin} \cdot R_L}{R_{Tmin} + R_L} = \frac{2417 \cdot 244}{2417 + 244} = 221,62 \, \Omega$$

$$R_{eqTmed}(50 \, ^\circ\text{C} \Rightarrow 323 \, \text{K}) = \frac{326 \cdot 244}{326 + 244} = 139,50 \, \Omega$$

$$R_{eqTmax}(100 \, ^\circ\text{C} \Rightarrow 373 \, \text{K}) = \frac{75 \cdot 244}{75 + 244} = 57,35 \, \Omega$$

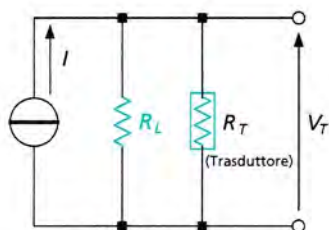


figura 2.17

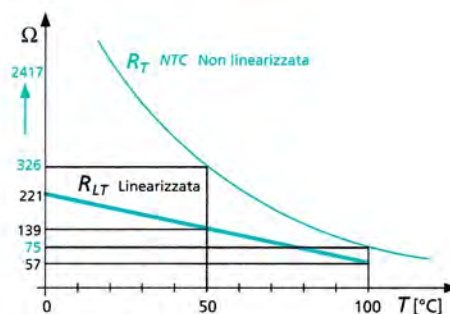


figura 2.18

I risultati ottenuti sono riportati in **tabella 2.7** e sono rappresentati in **figura 2.18**.

**tabella 2.8**

$T$	Temperatura		Caratt. non linearizzata		Res. Lin.	Caratt. linearizzata	
	$T$ [°C]	$T$ [K]	$R_T$ [Ω]	$\Delta R$ [Ω]	$R_L$ [Ω]	$R_{Eq} (R_L // R_T)$ [Ω]	$\Delta R$ [Ω]
Min	0	273	2417	—	244	221,62	—
Med	50	323	326	2091	244	139,50	82,1
Max	100	373	75	251	244	57,35	82,2

La **tabella 2.8** evidenzia che la resistenza  $R_L$  calcolata linearizza, in modo soddisfacente, la caratteristica del trasduttore NTC.

Dalla [1.4], si ha:

$$R_L = R_{Tmed} \cdot \frac{B - 2 \cdot T_{med}}{B + 2 \cdot T_{med}} = 326 \cdot \frac{3530 - 2 \cdot 323}{3530 + 2 \cdot 323} = 225,13 \, \Omega$$

Come si può osservare, il risultato ottenuto con la [1.4] si discosta di poco da quello ottenuto con la [1.3].

## 2.4 Termocoppia



figura 2.19

La termocoppia è un trasduttore analogico di temperatura che non richiede circuiti d'alimentazione ed è molto utilizzata in ambito industriale (figura 2.19). Il principio di funzionamento è basato sull'effetto Seebeck secondo cui due metalli, diversi e saldati alle loro estremità, danno origine a una corrente di debole intensità (*termocorrente*) quando le due saldature (*giunti*) sono mantenute a temperature diverse (figura 2.20).

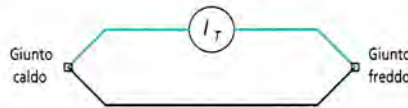


figura 2.20

Se si apre una saldatura della termocoppia e si collega un voltmetro ad alta impedenza, come in figura 2.21, si misura la *f.e.m.*:

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

dove:

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

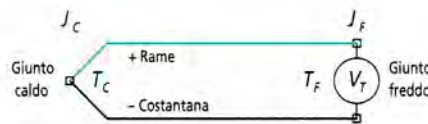


figura 2.21

In particolare, se è  $T_F = 0^\circ C$ , la tensione misurata è direttamente proporzionale alla temperatura  $T_C$  del giunto caldo:

$$V_C = \alpha \cdot T_C$$

I materiali più comunemente impiegati per la realizzazione delle termocoppie, riferiti al campo di lavoro, alla sensibilità e al tipo sono riportati nella tabella 2.9. I valori della sensibilità ( $25^\circ C$ ) provengono dalle note applicative dell'Analog.

tabella 2.9

Conduttore positivo (+)	Conduttore negativo (-)	Tipo	Range ( $^\circ C$ )	Sensibilità ( $\mu V/^\circ C$ )
Rame	Costantana	T	-200 + 370	41
Cromo	Costantana	E	-200 + 900	61
Ferro	Costantana	J	0 + 760	52
Cromo	Alumel	K	-200 + 1250	41

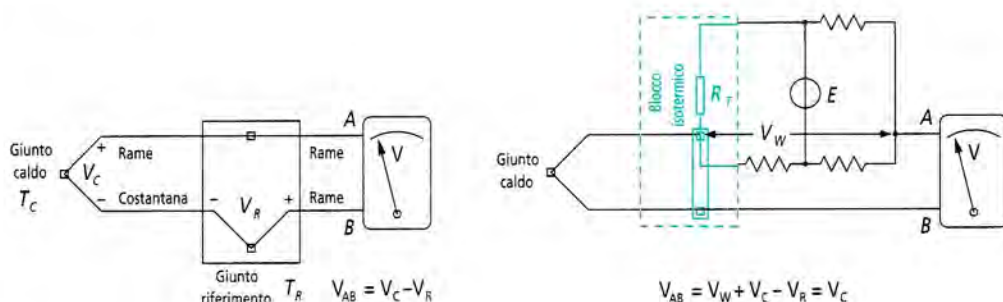
Poiché la *f.e.m.* misurata dipende dalle giunzioni della termocoppia e da quelle dovute ai cavetti di collegamento (figura 2.22, vedi pagina seguente), è necessario annullare la *f.e.m.* generata dal giunto di riferimento  $J_R$ .

Se i fili sono di rame e la termocoppia è di tipo T, si genera una sola giunzione  $J_R$  che genera una *f.e.m.*  $V_R$  detta tensione d'errore:

$$V_T = \alpha \cdot (T_C - T_R) = \alpha \cdot T_C - \alpha \cdot T_R = V_C - V_R$$



Se si immerge la giunzione  $J_R$  in un bagno di ghiaccio fondente a temperatura di  $0^\circ\text{C}$  (vaso di Dewar) si ha  $V_R = 0\text{ V}$  e la tensione prodotta dalla termocoppia è  $V_T = \alpha \cdot T_C$ . Poiché nelle applicazioni pratiche non è possibile utilizzare un bagno di ghiaccio fondente, è necessario ricorrere a un *blocco isotermico* elettronico che sia in grado di compensare la *f.e.m.* aggiuntiva. Il dispositivo è costituito da una termoresistenza  $R_T$  con caratteristica  $T/R_T$  lineare e crescente, disposta su un ramo di un ponte di Wheatstone, in modo da generare una tensione  $V_W$  dipendente dalla temperatura cui è sottoposto il blocco isotermico (figura 2.22).



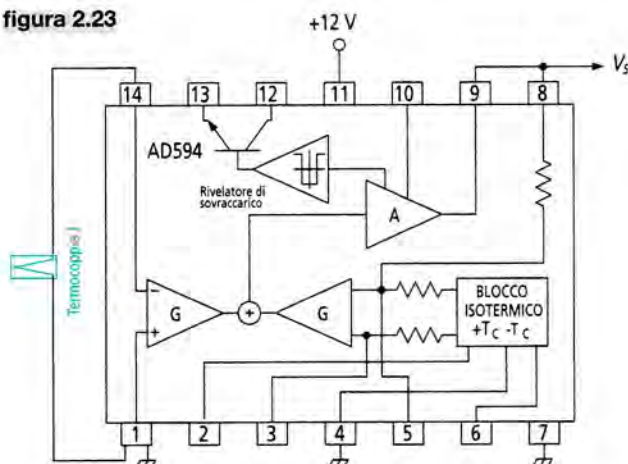
**figura 2.22**

Tra i circuiti integrati più facilmente reperibili per la compensazione del giunto di riferimento si annoverano l'AD594 per la termocoppia di tipo *J* e l'AD595 per quella di tipo *K*, prodotti entrambi dall'Analog Devices. L'AD594 contiene un blocco che produce la tensione di compensazione del giunto freddo (o di riferimento), un amplificatore precalibrato in grado di fornire una tensione d'uscita di  $10\text{ mV}$  per ogni  $^\circ\text{C}$  (sensibilità di  $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ) e un circuito di segnalazione della rottura della termocoppia (figura 2.23). Per temperature maggiori di  $0^\circ\text{C}$  i due integrati necessitano di una alimentazione singola compresa tra  $5\text{ V} + 30\text{ V}$ , mentre per temperature minori di  $0^\circ\text{C}$  necessitano dell'alimentazione duale  $\pm 15\text{ V}$ .

Al fine di polarizzare correttamente l'ingresso dell'amplificatore è necessario che il pin 1 sia connesso a massa e al morsetto positivo della termocoppia (figura 2.23).

In realtà la tensione d'uscita  $V_S$  non è perfettamente lineare ed è uguale a circa  $10\text{ mV}$  per ogni grado Celsius (tabella 2.10).

**figura 2.23**



**tabella 2.10** Termocoppia tipo *J* (Rame-Costantana)

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	Tensione $V_T$ [mV]	Tensione $V_S$ [mV]
+60	3,115	606
+80	4,186	813
+100	5,268	1 022
+140	7,457	1 445
+180	9,667	1 873
+200	10,777	2 087
+300	16,325	3 160
+400	21,846	4 228

L'integrato AD594 può essere utilizzato anche per misure dirette di temperatura nel range  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} + 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In tal caso la termocoppia è sostituita con un cortocircuito (pin 1 connesso a massa) e l'elemento sensibile è la termoresistenza  $R_T$  interna al blocco isotermico.

### esempio 2.3

Si utilizzi una termocoppia di tipo J per misure di temperatura comprese nel range  $100\text{ }^{\circ}\text{C} + 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le tensioni d'uscita del segnale  $V_0$  siano rispettivamente 0 V per  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 10 V per  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Svolgimento

Nella **figura 2.24** si riporta lo schema funzionale del circuito elettrico. Il segnale  $V_S$ , disponibile sul pin 9 dell'integrato AD594, è compreso tra 1,022 V quando è  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 3,160 V quando è  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (**tabella 2.10**). La tensione d'offset di 1,022 V è realizzata con l'integrato LM336-2,5 V e con il partitore resistivo  $R_1$ ,  $R_P$  e  $R_2$ .

Poiché  $V_0 = 10\text{ V}$ , il guadagno  $G$  dell'amplificatore per strumentazione e la resistenza  $R_G$  risultano:

$$G = \frac{V_0}{V_S(300\text{ }^{\circ}\text{C}) - V_{REF}(100\text{ }^{\circ}\text{C})} = \frac{10}{3,160 - 1,022} = \frac{10}{2,206} = 4,53$$

$$R_G = \frac{50 \cdot 10^3}{G - 1} = \frac{50 \cdot 10^3}{3,53} = 14,16\text{ k}\Omega \quad (12\text{ k}\Omega + 5\text{ k}\Omega)$$

#### Taratura e collaudo

Per la taratura si osservi la seguente procedura:

- si regoli  $R_P$  fino ad avere la  $V_{REF} = 1,022\text{ V}$  (offset), quando la temperatura  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- successivamente si regoli il trimmer  $R_G = 5\text{ k}\Omega$  per ottenere  $V_0 = 10\text{ V}$  (fattore di scala) quando la temperatura  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

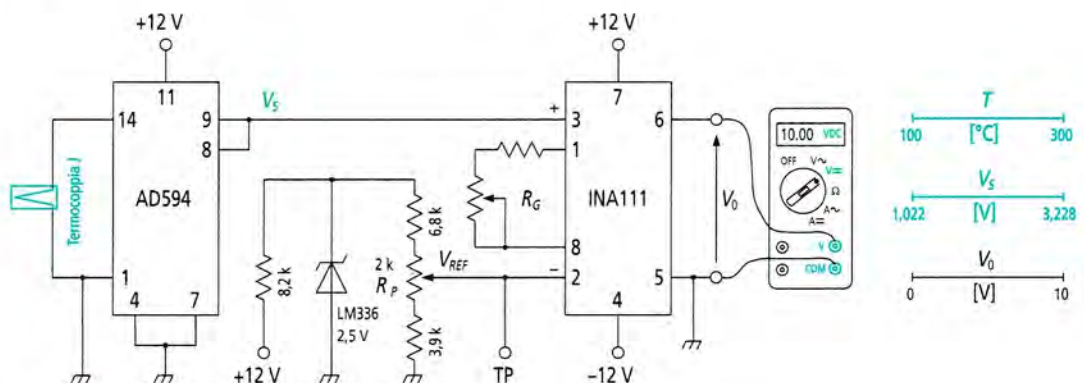


figura 2.24



# Trasduttori fotoelettrici

Sono dispositivi che convertono energia luminosa in energia elettrica e viceversa. Possono convertire energia luminosa in una grandezza elettrica (fotoresistori) oppure direttamente energia elettrica (fotodiodi, fototransistor, celle fotovoltaiche o fotocellule, ecc.).

## 3.1 Diodo LED

Il LED è un dispositivo, costituito da una giunzione *p-n* polarizzata direttamente, che converte energia elettrica in energia luminosa nel campo della luce visiva (VLED) o in quella dell'infrarosso (IRED). La ricombinazione tra elettrone e lacune genera energia sotto forma di luce (fenomeno di **elettroluminescenza**).

Il colore della luce emessa dipende dal tipo di materiale utilizzato per la costruzione che lo rende più sensibile a una particolare lunghezza d'onda  $\lambda$  che ne fissa il colore (**figura 3.1**).

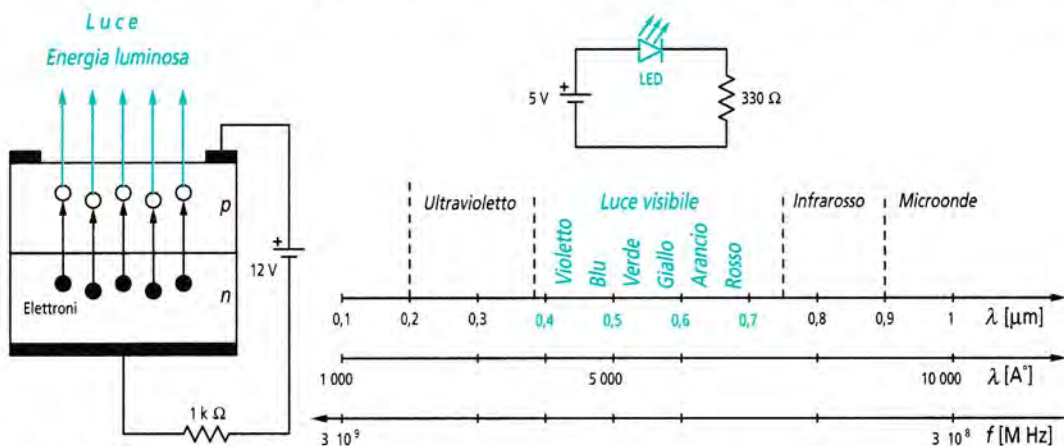


figura 3.1

I moderni LED ad alta emissione di luce e basso assorbimento sono impiegati come punti luminosi nei pannelli di controllo, nei display per la visualizzazione di cifre e caratteri alfanumerici, nelle matrici, ecc.

I pregi sono la bassa tensione di pilotaggio, la lunga durata e la sicurezza nel funzionamento continuo.

Oggigiorno, poiché le nuove tecnologie hanno permesso di produrre LED a basso consumo e a elevata emissione di luce sono impiegati in campo civile (**figura 3.2**), industriale e automobilistico.



figura 3.2

## 3.2 Trasduttore di luminosità



figura 3.3

I **fotoresistori** sono costituiti con materiali semiconduttori leggermente drogati (solfuro di cadmio, solfuro di piombo, ecc.).

Il semiconduttore drogato è disposto tra due elettrodi metallici a forma di pettine per aumentarne la superficie esposta alla luce (**figura 3.3**). Poiché è utilizzato un solo semiconduttore non si forma alcuna giunzione.

Quando la superficie sensibile del fotoresistore viene esposta alla luce, l'energia raggiante assorbita provoca la rottura dei legami covalenti, generando cariche libere (coppie lacune-elettroni).

Tale fenomeno provoca l'aumento della conducibilità e una conseguente diminuzione della resistenza del semiconduttore.

La variazione della resistenza  $R$  del trasduttore in funzione dell'illuminamento  $E$  è data dalla seguente legge:

$$R = A \cdot E^{-\alpha}$$

- $A$  [ $\Omega/\text{lx}$ ] è la costante dimensionale dipendente dalla forma geometrica della superficie sensibile che condiziona la *sensibilità* del trasduttore;
- $E$  [ $\text{lx} = \text{Lumen}/\text{m}^2$ ] è l'illuminamento (grandezza fotometrica di tipo soggettivo poiché dipende dalla sensibilità dell'occhio umano ed è utilizzata solo nel campo di radiazioni visibili). L'illuminamento  $E$  è il flusso luminoso incidente per una superficie unitaria;
- $\alpha$  è la costante adimensionale minore di 1 dipendente dal tipo di semiconduttore.

Nel Sistema Internazionale (SI) il *lux*, il cui simbolo è [ $\text{lx}$ ], è l'unità di misura dell'illuminamento  $E$ . Il lux, rapporto tra il lumen e il  $\text{m}^2$ , è l'illuminamento prodotto dal flusso luminoso di 1 lm (lumen) che incide perpendicolarmente su una superficie di  $1 \text{ m}^2$ . A volte il lux è indicato con il phot ( $\text{ph} = 10^{-4} \text{ lx}$ ) o con il foot ( $\text{fc} = 10,76 \text{ lx}$ ).

La scala metrica di tipo **radiometrica** definisce la stessa grandezza in termini energetici che consente riferirsi sia a radiazioni visibili e sia a quelle non visibili (infrarosse e ultraviolette). In questo caso l'illuminamento  $E$  è detto irradiazione e l'unità di misura diviene [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Si ha:

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1,46 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

### ■ Il fotoresistore NORP-12

La caratteristica resistenza/illuminamento del trasduttore NORP-12 [RS 651-507] presenta un'accentuata non linearità e una pendenza negativa (**figura 3.4**).

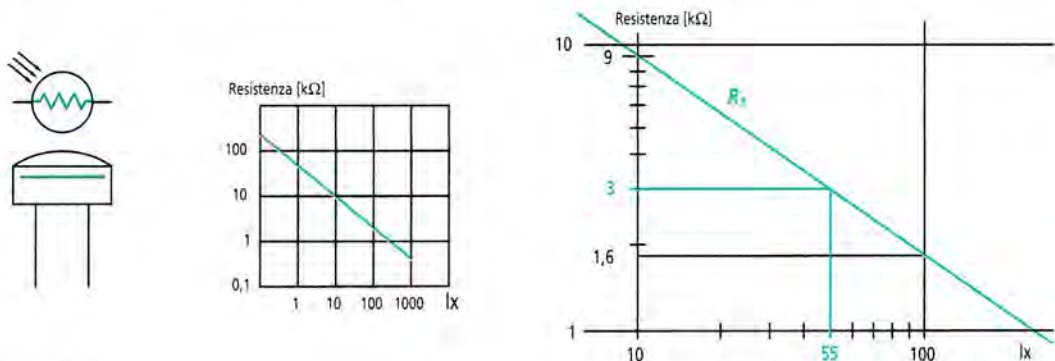


figura 3.4

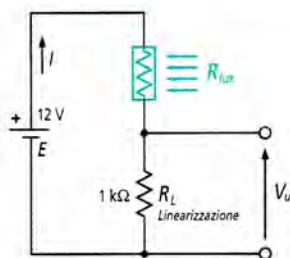


Nella **tabella 3.1** sono riportate le caratteristiche elettriche della fotoresistenza NORP-12.

**tabella 3.1**

Caratteristiche elettriche	Valori	Unità di misura
Resistenza d'oscurità (min.)	1	MΩ
Resistenza di cella a 10 lx	9	kΩ
Resistenza di cella a 1000 lx	400	Ω
Tensione max di picco (AC e DC)	320	V
Corrente max	75	mA
Potenza max (a 25 °C)	250	mW
Range di temperatura	- 60 + 75	°C
Capacità d'oscurità (tipica)	3,6	pF
Reazione spettrale di picco	0,53	μm

Per la conversione illuminamento/resistenza/tensione si può utilizzare il circuito a partitore di tensione (**figura 3.5**). Nello schema elettrico proposto è riportata la resistenza di linearizzazione  $R_L$  che rende la caratteristica illuminamento/tensione lineare.



**figura 3.5**

Come si può osservare dalla **figura 3.5**, si preleva la tensione d'uscita  $V_u$  sulla resistenza di linearizzazione  $R_L$ . La caratteristica  $V/lx$  che si ottiene è lineare e crescente all'aumentare dell'illuminamento, come si può riscontrare dalla **tabella 3.2** ricavata con la simulazione di Multisim.

### esempio 3.1

Si calcoli la resistenza di linearizzazione  $R_L$  nel range di luminosità 10 lx + 100 lx e la tensione  $V_u$  per la luminosità media sapendo che  $E = 12$  V.

Dalla **tabella 3.1** e dalla **figura 3.4** si ha:

$$R_{lux}(10 \text{ lx}) = 9 \text{ k}\Omega$$

$$R_{lux}(55 \text{ lx}) = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{lux}(100 \text{ lx}) = 1,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = \frac{R_{med} \cdot (R_{min} + R_{max}) - 2 \cdot (R_{min} \cdot R_{max})}{R_{min} + R_{max} - 2 \cdot R_{med}} = \frac{3000 \cdot (1600 + 9000) - 2 \cdot (1600 \cdot 9000)}{1600 + 9000 - 2 \cdot 3000} = 1043,47 \text{ }\Omega$$

$$R_L = 1 \text{ k}\Omega \text{ (Val. Comm.)}$$

$$V_u = \frac{R_L}{R_{lux}(55 \text{ lx}) + R_L} \cdot E = \frac{1000}{3000 + 1000} \cdot 12 = 3,0 \text{ V}$$

## ■ Utilizzando Multisim

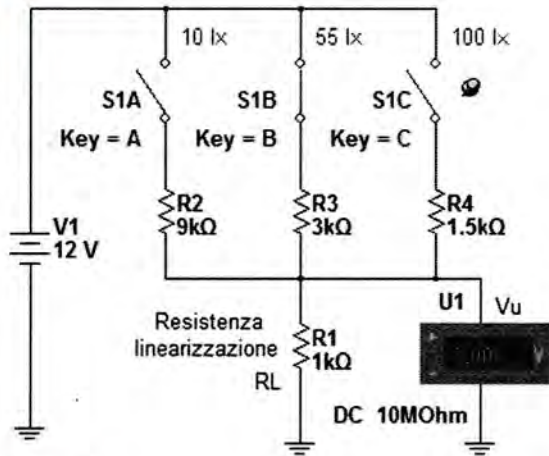


figura 3.6

Si disegna con Multisim lo schema di **figura 3.6** sostituendo il trasduttore (non disponibile su Multisim) con tre resistenze riferite all'illuminamento: minimo, medio e massimo.

Si attiva la simulazione. Chiudendo un solo interruttore S1 alla volta si costruisce la **tabella 3.2**.

tabella 3.2

$Lux$	[lx]	0	55	100
$R_{lux}$	[kΩ]	9	3	1,6
$\Delta R_{lux}$	[kΩ]	-	6	1,4
$V_u$	[V]	1,20	3,00	4,800
$\Delta V_u$	[V]	-	1,80	1,80

### 3.3 Cella fotovoltaica

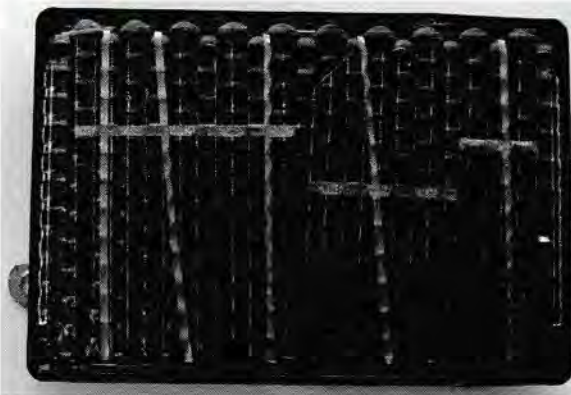


figura 3.7

È un dispositivo a semiconduttore che converte energia luminosa in energia elettrica per effetto fotovoltaico (**figura 3.7**). È costituita da due semiconduttori drogati di tipo  $p$  e di tipo  $n$  che formano una giunzione. La superficie superiore è esposta alla luce mentre quella inferiore non esposta è metallizzata (**figura 3.8**).

I fotoni della luce incidente trasferiscono energia agli elettroni che, svincolati dagli atomi, formano coppie elettroni-lacune generando un campo elettrico nella giunzione ed esternamente una differenza di potenziale funzione non lineare dell'intensità di irraggiamento (**figura 3.8**). Chiudendo la giunzione della cella fotovoltaica su una resistenza (carico) si genera una corrente  $I$  (**figura 3.8**).

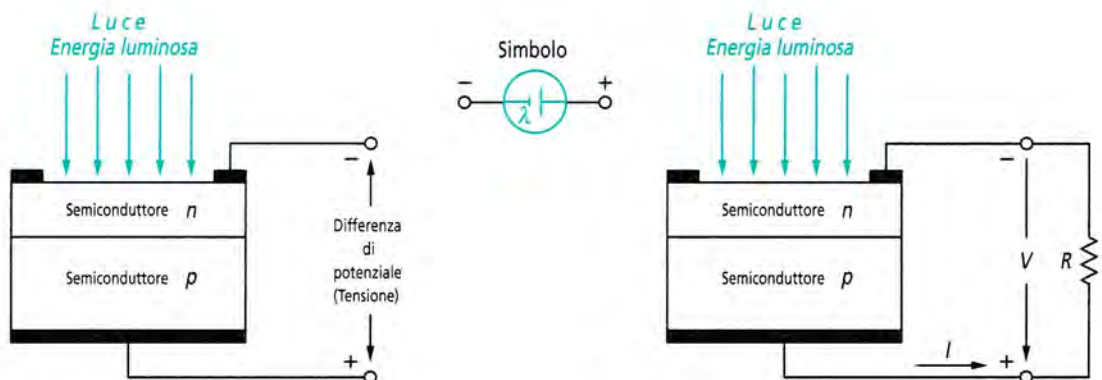


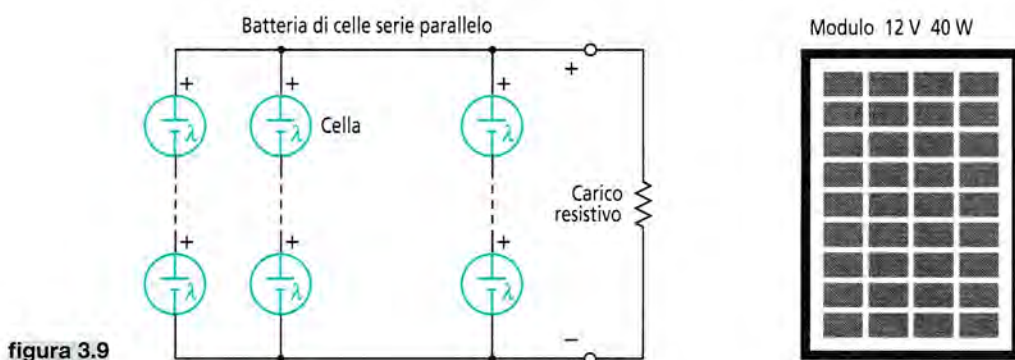
figura 3.8



La tensione prodotta, di basso valore, è dell'ordine di 0,5 V e l'efficienza di conversione è di circa il 17%. Ad esempio se una cella è investita da una radiazione di 1 W fornisce una potenza elettrica di  $1 \times 0,17 = 0,17$  W.

Per poter sfruttare al meglio l'utilizzo delle celle è opportuno disporle in batterie collegate in serie (per aumentare la tensione) e in parallelo (per aumentare l'intensità di corrente) costruendo pannelli, detti moduli fotovoltaici (**figura 3.9**), adatti all'utilizzo in campo industriale per la produzione di energia elettrica comunemente detta energia pulita.

Generalmente i moduli forniscono tensioni di 12 V o 18 V con potenze da pochi W fino a 40 W e oltre.

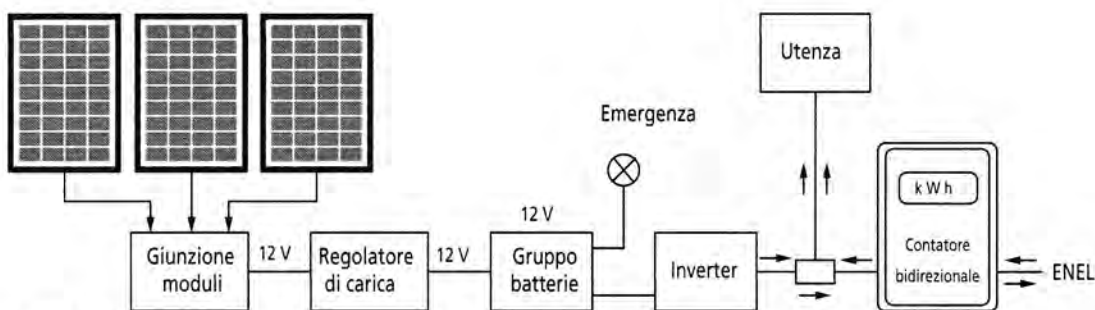


**figura 3.9**

Le applicazioni delle celle fotovoltaiche o dei moduli sono molte. Ad esempio sono utilizzate per:

- l'alimentazione di piccole unità portatili;
- l'alimentazione di faretto di illuminazione in campo civile e stradale;
- la produzione di energia elettrica.

In **figura 3.10** è riportato uno schema a blocchi di produzione di energia elettrica utilizzabile direttamente in abitazioni civili o immessa nella rete elettrica dell'ENEL.



**figura 3.10**