

Istituto **P**rofessionale per L'**i**ndustria L'**A**rtigianato
"Antonio Guastaferrò"
63074 SAN BENEDETTO DEL TRONTO (AP)

Classe : 5A_IPAI

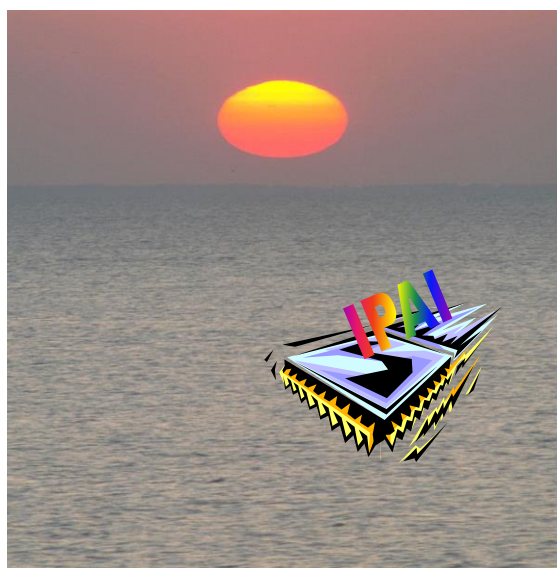
A.S. : 2019-2020

Docenti : Tufoni Franco -- Enrico Ruggieri

Disciplina : Tecnologie elettriche-elettroniche, dell'automazione e applicazioni

Acquisizione - Elaborazione dati

Sensori e Trasduttori



1 - INTRODUZIONE

La disciplina si propone lo scopo di far acquisire specifiche conoscenze sui moderni e sofisticati apparati, oggi in grande evoluzione, quali:

- ↪ i servomeccanismi;
- ↪ gli automatismi gestiti da computer;
- ↪ i controlli di processi industriali;
- ↪ la trasmissione dati rilevati in posti diversi ma elaborati da un unico centro computerizzato.

Qualsiasi controllo deve affidare il suo funzionamento a particolari dispositivi in grado di rilevare le grandezze fisiche da controllare.

Nel controllo di una caldaia, utilizzata per il riscaldamento di una abitazione, ad esempio, è necessario controllare la pressione nell'impianto, le temperature dei locali ed esterna.

I dispositivi, in grado di rilevare le grandezze fisiche da controllare, sono detti ***sensori e trasduttori***.

È lecito chiedersi se il termine sensore o trasduttore ha lo stesso significato. Nel gergo corrente sembra di sì, ma se analizzato sia nel senso letterario che tecnico si attribuisce a ciascuno una precisa funzione

2 - SENSORE

Si definisce sensore un dispositivo sensitivo o elemento sensibile in grado di rilevare le variazioni di una **grandezza fisica** (temperatura ,umidità, pressione, posizione, luminosità , velocità di rotazione, ecc.) e di fornire in uscita un'altra **grandezza fisica** (resistenza , capacità, ecc.) senza utilizzo di fonti di energia esterna come mostrato in fig.1



Fig.1

Ad esempio il mercurio ,utilizzato nei termometri per rilevare la temperatura, e un sensore perché ad una variazione della temperatura in ingresso corrisponde in uscita una variazione proporzionale di volume fig.2

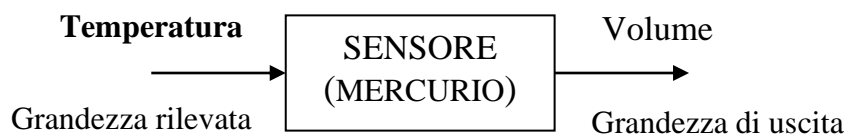


Fig.2

Un potenziometro a slitta (slider-lineare) è un altro esempio di sensore, poiché a spostamenti lineari del cursore mobile corrispondono variazioni proporzionali della resistenza fig.3

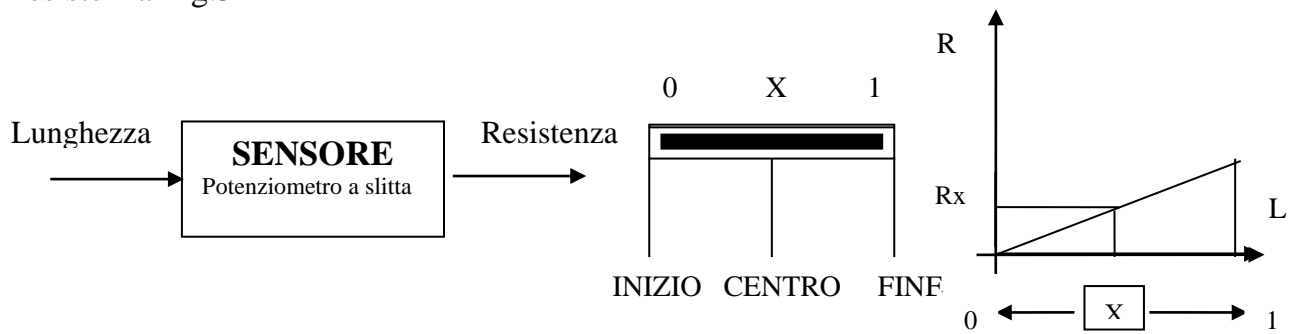


Fig.3

Un termistore NTC (Negative Temperature Coefficient) è un sensore di temperatura. Il valore della resistenza misurato ai suoi capi, e funzione della temperatura, poiché ad un aumento della temperatura corrisponde una diminuzione del valore della resistenza. (fig. 4)

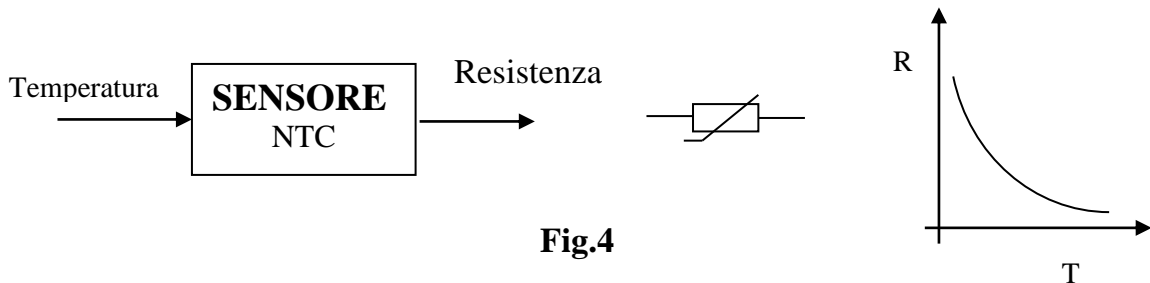


Fig.4

3 - TRASDUTTORE

Un controllo di processo è costituito normalmente da circuiti elettrici che non possono utilizzare direttamente la grandezza fisica presente all'uscita del sensore. Pertanto, in molte applicazioni è necessario trasformare la grandezza fisica presente all'uscita del sensore in una grandezza di natura elettrica, generalmente una tensione o una corrente , direttamente manipolabile dal controllo di processo.

Il dispositivo che opera la conversione fa uso di energia esterna come mostrato nella fig.5 . la resistenza della NTC, indicata con $R_{NTC}(T)$, è trasformata dal *convertitore di tensione* $V(T) = R_{NTC}(T) \cdot I$, prelevando energia elettrica dal generatore di corrente costante

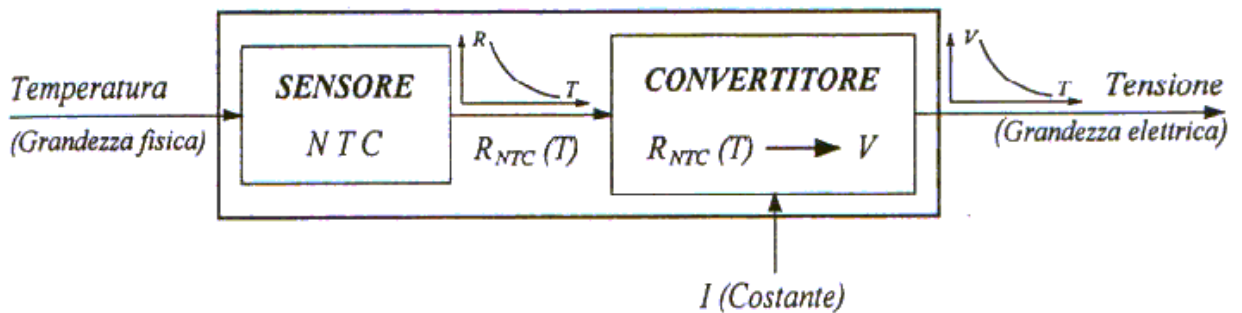


Fig.5

Il sensore e il convertitore formano nel loro insieme un *trasduttore* che trasforma l'energia termica in ingresso in energia elettrica utilizzabile in uscita(fig. 6)

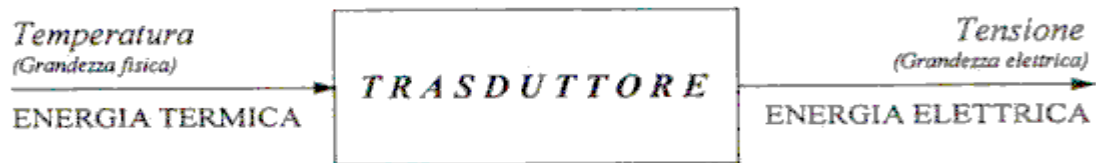


Fig.6

Nel caso specifico del trasduttore di fig.6, le variazioni di energia termica si manifesta con una variazione dello stato termodinamico del sensore, misurabile attraverso la variazione della temperatura.

In uscita la variazione di energia elettrica si manifesta con la variazione dello stato elettrico del dispositivo rilevabile attraverso la variazione della tensione agli estremi della NTC.

4 - PARAMETRI DEI TRASDUTTORI

Un trasduttore di buona qualità deve possedere molteplici requisiti, non ultimo quello relativo al costo. Le principali caratteristiche, fornite dalle case costruttrici, sono:

1. caratteristica di trasferimento;
2. linearità;
3. sensibilità;
4. range di funzionamento;
5. tempo di risposta;
6. isteresi;
7. risoluzione;
8. segnale d'uscita.

Nel seguito le grandezze fisiche d'ingresso sono indicate con I e quelle d'uscita con U .

4.1 - Caratteristica di trasferimento

La *caratteristica di trasferimento*, indica la relazione fra la grandezza da rilevare e la grandezza d'uscita del trasduttore; tale relazione può essere descritta da un'espressione matematica, da una tabella di valori, da una curva teorica o sperimentale.

Se si riporta su un piano cartesiano la grandezza d'uscita in funzione di quella d'ingresso si ottiene un grafico del tipo di quello riportato in fig.7a.

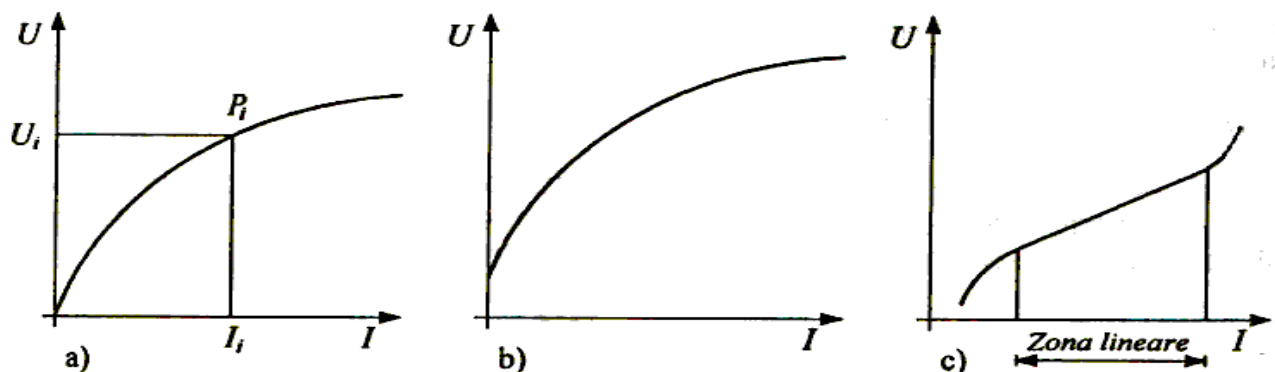


Fig.7

Dal grafico si evidenzia che un generico punto P_i dà la corrispondenza tra il valore della grandezza d'ingresso I_i rispetto al corrispondente valore assunto della grandezza d'uscita U_i . Se la caratteristica di trasferimento di un trasduttore di precisione è lineare, allora la variazione della grandezza d'uscita (variabile dipendente) è direttamente proporzionale a quella d'ingresso (variabile indipendente).

In generale però la caratteristica non è lineare e può non passare per l'origine (fig. 7b).

Se la caratteristica presenta linearità solo in una ristretta fascia di valori, è opportuno utilizzare il trasduttore solo nel range di intervallo che risulta lineare, anche se si riduce il *campo di lavoro* (fig. 7c).

L'equazione matematica che rappresenta la caratteristica di un trasduttore lineare deve essere del tipo $y = m \cdot x$ se la retta passa per l'origine (fig. 8a), o del tipo $y = m \cdot x + k$ se la retta non passa per l'origine ed interseca l'asse y nel punto di coordinate $P(x=0, y=k)$ (fig. 8b).

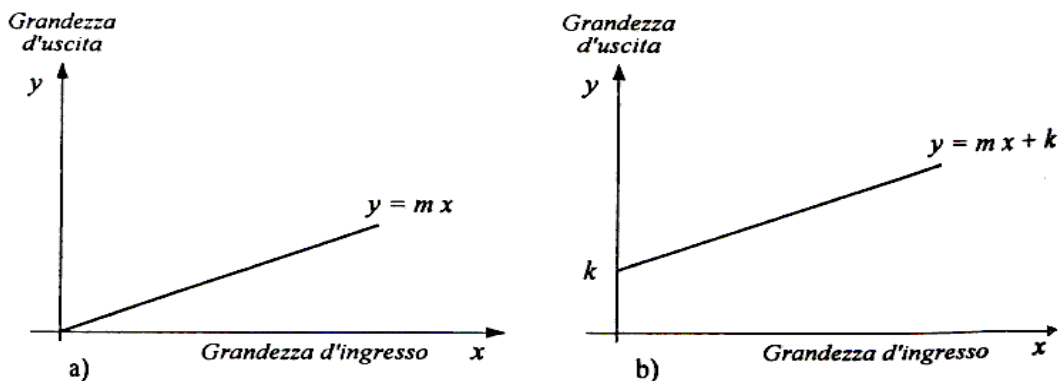


Fig.8

4.2 - Linearità

La **linearità** è il parametro del trasduttore che evidenzia l'*errore* (o deviazione) tra la caratteristica ideale teorica (funzione lineare) e la reale curva di trasferimento del trasduttore.

La deviazione è calcolata rispetto alla retta di equazione $y = m \cdot x + k$ che meglio approssima la caratteristica reale del trasduttore (fig. 9).

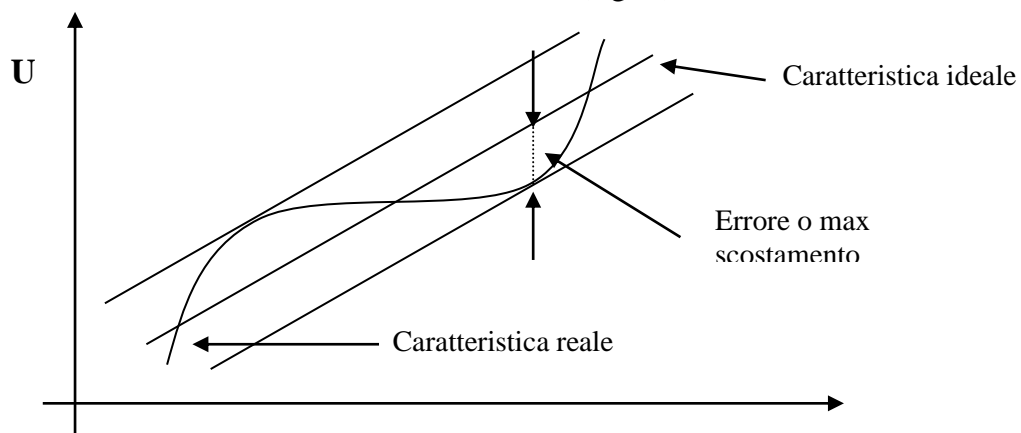


Fig.9

In realtà, poiché non esiste uno standard definito di tale parametro, i costruttori forniscono definizioni di linearità diverse: alcuni considerano la retta passante per i punti estremi, mentre altri quella calcolata con il metodo dei minimi quadrati.

4.3 - Sensibilità

Si definisce *sensibilità* S di un trasduttore il rapporto tra la variazione della grandezza d'uscita ΔU (presumibilmente grande) e la variazione di quella d'ingresso che la provoca (possibilmente piccola).

Si ha:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Un buon trasduttore deve avere una grande sensibilità, ossia ad una piccola variazione della grandezza d'ingresso deve corrispondere una grande variazione di quella d'uscita. Se la caratteristica di funzionamento ha un coefficiente angolare molto elevato il trasduttore ha una buona sensibilità perché, a parità di variazione della grandezza d'ingresso, la variazione di quella d'uscita è massima (fig.10).

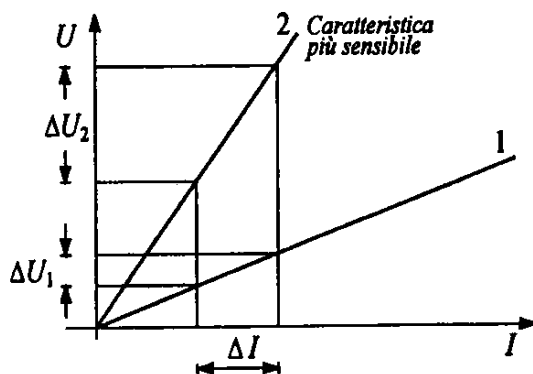


Fig.10

la sensibilità del trasduttore per la caratteristica rappresentata dalla curva 2 è maggiore di quella di un trasduttore avente come caratteristica la curva 1 perché, a parità di variazione della grandezza d'ingresso ΔI , risulta $\Delta U_2 > \Delta U_1$.

Se la caratteristica è lineare, la sensibilità è costante in tutta la gamma (range) di funzionamento.

4.4 - Range di funzionamento.

Si definisce *range di funzionamento* o campo di lavoro la differenza tra il valore massimo e quello minimo che può assumere la grandezza d'ingresso.

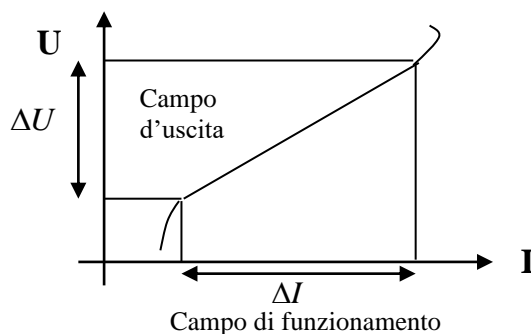


Fig.11

Questa caratteristica (fig.11), fornita generalmente dal costruttore, rappresenta il campo (range) di funzionamento ottimale entro il quale sono garantite le prestazioni del trasduttore, comprese la linearità e l'integrità.

4.5 - Tempo di risposta.

Si definisce *tempo di risposta* il tempo impiegato dal trasduttore a raggiungere un valore di regime conforme a quello della grandezza d'ingresso, quando quest'ultima subisce una variazione improvvisa.

Il tempo di risposta è un parametro dinamico, dovuto all'inerzia del dispositivo. Nella pratica il tempo di risposta è il tempo necessario perché l'uscita raggiunga il 90% o 98% del valore finale(fig.12)

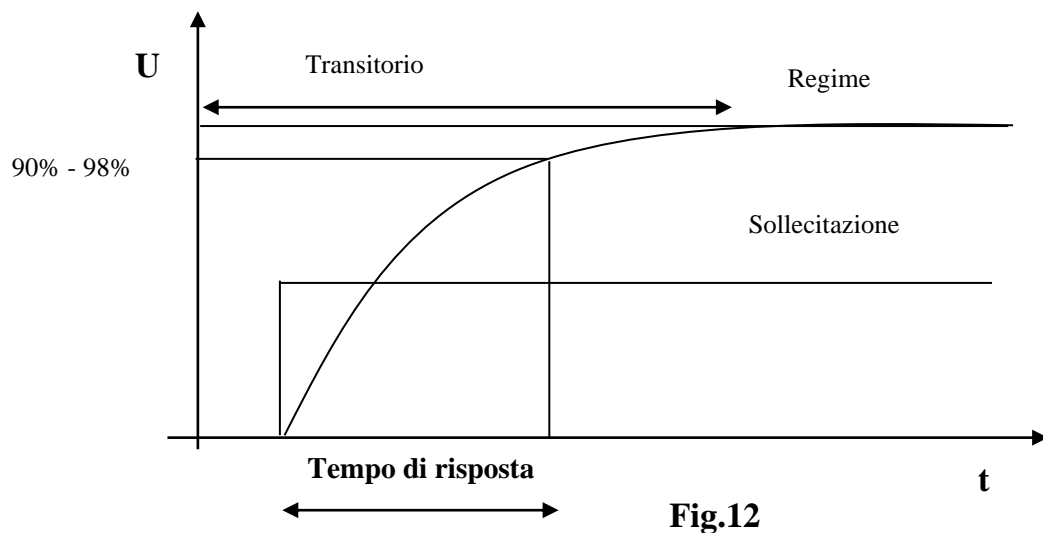


Fig.12

4.6 - 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 (fig. 13).

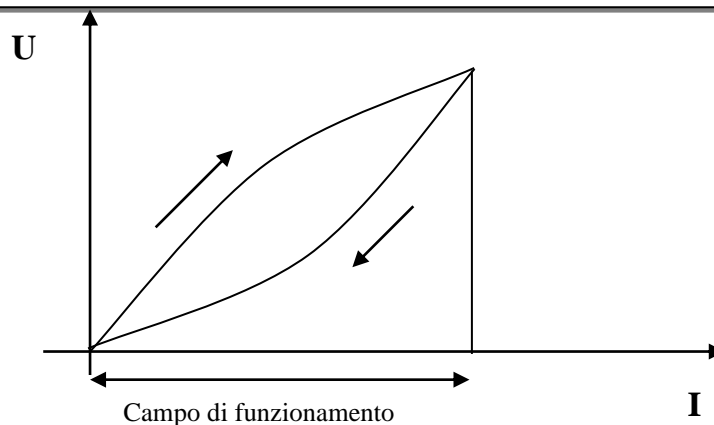


Fig.13

Un trasduttore ideale non presenta isteresi e la sua caratteristica è unica.

4.7 - Risoluzione

La **risoluzione** è la minima variazione della grandezza d'ingresso in grado di provocare una variazione percettibile su quella d'uscita.

Se è riferita alla sola grandezza d'uscita, esprime il rapporto, formulato in percentuale, tra la minima variazione della grandezza d'uscita e il valore di fondo scala.

$$Risoluzione \text{ \%} = \frac{GRANDEZZA \text{ uscita}(\min)}{G.uscita(Fondo \text{ scala})} \cdot 100$$

Un buon trasduttore presenta una risoluzione molto bassa.

4.8 - Segnale d'uscita

Il **segnale d'uscita**, è un parametro molto importante, poiché condiziona il progetto dei blocchi successivi: infatti la grandezza in uscita da un trasduttore può essere una tensione, una corrente, una frequenza, una variazione di resistenza, di capacità o di induttanza; inoltre il segnale d'uscita può essere analogico o digitale.

5 - CRITERI PRATICI DI SCELTA DEI TRASDUTTORI

Un trasduttore ideale dovrebbe avere le seguenti specifiche:

- ↪ caratteristica di trasferimento lineare;
- ↪ range di funzionamento ampio;
- ↪ alta sensibilità;
- ↪ bassa risoluzione;
- ↪ tempo di risposta nullo;
- ↪ assenza di isteresi.

In realtà un generico trasduttore presenta solo qualcuna di queste specifiche.

È compito del progettista scegliere il dispositivo che meglio si adatta all'apparato da realizzare. In ogni caso nella scelta non si può prescindere dal costo e dalla reperibilità 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 le seguenti specifiche:

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

6 - CLASSIFICAZIONE DEI TRASDUTTORI

Esistono classificazioni diverse dei trasduttori:

1. classificazione dei trasduttori, basata sulla presenza o meno di una fonte di energia esterna necessaria al loro funzionamento (*passivi e attivi*);
2. classificazione basata sul tipo di segnale d'uscita (*analogici e digitali*);
3. classificazione più comune e forse più significativa è fatta in base alla grandezza fisica che esso deve rilevare (*temperatura, umidità, pressione, ecc*).

1) Una prima classificazione dei trasduttori, basata sulla presenza o meno di una fonte di energia esterna necessaria al loro funzionamento, li distingue in:

↪ **passivi**: sono quei trasduttori ai quali bisogna fornire energia esterna perché la grandezza fisica d'uscita possa essere trasformata in una grandezza elettrica. A tal proposito si pensi al potenziometro che fornisce in uscita valori di resistenza diversi a seconda della posizione in cui si trova il cursore mobile. Per la conversione delle variazioni di resistenza in variazioni di tensione o corrente è necessario fornire energia al potenziometro.

↪ **attivi**: forniscono in uscita una grandezza direttamente utilizzabile senza consumo di energia esterna. In taluni casi il trasduttore fornisce in uscita una grandezza elettrica che può essere manipolata dai circuiti di elaborazione. E' il caso delle cellule fotovoltaiche e delle termocoppie.

2) Una seconda classificazione basata sul tipo di segnale d'uscita porta a distinguere i trasduttori in:

↪ **analogici** perché presentano una caratteristica di trasferimento costituita da una funzione continua; la grandezza d'uscita e quella d'ingresso variano con continuità assumendo tutti i valori appartenenti a un sotto-insieme dei numeri reali (fig. 14);

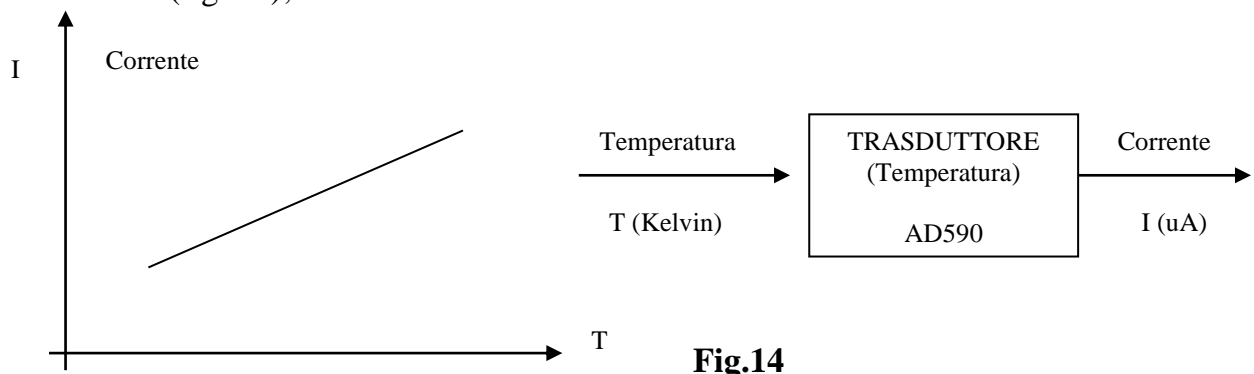
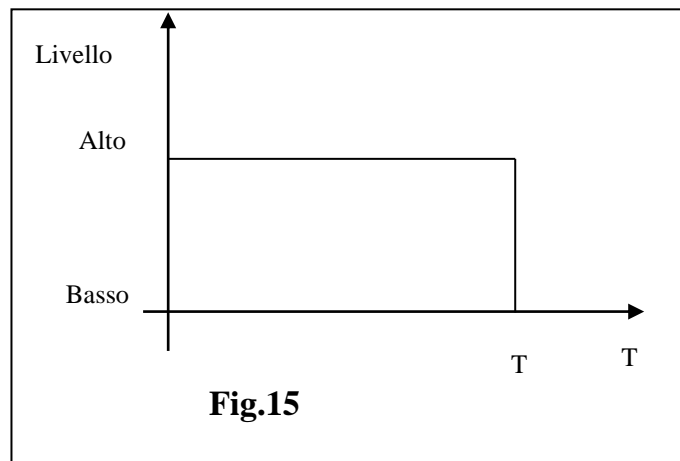


Fig.14

↪ **digitali** perché presentano una caratteristica di trasferimento che può assumere solo due distinti valori, ossia *alto* e *basso*; al valore alto si associa il livello logico "1", mentre a quello basso si associa il livello logico "0" (fig.15).



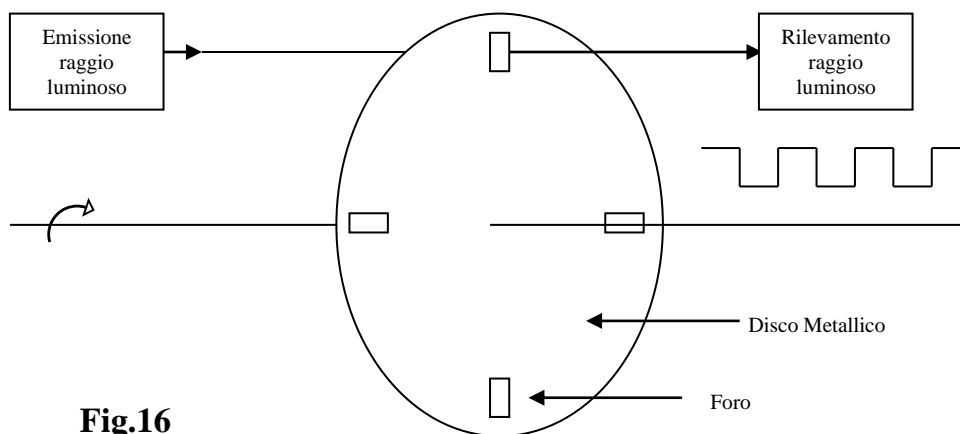
Un esempio di trasduttore di temperatura digitale di tipo ON - OFF è la lamina bimetallica che fornisce in uscita un livello alto o basso a seconda se la temperatura supera o non una temperatura di riferimento T_r (fig.15).

Alcuni trasduttori digitali forniscono in uscita un segnale formato da un *treno* di impulsi.

Sono costituiti da un dispositivo emettitore di radiazione luminosa o infrarossa, detto anche trasmettitore, da un ricevitore e da un disco forato che ruota a velocità dipendente dalla applicazione specifica in cui il dispositivo è utilizzato (fig. 16).

Il trasmettitore e il ricevitore sono posti sullo stesso asse (che risulta ortogonale al disco) in modo che il raggio emesso dal trasmettitore possa attraversare uno dei fori e raggiungere il ricevitore che lo trasforma in un segnale elettrico.

La frequenza del treno d'impulsi all'uscita del ricevitore dipende dalla velocità di rotazione del disco e dal numero dei fori.



3) La classificazione più comune e forse più significativa dei trasduttori è fatta in base alla grandezza fisica che esso deve rilevare. In base a 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 velocità.

7 – TRASDUTTORI COMMERCIALI

Considerata l'importanza che i trasduttori hanno in un progetto di un sistema di acquisizione dati e/o controllo, di seguito sono presentati alcuni sensori/trasduttori che possono essere utilizzati per il rilievo di grandezze termiche, meccaniche, fisiche, elettriche, ecc.

7.1 Trasduttori di temperatura

I trasduttori di temperatura sono utilizzati in molte applicazioni. Le tecniche di rilevamento della temperatura sono basate:

1. principio della dilatazione dei corpi (termometro a mercurio);
2. effetto termico (lamina bimetallica);
3. effetto termoelettrico (termocoppie);
4. variazione della resistenza in funzione della temperatura (termoresistenze, termistori);
5. sensori a semiconduttore.

Nella fig. 17 sono riportate le curve caratteristiche normalizzate di alcuni trasduttori. Si osserva che le termoresistenze non necessitano di circuito di linearizzazione perché presentano una caratteristica lineare in un ampio range del campo di funzionamento.

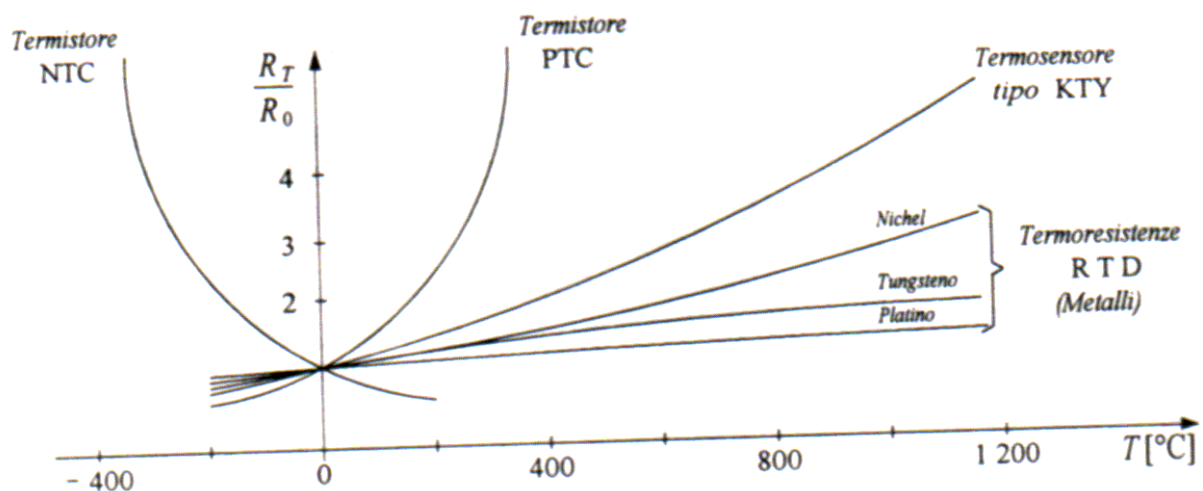


Fig.17

7.1.1 Lamine Bimetalliche (Interruttore termico bimetallico)

Sono dispositivi costituiti da due (o più) lamine di metalli diversi saldate assieme. Vincolata ad un'estremità, al variare della temperatura, la lamina bimetallica si deflette, a causa del diverso coefficiente di dilatazione dei due metalli di cui è composta; l'altra estremità pertanto si sposta e determina la chiusura o l'apertura di un interruttore.

Sono impiegate in sistemi di controllo di tipo ON-OFF quali sistemi di riscaldamento, ventilazione, ecc., con limiti di temperatura di diverse centinaia di gradi centigradi.

7.1.2. Termocoppie.

Le termocoppie sono fra i sensori di temperatura più diffusi in quanto presentano i seguenti vantaggi: possibilità di misura in un ampio campo di temperature ($-200^{\circ}\text{C} \div 2000^{\circ}\text{C}$); possibilità di impiego di materiali resistenti alle diverse condizioni ambientali; costi contenuti. Fra gli inconvenienti vi sono la mancanza di linearità e i bassi livelli della tensione di uscita (circa $10\mu\text{V}/^{\circ}\text{C} \div 80\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), il basso valore di uscita rende difficile la rivelazione di piccole variazioni di temperatura (circa 10°C).

Il loro principio di funzionamento si basa sull'effetto Seebeck: due conduttori metallici diversi A e B uniti alle due estremità sono percorsi da una corrente proporzionale alla differenza di temperatura fra un giunzione, detta giunzione calda (J_h :hot junction), e l'altra, detta giunzione fredda (J_c :cold junction).

Se, come indicato in fig 18. si considerano i due conduttori scollegati, ad esempio in corrispondenza della giunzione fredda (J_c), fra i terminali scollegati si manifesta una f.e.m. E proporzionale alla differenza di temperatura $T_h - T_c$. Se la giunzione fredda è mantenuta a $T_c = 0^{\circ}\text{C}$, la f.e.m risulta proporzionale a T_h .

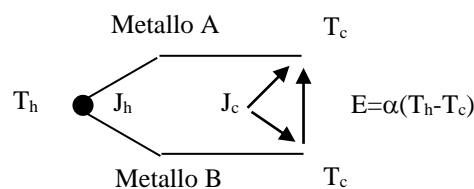


Fig. 18

A seconda delle condizioni ambientali e delle temperature da rilevare, vengono utilizzate diverse combinazioni di metalli (Tab 1.), a cui corrispondono le curve di trasferimento ideali di fig. 19

Tipo (UNI 7938)	Elementi +/-	Range di temperature ($^{\circ}\text{C}$)
E	Cromel/Costantana	$0 \div 900$
J	Ferro/Costantana	$-200 \div 700$
K	Cromel/Alumel	$-200 \div 1200$
R,S	Platino-Rodio/Platino	$0 \div 1400$
T	Rame/Costantana	$-200 \div 350$
C	Tungsteno/renio	$0 \div 2000$

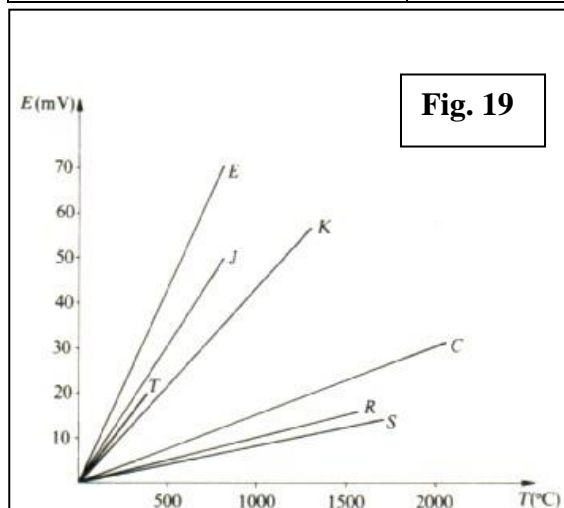


Fig. 19

Tab 1

I parametri caratteristici principali sono l'intervallo di temperatura in cui può operare, o la massima temperatura di impiego, e la tensione fornita; essi dipendono dai materiali con cui è costituita la termocoppia. Ad esempio, la termocoppia rame-costantana è caratterizzata dalla temperatura massima di 350°C , a cui la tensione di uscita è di circa 20 mV .

Per ottenere misure di temperatura precise occorre compensare l'errore dovuto al collegamento dei terminali di uscita della

termocoppia con i conduttori, generalmente in rame, (si creano altre due giunzioni e quindi due f.e.m.) e occorre disporre di una temperatura di riferimento stabile a 0°C, cosa decisamente poco pratica.

La connessione della termocoppia al sistema di acquisizione o di misura deve avvenire tramite terminali compensati ed un blocco di compensazione (fig. 20). I terminali compensati sono scelti in modo che le loro caratteristiche siano simili a quelle dei metalli della termocoppia, nell'intervallo della temperatura di impiego; in questo modo la tensione della termocoppia è trasferita al sistema di misura col minimo errore. Inoltre, dato che la giunzione fredda è posta ad una temperatura diversa da zero gradi, viene inserito un blocco di compensazione, che aggiunge alla tensione della termocoppia una tensione tale da compensare l'errore.

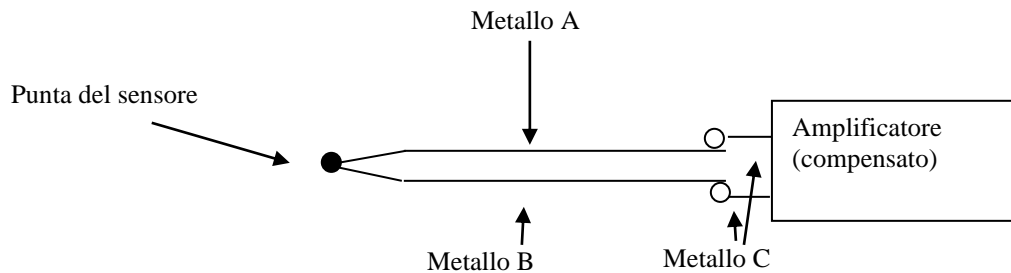


Fig. 20

Il circuito di fig. 20 è molto pratico ed è quello prevalentemente usato; generalmente i fili sono racchiusi in una guaina flessibile di acciaio inossidabile per aumentare la robustezza.

In commercio sono disponibili integrati specifici che contengono il blocco di compensazione e un amplificatore di segnale di uscita (ad esempio l'integrato AD594 per termocoppie di tipo J e K).

7.1.3. Termoresistenza RTD

La termoresistenza o **RTD** (Resistance Temperature Detector → rivelatore di temperatura a resistenza) è un trasduttore di temperatura molto utilizzato in applicazione industriale. Essa è costruita con materiali metallici come il platino, nichel, tungsteno, ecc. I costruttori forniscono i valori della resistenza R , espressa in Ohm, in funzione della temperatura T espressa in gradi Celsius (°C).

La legge di variazione della resistenza con la temperatura, lineare in un vasto range di funzionamento, è:

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

dove:

R_T = resistenza alla temperatura generica T

R_0 = resistenza alla temperatura 0°C

α = costante dimensionale

Trasduttore RTD PT100

Il trasduttore PT100 è una termoresistenza di precisione in pellicola di platino, robusta, economica, di dimensioni contenute e con caratteristica lineare in un vasto range. La lamina al platino è disposta su un supporto di allumina ed è tarata a raggio laser.

Caratteristiche PT100:

materiale	Platino
Resistenza R_0 (0°C)	$100 \Omega + 0,1 \%$
Coefficiente di temperatura (α)	$3,85 \cdot 10^{-3} \text{ C}^{-1}$
Range di funzionamento	$-50^\circ\text{C} \div 260^\circ\text{C}$

7.1.4. Termistori

Sono costituiti da miscele di ossidi di vari metalli, come cobalto, nichel e manganese, e sono spesso incapsulati in vetro. Sono dispositivi caratterizzati da una forte dipendenza della tensione di uscita dalle variazioni di temperatura e si suddividono in NTC (Negative Temperature Coefficient), con coefficiente di temperatura negativo, e PTC (Positive Temperature Coefficient), con coefficiente di temperatura positivo in un determinato intervallo di temperatura. Ad esempio se un NTC è inserito in un circuito e ad esso è applicata una certa quantità di calore, la resistenza e quindi la tensione ai suoi capi diminuiscono. I termistori hanno i vantaggi di: grande sensibilità a piccole variazioni di temperatura (la resistenza può variare del 5% per ogni grado centigrado di variazione della temperatura); bassi tempi di risposta; ripetibilità della misura; possibilità di grandi varietà di montaggio. I maggiori inconvenienti: la non linearità (la curva di trasferimento è di tipo esponenziale Fig 17, però è possibile la linearizzazione, mediante opportune reti resistive); il limitato intervallo di temperatura di impiego (temperatura massima dell'ordine di 150°C).

7.1.5. Trasduttori a semiconduttore

Sfruttano il fatto che la tensione ai capi di una giunzione a semiconduttore polarizzata direttamente varia con la temperatura di circa $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ in un ampio range di temperatura.

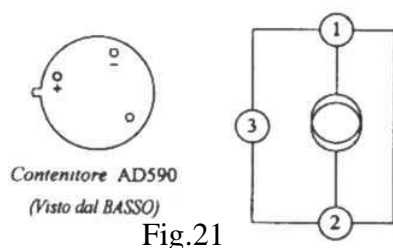
In commercio sono disponibili:

1. Transistor-sensori (Motorola MTS 102/103/105);
2. Sensori integrati (LM35 e LX5600: forniscono una tensione proporzionale alla temperatura);
3. Sensori integrati (AD590: fornisce una corrente proporzionale alla temperatura)

7.1.5.1. Trasduttore di temperatura AD590

Il trasduttore di temperatura AD590, prodotto dalla Analog Devices in forma integrata, è realizzato con materiale semiconduttore e produce in uscita una corrente proporzionale alla temperatura (espressa in gradi Kelvin).

È un dispositivo a due terminali e per tensioni di alimentazioni nel range $4 \div 30\text{V}$ genera una corrente di $1 \mu\text{A}/\text{K}$ (fig 21)



Nelle applicazioni pratiche si pone il problema di convertire il segnale di uscita dell'AD590 in tensione. Molto spesso è necessario adattare il segnale alle specifiche dei convertitori A/D.

7.1.6. Pirometri ottici.

Sono dispositivi sensibili alle radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa fra circa $0,3\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$ e trovano impiego quando fra il sensore e l'ambiente da controllare non è attuabile un contatto diretto ma è invece attuabile un contatto visivo.

La radiazione generata nell'ambiente di cui si vuole rilevare la temperatura, coerente con la risposta spettrale del sensore scelto, determina una corrente proporzionale alla temperatura. I pirometri lavorano in un vasto campo di temperature, fino ad alcune migliaia di °C, ma presentano scarsa linearità.

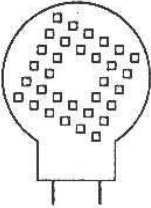
7.2.1. Trasduttori di umidità

All'inizio i trasduttori di umidità erano richiesti in quegli impianti sede di processi sensibili all'umidità, tra i quali le serre. Oggi la diffusione degli impianti di riscaldamento e di condizionamento ha ampliato la potenziale richiesta di questi trasduttori.

Tra i principali effetti alla base di questi sensori troviamo una volta di più la variazione della resistività, ma anche quella della capacità che ora esamineremo. Vi sono pellicole di materiale plastico porose che possono essere usate come dielettrico di un condensatore: si parla allora di sensori capacitivi la cui variazione di capacità offre una misura dell'umidità relativa. La lettura di una capacità non è un problema sostanzialmente più grande della lettura di una resistenza: basta infatti usare un ponte capacitivo alimentato in alternata, anziché un ponte resistivo alimentato in corrente continua.

7.2.1.1. Trasduttore di umidità 2322 691 900001 Philips Elcoma (capacitivo)

Il trasduttore di umidità 2322 691 900001, prodotto dalla Philips Elcoma (fig 22.), è stato progettato per le misure di umidità relativa, definita come il rapporto tra l'umidità assoluta (quantità di vapore acqueo in un metro cubo di aria) e l'umidità di saturazione (massima quantità di vapore acqueo in un metro cubo di aria):

 <p>fig 22</p>	Umidità relativa	Capacità Cs (pF)	$U\% = \frac{U_{ass}}{U_{sat}} \cdot 100$
	0	110,0	
	10	112,8	
	20	115,5	
	30	118,0	
	40	120,8	
	50	124,2	
	60	127,8	
	70	132,0	
	80	137,0	
	90	143,8	
	100	155,0	

tab 2

Il dispositivo non è sensibile alle sostanze inquinanti sempre presenti nell'aria; ha una costante dielettrica relativa ed una capacità C_s che dipendono dall'umidità relativa. Le facce del dielettrico, ricoperte da un sottile strato di oro, costituiscono le armature del condensatore alle quali vengono saldati i due reofori. Il trasduttore è protetto da un involucro plastico forato. La capacità C_s è costituita da una capacità fissa C_0 alla quale si somma una capacità ΔC , dovuta alla variazione di umidità relativa secondo i valori riportati in tabella 2

$$C_s = C_0 + \Delta C$$

Le caratteristiche principali del trasduttore sono:

- tensione alimentazione max 15v;
- range dal 10% al 90% (umidità relativa);
- campo di temperatura $0^\circ\text{C} \div 60^\circ\text{C}$;
- capacità nominale ($U\%=43\%$, $T=25^\circ\text{C}$, $f=100\text{KHz}$) $122 \text{ pF} \pm 15\%$
- tempo di risposta max < 5 minuti (risposta lenta)
- banda di frequenza $1\text{Hz} \div 1 \text{ MHz}$
- isteresi 3%
- Linearità contenuta all'1% nel range di funzionamento.

7.3.1. Trasduttori di pressione

I trasduttori di pressione trasformano la misura di una pressione in una grandezza elettrica rilevabile da un circuito elettronico. Prima di procedere sui trasduttori di pressione è però bene chiarire che i tipi di pressione che si misurano di solito sono tre:

1. assoluta
2. differenziale
3. relativa

Ogni misura di pressione è fatta rispetto ad una pressione di riferimento:

nella misura della pressione assoluta si prende come riferimento il vuoto, in quella differenziale un'altra pressione, ed in quella relativa (gauge pressare) la pressione atmosferica.

Nel sistema S.I. l'unità di misura della pressione è il Pascal. Spesso, in ambito industriale, si utilizzano anche le unità di misura di seguito riportate

Unità di misura	trasformazione
bar	10^5 Pa
Psi (pounds per square inch, libbre per pollice quadrato)	$6,89 \cdot 10^3 \text{ Pa}$
atm	101325 Pa
mmHg	$133,322 \text{ Pa}$
m Hg	$9,81 \text{ Pa}$

I trasduttori di pressione si differenziano in base all'effetto fisico sul quale si basano. Questo può essere di tipo:

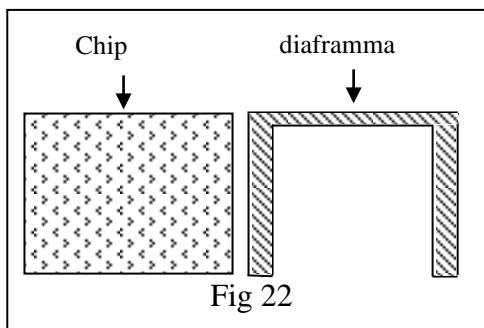
1. **capacitivo:** è in pratica un condensatore la cui capacità varia quando una delle armature, costituita da una membrana, subisce una deformazione non permanente della sua struttura a causa della pressione ad essa

applicata. Il trasduttore è poco sensibile alla variazione di temperatura, presenta alta stabilità, ma richiede processi di fabbricazione molto complessi;

2. **induttivo:** è basato sul principio della variazione dell'induttanza o della riluttanza a causa delle variazioni di pressione: è un dispositivo di grande dimensione e poco sensibile;
3. **effetto Hall:** è costituito da una membrana sulla quale si sposta un piccolo magnete a causa della variazione di pressione;
4. **piezoresistivo:** è costituito da un semiconduttore, la cui resistenza varia per la deformazione meccanica (in genere incurvamento) di una membrana sotto l'azione di una pressione applicata.

7.3.1.1. Trasduttore piezoresistivo

Il trasduttore piezoresistivo è quello maggiormente utilizzato: è realizzato in un chip di silicio, scavato da una parte in modo da ottenere una sottile membrana o diaframma (fig 22)

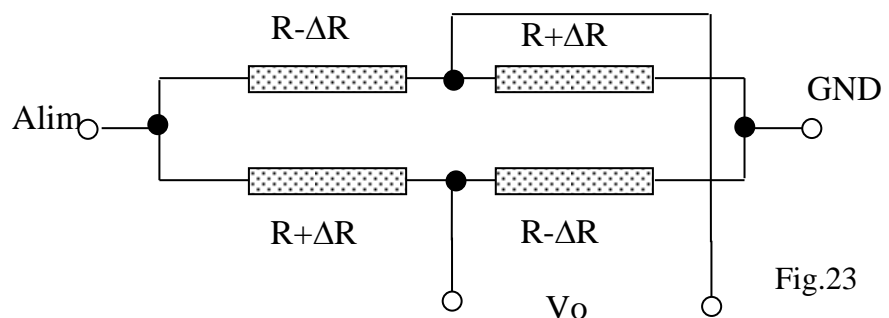


Sulla membrana di silicio sono realizzati uno o quattro piezoresistori con un processo di diffusione o di deposizione di un film sottile oppure con un impianto di ioni

Ad esempio la motorola costruisce trasduttori formati da un solo piezoresistore, detto ad "x"

perché è posto trasversalmente con un angolo di 45° .

I trasduttori della Philips, invece, sono costituiti da una membrana di silicio, il più delle volte a forma quadrata, al centro della quale sono realizzati quattro piezoresistori, collocati a coppie in senso tangenziale e radiale (fig.23)



A causa dell'azione della pressione, la membrana si incurva provocando l'accorciamento di due piezoresistori e l'allungamento degli altri due. Questi effetti meccanici provocano l'aumento ($R+\Delta R$) e la diminuzione ($R-\Delta R$) della resistenza su ogni ramo del ponte, come mostrato in fig. 23. Se il ponte è alimentato con un generatore di tensione o di corrente, ai terminali di uscita si ottiene una tensione V_o proporzionale alla pressione esercitata sulla membrana. Anche in questo caso la tensione di uscita dipende dalla temperatura.

I due trasduttori piezoresistivi esaminati consentono misure di pressione assolute relative e differenziali.

7.4.1. Trasduttori di posizione lineare - potenziometro

È costituito da una resistenza racchiusa in un contenitore metallico generalmente flangiato per il fissaggio, nel quale scorre un'asta metallica (fig. 24).

All'esterno del contenitore sono riportati tre reofori detti:

1. inizio;
2. centro;
3. fine

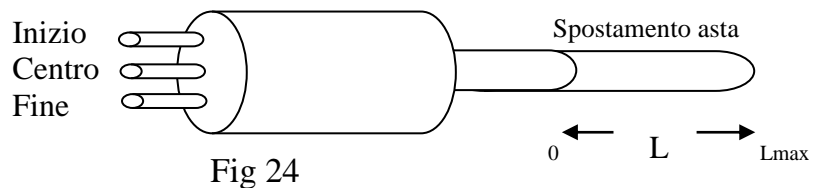


Fig 24

La resistenza del trasduttore, misurata tra il terminale inizio e centro, varia da 0Ω , quando l'asta è nella posizione 0, ad un valore massimo R_{max} dipendente dalle caratteristiche del trasduttore, quando l'asta è nella posizione L_{max} (asta tutta esterna). Ad esempio la resistenza del trasduttore di posizione di fig.25 varia tra 0Ω e 2000Ω quando esso è utilizzato come partitore di tensione o come potenziometro, mentre se è utilizzato come riferimento di 0 il cursore viene posto a metà corsa e lo spostamento dell'asta provoca una variazione $\pm 1000\Omega$ rispetto alla posizione centrale di riferimento.

Per un generico trasduttore la resistenza R_s è data dalla relazione:

$$R_s = R + \Delta R$$

Dove R_s è la resistenza complessiva del potenziometro misurata tra i terminali *inizio* e *centro*, R è il valore fisso e ΔR è la variazione di resistenza dovuta allo spostamento ΔL dell'asta.

Per convertire la variazione di spostamento in variazione di tensione è necessario disporre il trasduttore su un ramo di un ponte di Wheatstone secondo lo schema di fig. 25.

La tensione sulla diagonale opposta a quella di alimentazione, fornisce la caratteristica $V \rightarrow \Delta R$

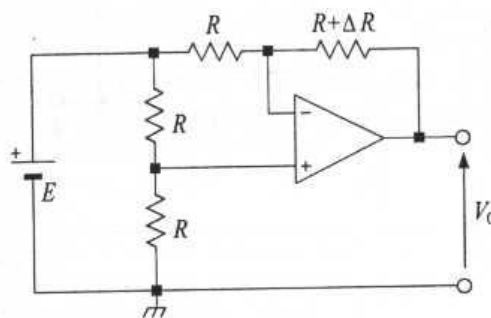


Fig 25

considerando che la tensione applicata all'ingresso non invertente è $E/2$, si ricava che la tensione d'uscita V_o è proporzionale alla variazione di resistenza ΔR

$$V_o = -\left(\frac{R + \Delta R}{R}\right) * E + \left(1 + \frac{R + \Delta R}{R}\right) * \frac{E}{2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{V_o = -m * \Delta R} \quad m = \frac{E}{2R}$$

la caratteristica tensione-resistenza ($V_o \Rightarrow \Delta R$) è lineare, ma il coefficiente angolare m della retta è negativo. (Per m positivo si scegli E negativo).

7.5 Trasduttori ottici o fotosensori.

Comprendono tutti i dispositivi sensibili alle radiazioni dello spettro visibile e infrarosso:

1. **Fotoresistori:** la resistenza diminuisce all'aumentare dell'intensità della luce incidente;
2. **fotosensori a semiconduttore:** (fig. 26) si basano tutti sul principio per cui radiazioni, comprese in un certo intervallo di frequenza, incidenti su una giunzione polarizzata inversamente producono coppie elettrone – lacuna che danno origine ad una fotocorrente I_L . i principali sono:
 - a. **Fotodiodi:** la densità di radiazione incidente determina la fotocorrente I_L ; in assenza di radiazione permane una debole corrente di perdita, detta corrente di buio. Sono più lineari dei fotoresistori e vengono usati nel campo della trasmissione dei segnali.
 - b. **Fototransistori:**realizzati con un'estesa giunzione base-collettore, la corrente di collettore I_C (o I_L) dipende dalla densità di radiazione incidente e dal guadagno di corrente statico del transistor; in assenza di radiazione, il transistor è interdetto e la corrente I_{CEO} residua costituisce la corrente di buio; molto usati come sensori di posizione e negli optoisolatori.
 - c. **Fotodarlington:** funzionano sullo stesso principio dei fototransistori ma consentono un guadagno di corrente maggiore e quindi presentano una sensibilità alle radiazioni molto elevata.
 - d. **Fototriac:** il gate, sensibile alla radiazione incidente, comanda il triac, innescandolo quando la densità della radiazione, supera una determinata soglia. In condizioni di buio il triac è spento.

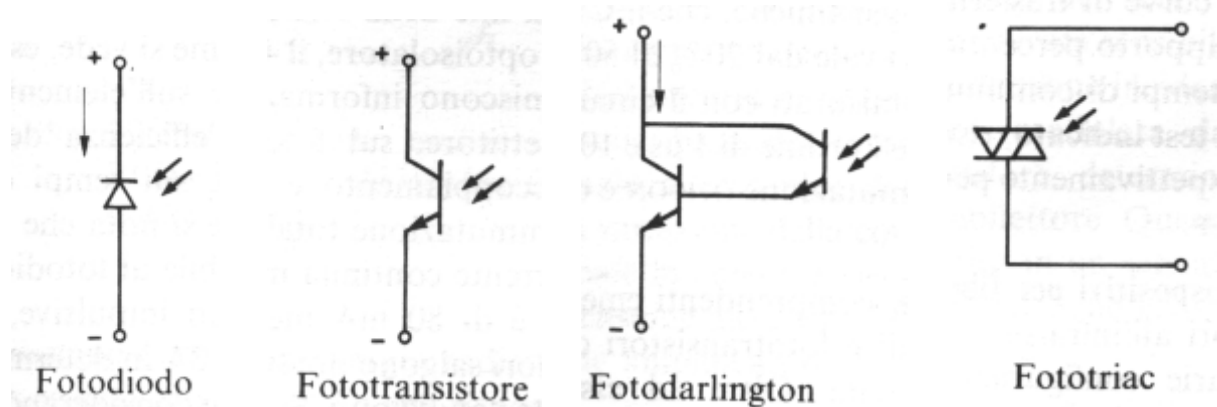


Fig 26

Comuni a tutti i sensori sono la selettività della risposta spettrale e la sensibilità direzionale, che dipende dalla geometria costruttiva.

Il campo di applicazione dei trasduttori ottici é vastissimo e comprende:

- sistemi di misura di livello;
- sistemi di misura di densità;
- sistemi di misura di prossimità;
- sistemi di misura di posizione;
- sistemi di misura di velocità;
- lettori di codici a barre;
- controlli di luminosità
- trasmissione di segnali.

7.6 Estensimetri

Gli estensimetri sono componenti che subiscono una variazione di resistenza quando sono sottoposti a forze di trazione o di compressione.

Essi sono utilizzati per la misura (gauge) di deformazioni e di forze e per le bilance elettronica (misure di peso). L'intensità di sollecitazione (strain) deve essere contenuta nel limite della validità della legge di Hooke (deformazione elastica).

Gli estensimetri possono classificarsi come di seguito riportato.

- **Estensimetri filiformi metallici o a strato metallico:** sono realizzati con materiali metallico filiforme (costantana, platino, nichel-cromo, ecc.) e variano la loro resistenza al variare delle dimensioni sia di lunghezza che di sezione.
- **Estensimetri piezoresistivi:** sono realizzati con semiconduttori drogati di tipo P o N. Hanno una sensibilità maggiore di quella degli estensimetri metallici (piccole variazioni dell'intensità di sollecitazione provocano grandi variazioni di resistenza) e basano il loro funzionamento sulla variazione della resistenza del materiale al variare delle dimensioni.
- **Estensimetri piezoelettrici:** sono realizzati con cristalli di quarzo. Essi generano una variazione di tensione quando sono sottoposti a sollecitazione di natura meccanica e risultano particolarmente adatti per il rilievo di sollecitazioni meccaniche variabili nel tempo.

Sebbene gli estensimetri piezoelettrici siano maggiormente utilizzati perché è possibile integrare l'elemento semiconduttore sensibile, l'amplificatore, il circuito di linearizzazione e quello di compensazione su un unico chip, di seguito sono descritte le caratteristiche principali degli estensimetri metallici.

Estensimetri filiformi metallici o a strato metallico

Un estensimetro metallico, costituito da un filo metallico di costantana di lunghezza l , sezione trasversale S e resistività ρ , subisce una variazione positiva di lunghezza Δl ed una variazione negativa ΔS della sezione (la lunghezza aumenta e la sezione diminuisce) quando è sottoposto a trazione. Nell'ipotesi che la resistività ρ del filo non subisca variazioni e considerato che la sua resistenza nominale è $R = \rho \cdot l/S$, si dimostra che la variazione relativa della resistenza è uguale a:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

dove:

- $\frac{\Delta R}{R}$: la variazione relativa della resistenza dell'estensimetro;
- μ : coefficiente di valore compreso tra $0.25 < \mu < 0.5$;
- $(1+2\mu)$: costante;
- $\frac{\Delta l}{l}$: variazione relativa della lunghezza dei fili;
- R : resistenza nominale del filo.

Un filo di piccola sezione (qualche centesimo di millimetro quadrato) e lunghezza elevata ha una resistenza R dell'ordine del centinaio di Ohm e può subire variazioni ΔR della resistenza apprezzabili quando è sottoposto a sollecitazioni. Generalmente il filo conduttore è ripiegato in modo da formare un griglia e incollato su un piccolo supporto che, a sua volta, è incollato sul provino di cui si desidera misurare la deformazione. (Fig.27)

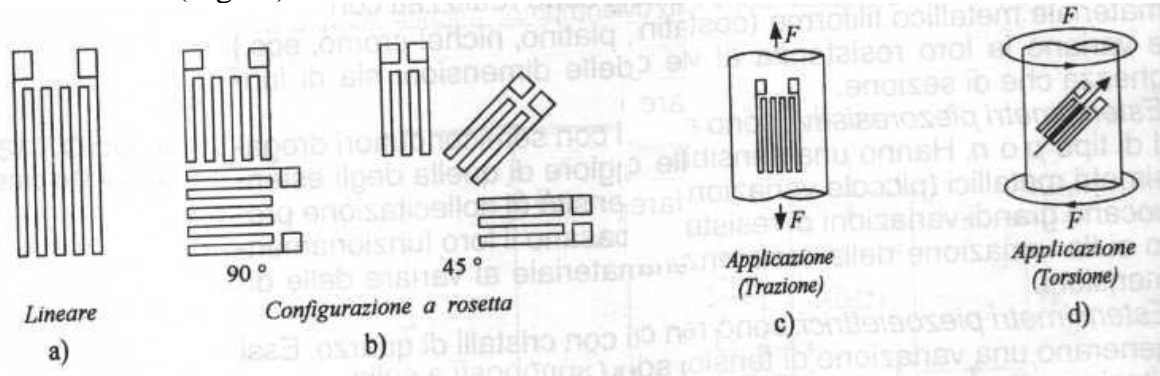


Fig. 27

Il rapporto tra la variazione relativa della resistenza e la variazione relativa della lunghezza del filo è il fattore di traduzione o il fattore di amplificazione G_F :

$$G_F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = (1 + 2\mu)$$

se $\mu=0,5 \rightarrow G_F=2$

Si tenga presente che le misure sono corrette solo quando l'estensimetro è incollato sul provino in modo che la direzione dell'allungamento coincida con le linee di scorrimento. Per rilevare le sollecitazioni torsionali su un albero in rotazione, ad esempio sono necessari due trasduttori disposti a 45° ed orientati nelle direzioni delle linee di massimo scorrimento (fig 27d).

Si dimostra che la variazione relativa di lunghezza del filo è proporzionale alla sollecitazione unitaria (rapporto tra la forza e la superficie)

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \sigma$$

dove:

- $\sigma = \frac{F}{S}$: sollecitazione unitaria;
- E : modulo di elasticità (modulo di Young);

dalla: $G_F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$ e dalla: $\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \sigma$

si ricava la **relazione tra la forza applicata e la variazione relativa di resistenza:**

$$\frac{\Delta R}{R} = G_F \cdot \frac{\Delta l}{l} = G_F \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

da cui si ricava:

$$F = \frac{S \cdot E}{G_F} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \rightarrow \quad \boxed{F = K \cdot \frac{\Delta R}{R}}$$

dove K è la costante di proporzionalità detta anche coefficiente di taratura del trasduttore ed F è la forza applicata.

I costruttori producono estensimetri, detti a rosetta perché costituiti da più trasduttori disposti secondo angoli prefissati, adatti a rilevare qualsiasi tipo di sollecitazione meccanica (fig 27b).

La variazione di un estensimetro metallico filiforme può essere rilevata mediante un ponte di Wheatstone (fig 28). Per compensare le variazioni di resistenza dovute alle variazioni di temperatura si utilizzano due estensimetri. Essi, di pari resistenza, sono incollati sul provino sottoposto, ad esempio, a trazione come mostrato nella fig 28.

L'estensimetro R_s è sollecitato, mentre l'estensimetro $R(T)$, ruotato di 90° rispetto ad R_s , non è sollecitato, ma permette di compensare le variazioni di resistenza dovute alla temperatura.

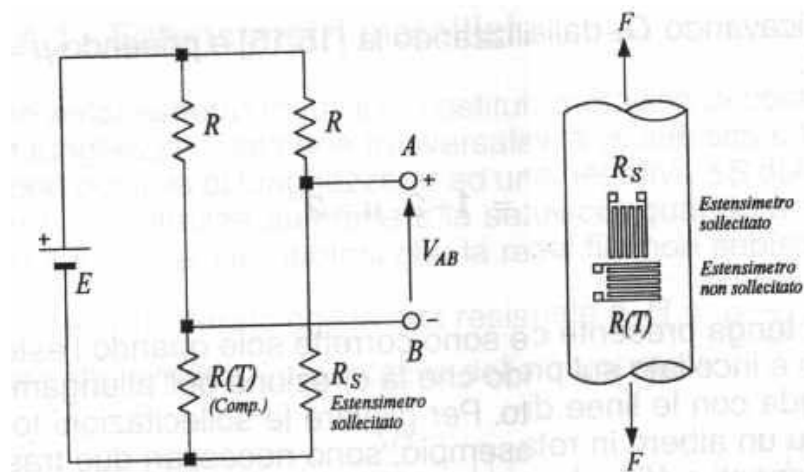


Fig. 28

Dal circuito di fig 28 si ricava, in assenza di sollecitazione (ponte in equilibrio), $V_{AB}=0$. In presenza di sollecitazione, la tensione V_{AB} risulta:

$$V_{AB} = \left(\frac{R_s}{R + R_s} - \frac{R(T)}{R + R(T)} \right) \cdot E = \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) \cdot E \quad \rightarrow \quad V_{AB} = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \cdot E$$

dove:

- $R_s=R+\Delta R$: resistenza complessiva del trasduttore sottoposto a sollecitazione;
- ΔR : variazione di resistenza del trasduttore sottoposto a sollecitazione;
- $R(T)=R$: resistenza del trasduttore di compensazione non sottoposto a sollecitazione;
- E : tensione di alimentazione.

Poiché si può ritenere $4R \gg 2\Delta R$, dalla $V_{AB} = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \cdot E$ si ha:

$$V_{AB} \cong \frac{E}{4} * \frac{\Delta R}{R}$$

Lo schema elettrico di fig.28 e la relazione di V_{AB} trovata possono essere rappresentati con lo schema a blocchi di fig. 29

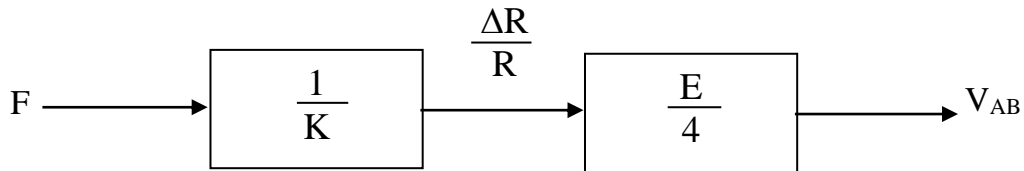


Fig. 29

dove:

- F : forza che esercita la sollecitazione;
- $\frac{\Delta R}{R}$: variazione relativa di resistenza;
- V_{AB} : tensione d'uscita del circuito di condizionamento (convertitore R/V).

Per amplificare la V_{AB} si utilizza un amplificatore per strumentazione.

7.7 Trasduttori digitali (*encoder*).

Esistono fondamentalmente tre tipi di trasduttori digitali di spostamento rotazionale (ma anche traslazionale):

- tachimetrico,
- incrementale,
- assoluto.

Essi si differenziano principalmente per il segnale che forniscono in uscita.

✚ **L'encoder tachimetrico** è costituito essenzialmente da un disco forato (fig. 30), che ruota con il corpo di cui si vuole controllare la velocità, e da un generatore di segnale formato da un LED e un fotosensore allineati.

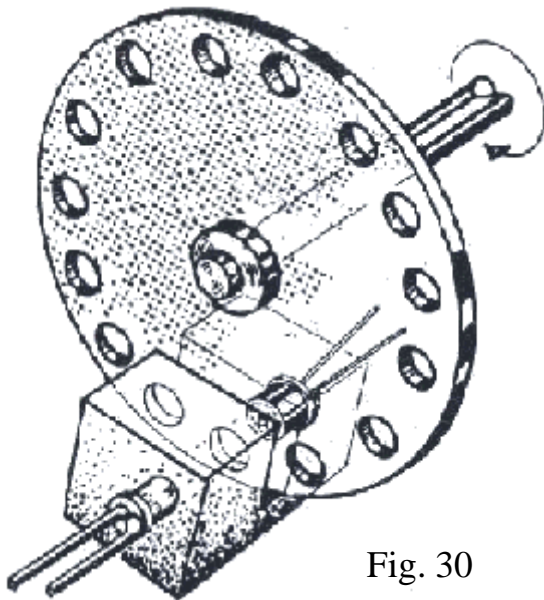


Fig. 30

La rotazione del disco fa sì che la luce emessa dal LED raggiunga il fotosensore quando uno dei fori si posiziona fra il LED e il fotosensore stessi. Il segnale di uscita generato dal fotosensore sarà pertanto un treno di impulsi, di frequenza proporzionale alla velocità di rotazione. Se il movimento avviene sempre nello stesso verso, un contatore digitale che conti gli impulsi è in grado di fornire l'entità dello spostamento rispetto ad una posizione di riferimento. Naturalmente una rotazione in verso opposto, producendo impulsi uguali ai precedenti, causerebbe una lettura

di posizione del tutto errata; per questo motivo il tachimetro digitale può essere usato solo per misure di velocità oppure per misure di spostamento angolare in situazioni in cui il movimento non si inverte.

Per semplicità si è descritto l'encoder come costituito da un disco forato; in realtà invece viene realizzato generalmente con uno o più dischi trasparenti o riflettenti, su cui vengono prodotte con tecniche fotolitografiche tracce opache disposte lungo la circonferenza.

✚ **L'encoder incrementale** illustrato schematicamente in fig. 31 elimina l'inconveniente sopra citato. Esso comprende infatti almeno due elementi generatori di segnale (sensori A e B), disposti in modo che i due segnali prodotti

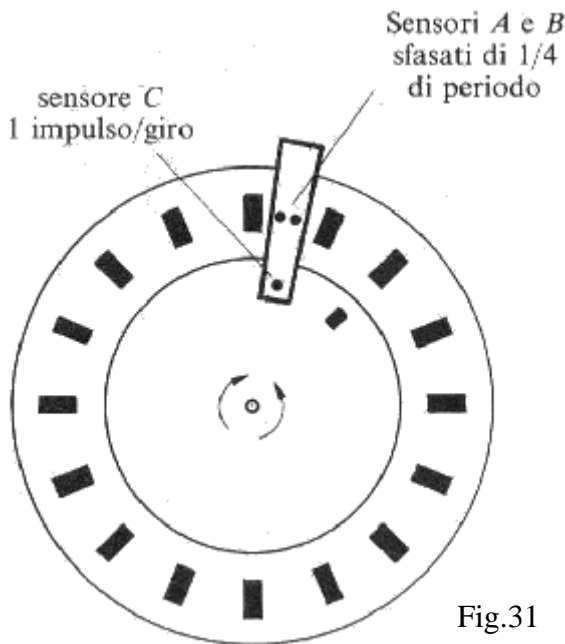


Fig.31

(fig 32) risultino sfasati di circa 1/4 di periodo; si desume il verso di rotazione osservando quale dei due segnali risulta in anticipo.

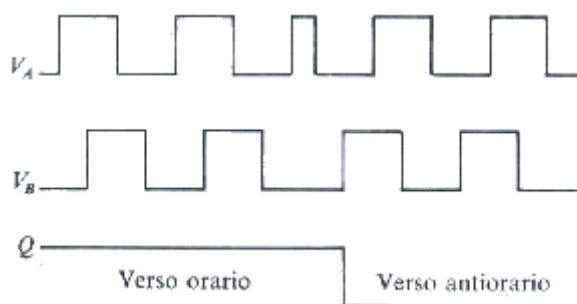


Fig.32

Il conteggio degli impulsi può essere effettuato ad esempio mediante il semplice circuito di fig. 33

Il contatore riceve in ingresso il segnale V_A ed esegue il conteggio avanti o indietro a seconda dello stato di uscita, rispettivamente 1 o 0, del Flip Flop FF. Quest'ultimo commuta sul fronte di salita del clock costituito dal segnale V_B ; la sua uscita pertanto commuterà (o rimarrà) ad 1 se, in corrispondenza di ciascun fronte di salita di V_B , V_A è alto; questa

situazione corrisponde evidentemente al verso di rotazione orario. Viceversa, se in corrispondenza al fronte attivo di V_B il segnale V_A è basso, il flip flop si porterà a 0, segnalando il verso di rotazione antiorario.

In commercio sono disponibili contatori programmabili integrati (SN74LS2000B della Texas, S360 B114 della Siemens ecc.) che consentono la lettura diretta dei segnali di uscita di encoder incrementali e l'interfacciamento con microprocessori.

Alcuni encoder incrementali presentano anche una terza uscita (sensore C in fig. 31) che fornisce un impulso per ogni giro completo.

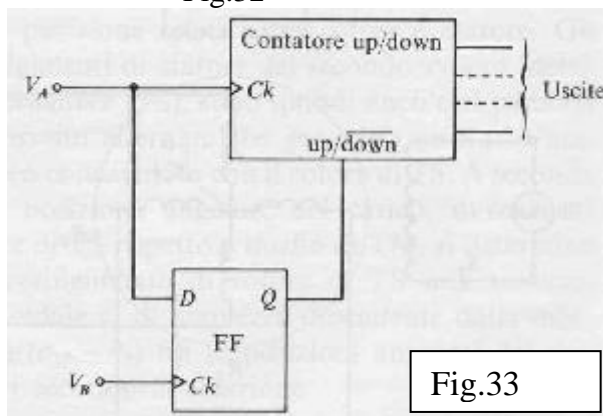


Fig.33

Un inconveniente intrinseco all'uso di tutti questi encoder è rappresentato dal fatto che la logica di conteggio è talvolta sensibile ai disturbi, che possono causare errori irrimediabili. Inoltre la caduta anche momentanea dell'alimentazione fa perdere ogni informazione sulla posizione raggiunta, senza possibilità di recupero.

✚ **Gli encoder assoluti** presentano più tracce opache, più elementi generatori di segnale e più uscite; queste vengono lette in parallelo e forniscono un numero binario (sovente espresso in codice Gray onde evitare errori dovuti a leggere imperfezioni costruttive), che fornisce direttamente la posizione dell'oggetto rotante.

In fig. 34 è illustrato schematicamente il disco di un rudimentale encoder assoluto ed è indicata la rappresentazione dei dati di uscita per una rotazione completa.

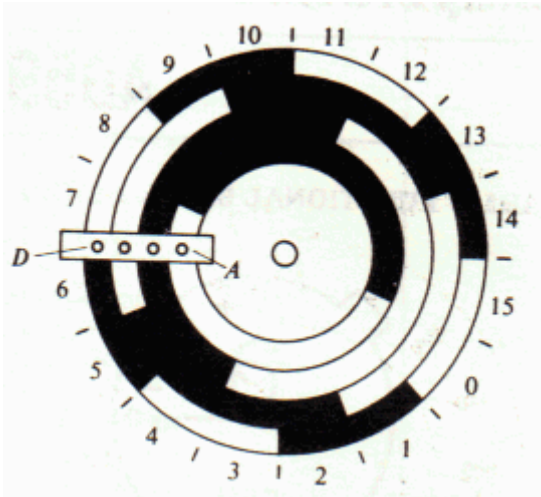


Fig.34 – Disco di un encoder assoluto e dati di uscita in codice Gray

DATI DI USCITA IN CODICE GRAY				
	A	B	C	D
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	1
7	0	1	0	0
8	1	1	0	0
9	1	1	0	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	0
12	1	0	1	0
13	1	0	1	1
14	1	0	0	1
15	1	0	0	0

7.8 Trasduttori di velocità - dinamo tachimetrica

La dinamo tachimetrica è una macchina elettrica che trasforma energia meccanica in energia elettrica, è un trasduttore di velocità angolare che, montato coassialmente all'albero del motore, fornisce una tensione proporzionale alla velocità di rotazione.

La tensione d'uscita è espressa dalla seguente relazione:

$$V_T = K_T * n$$

K_T :costante tachimetrica (V/giro al minuto)

V_T :tensione d'uscita (V)

n :numero di giri al minuto oppure rotazioni per minuto (r.p.m)