



Facoltà di Ingegneria  
Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni

# Fondamenti sui Sensori

**Ing. Andrea Zanobini**

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni

*Ottobre 2002*

# Contenuti del seminario

- ✓ Introduzione e definizioni
- ✓ Classificazione dei sensori
- ✓ Parametri fondamentali
- ✓ Effetti fisici coinvolti
- ✓ Qualche applicazione

Riferimenti bibliografici

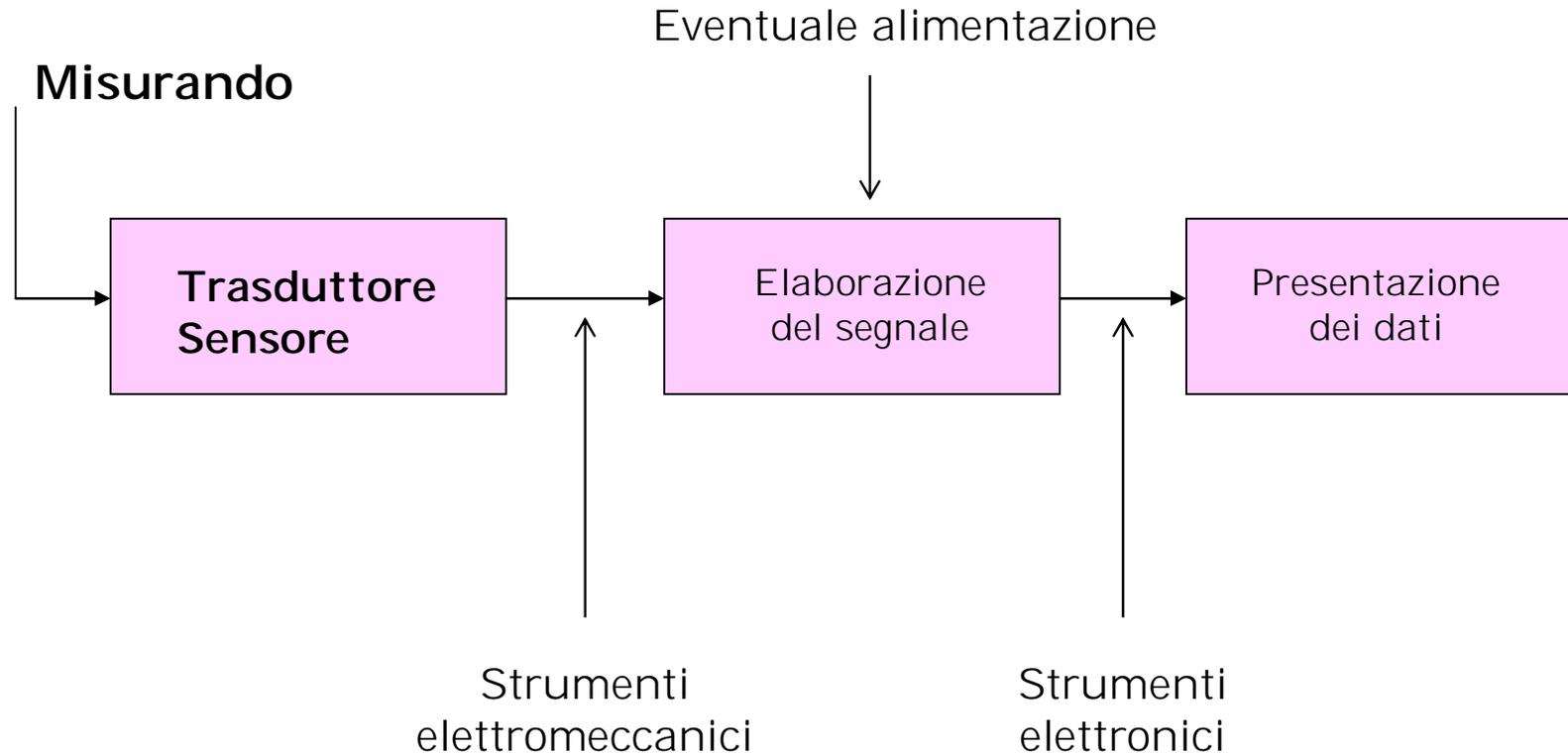
# Applicazioni dei sensori

- Misure per la determinazione di una grandezza
- Controlli di produzione industriale, robotica

## Tecnologie

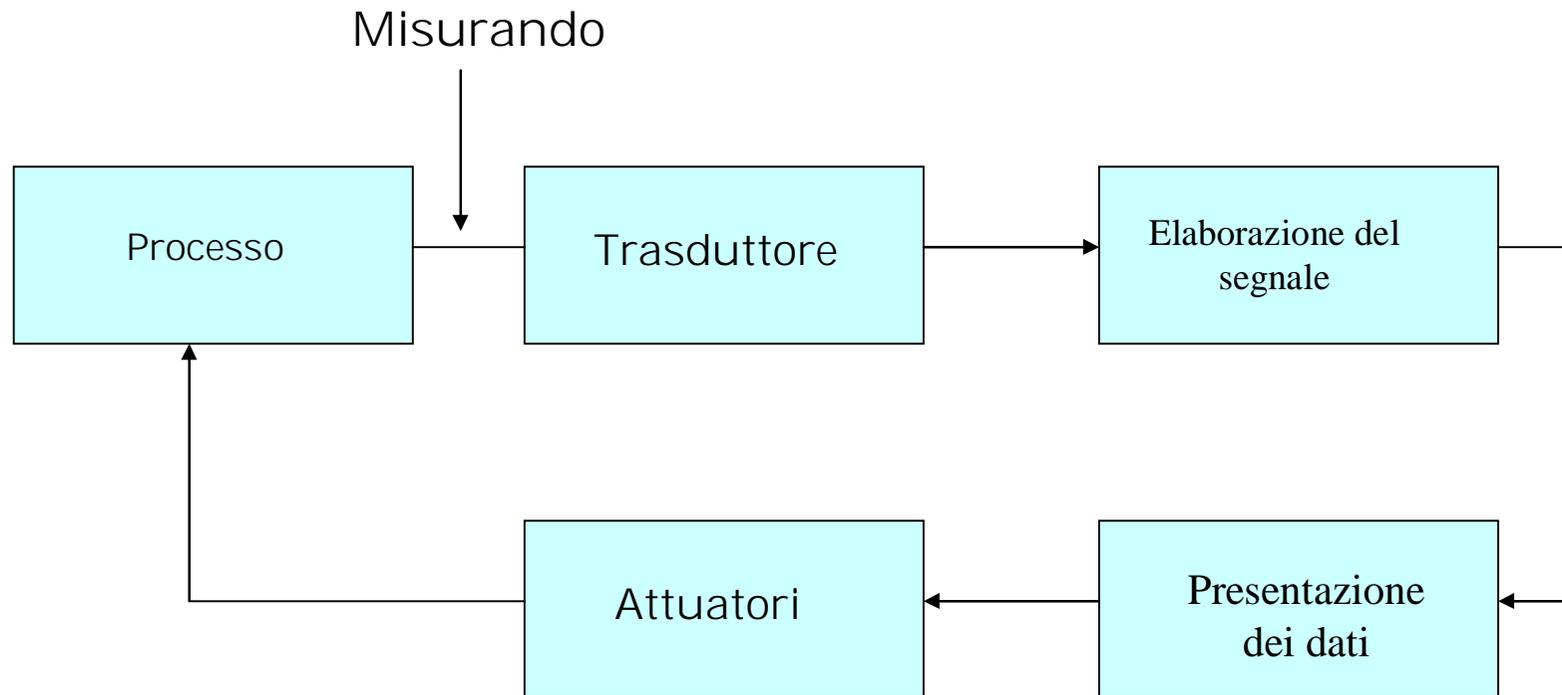
- **Tradizionale** (resistivi, capacitivi, induttivi)
- **A semiconduttore** (dispositivi integrati, funzionamento limitato in temperatura, basso costo)
- **Optoelettronica** (ambienti aggressivi, vasto range di temperature ma limite di sensibilità, il costo può essere alto)

# Schema di una catena di misura

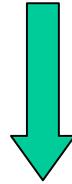


# Schema di una catena di regolazione

es: termocoppia e temperatura costante entro limiti prefissati



# Cos' è un **SENSORE/TRASDUTTORE**?



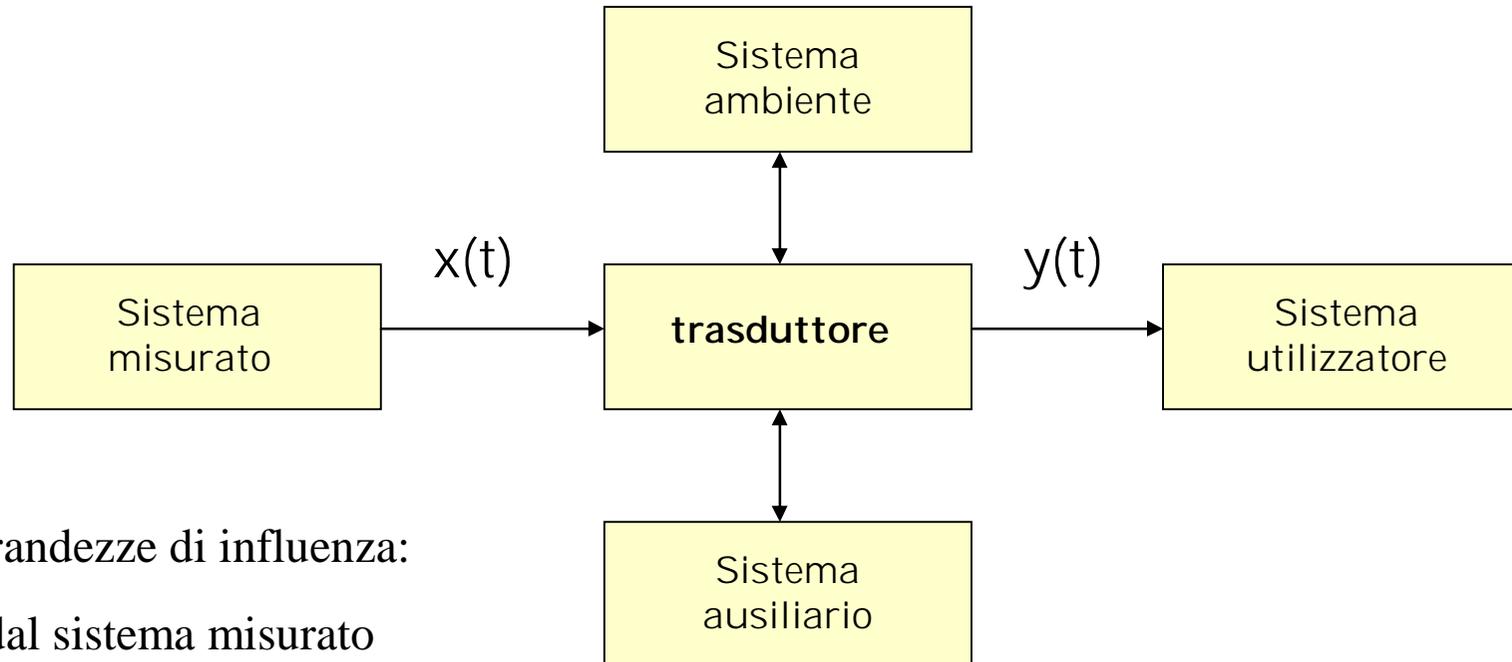
E' un dispositivo che riceve un' informazione mediante un segnale di ingresso costituito da una determinata grandezza fisica (misurando) e la restituisce mediante un segnale d' uscita costituito da una grandezza fisica diversa, più adatta alle successive elaborazioni

**Termini:** sensori, trasduttori, rivelatori, trasmettitori, celle, *gage, pickup...*

# Differenza

- 👉 **SENSORE**: la grandezza di ingresso è di qualsiasi natura, mentre l'uscita è una grandezza elettrica
- 👉 **TRASDUTTORE**: converte una forma di energia in un'altra (es. altoparlante). In generale lo stesso sensore potrà essere utilizzato per differenti trasduttori e, reciprocamente, lo stesso trasduttore può utilizzare diversi sensori ( *sensore intelligente e in un prossimo futuro sensore esperto*)

# Le interazioni nei sensori



Grandezze di influenza:

- dal sistema misurato
- dal sistema utilizzatore
- dal sistema ausiliario
- dall' ambiente

Il Tempo (invecchiamento)

## Il modello di un sensore

La funzione di conversione

$$\begin{aligned}x(t) &= f[y(t)] \\ y(t) &= g[x(t)]\end{aligned}$$

**Esempio: estensimetro.** La variazione di lunghezza si traduce in una variazione di resistenza elettrica.

$$\begin{aligned}x(t) &= \frac{\partial L(t)}{L_0}; \quad y(t) = \frac{\partial R(t)}{R_0} \\ \frac{\partial R(t)}{R_0} &= S \frac{\partial L(t)}{L_0} \Rightarrow g = S = \text{costante}\end{aligned}$$

# Campo di misura e di normale funzionamento

- **Campo di misura** definisce i limiti entro i quali deve variare il misurando affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fornite dal costruttore.
- **Campo di normale funzionamento**: Campo di valori assunti dall'uscita corrispondentemente al campo di misura del misurando.
- **Il modello** scelto per rappresentare il comportamento del sensore può essere diverso a seconda del campo di variabilità del segnale di ingresso (contenuto all'interno del campo di misura).

# Classificazione dei sensori

- ✓ Sulla base della tecnologia e del principio fisico utilizzato (ottico, piezoelettrico, ...)
- ✓ Funzione svolta e grandezza da misurare (m, K ...)
- ✓ Particolare settore cui sono destinati
- ✓ In base al loro comportamento energetico:

 **SENSORI ATTIVI** : convertono direttamente l'energia dell'ingresso in energia di uscita, senza l'ausilio di sorgenti esterne.

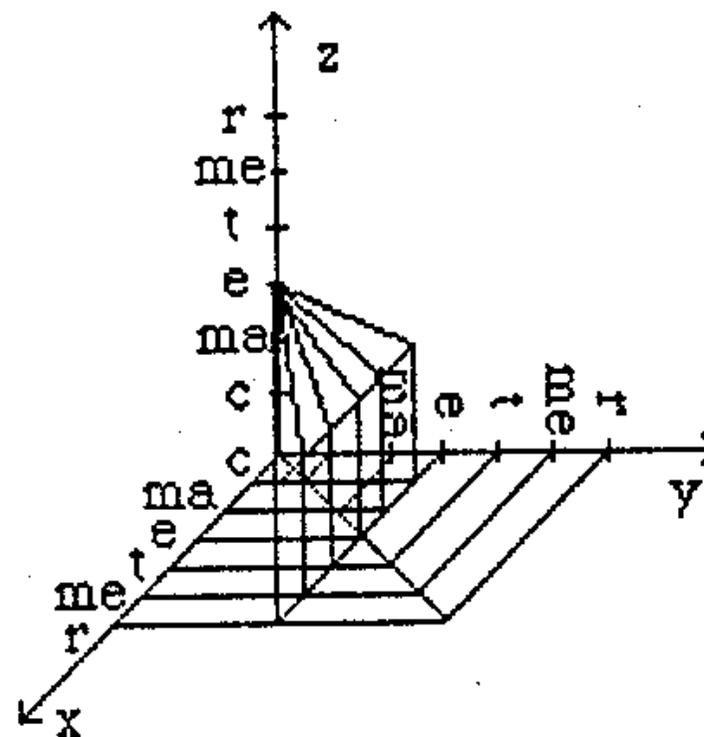
 **SENSORI PASSIVI** : richiedono energia dall'esterno (eccitazione) per la conversione.

# Rappresentazione tridimensionale dei sensori

(Middelhoek e Noorlag, 1981)

## Forme di energia considerate

- Energia elettromagnetica radiante
  - Energia meccanica
  - Energia termica
  - Energia elettrica
  - Energia magnetica
  - Energia chimica
- 
- XY: 36 sensori attivi
  - XYZ: 216 sensori passivi



## Tipi di sensori passivi

Classi ed esempi	Natura del sensore	Misurando e applicazioni
Resistore a filo	Resistenza variabile in un potenziometro	Dimensioni, spostamento
Strain-gage	Resistenza variabile con lo sforzo	Sforzi, coppie, forze, pressioni
Termometri a resistenza	Spira o termistore con variazioni di resistenza	Temperatura, effetti termici, calore irradiato
Cellule fotoconduttive	Resistenze variabili con radiazioni incidenti	Relè sensibili alla luce o a radiazioni infrarosse
Misuratori di traferro	Variazioni di induttanza con campo magnetico	Spessori, spostamenti, pressioni
Sensore a magnetostrizione	Proprietà magnetiche variabili con sforzi	Suoni, pressioni, forze
Sensore a effetto Hall	Interazioni campo magnetico corrente	Forza del campo, correnti
Condensatore variabile	Variazioni di capacità per lunghezza o area	Spostamenti, pressioni
Microfono a condensatore	Variazioni capacità per pressione del suono	Voce, musica, rumori, vibrazioni
Dielettrico	Variazioni nel dielettrico	Livelli, spessori

## Tipi di sensori attivi

<b>Classi ed esempi</b>	<b>Natura del sensore</b>	<b>Misurando e applicazioni</b>
Sensori ad equipaggio mobile	Movimento relativo tra magnete ed equipaggio	Correnti, tensioni
Termocoppie	Metalli diversi a diverse temperature	Temperature, radiazioni, flussi di calore
Sensori piezoelettrici	Compressione del quarzo o altro cristallo	Vibrazioni, accelerazioni, suoni, pressioni
Cellule fotovoltaiche	Generazione in semiconduttori di tensione dalla luce solare	Esposizione, luce

## Regime stazionario e regime dinamico

- Un sensore opera in **regime stazionario** quando le variazioni nel tempo del segnale di ingresso sono tali che la funzione di conversione non risulta alterata in modo significativo rispetto a quella che si ha con misurando costante nel tempo
- **Regime dinamico**: quando si verifica il contrario



Occorre una caratterizzazione del sensore nelle due situazioni

# Parametri fondamentali

- Sensibilità
- Risoluzione
- Taratura
- Isteresi
- Linearità
- **Tempo di risposta**
- Vita utile
- Ripetibilità
- Stabilità
- **Accuratezza**
- **Affidabilità**
- Range di ingresso
- Selettività
- Costo, dim. e peso
- Impedenza (in/out)
- **Risposta in frequenza**
- Fattori ambientali
  - temperatura max/min
  - tempo di *warm-up*
  - umidità relativa
  - pressione max
  - presenza di gas, fumi,
- molti altri...

### *Sensibilità*

- Rapporto tra la variazione del segnale in uscita al trasduttore e la corrispondente variazione della grandezza in ingresso (es: per la termocoppia rame-costantana circa  $45 \text{ microV}/^{\circ}\text{C}$  ).

### *Risoluzione*

- La risoluzione corrisponde con la più piccola quantità che può essere misurata; ovvero con la minima variazione dell'ingresso che provoca un'apprezzabile variazione in uscita.

### *Taratura (Calibrazione)*

- L'operazione di taratura di un trasduttore corrisponde con la misurazione della grandezza di uscita per valori noti della grandezza di ingresso al trasduttore stesso.
  - Per ciclo di taratura si intende una prova che copra tutto il campo di misura del trasduttore; la prova viene suddivisa in due parti, una per valori crescenti della grandezza e l'altra per valori decrescenti

### *Isteresi*

- Corrisponde con la massima differenza tra i due cammini di andata e di ritorno dell'uscita di un trasduttore durante il ciclo di calibrazione. E' espressa in *percentuale del fondo scala* (% f.s.).

### *Linearità*

- Corrisponde con il massimo scostamento, espresso in % di f.s., tra curva di calibrazione e una linea retta di riferimento.

### *Tempo di risposta*

- Quando in ingresso al trasduttore applichiamo una sollecitazione a gradino (cioè un gradino della grandezza da misurare) l'uscita (risposta) varierà fino a raggiungere, dopo un certo tempo, un nuovo valore. A tale proposito vengono definiti:
  - *tempo di salita*: tempo impiegato per passare dal 10% al 90% del valore finale
  - *tempo di risposta*: tempo impiegato per raggiungere una percentuale prefissata del valore finale.

### ***Vita utile del trasduttore***

- E' il tempo per il quale il trasduttore opera senza modificare le sue prestazioni.

### ***Ripetibilità***

- Attitudine del trasduttore a fornire valori della grandezza in uscita poco diversi tra loro, a parità di segnale di ingresso, nelle stesse condizioni di lavoro.

### ***Stabilità***

- Capacità del trasduttore a conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un certo intervallo di tempo (lungo, medio, breve).

<b><i>Parametro</i></b>	<b><i>Termocoppia</i></b>	<b><i>Termoresistenza (es. Pt100)</i></b>
• <b><i>Sensibilità</i></b>	10÷50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0.1÷1 $\text{k}\Omega/^\circ\text{C}$
• <b><i>Stabilità (anno)</i></b>	0.5 $^\circ\text{C}$	1 $^\circ\text{C}$
• <b><i>Range temp.</i></b>	-200÷1600 $^\circ\text{C}$	-200÷600 $^\circ\text{C}$
• <b><i>Diametro minimo</i></b>	$\approx$ mm	$\approx$ mm
• <b><i>Costo</i></b>	30 000 Lit	100 000 Lit

# Accuratezza

- In realtà rappresenta una “inaccuratezza”, poiché esprime la maggiore deviazione tra il valore presentato in uscita dal sensore ed il “valore vero” in ingresso.
- E' descritta dalla differenza tra
  - il valore in uscita dal sensore (es. tensione) riconvertito all' ingresso e il
  - il valore attualmente presente all' ingresso

*Da qui una valutazione  
dell' incertezza...*

## Calcolo dell' accuratezza

*Esempio: sensore lineare di spostamento*

- D = spostamento, V = tensione di uscita
- Idealmente genera 1 mV per 1 mm
- sensibilità S = 1mV/mm
- Con d=10mm si rileva in uscita V=10.5 mV
- riconvertendo senza errore V all' ingresso, si ottiene D=V/s = 10.5 mm
- in un range di 10mm l' inaccuratezza assoluta è 0.5mm
- l' (in)accuratezza è quindi espressa in termini relativi come

$$\frac{0.5\text{mm}}{10\text{mm}} \times 100 \% = 5\%$$

# Affidabilità (Reliability)

- E' l'attitudine del sensore a fornire specificate prestazioni sotto determinate condizioni e per un certo periodo
- E' espressa in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni senza guasti per un tempo specificato (nelle specificate condizioni di utilizzo)

$$R(t) = P \{T > t\} = 1 - F(t) = e^{-\int_{t_0}^t \lambda(t) dt}$$

# Caratterizzazione di un sensore

## Progetto in un sistema di acquisizione dati

- Principio di funzionamento;
- grandezza misurata;
- eccitazione (eventuale);
- caratteristiche metrologiche (in regime stazionario e in regime dinamico, modello del sensore);
- condizioni operative.

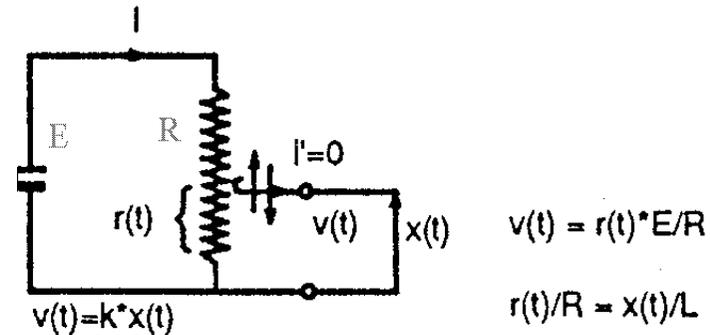
## Principali effetti fisici coinvolti:

- Variazione di resistenza, capacità induttanza
- Induzione elettromagnetica
- Effetto termoelettrico (Seebeck, Peltier) e termoresistivo
- Effetto piezoelettrico, piroelettrico, piezoresistivo
- Effetto Hall
- Effetto fotoconduttivo e fotovoltaico
- Sistemi ad ultrasuoni (effetto Doppler)

# Sensori resistivi

- Sensori a grande variazione di resistenza:

- Potenziometri

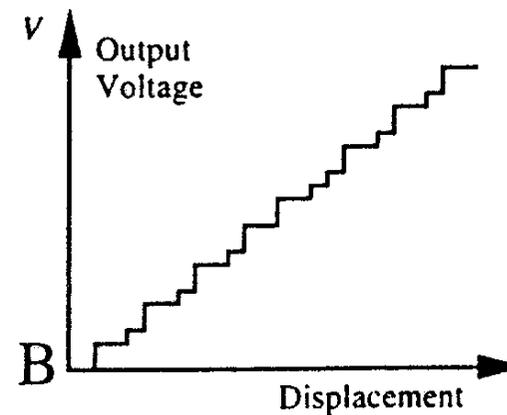
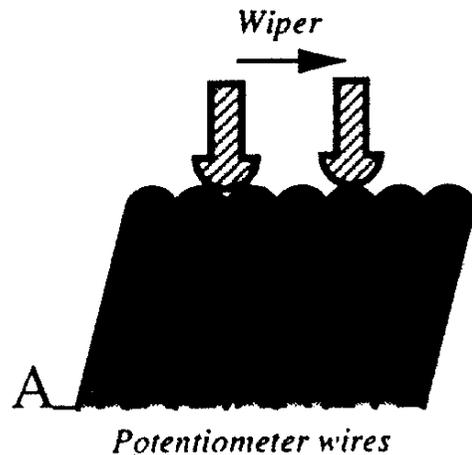


- Sensori a piccola variazione di resistenza:

- estensimetri (piezoresistenze)
- termoresistenze e termistori

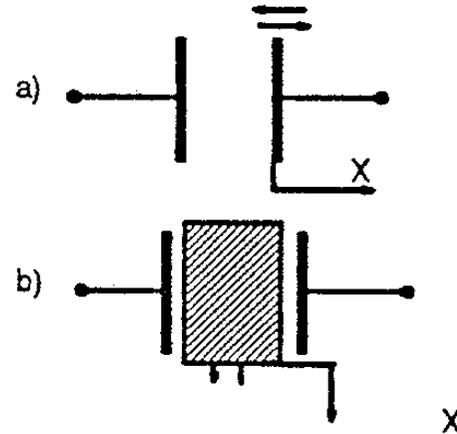
# Sensori potenziometrici

- Un potenziometro lineare o di rotazione costituisce un sensore di posizione o di spostamento
- la resistenza elettrica dipende linearmente dalla lunghezza del conduttore
- la misura di resistenza si traduce in una misura di tensione  $v = Er/R = Ed/D$
- cause di errore:



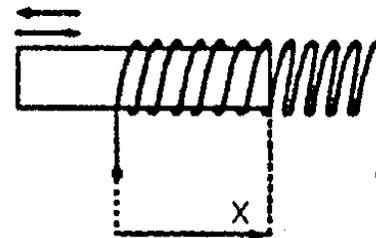
## La capacità come sensore

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$



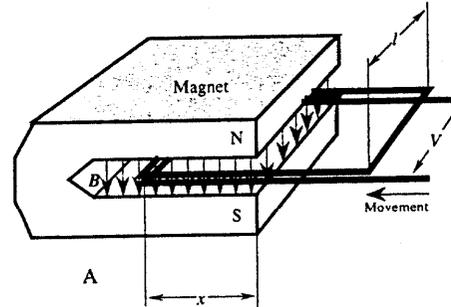
## Variazione di induttanza

$$L = \mu \mu_0 n^2 \frac{A}{\ell}$$

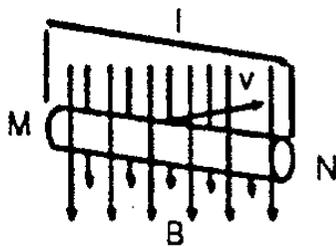


# Induzione elettromagnetica (Faraday 1791-1867)

- E' possibile risalire a spostamenti, deformazioni, forze, pressioni, velocità



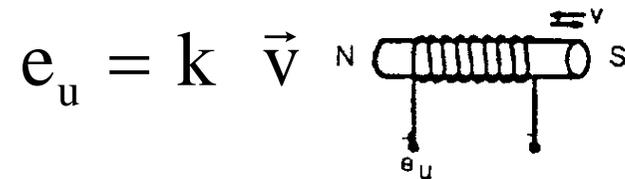
$$e = n B l \vec{v}$$



$$e_{MN} = B l \vec{v}$$

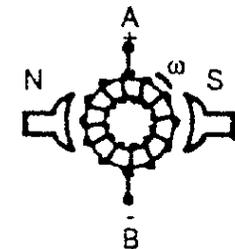


$e_{MN}$  proporzionale a vel.  
 Condotta non metallica  
 Fluido conduttore



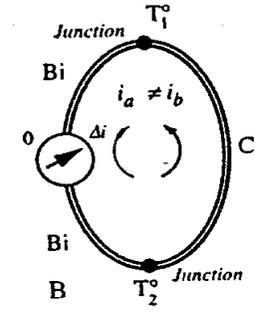
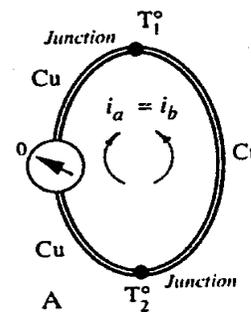
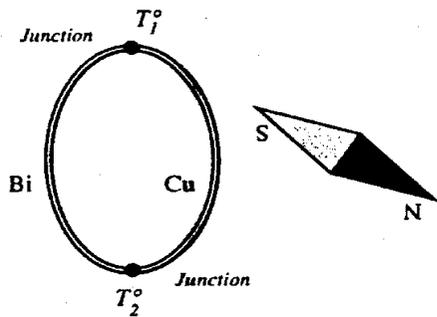
$$e_u = k \vec{v}$$

$$e_{AB} = k \omega$$



## Effetti termoelettrici (Seebeck 1826, Peltier 1834)

- Un conduttore, con una estremità posta ad una temperatura  $T_1$  e con l'altra ad una temperatura  $T_2$ , diventa sede di un passaggio di energia dalla parte calda alla parte fredda
- il gradiente termico genera un campo elettrico che si manifesta con un incremento di tensione

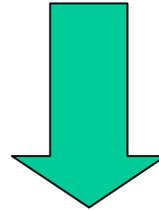


$$dV_a = \alpha_a dT$$

Usando due materiali differenti A e B si ha

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT$$



**Per ottenere la migliore sensibilità  
si scelgono materiali con coefficienti di segno opposto**

- **Effetto Peltier:** Consiste nel manifestarsi di una certa quantità di calore, assorbita o ceduta da una termocoppia quando questa è attraversata da corrente elettrica
- **esempio:** frigoriferi termoelettrici di piccole dimensioni e limitato assorbimento di potenza

# Termocoppie

Tipo	Materiale bimetallo	Campo T°C	V <sub>u</sub> [mV]	Caratteristiche
J	Ferro-Costantana	-200...780	30 con $\Delta T=500^{\circ}\text{C}$	Economica
T	Rame-Costantana	-200...400	15 con $\Delta T=320^{\circ}\text{C}$ Sens.: $45\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	Piccole dimensioni
E	Cromel-Costantana	-200...1250	>70 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Elevata f.e.m.
S	Pt-Pt90%, Rd10%	0...1760	10 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Robusta, affidabile, costosa, poco sensibile
C	Tungsteno- Tungsteno,Iridio	0...2400	Dipende dalla % della lega	Alta temperatura

## Effetto termoresistivo (1)

### Metalli e semiconduttori

- In un range di temperatura relativamente ristretto

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

- dove  $\alpha$  = coefficiente di temperatura resistivo (TCR)
- $\rho_0$  = resistività alla temperatura di riferimento  $T_0$  (es. 0°C o 25°C)
- Per intervalli di temperatura più estesi si ricorre a polinomi, **esempio** per il tungsteno

$$\rho = 4.45 + 0.0269 T + 1.914 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (\text{con } T \text{ in } ^\circ\text{C})$$

## Effetto termoresistivo (2)

### Metalli e semiconduttori

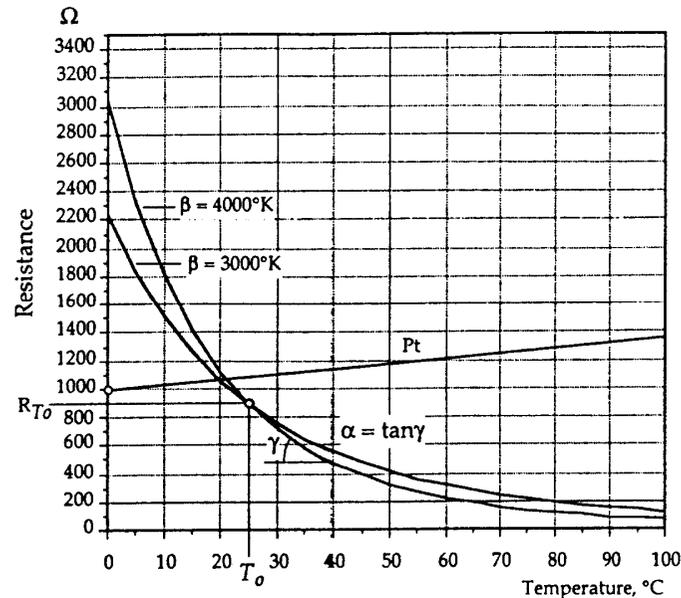
- Metalli  $\Rightarrow$  **PTC**
- Molti semiconduttori e ossidi  $\Rightarrow$  **NTC**
- TCR ( $\alpha$ ) deve essere basso per resistori utilizzati in circuiti elettronici
- Al contrario, un grande TCR permette di realizzare un sensore di temperatura (termistore)
- **Esempio:** Platino (Pt100) opera da  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$   
Tarando  $R_0$  a  $0^{\circ}\text{C}$  ( $100\ \Omega$ )

$$R = R_0 (1.0036 + 36.79 \cdot 10^{-4} T)$$

## Effetto termoresistivo (3): termistori

- Possiedono una caratteristica resistenza-temperatura non lineare bene approssimata, in un *range* relativamente ristretto di temperature, dall' espressione esponenziale

$$R_T = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$



dove:

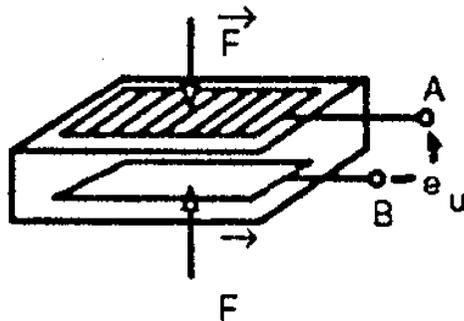
β è la temperatura caratteristica del materiale in Kelvin (3000-5000 K)

*Quando sono richieste accuratezze spinte si ricorre ad approssimazioni polinomiali.*

## Effetto piezoelettrico (Curie, 1880)

- Esiste in cristalli naturali (quarzo) e in ceramiche e polimeri artificiali opportunamente polarizzati (anisotropia del quarzo)
- Consiste nella generazione di carica elettrica da parte di un materiale cristallino sottoposto ad una sollecitazione meccanica
- E' un effetto reversibile:

energia meccanica  $\longleftrightarrow$  energia elettrica



$$e_u = k F$$

$$e_u = \text{f.e.m. ai morsetti A e B}$$

$$F = \text{Forza applicata}$$

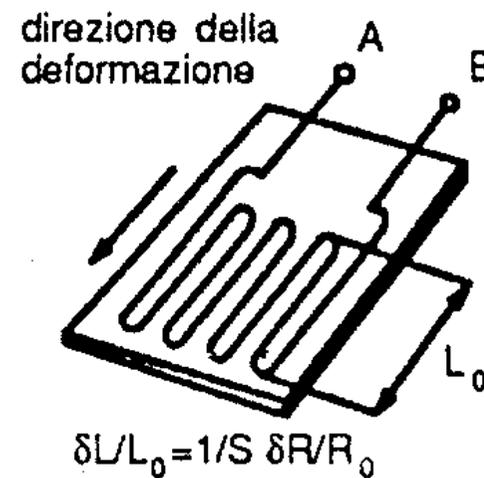


## Effetto piezoresistivo (Strain-gauge, Strain-gage)

È l'effetto di variazione della resistività di un opportuno materiale quando è soggetto ad una deformazione dovuta ad uno sforzo ad esso applicato (ridotto nei materiali metallici, più consistente nei semiconduttori).

- Sforzo:  $\sigma = \frac{F}{a} = E \frac{dl}{l}$
- dove E = modulo di Young del materiale
- F = forza applicata
- a = sezione interessata

$$\frac{dl}{l} = \epsilon \quad \text{È chiamato tensione (deformazione normalizzata)}$$



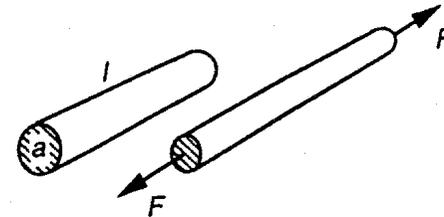
## Effetto piezoresistivo (2)

- Il conduttore cilindrico che subisce una elongazione  $d\ell$  (supponendo che il volume  $V$  rimanga costante) possiede una resistenza pari a:

$$R = \frac{\rho}{V} \ell^2$$

da cui si ricava la sensibilità:

$$\frac{dR}{d\ell} = 2 \frac{\rho}{V} \ell$$



che è tanto migliore quanto più lungo e stretto è il cilindro e quanto maggiore è la resistività del materiale.

Si può esprimere come:

$$\frac{dR}{R} = S_e \varepsilon$$

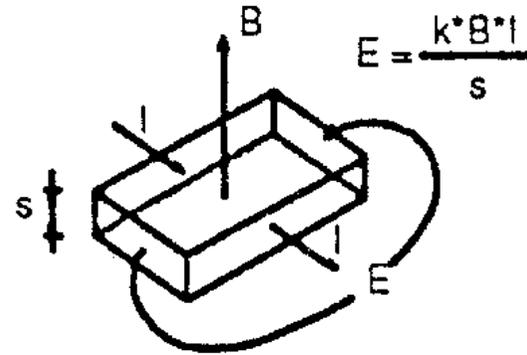
$S_e =$  **Sensibilità** (*gauge factor*) [2-6 per metalli, 40-200 per semiconduttori]

- **applicazioni:** accelerometri, microfoni.

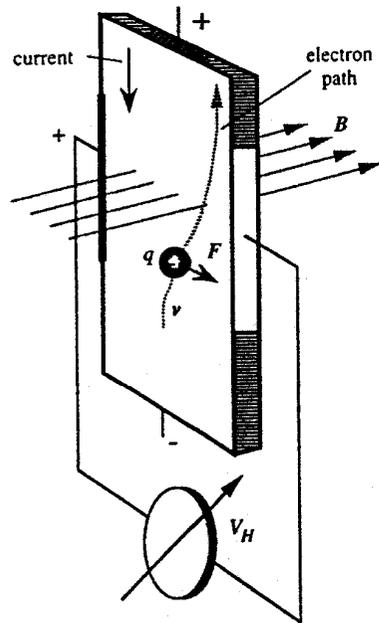
## Effetto piezoresistivo (3)

- E' formato da un resistore saldato su un substrato portante elastico, che viene fissato sull' oggetto che si deforma
- il resistore è in tal modo isolato elettricamente dall' oggetto
- il coefficiente di espansione termica del substrato deve essere coincidente con quello del materiale di cui è fatto il resistore
- la resistenza varia in genere da 100 a migliaia di ohm.
- Per avere una buona sensibilità il sensore deve avere lunghi segmenti longitudinali e corti segmenti trasversali, così la sensibilità trasversale è solo di pochi percento di quella longitudinale

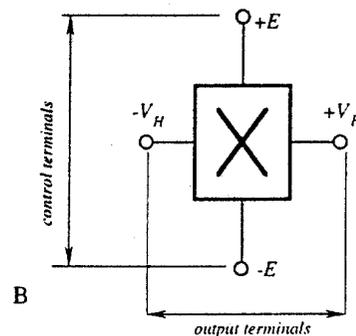
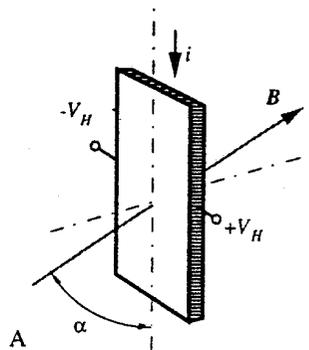
## Effetto Hall (E.Hall 1879)



- In un materiale conduttore sottoposto ad un campo di induzione magnetica  $B_z$  normale al flusso di una corrente elettrica di intensità  $I_x$ , si manifesta una d.d.p.  $V_y$  in direzione perpendicolare alle direzioni sia di  $B_z$  sia di  $I_x$ .
- Il fenomeno è dovuto al fatto che le cariche elettriche, in movimento per la presenza della corrente, si accumulano su di una faccia del materiale per effetto del campo magnetico, fino a che non si determina un campo elettrico agente sugli elettroni tale da opporsi e compensare la forza dovuta al campo magnetico.
- Sensori Hall sono usati per rilevare campi magnetici, posizione e spostamento di oggetti

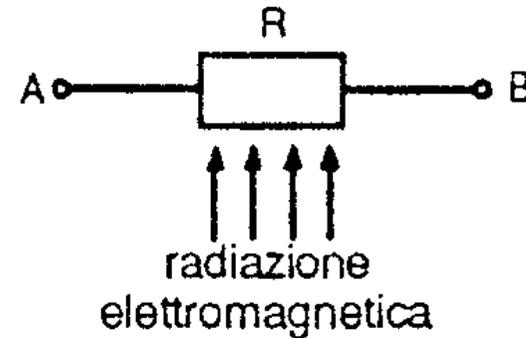


- La tensione di Hall può essere prelevata con opportuni elettrodi. (Bassa nei conduttori e negli isolanti, buona nei semiconduttori)
- non sono molto lineari rispetto all'intensità del campo  $B$  e quindi richiedono una calibrazione per misure di precisione
- per misure di posizione e di spostamento devono essere forniti con una sorgente di campo magnetico ed una interfaccia elettronica
- Un dispositivo commerciale che utilizza arseniuro di indio ha una corrente di controllo di 0.1 A e presenta una tensione di Hall pari a 0.15 V per un campo di induzione magnetica di 1 Wb/m<sup>2</sup> (T)



## Effetto fotoconduttivo

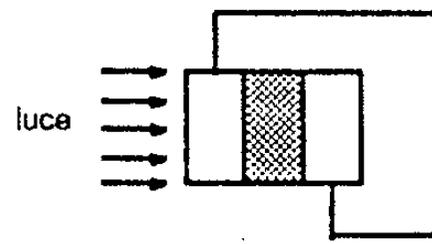
(Sensori passivi)



- Determina un passaggio di corrente elettrica in materiali investiti da radiazioni di varia lunghezza d'onda.
- Dovuto alla variazione della conduttività di materiali isolanti e semiconduttori.
- La radiazione incidente consente il passaggio di elettroni da uno stato di legame ad uno libero, questi non hanno energia sufficiente per uscire dal materiale (*fotoemissione*) ma contribuiscono alla conduzione facendo diminuire la resistività.
- E' necessario collegare il sensore ad un generatore di tensione per avere un flusso di corrente elettrica variabile con la radiazione incidente.

## Effetto fotovoltaico

(Sensori attivi)



- Conseguente alla conversione dell'energia radiante in energia elettrica che consente la realizzazione di celle solari.
- Si presenta nelle giunzioni p-n dei semiconduttori, sottoposte a radiazioni che danno luogo alla comparsa di una f.e.m.
- Illuminando la giunzione si producono coppie elettroni-buche.
- Materiali tipici sono selenio-ferro e rame-(ossido di rame)
- Fotodiodi o fototransistor sono elementi fotovoltaici usati come interruttori nei quali piccole quantità di luce sono in grado di produrre la commutazione del circuito dalla condizione di minima corrente a quella di corrente elevata

## Sistemi ad ultrasuoni (Effetto Doppler, 1842)

- Consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche, ottiche, radio dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore delle onde.



$$f_1 - f_2 = k v$$

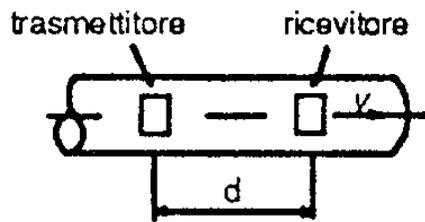
$f_1$  = Frequenza dell'onda incidente

$f_2$  = Frequenza dell'onda riflessa

$v$  = Velocità media del fluido

## Sistemi ad ultrasuoni (tempo di volo)

- Misura della velocità di un fluido all'interno di un condotto
- Controlli non distruttivi: misura delle inclusioni in pezzi metallici
- Trasmettitore e ricevitore sono sensori piezoelettrici che funzionano ad impulso o ad onda continua.



$$\Delta t = \frac{d}{c + v} ; \quad \Delta \varphi = \frac{2\pi f d}{c + v}$$

## Riferimenti Bibliografici

- ✓ I.Gorini "Le misurazioni tramite trasduttori con uscita elettrica" in: E.Arri S.Sartori "Le misure delle grandezze fisiche", Paravia Editore, Torino 1984.
- ✓ M.Savino "Fondamenti di scienza delle misure", La Nuova Italia Scientifica, Roma 1992.
- ✓ H.K.P. Neubert "Instrument transducers", Clarendon Press, Oxford, 1976.
- ✓ J.Fraden "Handbook of modern sensors", AIP Press, New York, 1995.
- ✓ H.Sheingold "Transducer interfacing handbook", Analog devices, Norwood, 1980.