

Sensori e trasduttori

Il controllo di un processo industriale utilizza tecnologie sempre più sofisticate al fine di minimizzare i costi e contenere le dimensioni dei dispositivi adoperati.

In un sistema di riscaldamento di un'abitazione è necessario impiegare alcuni componenti per rilevare la pressione dell'impianto e le temperature (caldaia, locali riscaldati ed esterna).

Qualsiasi controllo di processo deve affidare il suo funzionamento a dei dispositivi, detti **sensori** o **trasduttori** (figura 1.1), in grado di rilevare le grandezze fisiche da controllare.



figura 1.1

1.1 Sensore e trasduttore

Un **sensore** è un dispositivo sensibile in grado di rilevare le variazioni di una grandezza fisica (temperatura, umidità, pressione, luminosità, ecc.) e di fornire in uscita le variazioni di una grandezza elettrica (resistenza, capacità, ecc.) senza utilizzo di fonti di energia.

Ad esempio un termistore di tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) è un **sensore di temperatura** poiché a un aumento della temperatura T corrisponde una diminuzione del valore della resistenza R (figura 1.2).



figura 1.2

Considerato che in un controllo di processo sono presenti circuiti elettrici che non possono utilizzare direttamente la grandezza elettrica (resistenza, capacità, ecc.) generata dal sensore, è necessario trasformare tale grandezza elettrica in un'altra, generalmente una tensione, direttamente manipolabile dal sistema di controllo.

In figura 1.3 è riportato un esempio di schema a blocchi per la conversione *temperatura/resistenza/tensione*, con l'uso di energia esterna.

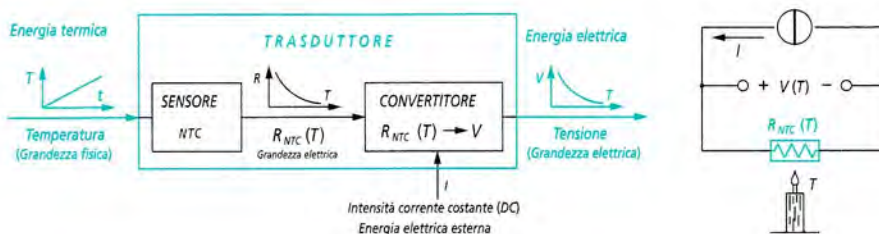


figura 1.3

Il sensore rileva la temperatura T e la trasforma in un valore di resistenza $R_{NTC}(T)$ che, percorsa dall'intensità di corrente costante I , è convertita in tensione $V(T) = R_{NTC}(T) \cdot I$. Il sensore e il convertitore $R_{NTC}(T)/V(T)$ formano, nel loro insieme, un **trasduttore** che trasforma l'**energia termica** d'ingresso in **energia elettrica** d'uscita.

Si definisce trasduttore un dispositivo sensibile che trasforma una grandezza fisica in una grandezza elettrica o, per meglio dire, trasforma energia termica (o di altro tipo) in energia elettrica.

In verità la *termocoppia* è un trasduttore di temperatura (sensore di temperatura autogenerante) che, pur non facendo uso di energia esterna, trasforma l'energia termica d'ingresso (temperatura) in energia elettrica (corrente o tensione).

Nelle pagine che seguono verrà utilizzato il solo termine *trasduttore*, perché, in realtà, anche i sensori, molto spesso (in modo improprio), sono definiti trasduttori.

1.2 Parametri caratteristici del trasduttore

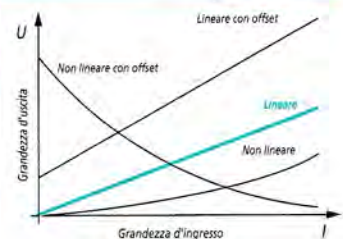
Un trasduttore di buona qualità deve possedere molteplici requisiti, anche in relazione al costo. Le principali caratteristiche di un trasduttore sono definite ed elencate nella **tabella 1.1**.

tabella 1.1

Parametri caratteristici principali del trasduttore

Caratteristica ingresso/uscita

È la **relazione matematica** esistente tra la grandezza d'uscita, indicata con U (*variabile dipendente*), e quella d'ingresso, indicata con I (*variabile indipendente*). È una funzione continua perché assume infiniti valori in un intervallo finito, può essere lineare e non, passare e non passare per l'origine. Se la caratteristica del trasduttore è lineare crescente (*trasduttore di precisione*), allora la variazione della grandezza d'uscita è direttamente proporzionale a quella d'ingresso. L'offset è il valore dell'uscita U diverso da zero per l'ingresso $I = 0$.

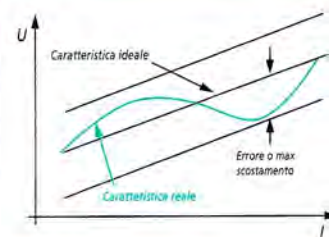


Linearità

È il parametro del trasduttore che evidenzia la **deviazione (errore)** tra la caratteristica ingresso/uscita ideale (teorica) e quella reale. La deviazione è calcolata rispetto alla retta d'equazione che meglio approssima la caratteristica reale del trasduttore. In realtà non esiste uno standard definito di tale parametro. L'errore di linearità è:

$$\epsilon_L \% = (\Delta U_{\max} / U_{FS}) \cdot 100 \quad [1.1]$$

dove ΔU_{\max} è lo scostamento max e U_{FS} è il valore di fondo scala.

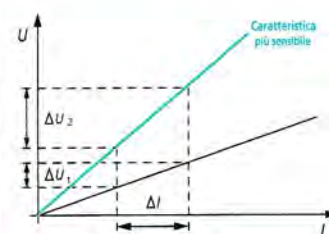


Sensibilità

È il **rapporto** tra la variazione della grandezza d'uscita ΔU (presumibilmente grande) e la variazione di quella d'ingresso ΔI che la provoca (possibilmente piccola). Per un trasduttore con caratteristica ingresso/uscita lineare la sensibilità è:

$$S = \Delta U / \Delta I \quad [1.2]$$

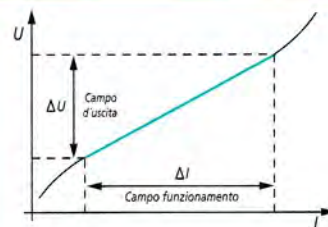
Un buon trasduttore deve avere una grande sensibilità, ossia a una piccola variazione della grandezza d'ingresso ΔI deve corrispondere una grande variazione di quella d'uscita ΔU .



Parametri caratteristici principali del trasduttore

Range di funzionamento o campo di lavoro

È la differenza tra il valore massimo e quello minimo che può assumere la grandezza d'ingresso I . La caratteristica è fornita generalmente dal costruttore e rappresenta il campo (range) di funzionamento ottimale entro il quale sono garantite le prestazioni del trasduttore, comprese la linearità e la integrità.

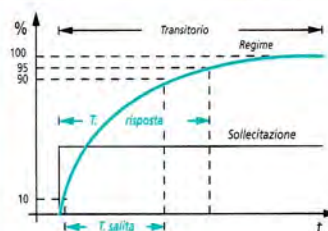
**Isteresi**

Molti trasduttori hanno una caratteristica non univoca, nel senso che essa è diversa a seconda che la grandezza d'ingresso vari da un valore minimo a uno massimo o viceversa. Un trasduttore ideale non presenta isteresi e la sua caratteristica ingresso/uscita è unica.

**Tempo di risposta. Tempo di salita**

Il **tempo di risposta** è l'intervallo di tempo impiegato dal trasduttore a raggiungere un valore di regime conforme a quello della grandezza d'ingresso, quando quest'ultima subisce una variazione improvvisa. In pratica il tempo di risposta è il tempo necessario perché l'uscita raggiunga il 95% del valore finale.

Il **tempo di salita** è l'intervallo di tempo impiegato dal trasduttore per passare dal 10% al 90% del valore finale.

**Risoluzione**

È la più piccola variazione della grandezza d'uscita U che può essere rilevata. Se la risoluzione è riferita alla sola grandezza d'uscita U , esprime il rapporto formulato in percentuale tra la minima variazione della grandezza d'uscita e il valore di fondo scala. Un buon trasduttore deve avere una risoluzione molto bassa e una sensibilità elevata.

$$\text{Risoluzione } \% = \left[\frac{\text{GRANDEZZA d'uscita (min)}}{\text{G. d'uscita (fondo scala)}} \right] \cdot 100 = \frac{\Delta U_{\min}}{U_{FS}} \cdot 100 \quad [1.3]$$

Accuratezza

È il rapporto tra l'errore massimo e il valore di fondo scala.

Affidabilità

È la capacità di mantenere nel tempo le stesse caratteristiche.

Ripetibilità

Fornisce gli stessi risultati in eguali condizioni di funzionamento.

Resistenza d'uscita

È la resistenza misurata sui morsetti d'uscita.

Stabilità termica

È la risposta alla variazione unitaria della grandezza d'ingresso.

Risposta in frequenza

È la gamma di frequenza per le quali non esiste distorsione.

Rumore

È il segnale in uscita con ingresso in cortocircuito.

1.3 Criteri pratici di scelta dei trasduttori

Dalle definizioni elencate nel paragrafo 1.2 si deduce che un trasduttore ideale dovrebbe avere le seguenti specifiche:

- caratteristica ingresso/uscita lineare;
- range di funzionamento ampio;
- alta sensibilità;
- bassa risoluzione;
- tempo di risposta nullo;
- assenza d'isteresi.

Poiché un generico trasduttore commerciale presenta solo alcune di queste specifiche, è compito del progettista scegliere il dispositivo che meglio si adatta all'apparato da realizzare. In ogni caso la scelta del trasduttore non può prescindere dal costo e dalla riproducibilità del componente per eventuali, e a volte inevitabili, interventi di riparazione. Spesso la scelta di un trasduttore risulta condizionata da un compromesso tra le varie specifiche. In generale un buon trasduttore deve avere:

- elevato range della grandezza da controllare;
- perfetta linearità per ottenere la massima precisione;
- piccolo tempo di risposta;
- bassa resistenza di uscita.

Le altre specifiche possono essere valutate al fine di ottimizzare il rapporto costo/prestazioni.

1.4 Classificazione dei trasduttori

Esistono diverse classificazioni dei trasduttori, ognuna delle quali è riferita a particolari elementi presi in considerazione, quali il tipo del segnale d'uscita, il principio fisico di funzionamento, la natura della grandezza d'ingresso, ecc.

Una prima classificazione dei trasduttori è basata sulla presenza o meno di una fonte di energia esterna necessaria per il loro funzionamento (**figura 1.4**).

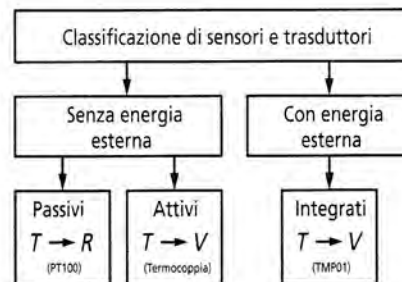


figura 1.4

Nella **tabella 1.2** di pagina seguente sono riportati i trasduttori senza utilizzo di energia esterna.

tabella 1.2

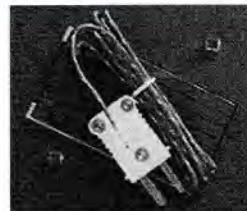
Classificazione dei trasduttori

Trasduttori passivi (sensori)

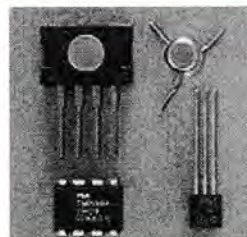
I sensori sono dispositivi che trasformano una generica grandezza fisica d'ingresso in una grandezza elettrica (resistenza, capacità, ecc.) non utilizzabile dai circuiti elettrici di elaborazione. Esempi di sensori sono il potenziometro, la termoresistenza, il termistore NTC e PTC, la fotoresistenza, ecc.

**Trasduttori attivi (trasduttori autogeneranti)**

Forniscono in uscita una grandezza elettrica direttamente utilizzabile senza consumo di energia esterna. In taluni casi il trasduttore fornisce in uscita una grandezza elettrica che può essere manipolata dai circuiti elettronici di elaborazione. È il caso delle celle fotovoltaiche e delle termocoppie che generano una tensione d'uscita in funzione rispettivamente della luminosità e della temperatura.

**Trasduttori integrati**

Forniscono in uscita una grandezza elettrica (tensione o corrente). Questi trasduttori, complessi e costosi, integrano nel chip il circuito di condizionamento, ossia alcuni componenti elettronici che rendono la grandezza elettrica d'uscita amplificata, filtrata e lineare crescente rispetto a quella fisica rilevata.



Una seconda classificazione è basata sul tipo di segnale d'uscita riportati nella **tabella 1.3** (figura 1.5).

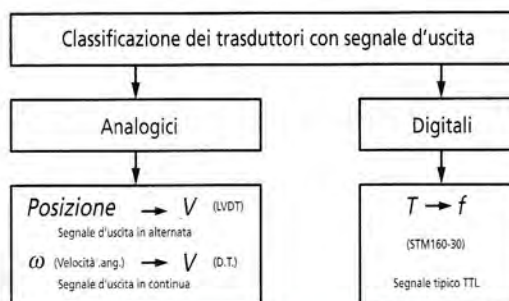


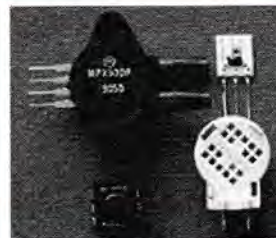
figura 1.5

tabella 1.3

Classificazione dei trasduttori

Trasduttori analogici

Presentano una caratteristica ingresso/uscita costituita da una funzione continua. La grandezza d'uscita e quella d'ingresso variano con continuità assumendo tutti i valori appartenenti a un sottoinsieme dei numeri reali. È il caso di alcuni trasduttori passivi (termistore, fotoresistenza, ecc.) che forniscono in uscita una grandezza elettrica (Resistenza, Capacità, ecc.) e di molti trasduttori che forniscono in uscita una tensione o una intensità di corrente.

**Trasduttori digitali**

Presentano una caratteristica ingresso/uscita che può assumere solo due distinti valori: *alto* o *basso*. Al valore alto si associa il livello logico "1", mentre a quello basso si associa il livello logico "0". Esempio di trasduttore digitale sono la lamina bimetallica, vista come un relè termico, o l'encoder incrementale che genera un treno d'impulsi TTL compatibili.



La classificazione più comune e forse più significativa dei trasduttori è fatta in base alla grandezza fisica che essi devono rilevare. Secondo tale classificazione si hanno:

- ▀ trasduttori di temperatura;
- ▀ trasduttori di umidità;
- ▀ trasduttori di pressione;
- ▀ trasduttori di luminosità;
- ▀ trasduttori di posizione;
- ▀ trasduttori di forza (celle di carico);
- ▀ trasduttori di gas;
- ▀ trasduttori di velocità;
- ▀ trasduttori piezoelettrici;
- ▀ trasduttori magnetici;
- ▀ trasduttori fotoelettrici;
- ▀ trasduttori di prossimità e di contatto;
- ▀ trasduttori per l'industria automobilistica;
- ▀ ecc.

esercizi

svolti

- 1** Sapendo che lo scostamento massimo $\Delta V_{max} = 0,015$ V e il valore di fondo scala $V_{FS} = 5$ V, calcolare l'errore di linearità ϵ_L %.

Utilizzando la [1.1], si ha:

$$\epsilon_L \% = \frac{\Delta V_{max}}{V_{FS}} \cdot 100 = \frac{0,015}{5} \cdot 100 = 0,3\%$$

- 2** Siano $U_1 = 2 \cdot I$ e $U_2 = 6 \cdot I$ due caratteristiche ingresso/uscita per due generici trasduttori. Calcolare le sensibilità sapendo che la variazione d'ingresso per entrambi è $\Delta I = 0,05$.

Dalla [1.2] si ha:

$$\Delta U_1 = 2 \cdot \Delta I = 2 \cdot 0,05 = 0,1$$

$$S_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta I} = \frac{0,1}{0,05} = 2$$

$$\Delta U_2 = 6 \cdot \Delta I = 6 \cdot 0,05 = 0,3$$

$$S_2 = \frac{\Delta U_2}{\Delta I} = \frac{0,3}{0,05} = 6$$

- 3** Sapendo che la risoluzione $R \% = 0,5\%$ e il valore di tensione di fondo scala $V_{FS} = 5$ V, calcolare la variazione minima ΔV_{min} .

La risoluzione, per un generico trasduttore, è espressa dalla relazione [1.3]. Riferendosi alle variazioni di tensione, dalla [1.3] si ha:

$$\Delta V_{min} = \frac{R \% \cdot V_{FS}}{100} = \frac{5 \cdot 0,5}{100} = 0,025 \text{ V}$$

esercizi proposti

1. Un generico sensore è:
.....
.....
.....

2. Un generico trasduttore è:
.....
.....
.....

3. La sensibilità di un generico trasduttore è:
.....
.....
.....

4. La risoluzione di un generico trasduttore è:
.....
.....
.....

5. L'offset di una caratteristica ingresso/uscita di un trasduttore è:
.....
.....
.....

6. Quale è la differenza tra sensibilità e risoluzione?
.....
.....
.....

7. Quale differenza esiste tra una caratteristica univoca e una con isteresi?
.....
.....
.....

8. La risoluzione di un trasduttore analogico è alta o bassa?
.....
.....
.....

9. Sapendo che la $\Delta V_{max} = 0,05$ e il valore di tensione di fondo scala $V_{FS} = 10$ V, calcolare la risoluzione percentuale.
.....
.....
.....

10. Sapendo che l'errore di linearità $\epsilon_L \% = 0,2$ e il valore di fondo scala $V_{FS} = 8$ V, calcolare lo scostamento massimo ΔV_{max} .
.....
.....
.....

11. Quale caratteristica ha un trasduttore autogenerante?
.....
.....
.....

12. Quali sono le caratteristiche dei trasduttori integrati?
.....
.....
.....

13. Quale è la differenza tra un trasduttore analogico ed uno digitale?
.....
.....
.....

14. Quali sono i criteri pratici per la scelta di un trasduttore?
.....
.....
.....

Trasduttori di posizione a variazione di resistenza

I trasduttori di posizione a variazione di resistenza, lineari o angolari, sono realizzati con potenziometri che permettono una variazione di resistenza in funzione della posizione assunta dal cursore mobile (**figura 2.1**). In genere la resistenza è costituita da uno strato sottile (carbone o film metallico) o da filo avvolto. Quest'ultimi hanno un'elevata ripetibilità, presentano una non linearità, a causa dei salti del cursore da una spirale alla successiva, e una caratteristica I/U a gradini.

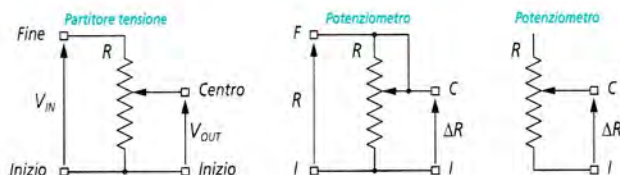


figura 2.1

2.1 Trasduttore di posizione lineare - potenziometro

Il potenziometro è un trasduttore di posizione lineare a variazione di resistenza (**figura 2.2**). Il valore della sua resistenza, misurata tra uno dei due estremi e quello centrale, varia da 0Ω (cursore nella posizione 0) a un valore massimo R (cursore nella posizione L).

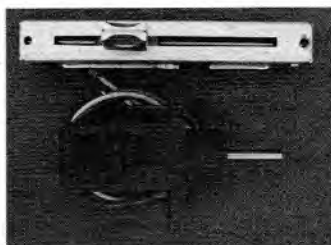


figura 2.2

Si consideri il potenziometro a slitta mostrato in **figura 2.3** e sia L_1 la posizione generica del cursore (**grandezza fisica d'ingresso**) a cui corrisponde un valore normalizzato della lunghezza $x = L_1/L$ compreso tra 0 e 1. Per $L_1 = 0$ risulta $x = 0$, mentre per $L_1 = L$ risulta $x = 1$.

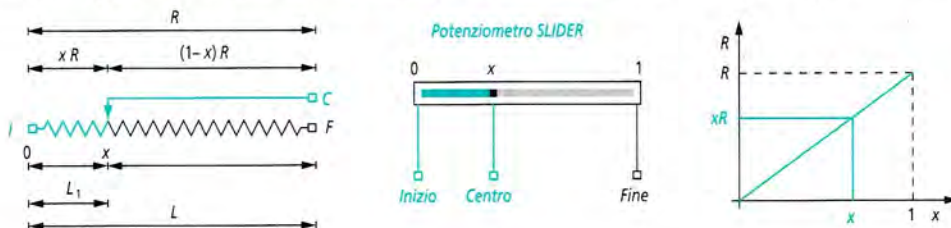


figura 2.3 Potenziometro a slitta lineare (slider).

Il valore della resistenza (**grandezza elettrica d'uscita**) in funzione della posizione L_1 del cursore è:

$$R(L_1) = \frac{L_1}{L} \cdot R = x \cdot R$$

dove:

- R è il valore nominale della resistenza del potenziometro;
- $x = L_1/L$ è la lunghezza normalizzata.

Variando la posizione del cursore nell'intervallo normalizzato da 0 a 1, si ottiene la caratteristica riportata in **figura 2.3** che esprime la relazione tra la posizione x assunta dal cursore (*variabile indipendente*) e il valore della resistenza corrispondente $R(L_1) = x \cdot R$ (*variabile dipendente*). Per convertire la variazione di resistenza $R(L_1)$ nella tensione V_0 si può utilizzare lo schema di **figura 2.4**.

$$V_0 = (x \cdot R) \cdot \frac{E}{R} = E \cdot x \quad [2.1]$$

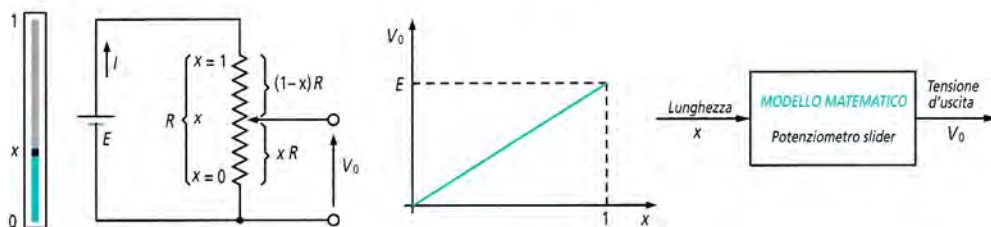


figura 2.4

esercizio 2.1

Si realizzi un controllo di posizione lineare che rilevi anche la posizione dello zero centrale (posizione di riferimento).

Il potenziometro a slitta si presta a tale tipo di controllo se inserito in un ponte di Wheatstone, costituito da due resistenze R e da un potenziometro lineare con valore nominale $2 \cdot R$ (**figura 2.5a**).

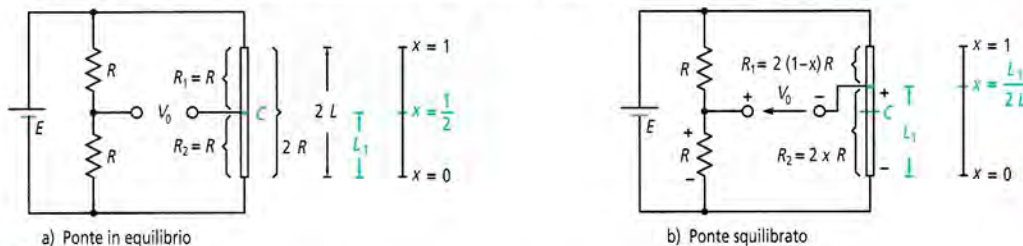


figura 2.5

Il ponte è in equilibrio ($V_0 = 0$ V) quando il cursore è nella posizione centrale e sbilanciato ($V_0 \neq 0$ V) quando il cursore è in una qualsiasi posizione diversa da quella centrale.

Indicando con $2 \cdot L$ l'intero spostamento e con L_1 la posizione generica del cursore si può definire la variabile x come rapporto tra L_1 e $2 \cdot L$ ($x = L_1/2 \cdot L$). Quando il cursore è nella posizione centrale $L_1 = L$ ($x = 1/2$) e il ponte è in equilibrio poiché $R_1 = R_2 = 2 \cdot R \cdot x = R$. Se si sposta il cursore verso l'alto, rispetto alla posizione centrale, le resistenze delle due parti del potenziometro cambiano (**figura 2.5b**): una diminuisce ($R_1 = 2 \cdot R - 2 \cdot R \cdot x = 2 \cdot R \cdot (1 - x)$) e l'altra aumenta della stessa quantità ($R_2 = 2 \cdot R \cdot x$). La tensione V_0 risulta:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot E - \frac{R}{2 \cdot R} \cdot E = \frac{2 \cdot R \cdot x}{2 \cdot R} \cdot E - \frac{E}{2} = \left(x - \frac{1}{2}\right) \cdot E \quad [2.2]$$

Posto $E = 12$ V la tensione d'uscita V_0 varia da -6 V (con $x = 0$) a $+6$ V (con $x = 1$) assumendo il valore di 0 V quando il cursore è nella posizione centrale ($x = 1/2$).

Il sistema di conversione proposto fornisce una caratteristica lineare tensione/posizione (V/x) perché la tensione V_0 è direttamente proporzionale alla posizione x del cursore mobile. Questa condizione è verificata solo quando l'uscita del potenziometro non è chiusa su un carico. La [2.1] è il modello matematico del trasduttore rappresentato con lo schema a blocchi di **figura 2.4**. In realtà la sollecitazione applicata al sistema è la forza che sposta l'asta del trasduttore.

La sensibilità del sistema di conversione R/V si ricava dalla relazione:

$$V_0 = E \cdot x = E \cdot \frac{L_1}{L} = \frac{E}{L} \cdot L_1$$

Il rapporto E/L è la sensibilità S del sistema di conversione utilizzato. Aumentando la E , aumenta la sensibilità che risulta limitata dalla massima tensione applicabile al potenziometro ($E_{max} = \sqrt{P_{max} \cdot R}$).

Lo schema di **figura 2.5** è un semplice sistema di controllo di posizione a catena aperta (**figura 2.6**). Il potenziometro è il trasduttore che rileva la posizione x del cursore centrale C e il ponte di Wheatstone trasforma la posizione x nella tensione V_0 .

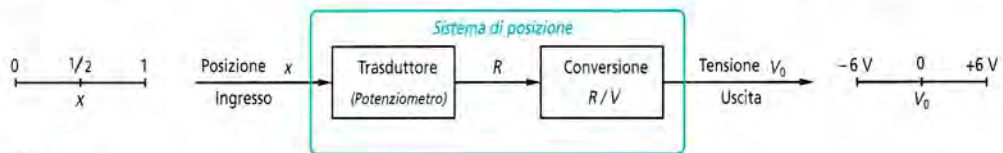


figura 2.6

Se il potenziometro è caricato con una resistenza R_C (**figura 2.7**), la caratteristica tensione/posizione (V/x) non è più lineare perché la tensione d'uscita V_u è una funzione razionale fratta, nella quale la variabile indipendente x è presente sia al numeratore che al denominatore.

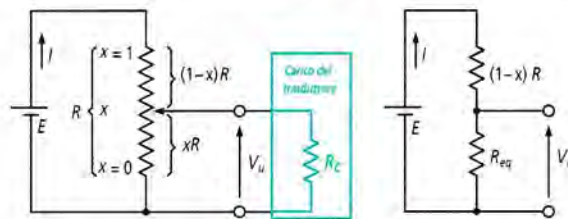


figura 2.7

$$R_{eq} = \frac{(x \cdot R) \cdot R_C}{x \cdot R + R_C}$$

$$V_u = \frac{x \cdot R_C}{R_C + x \cdot R - x^2 \cdot R} \cdot E \quad [2.3]$$

La [2.3] è il modello matematico del sistema di **figura 2.7** rappresentato con lo schema a blocchi di **figura 2.8**. La tensione d'uscita V_u dipende dalla posizione x del cursore e dalla resistenza di carico R_C .

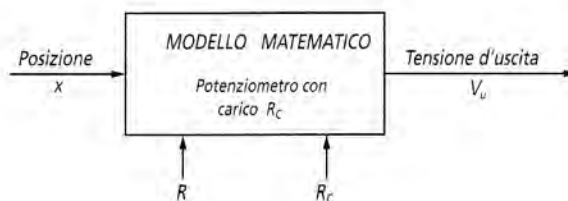


figura 2.8

La non linearità è tanto più accentuata quanto minore è la resistenza di carico R_C nei confronti della resistenza complessiva R del potenziometro. Per $R_C = 0$ la tensione d'uscita è uguale a zero per ogni valore di x .

Per ridurre la non linearità dovuta al carico R_C si utilizzano, come si vedrà nelle applicazioni riportate di seguito, gli amplificatori operazionali che, per le loro caratteristiche, **separano** il potenziometro dal carico R_C (figura 2.9). In base a tale configurazione il potenziometro **vede** sempre la resistenza d'ingresso R_i , teoricamente infinita, dell'amplificatore operazionale.

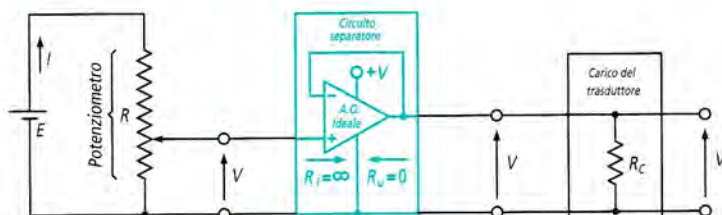


figura 2.9

esercizio 2.2

Si realizzi un sistema elettromeccanico per il rilievo del livello d'acqua in un serbatoio tra un livello minimo e un livello massimo di 0,5 m.

Il sistema è costituito da un serbatoio, da un potenziometro a slitta, da un sistema cinematico, da un galleggiante e da due molle di richiamo che mantengono in tensione le funicelle (figura 2.10).

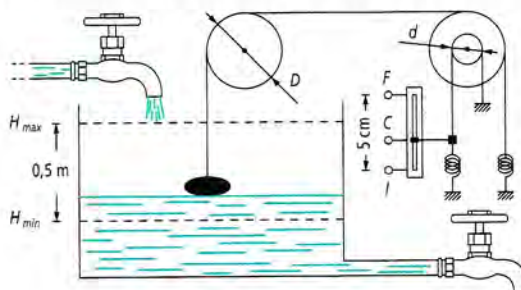


figura 2.10

Utilizzando un potenziometro slider con corsa di 5 cm e considerato che il livello d'acqua da controllare è $H_{max} - H_{min} = 50$ cm, si ricava il legame tra i diametri delle due ruote le cui gole accolgono le funicelle in tensione. Si ha:

$$\frac{\pi \cdot D}{\pi \cdot d} = \frac{500}{50} = 10 \quad D = 10 \cdot d$$

Si pone $R_p = 10 \text{ k}\Omega$ ed $E = 5 \text{ V}$, per limitare la potenza dissipata dal potenziometro a 50 mW. Dalla figura 2.11 si evidenzia che per H_{min} il cursore del potenziometro si è posizionato in basso con escursione nulla ($V_0 = 0 \text{ V}$) e viceversa quando l'altezza del livello d'acqua è massima H_{max} ($V_0 = 5 \text{ V}$).

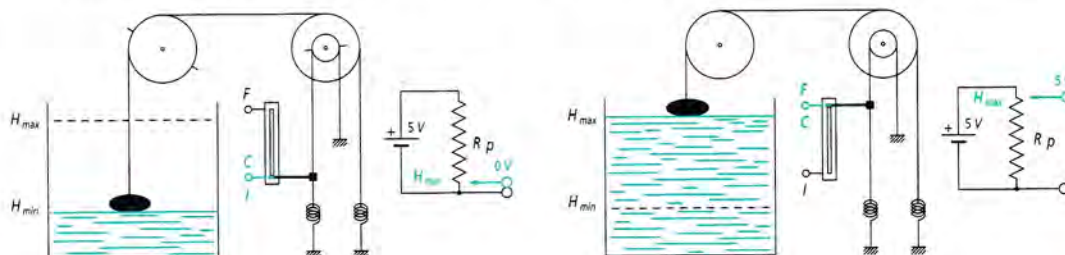


figura 2.11

Utilizzando LabVIEW

Per mettere in relazione il livello del liquido nel serbatoio e la posizione del cursore del potenziometro bisogna utilizzare la proporzione:

$$[2.4] \quad \frac{(liv. \text{ serb.} - 0,1)}{0,5} = \frac{posiz. \text{ curs.}}{0,05}$$

Considerando che:

- 0,5 m è la variazione che può avere il liquido;
- 0,1 m rappresenta il livello minimo di liquido nel serbatoio;
- 0,05 m (5 cm) è la lunghezza L della corsa del cursore del potenziometro.

Dalla [2.4] si ricava la posizione del cursore:

$$[2.5] \quad posiz. \text{ curs.} = \frac{(liv. \text{ serb.} - 0,1) \times 0,05}{0,5} = 0,1 \times (liv. \text{ serb.} - 0,1)$$

Per quanto riguarda la tensione d'uscita V_u sul punto centrale del potenziometro si ha:

$$[2.6] \quad V_u = E \times \frac{L}{L_1} = 5 \times \frac{0,05}{L_1}$$

dove L è la lunghezza totale della corsa del cursore del potenziometro, L_1 lo scostamento del cursore dalla posizione di partenza ed $E = 5$ V la tensione posta ai capi del potenziometro. Le relazioni [2.5] e [2.6] saranno utilizzate per inserire le funzioni sul Block Diagram di LabVIEW di figura 2.12 di pagina seguente.

Per realizzare il VI si proceda nel seguente modo.

Si avvia LabVIEW, scegliendo al solito Blank VI e quindi, aperta la CONTROLS PALETTE (menu View ⇒ Controls Palette), si inseriscano sul FRONT PANEL usando il menu EXPRESS:

1. l'indicatore per visualizzare la posizione del cursore (Express ⇒ Numeric Indicators ⇒ Vertical Pointer Slide);

2. il serbatoio (Express ⇒ Numeric Indicators ⇒ Tank);

3. l'indicatore per visualizzare il valore della tensione (Express ⇒ Numeric Indicators ⇒ Meter).

Si attivi la visualizzazione sul Tank sull'indicatore della posizione del cursore degli indicatori digitali. Si converta il Serbatoio in un controllo (clic con il tasto destro sul Tank ⇒ Change to Control).

Sul Block Diagram si inseriscano:

1. due blocchi funzione per la moltiplicazione, uno per la divisione e un altro per la sottrazione (Express ⇒ Arithmetic & Comparison ⇒ Multiply o Divide o Subtract);

2. tre blocchi per le costanti (Express ⇒ Arithmetic & Comparison ⇒ Numeric ⇒ Num

Cost).

Si trasformino due delle costanti di tipo Double, si eseguano i collegamenti come in figura 2.12 del DIAGRAMMA A BLOCCHI e si inseriscano i valori numerici all'interno delle funzioni costanti. La figura 2.13 di pagina seguente mostra il PANNELLO FRONTALE.

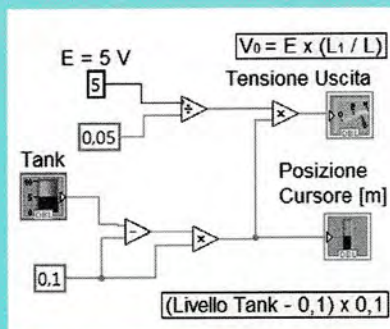


figura 2.12

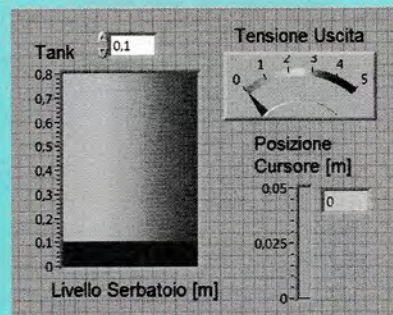


figura 2.13

Per modificare il livello del liquido si deve trascinare il puntatore del mouse sul controllo di livello (serbatoio) del pannello di controllo e fare scorrere il cursore.

2.2 Trasduttore di posizione angolare (potenziometro rotativo)

Il trasduttore di posizione angolare (figura 2.14) è costituito da un potenziometro il cui cursore mobile, collegato meccanicamente a una molla di richiamo, ruota in modo da descrivere un angolo (figura 2.15). Il dispositivo è utilizzato per misurare o controllare uno spostamento angolare.



figura 2.14

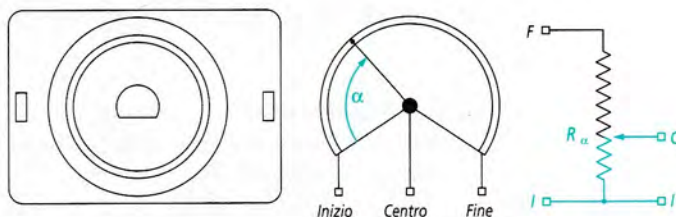


figura 2.15

Il circuito di figura 2.16 è un esempio di conversione *spostamento angolare/tensione* (α/V). La resistenza d'utilizzazione R_C è separata da quella del trasduttore con l'amplificatore operazionale, a elevata resistenza d'ingresso, al fine di non caricare il trasduttore.

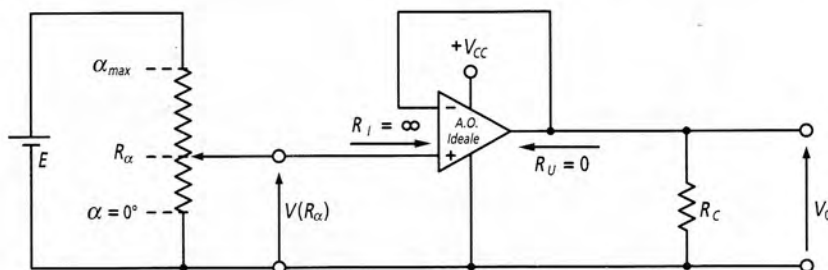


figura 2.16

Trasduttori di temperatura a variazione di resistenza

Alcuni materiali metallici e alcuni materiali a semiconduttore hanno la proprietà di modificare sensibilmente il valore della resistenza elettrica a causa di una variazione termica. La caratteristica resistenza/temperatura può essere crescente lineare, crescente non lineare e decrescente non lineare. Nella **figura 3.1** sono riportate le caratteristiche normalizzate di alcuni trasduttori di temperatura a variazione di resistenza.

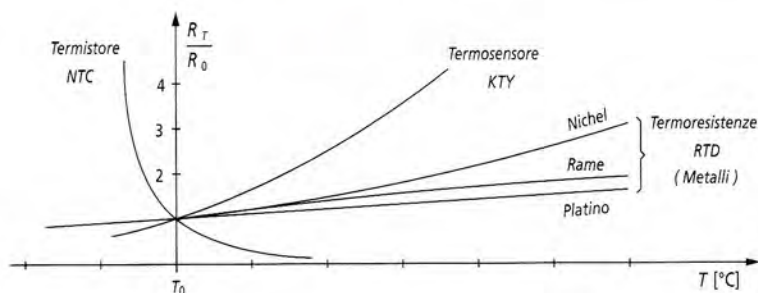


figura 3.1

3.1 Termoresistenza RTD (PT100)

La termoresistenza o RTD (*Resistance Temperature Detector* \Rightarrow rilevatore di temperatura a resistenza) è un trasduttore di temperatura a variazione di resistenza, è costruito con materiali metallici antinduttivi come il platino, nichel, rame, ecc. (**figura 3.2**).

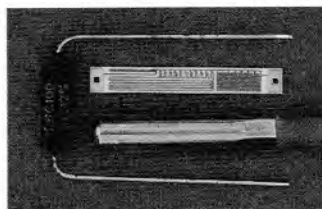


figura 3.2

La legge di variazione della resistenza R_T con la temperatura T anche per valori negativi, **lineare** e **crescente** è riportata nella [3.1], dove:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad [3.1]$$

- $R_0 = 100 \, \Omega$ è il valore nominale della termoresistenza per $T = 0 \, ^{\circ}\text{C}$;
- R_T è il valore della termoresistenza alla temperatura generica T ;
- $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \, [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ è la costante dimensionale. In verità α non è costante e la caratteristica R/T presenta una lievissima non linearità.

La termoresistenza RTD è indicata anche con PRT (*Platinum Resistor Thermometers*) o con PT100 quando il valore resistivo a $0 \, ^{\circ}\text{C}$ è uguale a $100 \, \Omega$. La PT100 è un trasduttore commerciale di precisione in pellicola di platino, robusta, economica, di dimensioni contenute

e con caratteristica pressoché lineare. La variazione della resistenza R_T , al variare della temperatura, può essere convertita in una variazione di tensione V_u da utilizzare nei circuiti elettrici. La conversione R/V può essere realizzata alimentando la PT100 con un generatore di corrente d'intensità costante I (figura 3.3).

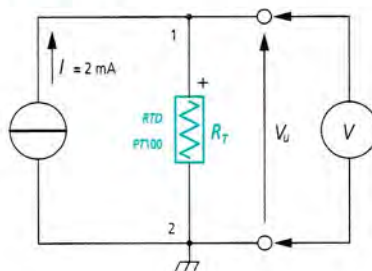


figura 3.3

esempio 3.1

Utilizzando il circuito di figura 3.3, rilevare la variazione della tensione ai capi della termoresistenza PT100 nell'ipotesi che la temperatura vari nel range $0\text{ }^{\circ}\text{C} \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a passi di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il circuito sia alimentato da un generatore di corrente d'intensità costante $I = 2\text{ mA}$ tale da non procurare l'effetto Joule sul trasduttore.

Applicando la [3.1] si ricavano i valori teorici della termoresistenza R_T e della tensione V_u al variare della temperatura T (tabella 3.1).

tabella 3.1

$T\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	0	20	40	60	80	100
$R_T\text{ [}\Omega\text{]} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$	100	107,70	115,40	123,10	130,80	138,50
$V_u\text{ [mV]} = R_T \cdot I$	200	215,40	230,80	246,20	261,60	277,00
$\Delta V\text{ [mV]}$	–	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70

Dall'analisi della tabella 3.1 si deduce che la caratteristica tensione/temperatura è lineare perché le variazioni di tensioni ΔV sono sempre uguali in corrispondenza di quelle della temperatura ΔT .

esempio 3.2

Si utilizzi lo schema di figura 3.4 per calcolare la tensione V_u in funzione della temperatura T rilevata con la termoresistenza PT100.

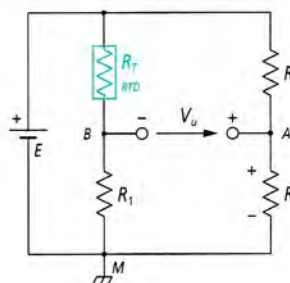


figura 3.4

Si bilancia il ponte a temperatura $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ponendo $R_1 = R = 100\text{ }\Omega$. Dalla **figura 3.4** si ricava:

$$V_u = V_{AM} - V_{BM} = \frac{R}{2 \cdot R} \cdot E - \frac{R_1}{R_1 + R_T} \cdot E = \left(\frac{1}{2} - \frac{R_1}{R_1 + R_T} \right) \cdot E \quad [3.2]$$

Per $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e per una generica temperatura T si ha:

$$V_u(T = 0) = \left(\frac{1}{2} - \frac{100}{100 + 100} \right) \cdot E = 0 \quad V_u(T) = \frac{R_T - R_1}{2 \cdot (R_1 + R_T)} \cdot E \quad [3.3]$$

La tensione di uscita $V_u(T)$ non è una funzione lineare della temperatura T , perché il circuito utilizzato per la conversione R/V introduce una non linearità. Per verificare la non linearità della caratteristica tensione/resistenza nel range $0\text{ }^{\circ}\text{C} \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ si possono utilizzare i valori teorici della resistenza R_T riportati nella **tabella 3.1** e la [3.3] per calcolare i valori teorici della tensione di uscita V_u riportati nella **tabella 3.2**.

Al fine di trascurare l'effetto Joule sulla termoresistenza, si pone $E = 1,2\text{ V}$, ottenibile con dispositivi per tensioni di riferimento di precisione (tipo LM 185 – 1,2 V), per non superare l'intensità di corrente di 6 mA riferita alle peggiori condizione quando $R_T = 100\text{ }\Omega$ e $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

tabella 3.2

$T\text{ }[^{\circ}\text{C}]$	0	20	40	60	80	100
$R_T\text{ }[\Omega]$	100	107,70	115,40	123,10	130,80	138,50
$V_u\text{ }[\text{mV}]$	0	22,24	42,89	62,12	80,06	96,85
$\Delta V\text{ }[\text{mV}]$	–	22,24	20,65	19,23	17,94	16,79

L'analisi dei dati conferma che a uguali incrementi della temperatura non corrispondono decrementi proporzionali della tensione d'uscita.

I risultati riportati nella **tabella 3.2** possono essere controllati con la simulazione. Si disegna con Multisim la **figura 3.5** con il trasduttore HEL-775-AT0 con range $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \div +150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ il valore misurato della termoresistenza è $R_T = 107,793\text{ }\Omega$.

Si attiva la simulazione per visualizzare l'intensità di corrente nel ramo che contiene il trasduttore e la tensione reale d'uscita misurata dal multimetro (\rightarrow Modulo 5, Unità 1, figura 1.55).

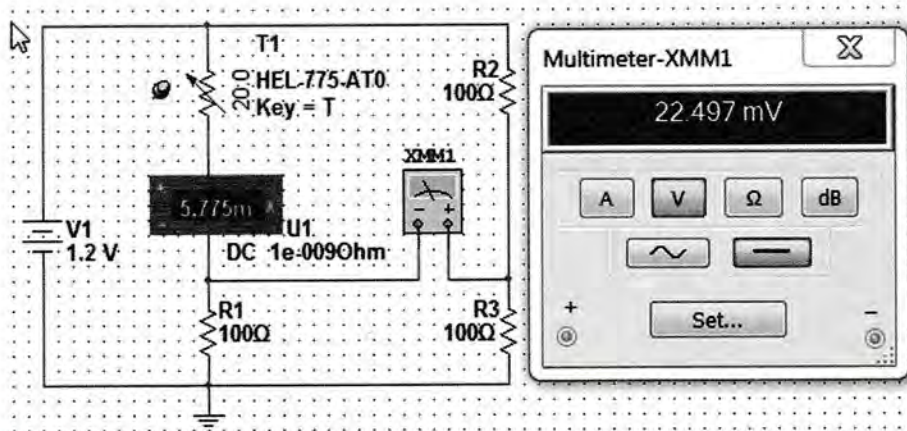


figura 3.5

3.2 Trasduttore KTY

I trasduttori di tipo KTY, prodotti dalla Philips, sviluppati in alternativa ai trasduttori convenzionali costituiti dai termistori a coefficiente negativo (NTC) e positivo (PTC), sono realizzati con silicio drogato di tipo n e basano il principio di funzionamento sulla dipendenza della resistività del semiconduttore dalla temperatura (figura 3.6). Presentano un coefficiente di temperatura positivo, hanno dimensioni contenute e una struttura a tronco di piramide e per attribuire al trasduttore una protezione efficiente è ricoperto completamente con vetro al fosforo.

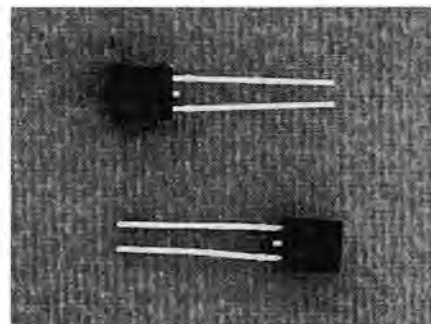


figura 3.6

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 formata essenzialmente da due trasduttori uguali collegati in serie ma aventi polarità opposte).

La resistenza R_T è una funzione esponenziale crescente della temperatura T dove:

$$R_T = R_a \cdot e^{\alpha(T-T_a)} \quad [3.4]$$

- R_T è la resistenza del trasduttore alla temperatura generica T ;
- R_a è la resistenza del trasduttore alla temperatura ambiente $T_a = 25^\circ\text{C}$;
- α è il coefficiente dimensionale dipendente dalla temperatura.

La figura 3.7 mostra la caratteristica R_T/T per la serie KTY81. Le curve sono ricavate con la [3.4]. La curva a con $\alpha = 0,75\%/K$, le curve b con $\alpha = 0,82\%/K$ ($T \leq 25^\circ\text{C}$) e $\alpha = 0,75\%/K$ ($T > 25^\circ\text{C}$).

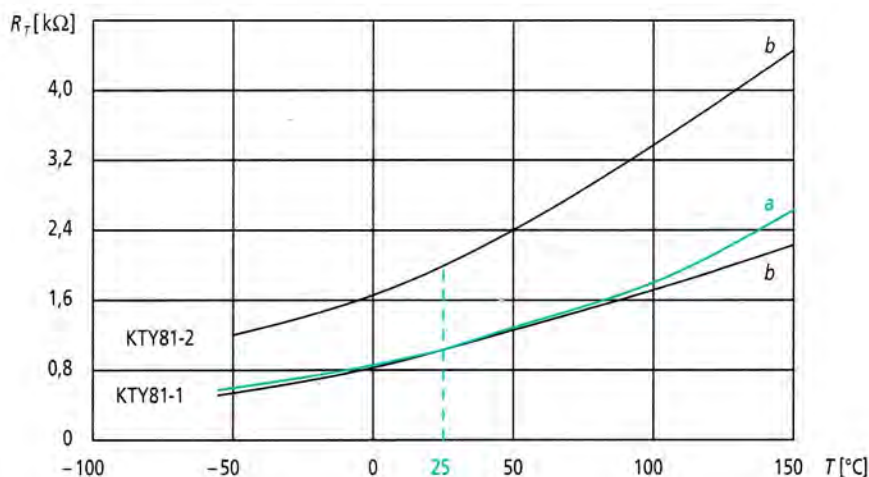


figura 3.7

3.2.1 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 3.8) e risulta adatto sia per le misure di temperatura sia nei controlli di sistemi.

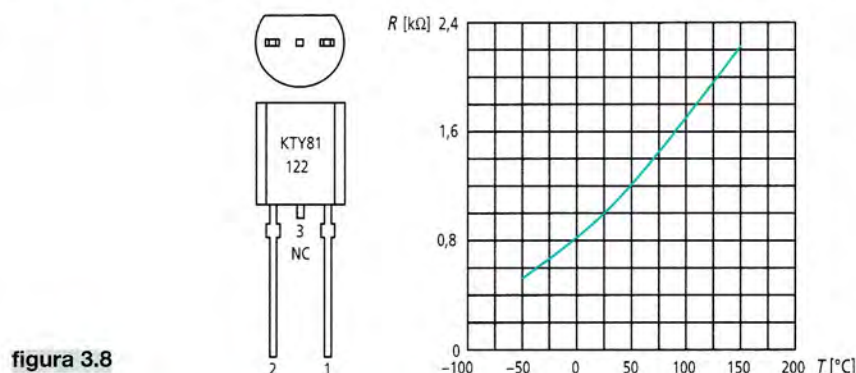


figura 3.8

Nella tabella 3.3 sono riportati i valori della resistenza in funzione della temperatura.

tabella 3.3

Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Valori trasduttore KTY81-122 [$I_{\text{cont}} = 1\ \text{mA}$]		
	Resistenza [Ω]		
	Min	Tipica	Max
- 50	505	520	535
- 40	558	573	588
- 30	615	630	645
- 20	676	690	705
- 10	741	755	769
0	810	823	836
10	883	895	907
20	960	971	982
25	1000	1010	1020
30	1039	1050	1062
40	1120	1134	1148
50	1204	1221	1238
60	1291	1312	1332
70	1382	1406	1430
80	1477	1505	1533
90	1574	1607	1639
100	1676	1713	1750

Per la conversione temperatura/resistenza/tensione si può utilizzare il circuito di figura 3.9.

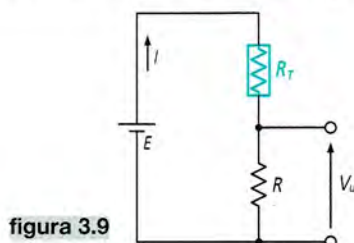


figura 3.9

esempio 3.3

Si ricavi la caratteristica temperatura/tensione del trasduttore di temperatura KTY81-122 (tabella 3.3) nel range da 0 °C a 50 °C a passi di 10 °C sapendo che $E = 5 \text{ V}$ ed $R = 1 \text{ k}\Omega$.

La tensione d'uscita V_u è:

$$V_u = R \cdot I = \frac{R}{R + R_T} \cdot E \quad [3.5]$$

Utilizzando la [3.5] si ricava la tabella 3.4 utilizzando i valori tipici della resistenza R_T .

tabella 3.4

$T [^\circ\text{C}]$	0	10	20	30	40	50
$R_T [\Omega]$	823	895	971	1010	1050	1134
$V_u [\text{V}]$	2,74	2,63	2,53	2,48	2,43	2,34
$\Delta V [\text{V}]$	–	0,11	0,10	0,05	0,05	0,09

3.3 Termistori

I termistori (Thermistor: THERMally sensitive resISTOR) sono trasduttori di temperatura a semiconduttore drogato. La quantità di drogaggio fissa il coefficiente di temperatura (figura 3.10). 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 a escursioni termiche.

La legge di variazione della resistenza con la temperatura di un termistore NTC è:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad [3.6]$$

- R_T è il valore nominale della 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 °C) e alla temperatura generica T , dalla [3.6] si ricava:

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

$$R_T = R_{Ta} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Ta} \right)} = R_{Ta} \cdot e^{\frac{B \cdot (Ta - T)}{Ta \cdot T}} \quad [3.7]$$

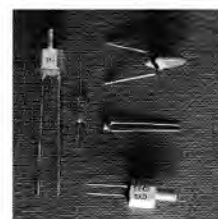


figura 3.10

In verità la temperatura di riferimento $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ può essere diversa, in tal caso è fornita dal costruttore.

esempio 3.3

Si ricavi la caratteristica temperatura/tensione del trasduttore di temperatura KTY81-122 (tabella 3.3) nel range da 0 °C a 50 °C a passi di 10 °C sapendo che $E = 5 \text{ V}$ ed $R = 1 \text{ k}\Omega$.

La tensione d'uscita V_u è:

$$V_u = R \cdot I = \frac{R}{R + R_T} \cdot E \quad [3.5]$$

Utilizzando la [3.5] si ricava la tabella 3.4 utilizzando i valori tipici della resistenza R_T .

tabella 3.4

T [°C]	0	10	20	30	40	50
R_T [Ω]	823	895	971	1010	1050	1134
V_u [V]	2,74	2,63	2,53	2,48	2,43	2,34
ΔV [V]	–	0,11	0,10	0,05	0,05	0,09

3.3 Termistori

I termistori (Thermistor: THERMally sensitive resISTOR) sono trasduttori di temperatura a semiconduttore drogato. La quantità di drogaggio fissa il coefficiente di temperatura (figura 3.10). 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 a escursioni termiche.

La legge di variazione della resistenza con la temperatura di un termistore NTC è:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad [3.6]$$

- R_T è il valore nominale della 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 °C) e alla temperatura generica T , dalla [3.6] si ricava:

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

$$R_T = R_{Ta} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Ta} \right)} = R_{Ta} \cdot e^{B \cdot \frac{Ta - T}{Ta \cdot T}} \quad [3.7]$$



figura 3.10

In verità la temperatura di riferimento $T_a = 20 \text{ °C}$ può essere diversa, in tal caso è fornita dal costruttore.

In **figura 3.11** sono riportate le caratteristiche di quattro termistori NTC della famiglia K22 prodotti dalla Siemens.

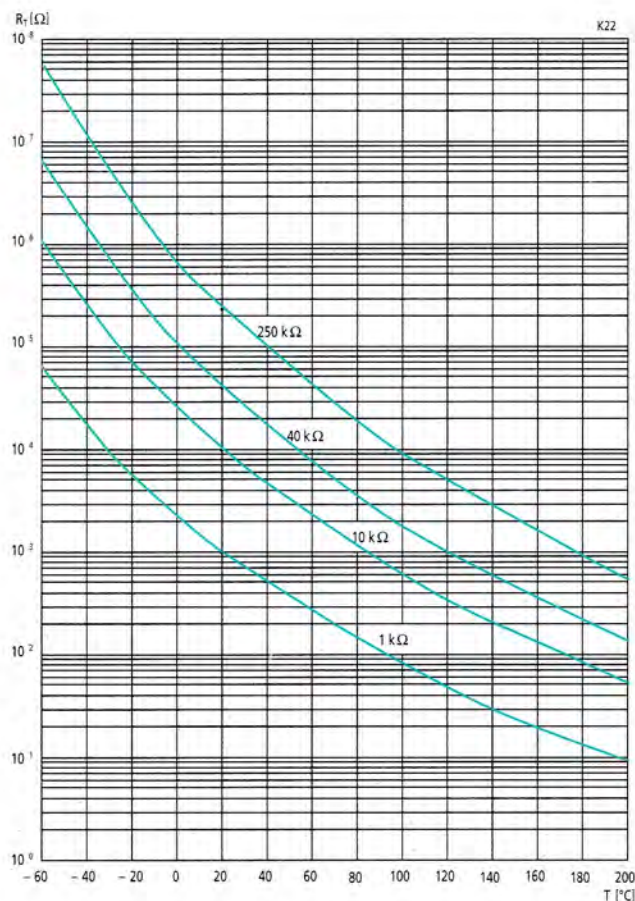


figura 3.11

esempio 3.4

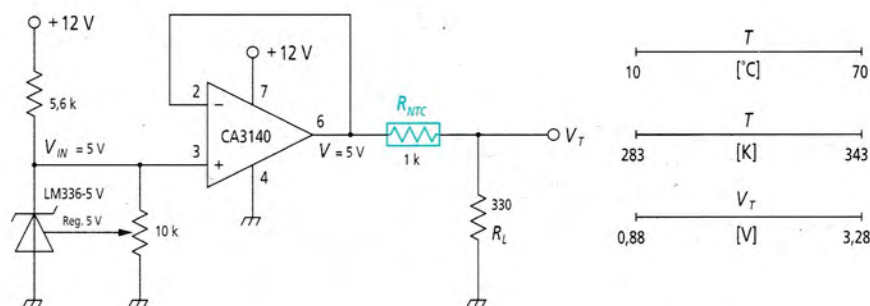
Si progetti un circuito di conversione temperatura/tensione per un termistore NTC K25-1k nel range di temperatura $10^{\circ}\text{C} \div 70^{\circ}\text{C}$ sapendo che $R = 1 \text{ k}\Omega$ ($T_a = 20^{\circ}\text{C}$) e $B = 3530 \text{ K}$.

Utilizzando la [3.7] si possono tabulare i valori assunti dal trasduttore NTC nel campo di funzionamento per incrementi di temperatura $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ (**tabella 3.5**).

tabella 3.5

T [$^{\circ}\text{C}$]	10	20	30	40	50	60	70
R [Ω]	1529	1000	671	463	326	235	172

Il circuito di conversione temperatura/resistenza/tensione è riportato in **figura 3.12**. Lo zener di precisione LM336-5 V genera la tensione di 5 V che alimenta il trasduttore. Tale valore è rigorosamente costante e indipendente dalle variazioni della tensione d'alimentazione esterna. L'amplificatore operazionale svolge la funzione di buffer analogico poiché separa la resistenza del trimmer di $10 \text{ k}\Omega$ dal partitore resistivo d'uscita in modo che quest'ultimo non carichi, ossia non modifichi il valore della resistenza del trimmer.


figura 3.12

Poiché la caratteristica del termistore è decrescente e non lineare, nel circuito di conversione s'introduce la resistenza $R_L = 330 \, \Omega$ (resistenza di linearizzazione) sulla quale è calcolata la tensione d'uscita V_T . La presenza della resistenza di linearizzazione R_L , scelta in modo opportuno, rende la caratteristica V_T/T crescente e quasi lineare all'aumentare della temperatura T (**tabella 3.6**).

tabella 3.6

$T \, [^{\circ}\text{C}]$	10	20	30	40	50	60	70
$R_T \, [\Omega]$	1529	1000	671	463	326	235	172
$V_T \, [\text{V}]$	0,88	1,24	1,64	2,08	2,51	2,92	3,28
$\Delta V \, [\text{V}]$	—	0,36	0,40	0,44	0,43	0,41	0,36

esercizi

svolti

1 Perché la sensibilità del termistore NTC è maggiore di quella della termoresistenza RTD?

A parità d'incrementi ΔT la variazione ΔR della NTC è più alta di quella della RTD (**figura 3.1**).

2 Perché la linearità della caratteristica del trasduttore KTY è inferiore rispetto a quella della termoresistenza RTD?

La relazione [3.4] della KTY è esponenziale a differenza della [3.1] della RTD che è di tipo lineare.

3 Per rilevare sperimentalmente la caratteristica R/T di un termistore di tipo NTC, quali strumenti occorrono?

Termistore NTC

Alimentatore in DC variabile 0÷12 V

Riscaldatore in DC 12 V

Multimetro per la misura della resistenza

Sonda di temperatura e multimetro per la misura della temperatura

Supporto metallico riscaldato solidale con la NTC

Trasduttori di luminosità a variazione di resistenza

I fotoresistori o LDR (*Light Dependent Resistor*) sono trasduttori di luminosità a variazione di resistenza utilizzati nell'ambito della luce visibile (**figura 4.1**). Sono costituiti con materiali semiconduttori intrinseci o estrinseci. Quando la superficie sensibile del fotoresistore viene esposta alla luce, l'energia luminosa assorbita provoca la rottura dei legami covalenti e quindi l'aumento delle coppie lacuna-elettrone rispetto a quelle generate per effetto termico. Questo fenomeno, noto come **effetto fotoconduttivo**, determina l'aumento della conducibilità del semiconduttore. Le variazioni della resistenza R in funzione dell'illuminamento E è data dalla seguente legge:

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

- A [Ω/lx] è la costante dimensionale dipendente dalla forma geometrica della superficie sensibile che condiziona la *sensibilità* del trasduttore;
- E [$\text{lx} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$] 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. 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 [W/m^2]. Si ha: $1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1,46 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$;
- α è la costante adimensionale minore di 1 dipendente dal tipo di semiconduttore.

4.1 Fotoresistore NORP-12

La resistenza di un fotoresistore commerciale (**figura 4.1**) varia da alcuni $\text{M}\Omega$, in condizioni di completa oscurità, ad alcune decine di Ω quando è sottoposta a illuminamenti molto intensi. La caratteristica resistenza/illuminamento del fotoresistore NORP-12 [RS 651-507] (RS Componenti elettronici www.rs-components.it) è instabile nel tempo e presenta un'accentuata non linearità e una pendenza negativa (**figura 4.2**).



figura 4.1

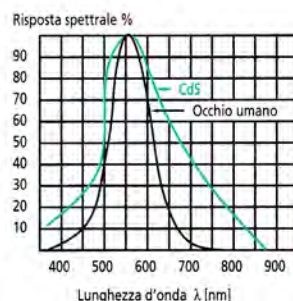
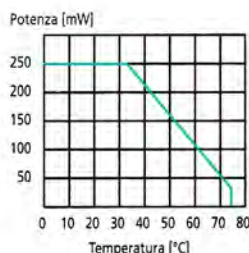
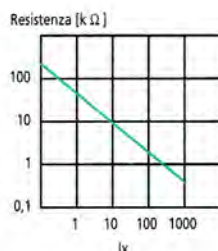
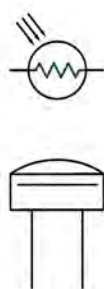


figura 4.2

In generale i fotoresistori hanno bassa affidabilità, tempi di risposta lunghi quando passano dalla luce al buio e una sensibilità che dipende dalla lunghezza d'onda e dalle caratteristiche costruttive (area utile, forma, ecc.).

Il fotoresistore è spesso utilizzato nei sistemi di puntamento o per pilotare direttamente transistor, relè, ecc. Le sue caratteristiche lo rendono più adatto all'utilizzo in funzionamento ON/OFF anche se, a volte, è utilizzato in applicazioni di tipo lineari. Le caratteristiche principali elettriche del fotoresistore NORP-12 sono riportate nella **tabella 4.1**.

tabella 4.1

Caratteristiche elettriche	Valori	Unità di misura
Resistenza di 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 (figura 4.2)	250	mW
Range di temperatura	-60 ÷ +75	°C
Capacità di oscurità (tipica)	3,6	pF
Reazione spettrale di picco	0,53	μm

Nella **tabella 4.2** sono riportate le caratteristiche principali del fotoresistore NORPS-12 della Silonex (www.silonex.com).

tabella 4.2

Caratteristiche elettriche	Valori	Unità di misura
Resistenza di oscurità	1	MΩ
Resistenza minima con luce	5,4	kΩ
Resistenza massima con luce	12,6	Ω
Tensione di picco (AC e DC)	250	V
Potenza max (a 30 °C)	250	mW
Range di temperatura	-60 ÷ +75	°C
Reazione spettrale di picco	550	nm

Per la conversione illuminamento/resistenza/tensione si possono utilizzare circuiti a partitore di tensione o a ponte di Wheatstone (**figura 4.3**). Negli schemi elettrici proposti compaiono le resistenze R_L , dette resistenze di linearizzazione, che rendono la caratteristica del trasduttore I_x/V_0 quasi lineare.

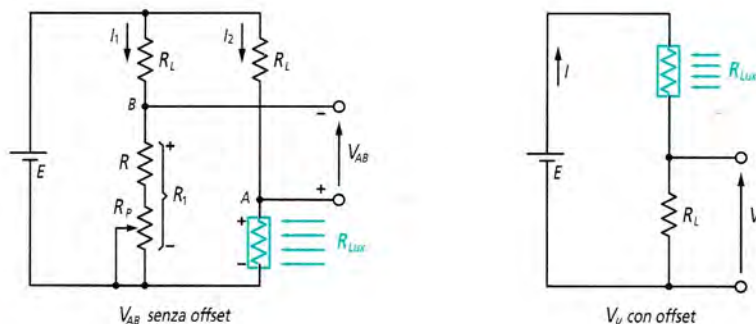


figura 4.3