

**Corsi di Formazione
su
Tecniche di Interfacciamento
per misura e controllo**

Padova Ricerche

Giugno 1998:

**Introduzione all'interfacciamento
Visual Basic per applicazioni di interfacciamento
LabView per applicazioni di interfacciamento
Comunicazione seriale e parallela
L'interfaccia standard IEEE-488**

Ottobre 1998:

**Sensori e condizionamento
Conversione AD/DA
Acquisizione dati con prodotti commerciali
Regolazione e Controllo
Bus di campo
Controllo di strumentazione via TCP/IP**

Giornata di studio:
Problematiche dei sistemi di misura automatici
e di controllo di processo mediante calcolatore

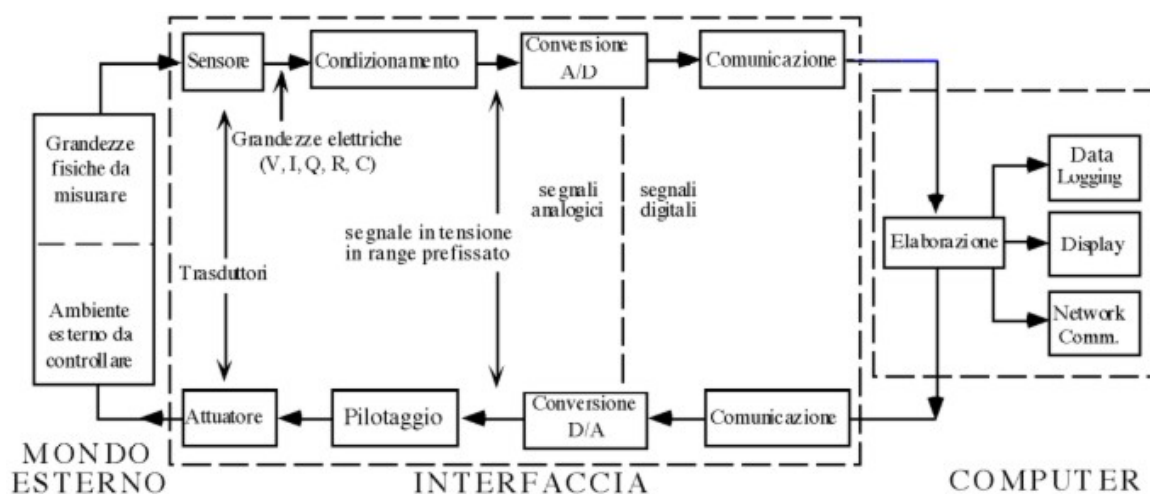
Mattina:

- 1) Sensori : principi fisici, problematiche, condizionamento
- 2) Principi della conversione AD/DA
- 3) Il trasferimento dati: diversi modi e standard di comunicazione
- 4) La programmazione: ambienti di sviluppo e linguaggi

Pomeriggio:

- 1) Definizione di architetture tipiche:
 - Requisiti funzionali
 - Scelta dell'hardware
 - Scelta del software
- 2) La strumentazione:
 - Interfacc. a generatore di funzioni via seriale
 - Interfacc. ad oscilloscopio via IEEE-488
- 3) Le schede on board: Scheda multifunzione
Schede dedicate
- 4) Sistemi di automazione: Architetture centralizzate e distribuite
Controllori (PLC, PC, VME,...)
Comunicazione (LAN, Bus di Campo,...)

Struttura generale di interfaccia tra computer e mondo esterno



Il livello più esterno è costituito da Trasduttori: Sensori e Attuatori

Dispositivi capaci di interagire con il mondo esterno che traducono i valori delle grandezze fisiche di interesse in segnali elettrici, e viceversa.

Nel primo caso si tratta di *sensori*, nel secondo caso *attuatori*

Il secondo livello è costituito da Condizionamento e Pilotaggio

Se il sensore produce una variazione di una grandezza elettrica (resistenza, capacità, corrente...) che va convertita in un segnale in *tensione*, l'interfaccia deve contenere un blocco di *condizionamento* del sensore.

Esistono innumerevoli tipi diversi di *attuatori* (motori, piezoi, LED, diodi laser, altoparlanti, riscaldatori, frigistors...), ciascuno dei quali richiede soluzioni circuitali diverse per il pilotaggio.

Il terzo livello è la Conversione AD / DA

Il trasduttore produce in uscita (e/o richiede in ingresso) un segnale *analogico*, e che i moderni calcolatori sono *digitali*, per attuare una comunicazione fra trasduttori e computer è necessario che l'interfaccia disponga di *blocchi di conversione* A/D e D/A.

Comunicazione

Va stabilito il *linguaggio* per dialogare con l'elaboratore.

Va scelto se comunicare in modo *seriale* o *parallelo*, se la successione temporale è *sincrona* o *asincrona*, se i livelli di tensione sono riferiti ad una massa comune o differenziali tra due linee....->*Standard di comunicazione*.

Software

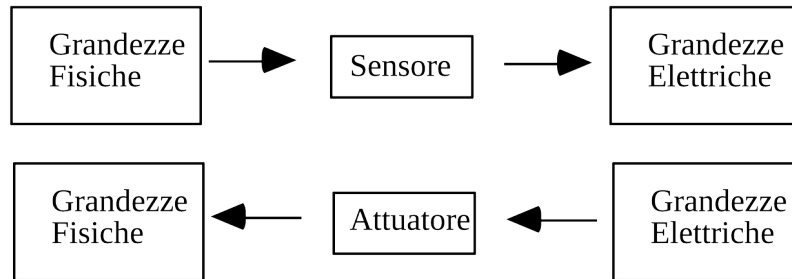
Il calcolatore viene usato per la gestione complessiva delle operazioni di elaborazione e di trasmissione dei dati.

Per *l'elaborazione*, dei dati ricevuti (interpolazione, filtraggio, medie, ...) e il loro *monitoraggio* o *memorizzazione* (display su video, stoccaggio su supporto magnetico, stampa, invio su rete...), valgono le tecniche usuali utilizzate nelle applicazioni del computer “*off-line*”, con il limite che usando il computer “*on-line*”, il tempo impiegato dall'elaboratore nel manipolare dati diventa un importante parametro nel determinare le prestazioni ottenibili dal sistema.

Per la parte che riguarda la gestione della *trasmissione*, è necessario utilizzare un opportuno software che istruisce l'elaboratore circa le operazioni da eseguire con l'interfaccia gestita. Tale software può essere scritto completamente dall'utente, ma più spesso può avvalersi di librerie di routines che facilitano enormemente la scrittura di un programma applicativo.

TRASDUTTORI E SENSORI

Un *trasduttore* è un dispositivo che genera un segnale *elettrico* correlato con una grandezza fisica, o più in generale con una modificazione qualsivoglia dell'ambiente circostante (*sensore*), oppure. un dispositivo capace di produrre un effetto fisico quando gli venga fornito un segnale elettrico(*attuatore*).



Alcuni trasduttori sono **reversibili**, cioè possono essere *sensori* o *attuatori*.

Esempi:

altoparlante magnetodinamico	⇔	microfono
motore in corrente continua	⇔	dinamo
diodo LED	⇔	fotodiodo
piezo-transducer	⇔	piezo-sensor

Gli stessi elementi sensibili possono essere utilizzati per misurare grandezze fisiche di natura diversa:

Sensori di temperatura possono funzionare come termometri, ma anche come misuratori di livello, di flusso, di conducibilità termica ...

Sensori di forza possono venire usati come misuratori di pressione, come microfoni, come accelerometri ...

Si può distinguere tra sensori *attivi* e sensori *passivi*, intendendo che i primi generano un segnale senza essere alimentati (*unbiased*) e sostanzialmente prelevano energia dal sistema sotto osservazione, mentre i secondi richiedono un opportuno circuito di condizionamento ed una sorgente di energia (alimentatore di corrente o di tensione) per poter funzionare.

Vi sono sensori in cui l'uscita è una “*grandezza elettrica*”(ad esempio variazioni di resistenza, capacità o induttanza), oppure un vero e proprio “*segnale elettrico*” (tensione o corrente)

Per ottimizzare l'utilizzo di sensori e trasduttori è utile conoscere, almeno a grandi linee, i diversi meccanismi fisici che regolano la conversione di grandezze fisiche in segnali elettrici e viceversa. Ciò consente ad esempio di facilitare la scelta tra diversi dispositivi che possono compiere la stessa funzione, o la previsione dei limiti di impiego di un particolare dispositivo.

Caratteristiche generali di un sensore

- *sensibilità* (rapporto tra la variazione della grandezza elettrica in uscita e la variazione della grandezza fisica che l'ha prodotta)
- *risoluzione* (la minima variazione della grandezza in ingresso che può essere rilevata dal sensore)
- *accuratezza o precisione* (massimo errore casuale o sistematico che va attribuito alla lettura)
- *portata* (l'intervallo di valori della grandezza rilevata entro il quale è possibile compiere una misura con l'accuratezza indicata)
- *non-linearità* (scostamento della funzione di trasferimento reale da un andamento lineare)
- *isteresi* (variazioni del segnale in uscita in corrispondenza ad un fissato valore della grandezza rilevata, conseguenti a cicli su ampi intervalli di valori della grandezza rilevata)
- *caratteristiche dinamiche* (tempo di risposta, tempo di salita, tempo di assestamento, smorzamento, banda passante)
- *rapporto segnale/rumore* (rumore interno, rumore indotto dall'esterno)
- *impedenza di uscita* (valore dell'impedenza che può pensarsi posta in serie al sensore se lo si schematizza come generatore ideale di tensione, o in parallelo al sensore se lo si schematizza come generatore ideale di corrente)
- *deriva* (termica, temporale)
- *dipendenza da grandezze fisiche diverse* da quella per cui il sensore è utilizzato (luce, temperatura, pressione, sollecitazioni meccaniche).

Segnale e Rumore

Il segnale fornito da un sensore è composto sempre da due termini: un termine che rappresenta il *segnale utile* e che contiene le informazioni richieste, e un *segnale spurio* che non contiene le informazioni utili, e che è chiamato “**rumore**”.

La distinzione tra **segnale** e **rumore** è sempre “scelta dall’utente”: la sovrapposizione tra due segnali acustici (ad es. la voce di un dialogo e la musica di una orchestra) può essere arbitrariamente vista come “*dialogo* disturbato da un rumore di fondo” o come “*musica* disturbata da chiacchiere”, a seconda che l’informazione che si considera importante sia il contenuto del dialogo o quello della musica.

Nel caso del segnale prodotto da un sensore tuttavia la distinzione è quasi sempre ovvia.

Quando l’ampiezza del rumore è *confrontabile* con quella del segnale utile l’informazione estratta dal sensore può essere affetta da errore, e quindi è importante utilizzare tecniche che siano in grado di aumentare il rapporto segnale/rumore.

Il rumore può essere suddiviso in due categorie: il *rumore dovuto a cause esterne* al sensore e il *rumore intrinseco* degli elementi che costituiscono il sensore .

Rumore interno

I principali tipi di rumore interno sono: il *rumore termico* (Johnson noise) e il *rumore 1/f* (Flicker noise).

Il *rumore termico* è presente in ogni conduttore ed è dovuto all'agitazione termica degli elettroni liberi. La differenza di potenziale agli estremi di un conduttore dipende dalla temperatura assoluta T , dal valore della resistenza elettrica R , dall'intervallo di frequenze Δf considerato: $V_{\text{neff}}^2 = 4KPT \Delta f$ (ove K è la costante di Boltzmann, Δf è l'intervallo di frequenze considerato).

Questo rumore non dipende dalla frequenza ed è quindi un “rumore bianco”.

Può essere ridotto limitando la banda passante, e lavorando con resistenze di basso valore .

Rumore 1/f. Molti componenti, specialmente quelli attivi, presentano un rumore inversamente proporzionale alla frequenza, e quindi si fa sentire maggiormente alle basse frequenze.

Questo tipo di rumore può essere ridotto solo lavorando con segnali in alternata (ad esempio utilizzando un “chopper”, prima di amplificare il segnale fornito dal sensore, nel caso esso sia un debole segnale in tensione continua)

Rumore esterno

- a) *Rumore ambientale* Se le condizioni ambientali in cui si trova il sensore inducono modificazioni del segnale non dovute alle variazioni della particolare grandezza fisica misurata (ad esempio se la variazione della temperatura ambiente induce derive o variazioni nella sensibilità di un sensore di pressione), il solo modo di ridurre l'errore di misura è di stabilizzare le condizioni ambientali o di renderne immune il sensore
- b) *Effetti di microfonicità*. Se i circuiti sono sottoposti a sollecitazioni meccaniche, i componenti e i collegamenti variano la loro posizione reciproca dando luogo a segnali indesiderati. (Caso tipico: due conduttori a potenziali diversi che presentano tra loro una certa capacità parassita).
- c) *Presenza di onde elettromagnetiche*. Se i segnali di interesse richiedono una banda passante superiore a 100kHz, parte del sistema può funzionare da antenna e captare segnali indesiderati (radiofrequenze). Il rimedio consiste in uno schermaggio elettromagnetico, ad esempio utilizzando cavi intrecciati (twisted pairs) o schermati (coax). Importante è anche tenere separate le sezioni in cui vengono manipolati e amplificati i segnali analogici da quelle in cui circolano segnali digitali (che irradiano rumore ad alta frequenza)
- d) *Accoppiamento capacitivo e induttivo*. Dispositivi operanti nelle vicinanze del sensore che presentino tensioni o correnti variabili nel tempo, anche se danno luogo a irraggiamento elettromagnetico trascurabile, possono produrre rumore tramite accoppiamenti capacitivi o induttivi. Principale sorgente di rumore di questo tipo è la rete di distribuzione elettrica (50 Hz e multipli). Il rimedio consiste in uno schermaggio elettrostatico e magnetico, o nell'uso di filtri passa-basso (ove possibile) o arresta-banda centrati sulle frequenze di rumore.
- e) *Ritorni di massa*. Segnali spuri di notevole importanza possono anche essere prodotti da un cablaggio scorretto delle "masse". I segnali sono sempre misurati rispetto ad una *tensione di riferimento* ("massa"): se, ad esempio, le correnti circolanti nei dispositivi di condizionamento del sensore provocano differenze di tensione tra i diversi punti del circuito usati come massa, si produce un errore nella lettura del segnale. Questo inconveniente può essere evitato scegliendo opportunamente il tipo di collegamento tra la sorgente di segnale, amplificatore e trasmettitore.

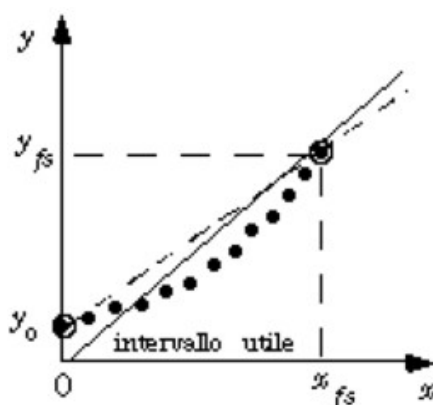
Sensibilità e linearità: la funzione di trasferimento

La sensibilità σ di un sensore è il rapporto tra la variazione della grandezza elettrica in uscita (Δy) e quella della grandezza fisica che l'ha prodotta (Δx).

Se σ è *costante* il sensore è *lineare* e la relazione tra uscita e ingresso è descritta graficamente da una *retta*.

Se σ *non* è *costante* il sensore è *non-lineare* e la relazione tra uscita e ingresso è descritta graficamente da una *curva*, detta *funzione di trasferimento*

In figura con una linea continua è indicata la funzione di trasferimento unitaria (sensore lineare), con la curva a punti una generica “curva di calibrazione” e con la retta tratteggiata una “retta di calibrazione” ottenuta da due valori di taratura (qui i cerchi a zero e a fondo scala).

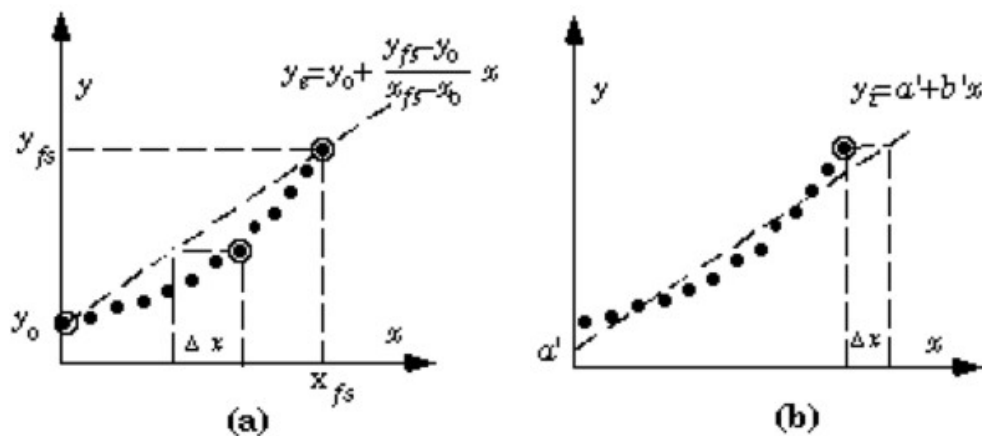


Per caratterizzare la precisione della funzione di trasferimento complessiva $y = T(x)$ di un sensore si dà un valore di “linearità” che permette di valutare quanto il valore *estrapolato linearmente dai valori di calibrazione* si discosta *al massimo* dal valore vero (tale valore si può trovare espresso in % o in unità della grandezza misurata).

Linearità riferita agli estremi e indipendente

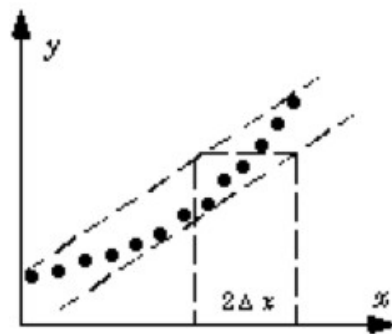
Anche il termine “linearità” va precisato: si deve distinguere tra “linearità *indipendente*”, “linearità riferita alla retta di *migliore interpolazione*” e “linearità riferita agli *estremi*”, a seconda di come il costruttore ha valutato la differenza tra la funzione di trasferimento reale e quella ideale.

Per calcolare la linearità *riferita agli estremi* si traccia la retta $y_e = a + bx$ tra i punti estremi della funzione di trasferimento $\{y_0, 0\}$, $\{y_{fs}, x_{fs}\}$, e si misura la *massima differenza* Δx tra le ascisse x corrispondenti al medesimo valore dell'ordinata sulla retta e sulla curva di calibrazione ($y = y_e$): l'errore di linearità é allora espresso da Δx in unità assolute e da $100\Delta x/x_{fs}$ in percento).



Lo stesso calcolo si può fare utilizzando, anziché la retta passante per gli estremi della curva di calibrazione, la retta $y_i = a' + b'x$ che *migliormente interpola tutti i punti misurati* di tale curva durante la taratura.

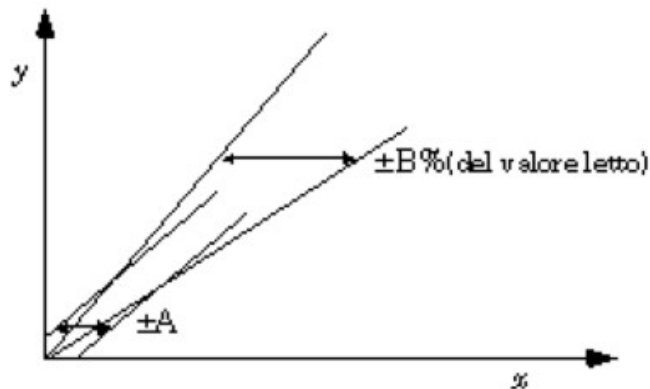
La linearità *indipendente* é calcolata come la minima semi-separazione orizzontale tra due rette parallele che racchiudano tra loro tutti i punti della curva di calibrazione.



Accuratezza

L'accuratezza complessiva di un sensore (che include l'errore di linearità) può essere specificata con due parametri: $\Delta Y = \pm(A + B\%)$.

Il primo parametro (A) è espresso in unità della grandezza misurata, oppure in *digits*, il secondo (B) in percento del *valore letto* (intendendosi che in ogni misura si debba considerare precisa a meno dell'errore *maggiore* tra i due calcolati in tale modo).



Il valore di B è sostanzialmente dovuto all'incertezza nella pendenza k della funzione di trasferimento (errore di *taratura*), mentre il valore di A (errore di *zero*) pone un limite inferiore all'accuratezza in prossimità dello zero, ove l'errore, se si considerasse solo quello dovuto alla pendenza, tenderebbe inverosimilmente a zero.

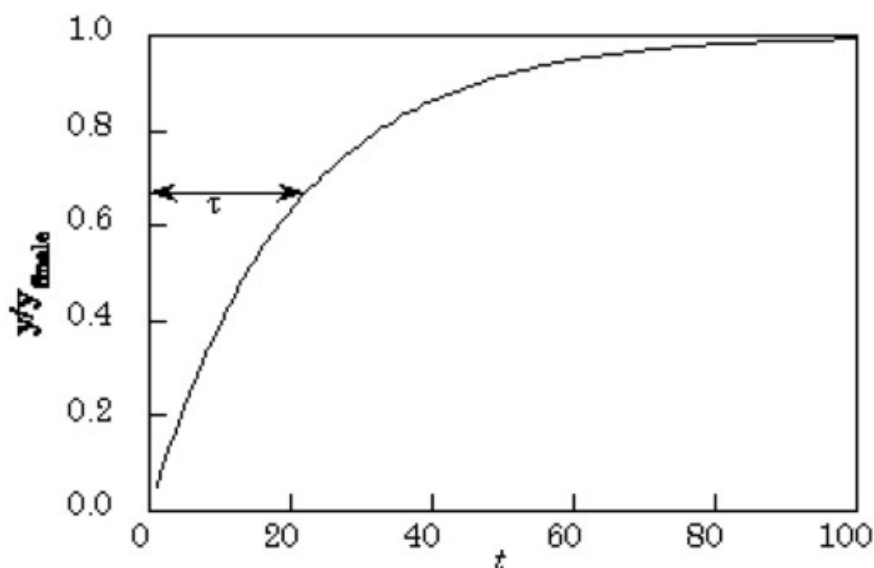
Risposta dinamica: prontezza di un sensore

Se il fenomeno osservato durante la misura non è stazionario bisogna fare attenzione al tempo di risposta del sensore, cioè alla *dinamica* della sua funzione di trasferimento. Dobbiamo cioè tener conto della dipendenza dal tempo : $y = T(x,t)$

La situazione che si riscontra più spesso è quella di una funzione di trasferimento di un filtro passa-basso, e che in notazione complessa si scrive $T = k/(1+j\tau/t)$, ove τ è la costante di tempo. Qui τ è il tempo caratteristico di risposta, ovvero il tempo necessario perchè il valore che appare all'uscita del sensore raggiunga il 63.2% del valore che assumerebbe a regime quando la grandezza misurata passa quasi istantaneamente dal valore zero al valore finale (risposta esponenziale ad uno stimolo a gradino). In questo caso si dice anche che la risposta è limitata da una *frequenza di taglio superiore* f_s pari a $1/\tau$.

Il valore di f_s quantifica la prontezza: una elevata frequenza di taglio superiore assicura la possibilità di misurare fedelmente grandezze velocemente variabili.

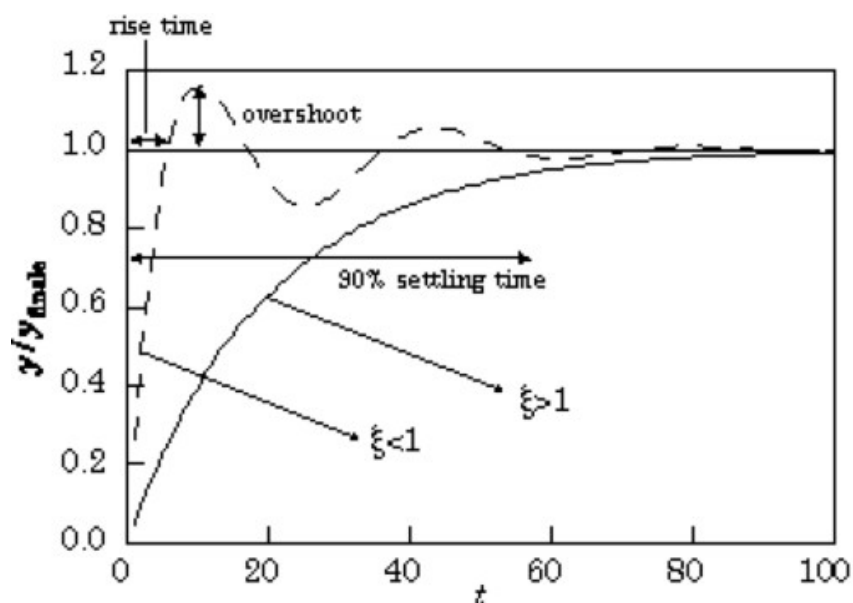
Vi sono anche casi in cui il sensore può fornire una misura precisa della grandezza osservata solo se questa varia con sufficiente rapidità, ovvero, nel caso di un segnale periodico, solo se la frequenza del segnale supera una *frequenza di taglio inferiore* f_i : ad esempio nei sensori piroelettrici la precisione cala al di sotto di una frequenza minima f_i oltre che sopra una frequenza massima f_s . La differenza $f_s - f_i$ è della *banda passante*.



La funzione di trasferimento può essere più complicata. L'*ordine* della funzione di trasferimento $y=T(x)$ è quello della equazione differenziale che lega la variabile y alla variabile x , ovvero il grado del polinomio che appare al denominatore della funzione di trasferimento $T(s)=Y(s)/X(s)$ dopo avere eseguito la trasformazione di Laplace.

Una funzione di trasferimento del secondo ordine è esprimibile come prodotto di due funzioni del primo ordine: $k/[(1+\tau_1s)(1+\tau_2s)] = k/[1+2\xi\tau s+\tau^2s^2]$, ove k è il *guadagno*, ξ è detto *coefficiente di smorzamento* e $f=1/\tau$ è la *frequenza naturale*. Se la risposta è del secondo ordine e $0<\xi<1$, l'uscita di un sensore, sollecitato da una funzione a gradino, presenta delle oscillazioni smorzate: il tempo necessario affinché l'ampiezza dell'oscillazione si riduca in modo che il valore all'uscita resti entro una fissata percentuale del valore finale, è detto tempo di assestamento (*settling time*). Durante questo transiente il segnale in uscita risulta alternativamente superiore ed inferiore al valore finale (stazionario): il rapporto tra il massimo valore in eccesso ed il valore finale è detto *overshoot*. Il tempo necessario a che l'uscita attraversi per la prima volta il valore finale è detto tempo di salita (*rise time*). Se $\xi>1$ la risposta dello strumento si dice sovrasmorzata, e non si osservano oscillazioni: la risposta assomiglia a quella descritta da una funzione del primo ordine.

Nei sensori in cui il tempo di risposta è importante, si cerca di ottenere $\xi=1$ (*smorzamento critico*) in modo da arrivare al valore stazionario nel più breve tempo possibile. Con $\xi=1$ non si ha overshoot e le due costanti di tempo τ_1 e τ_2 che compaiono nella funzione di trasferimento del secondo ordine risultano uguali.



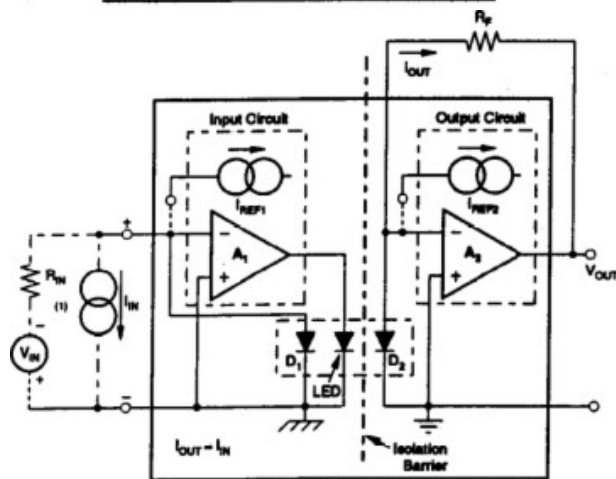
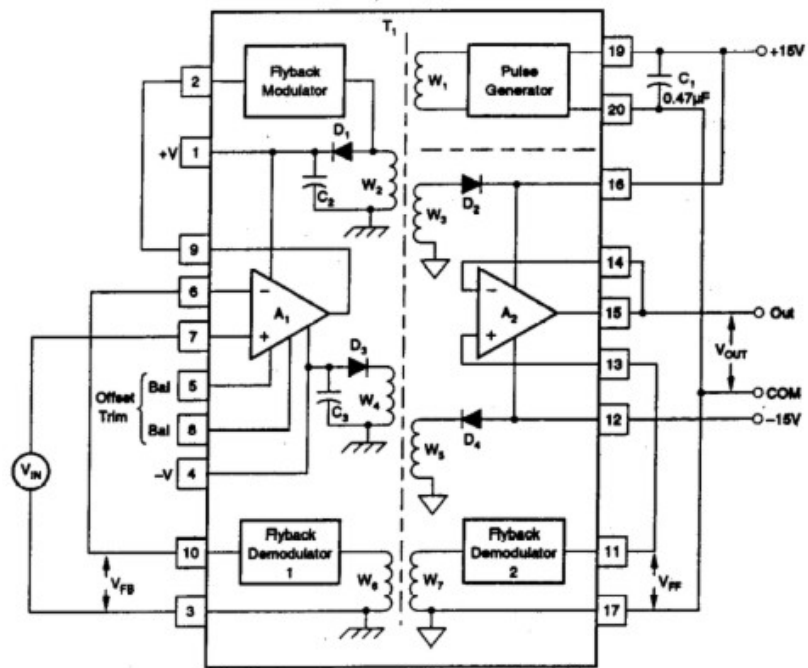
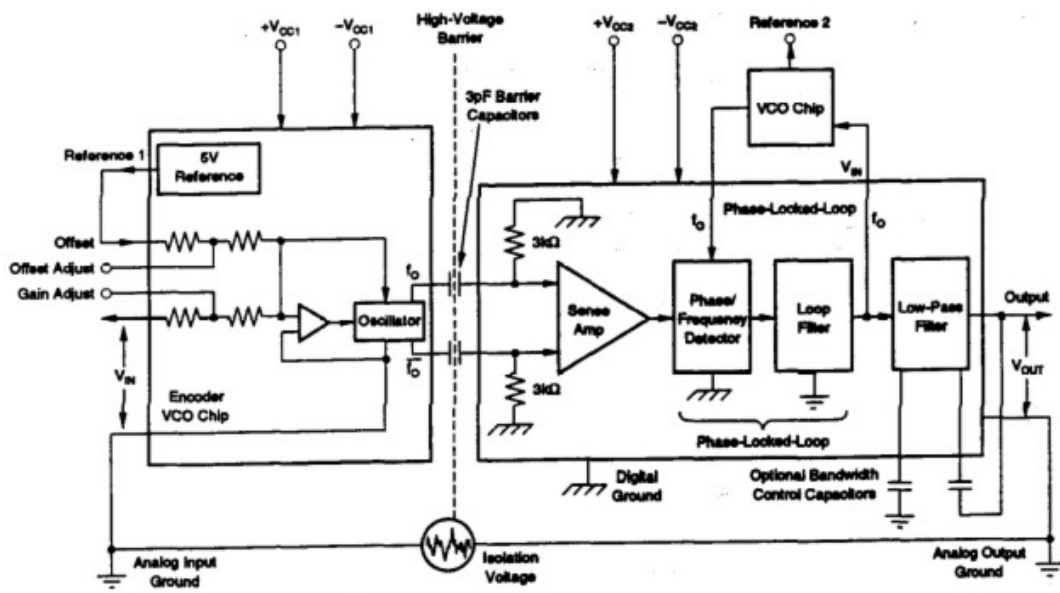
METODI DI DISACCOPPIAMENTO

Tenere separata la massa del sensore da quella dei circuiti di condizionamento del segnale , può essere necessario non solo per evitare *loop di massa*, ma anche nei casi in cui il segnale prodotto dal sensore abbia *tensioni che superano i limiti massimi permessi* al circuito di condizionamento (ad esempio una scheda di acquisizione).

In questi casi si possono adottare sostanzialmente tre metodi per trasferire il segnale analogico prodotto dal sensore senza avere con esso un accoppiamento in continua.

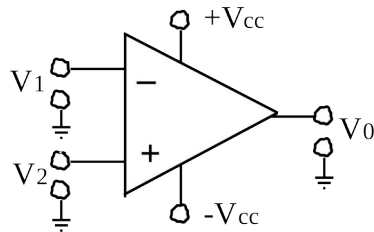
Si può usare un accoppiamento tramite :

- **capacità**
- **trasformatori**
- **fotoaccoppiatori**

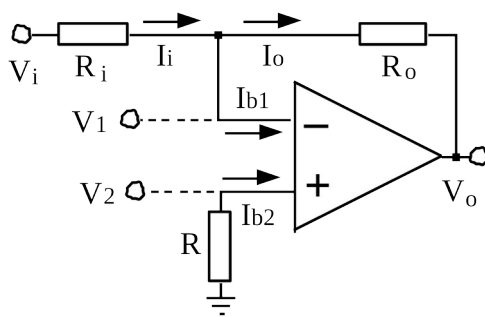


Amplificatori Operazionali

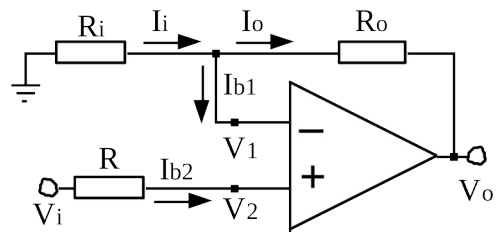
L'enorme sviluppo che ha avuto la tecnologia dei circuiti integrati ha reso disponibili sul mercato, a costi molto contenuti, una vasta serie di dispositivi che consentono una facile elaborazione lineare dei segnali analogici.



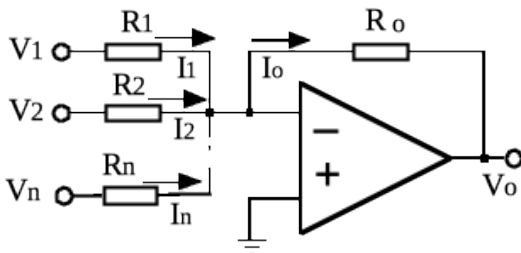
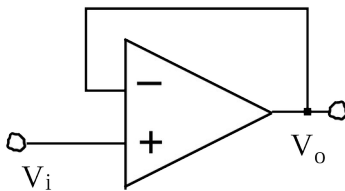
Amplificatore operazionale



Amplificatore invertente: $G = -R_o/R_i$

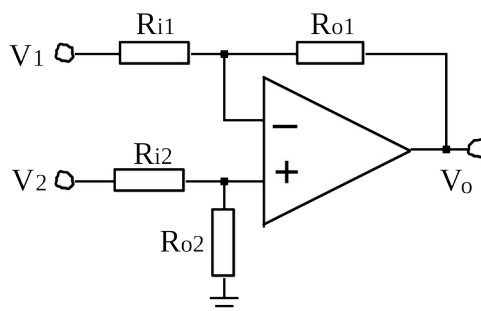


Amplificatore non-invertente:
 $G = 1 + R_o/R_i$



Buffer: $G = 1$

Sommatore: $V_o = -R_o \sum (V_i/R_i)$



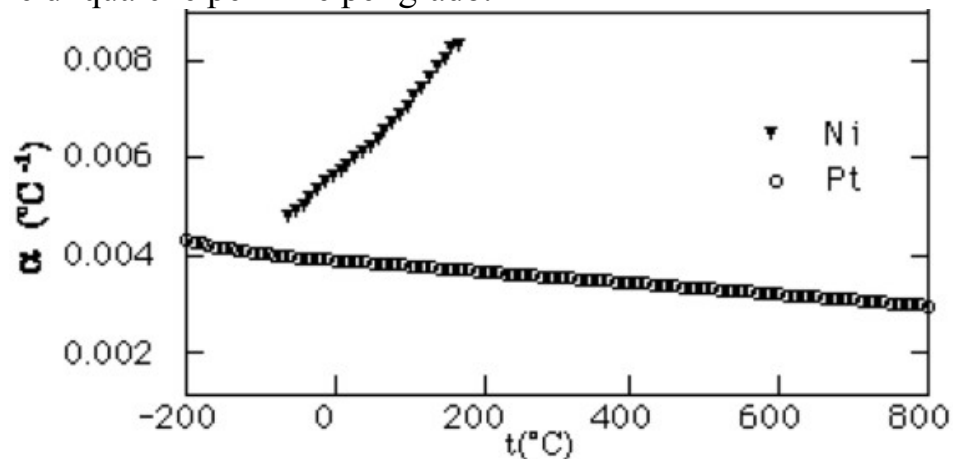
Amplificatore differenziale: $V_o = V_2 - V_1$

SENSORI DI TEMPERATURA

- 1) *resistivi (RDT) (metallici o a semiconduttore)*
- 2) *a diodo*
- 3) *termocoppie.*

1) Termometri a resistenza metallica (*nichel o platino*)

La resistività di un metallo, per temperature non troppo basse, segue la legge lineare $\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha T)$, dove α è il coefficiente di temperatura che è dell'ordine di qualche permille per grado.



Il segnale prodotto è proporzionale alla tensione V_p di polarizzazione, ma anche la potenza erogata al termometro è proporzionale a V_p , (*autoriscaldamento*).

I sensori metallici hanno *piccola massa (risposta pronta)* e discreta linearità su un ampio intervallo di temperatura.

Svantaggi: i sensori di piccole dimensioni hanno *bassa resistenza*, tipicamente 100Ω a temperatura ambiente. Di conseguenza la *resistenza dei cavi di collegamento* al sistema di misura può produrre un errore apprezzabile: questo richiede che il termometro venga utilizzato in una *configurazione a 3 o a 4 terminali*.

Intervallo utile: per gli elementi di platino si va da 10 K a 800 K, per il nichel da -60°C a $+300^{\circ}\text{C}$.

Thermistor NTC e PTC

Gli RTD a *semiconduttore* possono essere a coefficiente di temperatura negativo (NTC) positivo (PTC)

I *termistori* NTC hanno una resistenza che dipende circa esponenzialmente dalla temperatura assoluta.

L'equazione caratteristica di un termistore è spesso scritta dal costruttore come:

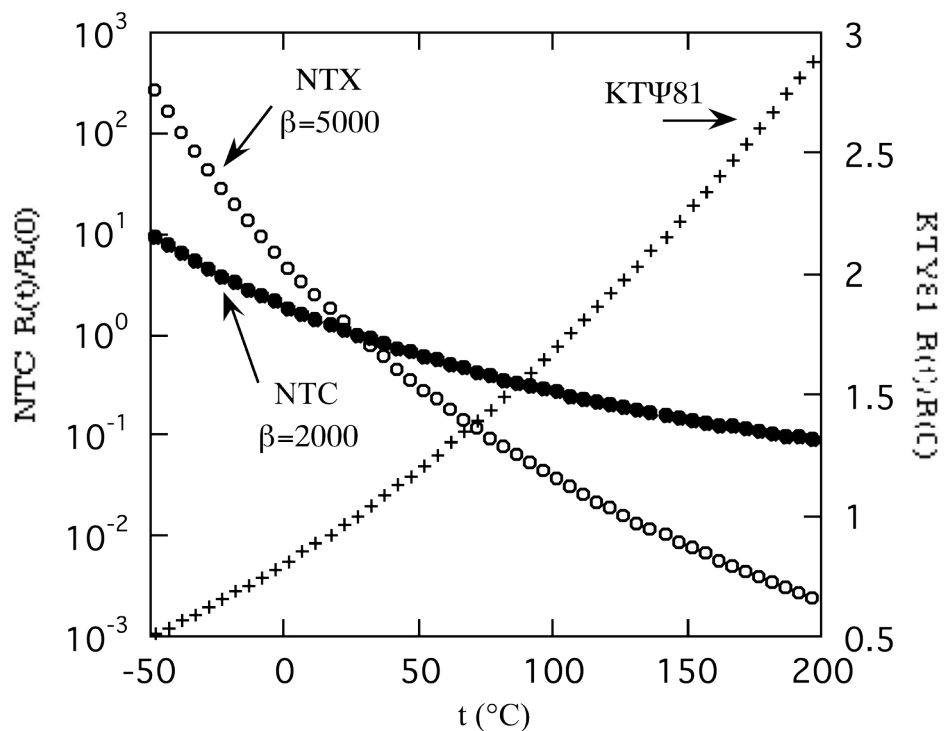
$$R(T) = R(T_0) e^{\beta(1/T - 1/T_0)},$$

ove $R(T_0)$ è la resistenza di riferimento e la costante β (tipicamente tra 2000 e 5000 K) è detta *temperatura caratteristica*, che quantifica la sensibilità.

Gli NTC esibiscono quindi una notevole *non-linearità*, con una sensibilità che varia inversamente con il quadrato della temperatura assoluta T ($\alpha = \partial R / R \partial T = -\beta/T^2$). Inoltre sono soggetti a deriva temporale (invecchiamento) che è dell'ordine di 10^{-3} /anno.

I termistori offrono valori ohmici a T_0 in un intervallo vastissimo e possono avere dimensioni ridottissime (*risposta molto rapida*).

I termistori PTC hanno un *coefficiente termico costante* in un limitato intervallo di temperature, con discreta sensibilità (dell'ordine di 10^{-2} K^{-1}).



Per i sensori non-lineari sono stati proposti molti circuiti di condizionamento per migliorarne la linearità (es. una resistenza in parallelo al sensore e una in serie).

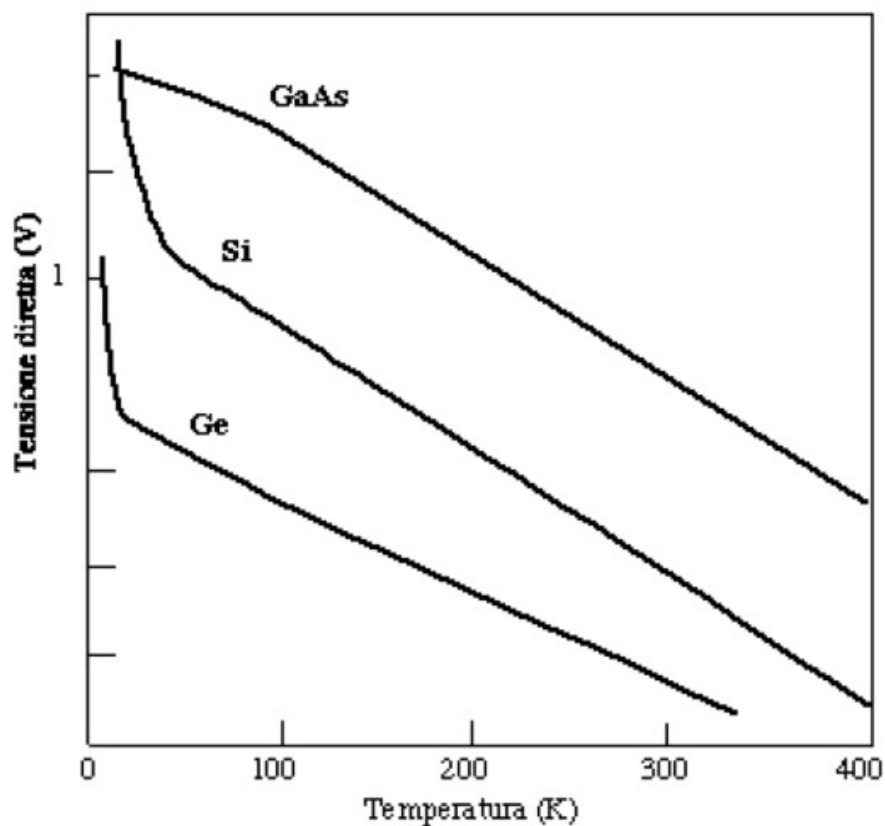
Alternativamente si può procedere, mediante l'uso di un computer o microprocessore, alla linearizzazione digitale utilizzando un algoritmo per la interpolazione della curva di calibrazione.

Termometro a diodo

Il termometro a diodo sfrutta il fatto che la dipendenza dalla temperatura della tensione diretta V_f di una giunzione p-n polarizzata con corrente I_f costante è *quasi lineare* per temperature $T > 30\text{ K}$ (≈ -240 centigradi).

$$V_f = V_o - \gamma(I_f)T.$$

ove la pendenza $\gamma(I_f)$ dipende solo debolmente (logaritmicamente) dalla corrente di polarizzazione.



Vantaggi : *buona linearità e discreta sensibilità* (2 mV/K)

Svantaggi: vanno polarizzati a *corrente costante*, e *limitato intervallo utile*: $T < 150^\circ\text{C}$.

Esistono anche circuiti integrati che comprendono già, insieme al diodo usato come sensore di temperatura, il circuito di condizionamento del segnale.

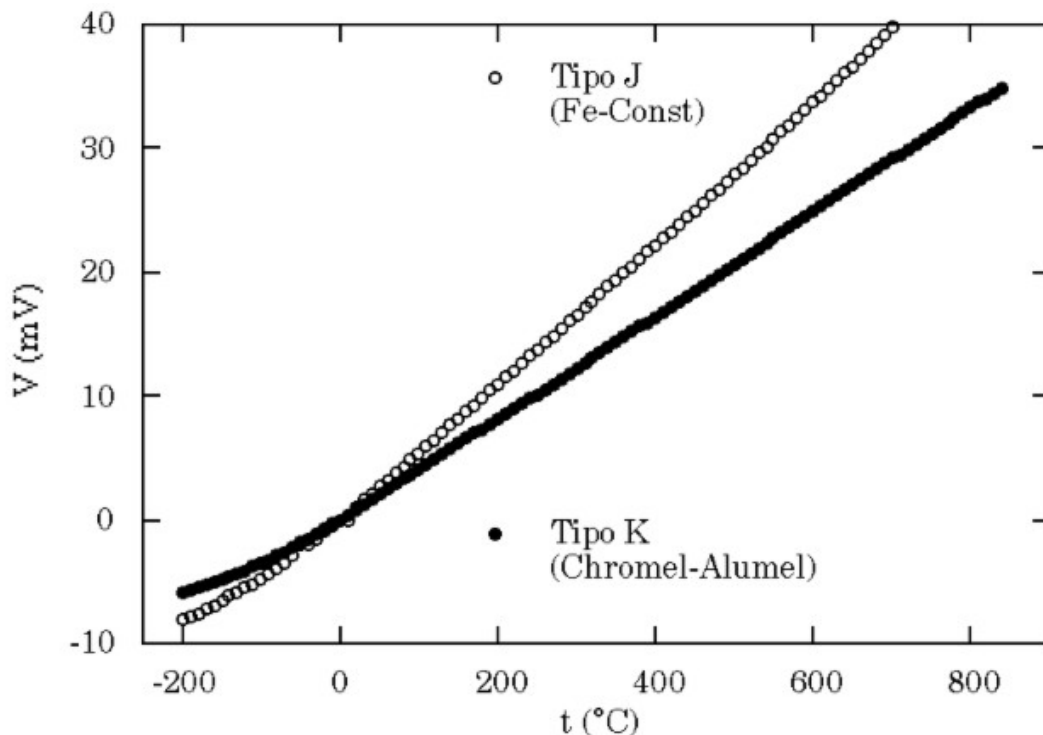
La termocoppia

La termocoppia sfrutta la dipendenza dalla temperatura della forza elettromotrice ai capi di una giunzione tra metalli diversi (effetto Seebeck). Questa forza elettromotrice è funzione crescente di T , ed è quasi lineare in prossimità della temperatura ambiente.

Vantaggi : *prontezza* (piccola massa) facilità di accoppiamento termico (con fili sottili e lunghi) *esteso intervallo di lavoro* (70 - 1000 K) *basso costo*, *non richiede polarizzazione*

Svantaggi: *scarsa sensibilità* (qualche decina di $\mu\text{V/K}$) e la necessità di usare fili senza interruzione dal punto di misura fino ai terminali di lettura della tensione

I tipi più usati sono **J** (Ferro+, Costantana-) e **K** (Cromel+, Alumel-).



EFM di termocoppie J e K in funzione della temperatura

In sostituzione del tradizionale bagno di ghiaccio in cui immergere la giunzione di riferimento si può usare un sistema elettronico di compensazione, ad esempio usando un integratore a diodo. Esistono circuiti integrati che funzionano da convertitori di segnale di termocoppia con inclusa la compensazione la cui uscita è circa proporzionale alla temperatura ($dV_{\text{out}}/dT = 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$).

SENSORI DI FORZA E DI PRESSIONE

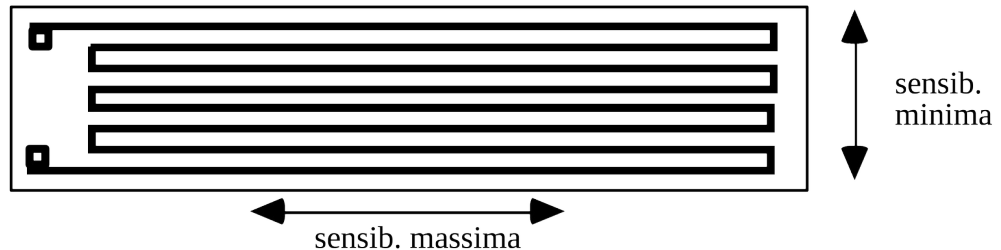
I sensori di forza misurano essenzialmente la deformazione di un supporto elastico soggetto alla forza: la costante elastica del supporto (k che lega forza F e spostamento s , mediante la legge di Hooke $F = k s$) stabilisce la sensibilità e la portata del sensore.

Il sensore può essere un *cristallo piezoelettrico* che sviluppa un campo elettrico proporzionale alla deformazione, o una piastrina di semiconduttore su cui è ricavato un *ponte resistivo*, o l'*armatura flessibile di un condensatore*, o più in generale un qualunque dispositivo elastico connesso ad un qualsiasi rivelatore di spostamento, anche di tipo ottico o magnetico .

Quando la forza misurata è quella prodotta dalle collisioni delle molecole di un gas contro il supporto sensibile, si ha un misuratore di *pressione*.

Sensore di forza a Strain-Gauge

L'estensimetro (o strain gauge) è costituito da una **resistenza a film sottile** inglobata in una striscia di materiale plastico isolante che va incollata alla superficie del campione di cui si vuol misurare la deformazione. La geometria della pista del film resistivo conferisce all'estensimetro proprietà vettoriali



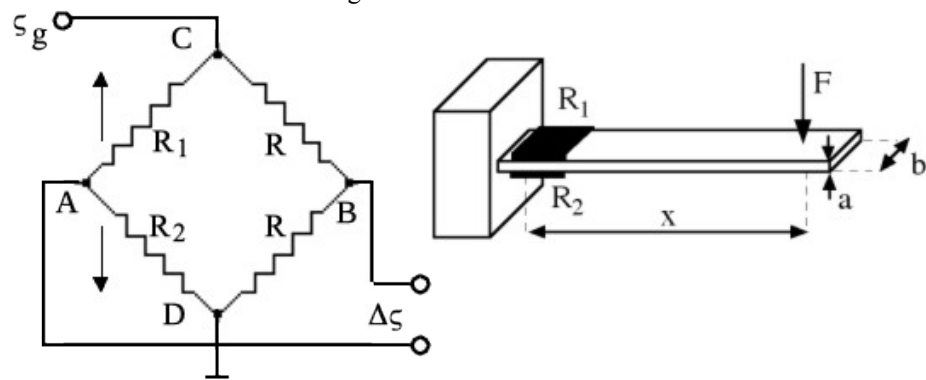
Tipica configurazione della pista di un estensimetro a film

Un semplice esempio di sensore di forza è costituito da due estensimetri uguali sono incollati ad una lamina di acciaio in prossimità dell'estremo della lamina serrato tra due blocchi metallici.

La forza da misurare viene applicata all'estremo libero della lamina che, flettendosi, provoca l'*allungamento relativo* $\epsilon = \Delta L/L$ di uno dei due films resistivi e l'*accorciamento relativo* $-\epsilon$ dell'altro.

Le resistenze a strato sottile ($R_1 \approx R_2$) sono connesse a ponte, insieme a due resistenze fisse R come in figura: così l'uscita del ponte diventa funzione lineare di $\Delta R/R$:

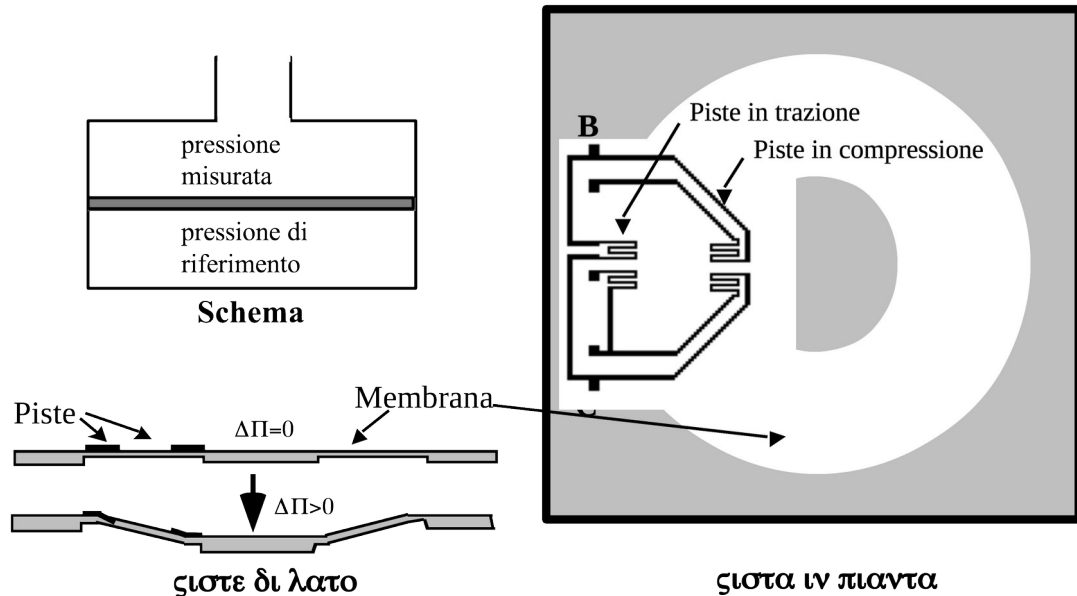
$$\Delta V/V_g = (1/2)\Delta R/R = (1/2)\sigma F.$$



Ponte di Wheatstone e schema del sensore di forza

Manometro a ponte piezoresistivo

E' un circuito integrato fatto di una sottile membrana di silicio su cui sono ricavati quattro estensimetri connessi a ponte. La deformazione della membrana, per lo sforzo applicato su una faccia dalla pressione del gas, modifica il valore delle quattro resistenze e sbilancia il ponte, fornendo in uscita una tensione differenziale proporzionale alla pressione, e alla tensione di polarizzazione.



Schema del sensore di pressione Siemens KPY

Nei sensori *assoluti* una faccia della membrana chiude un piccolo volume evacuato (pressione di riferimento).

Nei sensori *relativi* la pressione di riferimento è quella atmosferica.

Nei sensori *differenziali* due tubetti si affacciano alla membrana per permettere misure di differenze di pressioni.

Per sensori di pressione assoluta il fondo scala può arrivare a 5 MPa, e per i sensori di pressione relativa varia da un centinaio di Pa ad alcuni MPa.

La sensibilità varia da sensore a sensore e dipende debolmente dalla temperatura:

SENSORI DI LUCE

Con il termine luce si intende comunemente la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda tra $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ e $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$. Questa è la radiazione cui è sensibile l'occhio umano.

Quando la lunghezza d'onda supera $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ viene detta luce infrarossa (IR), o radiazione termica, quando è inferiore a $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$, viene detta luce ultravioletta (UV). Per λ ancora inferiori si hanno raggi X e poi raggi gamma, e per λ superiori le onde radio.

I tre tipi principali di conversione di luce in segnale elettrico sono per trasformazione dell'energia assorbita in *fononi* (eccitazioni del reticolo, cioè energia termica), per effetto *fotoelettrico interno* (creazione di coppie elettrone-lacuna nei semiconduttori) e per effetto *fotoelettrico esterno* (emissione di un elettrone dal metallo nel vuoto).

Si possono quindi distinguere tre grandi categorie di sensori elettro-ottici:

i sensori *termici* (termopile, cristalli piroelettrici, bolometri resistivi),

i sensori a *semiconduttore* (fotoresistenze, fotodiodi, fototransistor)

i *fotomoltiplicatori*.

A seconda che il sensore generi un segnale in corrente o in tensione la sensibilità σ , che viene in questo caso chiamata risposta alla radiazione (*radiant responsivity*), si esprime rispettivamente in A/W o in V/W. Per paragonare diversi sensori di luce si confrontano di solito, oltre alla sensibilità e all'intervallo utile in λ , anche i parametri NEP (=Noise Equivalent Power) e D^* (=Detectivity).

Il NEP è la quantità di luce equivalente al rumore intrinseco del sensore (la potenza del segnale luminoso, per una data lunghezza d'onda, che è necessaria a produrre un rapporto segnale/rumore SNR=1) e si esprime in unità $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$, dato che è definito come rapporto tra il rumore in corrente (o in tensione) e la sensibilità.

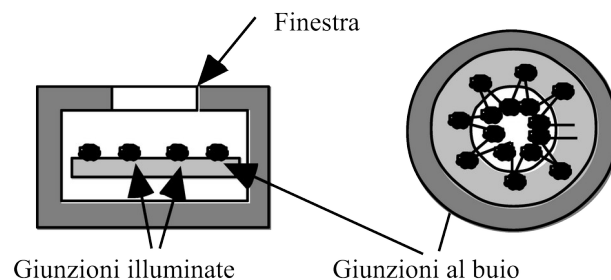
D^* è definita come $\sqrt{\text{area}(\text{cm}^2) \text{ Hz}} / \text{NEP}$ ed è una misura del rapporto segnale/rumore del sensore: un sensore ottico è tanto migliore quanto maggiore è D^* .

Sensori di luce termici

I sensori termici hanno risposta piatta in funzione della frequenza della luce incidente, cioè sensibilità costante dall'infrarosso all'ultravioletto. Tuttavia, dato che si comportano cioè come filtri passa-alto (con frequenza di taglio tra 1 Hz e 100 Hz), devono operare in luce intermittente. Il segnale sfruttato è sostanzialmente un gradiente termico prodotto dal riscaldamento preferenziale di una porzione del sensore rispetto ad un'altra porzione.

Termopila

La *termopila* è una versione miniaturizzata di termocoppia, costituita di numerose coppie di giunzioni in serie, con le giunzioni di riferimento mantenute al buio e le giunzioni di misura esposte alla luce. I modelli commerciali hanno le dimensioni di ingombro di un normale transistor e un'area sensibile dell'ordine del mm^2 .



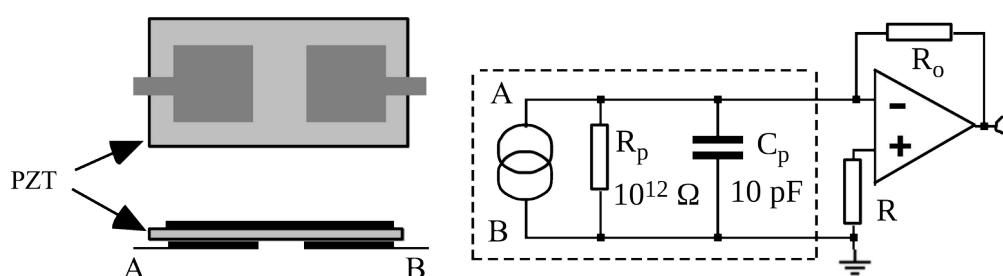
Termopila

I tipi ad alta sensibilità, dell'ordine di 10 V/W , con una impedenza di uscita dell'ordine di $1 \text{ k}\Omega$, hanno un limite per la potenza della luce incidente dell'ordine di 0.1 W/cm^2 .

Sensore piroelettrico

I materiali *piroeletrici* se sono sottoposti ad una variazione di temperatura, modificano la propria polarizzazione interna. Tale variazione di polarizzazione è rilevabile esternamente come differenza di potenziale tra due armature metalliche a contatto con superfici opposte. Se una delle due armature è sottoposta ad illuminazione intermittente, tra le due armature si preleva un segnale proporzionale all'intensità della luce assorbita.

Un sensore piroelettrico può essere visto come un generatore di corrente, in parallelo ad una capacità C_p dell'ordine di una decina di pF e ad una resistenza R_p molto elevata, dell'ordine di $10^{13} \Omega$.



Sensore Piroelettrico

Il circuito di amplificazione può essere un amplificatore di corrente. La variazione della tensione all'uscita per variazione unitaria di illuminamento è allora $\delta V = R_o \delta I = R_o \sigma_a \delta W$. Per ottenere un segnale apprezzabile con piccoli illuminamenti si dovrà ricorrere a valori elevati di R_o , e quindi si dovrà porre anche all'ingresso non-invertente una resistenza elevata ($R = R_p \parallel R_o$) per limitare l'offset dovuto alle correnti di polarizzazione. Per lo stesso motivo l'AO dovrà essere con ingresso a FET.

Sensori di luce a semiconduttore

I sensori ottici a semiconduttore sfruttano l'*effetto fotoelettrico interno*.

Non tutta la luce può produrre effetto fotoelettrico, ma solo quella di lunghezza d'onda λ inferiore ad una certa soglia λ_s .

La lunghezza d'onda di soglia λ_s è quella per cui $hc/\lambda = h\nu = E_g$, ove E_g è il salto energetico che l'elettrone deve fare per passare dalla banda di conduzione alla banda di valenza, h è la costante di Plank, ν è la frequenza della luce e c la velocità della luce.

In altri termini i fotoni di energia *maggiore o uguale* ad E_g vengono assorbiti producendo coppie di portatori di carica: elettrone-lacuna.

La relazione tra $h\nu$ e λ è : $\lambda (\mu\text{m}) = 1.24 / h\nu (\text{eV})$.

Le fotoresistenze

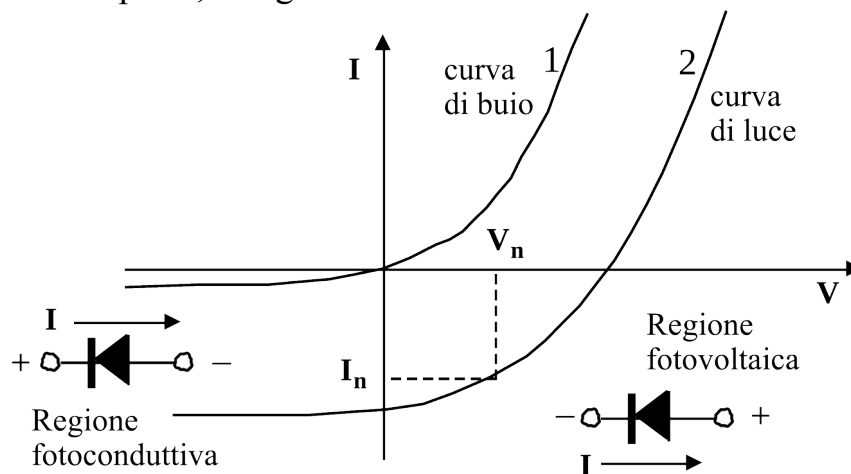
Le fotoresistenze sono costituite da un materiale semiconduttore (di solito PbS, CdS, CdSe) nel quale la soglia λ_s è generalmente nell'infrarosso. Il numero di portatori di carica, e quindi la conducibilità, aumenta in proporzione all'intensità della luce incidente, e la resistenza cala.

La risposta in funzione della lunghezza d'onda, detta anche *sensibilità spettrale* del sensore, ha generalmente un picco per valori un po' inferiori a λ_s . In questi trasduttori la sensibilità è proporzionale alla vita media τ delle coppie di portatori, e l'intervallo utile di frequenze di lavoro va da 0 Hz a qualche kHz.

La elevata sensibilità (che può raggiungere valori di alcuni V/ μ W) è incompatibile con la rapidità di risposta, infatti tanto maggiore è τ tanto più tempo ci vuole perché il conduttore torni all'equilibrio una volta cessato l'impulso luminoso. Essi richiedono polarizzazione, che può essere in tensione continua oppure alternata. Vengono di solito usati, dato il basso costo e la lentezza di risposta, principalmente come rivelatori di soglia luminosa (interruttori crepuscolari) o come misuratori assoluti di intensità luminosa.

Celle fotovoltaiche , fotodiodi

La *cella fotovoltaica* o *fotodiodo* è una giunzione PN, cioè sostanzialmente un diodo, in cui il semiconduttore drogato P ha uno spessore sottile, così da permettere alla luce di penetrare nello strato di svuotamento: qui le coppie create per effetto fotoelettrico migrano nel campo elettrico della giunzione e generano in un circuito esterno una *corrente fotovoltaica*. Questo sensore non richiede necessariamente polarizzazione, e la sensibilità è massima a valori prossimi a λ_s . La risposta è lineare con l'intensità di luce solo se si misura, anziché il segnale di tensione a circuito aperto, il segnale di corrente di corto circuito.



Curve caratteristiche della cella fotovoltaica

Nella regione “fotoconduttiva” la polarizzazione è inversa e il funzionamento è quello normalmente detto di *fotodiodo*.

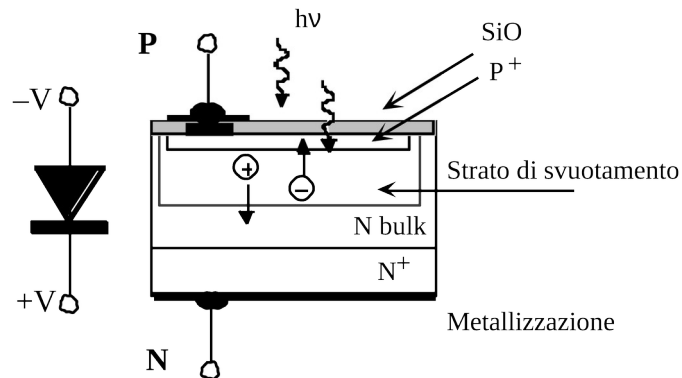
Nella regione “fotovoltaica” la polarizzazione è diretta e il funzionamento è quello della cella usata come generatore di corrente.

Nella prima e terza regione la cella dissipa energia ($W < 0$), nella seconda la produce ($W > 0$).

Il fotodiodo può essere usato imponendo una *polarizzazione inversa*, cioè con il catodo positivo rispetto all'anodo. In assenza di luce la *corrente di buio* che attraversa la giunzione PN è quella dovuta solo alla generazione di coppie per effetto termico che è molto piccola, dell'ordine di 10 pA/mm^2 , e cala drasticamente a bassa temperatura. Questa configurazione è quindi adatta ad essere usata come sensore di deboli flussi luminosi. Si tratta di un sensore lento perché la maggior parte dei fotoni assorbiti genera coppie di portatori fuori dallo strato di svuotamento, e le cariche che producono segnale devono raggiungere lo strato di svuotamento per *diffusione*.

Fotodiodo PIN

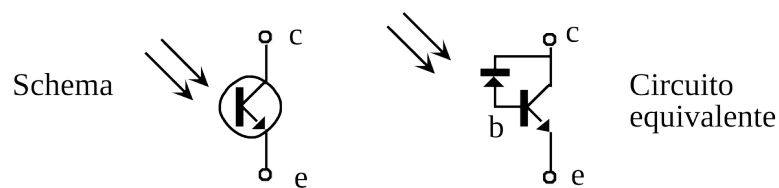
Nel fotodiodo PIN, lo spessore dello strato di svuotamento, che cresce con la tensione inversa, può essere reso abbastanza grande: ciò rende più rapida la risposta del sensore perché diminuisce la sua capacità e perché il processo di *deriva* nel campo della giunzione è più rapido che il processo di *diffusione*, la velocità delle cariche nello strato di svuotamento può raggiungere decine di Km/s.



Schema del fotodiodo PIN

Fototransistor

Nel *fototransistor* (NPN) la giunzione illuminata è quella base-collettore, che si comporta come fotodiodo. La corrente inversa di questa giunzione viene iniettata nella zona n dell'emettitore e viene qui amplificata di circa due ordini di grandezza. In questo caso la risposta è lineare solo per piccoli valori dell'illuminazione. Quando si cerca di massimizzare più la sensibilità che la velocità di risposta si può utilizzare un modello con amplificatore Darlington incorporato.



Fototransistor

SENSORI DI POSIZIONE

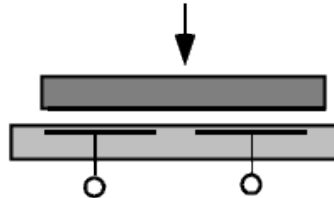
I dispositivi che possono essere usati per misurare la posizione di un oggetto sono molteplici.

Si può sfruttare ad esempio una *modulazione*:

- della *capacità* tra due armature di un condensatore
- della mutua *induttanza* tra due avvolgimenti,
- del *fattore di partizione* di un potenziometro
- del *segnale piezoelettrico* in un sensore accoppiato rigidamente all'oggetto in questione
- della *tensione di Hall* in un sensore accoppiato ad un magnete permanente se l'oggetto è ferromagnetico
- del ritardo tra impulso emesso ed impulso riflesso in un sensore acustico usato come *sonar*.

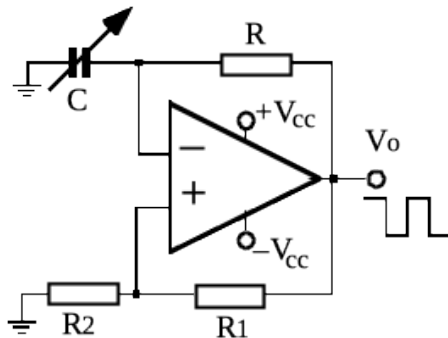
Sensori di posizione capacitivi

Nei sensori capacitivi la modulazione di capacità può essere indotta dal movimento di una delle armature rispetto all'altra che resta fissa, oppure l'accoppiamento capacitivo tra due armature fisse può essere variato tramite una terza armatura mobile (spesso costituita proprio dall'oggetto di interesse).



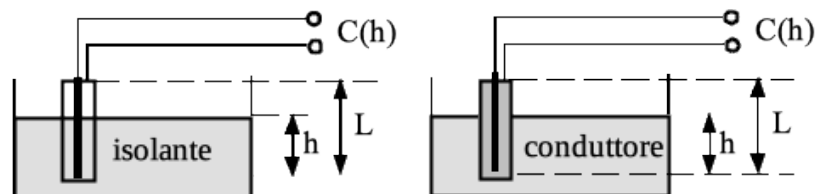
Schema di sensore capacitivo con due elettrodi adiacenti

Per misurare la capacità del sensore si può usare un convertitore capacità/frequenza, utilizzando il sensore nel circuito di retroazione di un oscillatore astabile.



Convertitore capacità/frequenza. .

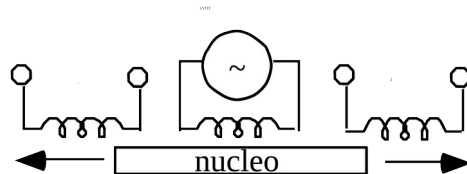
Un sensore capacitivo può essere usato anche per misurare il livello di un liquido isolante. Due elettrodi, tra loro affacciati, vengono immersi nel liquido in modo che, quando il livello della superficie libera si sposta, la diversa costante elettrica del fluido $\epsilon_r \epsilon_0$ e del suo vapore (o dell'aria) ($\approx \epsilon_0$), provoca una variazione di capacità.



Misuratori di livello capacitivi

Sensori di posizione induttivi a trasformatore

I sensori induttivi possono essere del tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Si tratta di un trasformatore in cui è reso variabile il coefficiente di accoppiamento tra il primario e due secondari. Il primario è guidato dal segnale di eccitazione e il segnale di uscita è prelevato come somma o come differenza dei segnali dei due secondari (simmetrici).



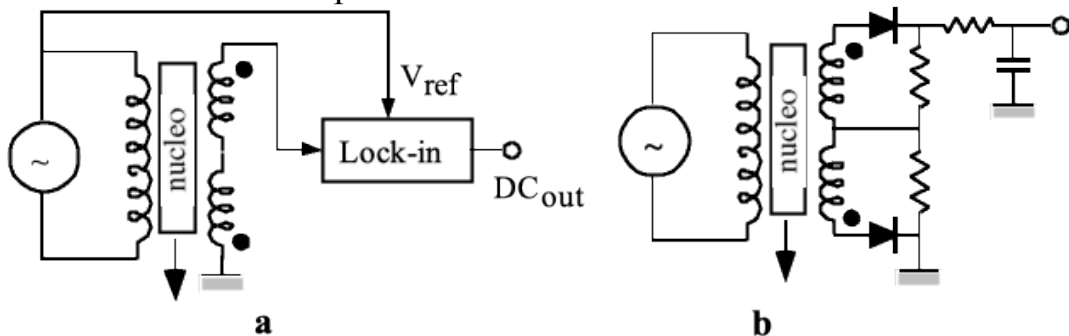
Linear Voltage Differential Transformer

L'accoppiamento tra gli avvolgimenti è controllato dalla posizione di un nucleo ferromagnetico mosso dall'oggetto che è in osservazione.

I due secondari possono essere connessi in serie con avvolgimenti in controfase: in tal caso l'ampiezza del segnale a.c. in uscita è minima quando il nucleo è in posizione simmetrica e cresce quando esso si sposta dal centro in entrambe le direzioni.

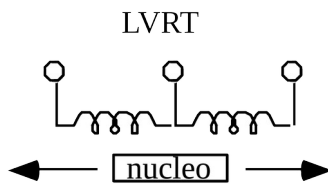
Rivelando il segnale mediante una tecnica sensibile allo sfasamento del segnale rispetto al segnale del primario (lock-in), si può ricavare una *uscita lineare* con lo spostamento del nucleo (positiva in una direzione e negativa nella direzione opposta).

Uno schema più semplice è quello in cui il segnale è rivelato attraverso una coppia di diodi ed un filtro passa-basso.



Schema di utilizzo di LVDT

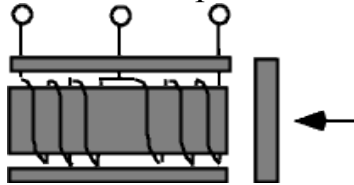
Sensori di posizione induttivi a riluttanza



Linear Voltage Reluctance Transformer

Nei sensori LVRT (Linear Variable Reluctance Transducer) due soli avvolgimenti costituiscono due rami di un ponte induttivo.

Qui è il segnale di sbilanciamento del ponte induttivo che misura lo spostamento del nucleo. Tale configurazione è spesso usata per misurare la distanza dal sensore di un oggetto costituito di materiale ferromagnetico che, spostandosi, varia la riluttanza in uno dei due rami del ponte ove il nucleo resta fermo.



Sensore a riluttanza con nucleo fisso

I principali vantaggi di questi sensori sono la robustezza meccanica, la affidabilità, e la possibilità di rendere trascurabile l'attrito per l'assenza di contatti striscianti.

Sensori di posizione resistivi

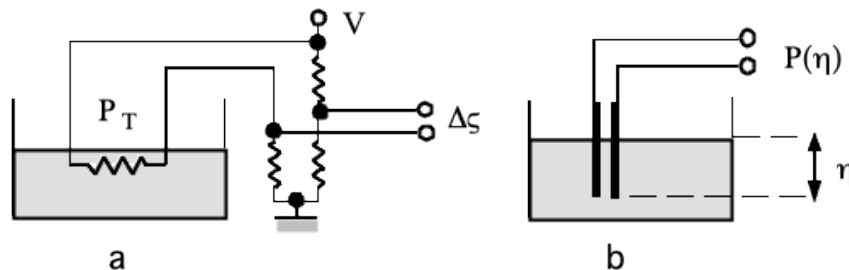
Un normale potenziometro, il cui asse venga collegato meccanicamente ad un ingranaggio che ruota in conseguenza di movimenti di oggetti esterni, può essere utilizzato come trasduttore di *posizione* o sensore di *rotazioni* (misura di angoli).

La configurazione più comune è quella a partitore resistivo (circuito potenziometrico) che consente una buona linearità, purchè si abbia cura di misurare la tensione in uscita con un voltmetro ad alta impedenza.

Rispetto ai trasduttori induttivi quelli resistivi offrono il vantaggio di poter essere usati con polarizzazione in d.c., ma hanno numerosi svantaggi: *usura* ed *attrito* (contatto strisciante), *risoluzione ed accuratezza limitate* dal passo minimo ΔR (resistenza di una spira del potenziometro) e dalla resistenza dei contatti.

Un sensore *termoresistivo* può essere usato anche come rivelatore di livello (ON/OFF), sfruttando la diversa dissipazione termica che si ha quando esso è immerso in un liquido.

Eccitando il ponte con una corrente sufficiente a produrre apprezzabile auto-riscaldamento della termoresistenza R_T si potrà rivelare una variazione di sbilanciamento del ponte quando R_T si trova al di sopra o al di sotto del pelo del liquido.



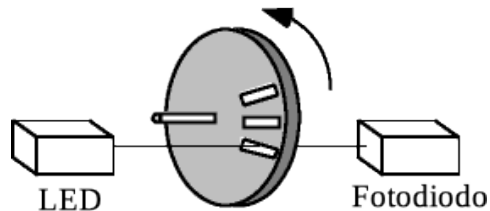
Misuratori di livello resistivi

Per liquidi elettricamente conduttori invece si può sfruttare direttamente la variazione di resistenza del liquido che dipende dalla profondità di immersione di due elettrodi disposti verticalmente nel contenitore.

Sensori di posizione ottici

Uno svantaggio notevole del sensore potenziometrico per la misura di angoli è la corsa limitata a 2π , o al massimo a 20π nel caso di helipot (potenziometri a 10 giri). Questo limite è eliminato se si impiegano sensori ottici (*encoder*) che *traducono la rotazione di un disco graduato in segnale digitale*.

Mediante opportune suddivisioni in settori otticamente diversi (alternanze di vuoti e pieni, o di superfici riflettenti con diversa intensità) si può codificare con estrema precisione la posizione angolare del disco rispetto ad una origine arbitraria, e l'angolo di rotazione può variare in intervalli arbitrariamente grandi senza perdere risoluzione in lettura. La risoluzione è determinata dal tipo di codifica e dalla finezza della suddivisione in settori, oltre che dal tipo di sorgente di luce (LED, diodo laser...) e dal tipo di rivelatore (fotodiodo, fototransistor...) usati. La lettura può essere in riflessione o trasmissione, ed esistono, oltre che encoder circolari, anche encoder lineari.



Encoder ottico

Un vantaggio di questo tipo di sensori è che essi sono virtualmente immuni alle interferenze elettromagnetiche.

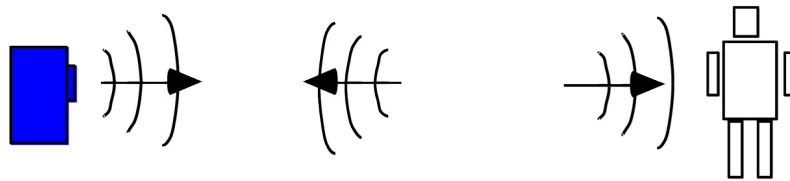
Una delle applicazioni più comuni di encoder ottici è il dispositivo di ingresso nei moderni PC detto “mouse”. Nel “mouse” (ma anche nell’equivalente “track-ball” che sostituisce il mouse in molti PC portatili) due encoder registrano la rotazione di due dischi tra loro ortogonali che sono mossi da una sfera (trascinata su una superficie piana nel primo, e mossa direttamente nel secondo): le due coordinate fornite al computer dai due encoder guidano il movimento di un puntatore sul monitor.

Sensori di posizione acustici (sonar)

Per misurare la distanza di un oggetto da un fissato riferimento si può sfruttare la *riflessione di una onda sonora* da parte dell'oggetto e ricavare la distanza dalla misura del *tempo* impiegato dal segnale acustico a percorrere i due tratti di andata e ritorno.

Questo tipo di sensore è usato, ad esempio, nelle macchine fotografiche Polaroid per la messa a fuoco automatica.

Si tratta di un generatore/ricevitore di brevi treni di impulsi ultrasonori che misura l'intervallo di *tempo trascorso* tra l'emissione e la ricezione dell'impulso *riflesso* da un oggetto.



Nota la velocità del suono in aria alla temperatura ambiente, si può tradurre il tempo misurato in distanza percorsa dall'onda sonora: se c è la velocità del suono [$c=(331+0.6t)\text{m/s}$ in aria, ove t è la temperatura dell'aria in gradi Celsius] e T è il tempo di andata e ritorno del segnale, allora la distanza X dell'oggetto dal sonar si ricava dalla relazione $X=cT/2$.

La frequenza dell'onda sonora è tipicamente dell'ordine di alcune decine di kHz e l'angolo di apertura del fascio è dell'ordine di 15° .

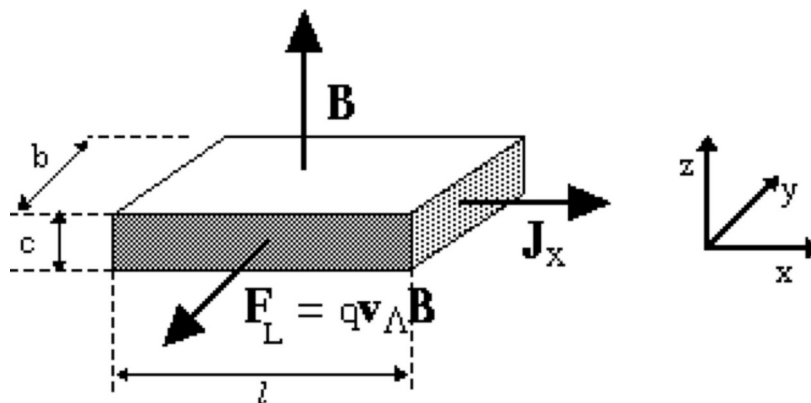
SENSORI DI CAMPO MAGNETICO

I misuratori di campo magnetico tradizionali si basano sul fenomeno dell'induzione: una bobina viene mossa (ruotata o fatta vibrare) in modo che il flusso Φ del campo magnetico B attraverso la bobina venga modulato, e la tensione indotta, proporzionale a $\partial\Phi/\partial t$ e quindi anche a B , viene rettificata e resa disponibile come segnale in uscita. Questo tipo di sonde presenta molti limiti: ingombro, basso rapporto segnale/rumore, complessità d'uso...

Sensori molto più semplici e compatti sono i *magnetoresistori*: che sono costituiti da materiale la cui resistività dipende fortemente dall'intensità del campo magnetico. La sensibilità delle magnetoresistenze è definita dal rapporto tra il valore ohmico in presenza di campo (R_B) e valore ohmico in assenza di campo (R_0): tipicamente si ha $\sigma_B = R_B/R_0 \approx 10$ (con $B=1$ Tesla); σ_B ha un coefficiente di temperatura negativo (qualche % per grado) e si tratta di sensori poco lineari.

Sensori ad effetto Hall

I sensori più versatili, che offrono una grande sensibilità e la possibilità di determinare anche la direzione del campo magnetico, sono quelli che sfruttano l'effetto Hall in un cristallo semiconduttore.



Geometria dell'effetto Hall

Il funzionamento di tali sensori è schematicamente il seguente: in un semiconduttore di forma parallelepipedica, immerso in un campo magnetico uniforme B diretto secondo l'asse z , si fa passare una corrente elettrica di intensità I_x secondo l'asse x . Gli elettroni acquistano una velocità di deriva $v_d = \mu E_x$ sotto l'effetto del campo elettrico E_x , e sono quindi soggetti alla forza di Lorentz $F_L = q v_d B$, che agisce nel verso delle y negative, e quindi tendono ad accumularsi sulla faccia del semiconduttore perpendicolare all'asse y , e in definitiva si produce una tensione $V_H = \mu(\rho/c)I_x B$

Si vede quindi che la tensione di Hall è proporzionale al campo magnetico, e alla densità di corrente, tramite un coefficiente che include la mobilità dei portatori di carica μ , la resistività ρ e lo spessore del campione c .

Per campioni molto sottili, e con elevata resistività (semiconduttori: InAs, InSb, GaAs) si possono ottenere grandi valori di sensibilità $\sigma = \partial V_H / \partial B$.

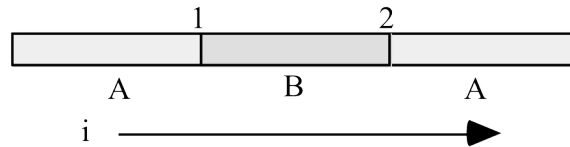
E' importante polarizzare il sensore a corrente costante (con correnti dell'ordine di qualche mA) ma anche stabilizzarne accuratamente la temperatura perchè in generale μ , ma soprattutto ρ , dipendono da T e quindi questi sensori sono soggetti a notevole deriva termica ($\approx -0.1\%/^{\circ}\text{C}$). Inoltre, se la polarizzazione è riferita a massa, la tensione V_H va misurata tramite un amplificatore differenziale.

La linearità è discreta per bassi valori del campo ($\approx 0.2\%$ per $B < 0.5\text{ T}$) e la sensibilità è dell'ordine di 0.1 V/T .

Esistono in commercio anche sensori lineari completi di stabilizzatore della corrente di polarizzazione e di amplificatore della tensione di Hall già integrati nel chip con sensibilità dell'ordine di 10 V/T , e sensori "switching" con un trigger di schmitt all'uscita adatti a pilotare logica TTL in corrispondenza all'attraversamento di una piccola soglia di campo magnetico. Questo secondo tipo di sensori di Hall è particolarmente adatto ad essere usato come sensore di posizione per oggetti ferromagnetici

Refrigeratori ad effetto Peltier

L'effetto Peltier si osserva quando si fa passare una intensa corrente elettrica lungo tre conduttori connessi in serie in modo che il flusso di carica attraversa due giunzioni tra metalli diversi.

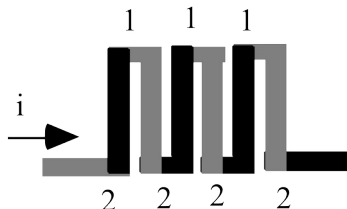


Esso consiste nel *trasporto di calore da una giunzione all'altra*, cosicchè, oltre al riscaldamento dovuto all'effetto Joule, si osserva una differenza di temperatura tra la giunzione 1 e la giunzione 2.

L'effetto Peltier può essere espresso dalla relazione $W = -\Pi_{AB} i$, ove W è la potenza assorbita nella giunzione AB quando essa è attraversata dalla corrente i . Esso è *reversibile*: cambiando segno alla corrente si inverte il flusso termico.

Valori tipici del coefficiente Π_{AB} (coeff. di Peltier) sono dell'ordine di alcuni mV.

Se si pongono in serie molte coppie di giunzioni tra due metalli e si affacciano allo stesso lato le giunzioni omologhe si ottiene una *Cella di Peltier*, detta anche *Frigistor*, che è un trasduttore corrente/temperatura.



Vantaggi del refrigeratore Peltier sono: *praticità* (piccolo ingombro), *assenza di vibrazioni*, *rapidità* (piccola capacità termica), *reversibilità*.

Svantaggi: *costo*, necessità di *dissipare il calore* sviluppato sulla faccia calda che è sempre piuttosto vicina a quella fredda (spessore tipico di una cella $\approx 5\text{mm}$).

Valori tipici: $\Delta T_{\text{max}} \approx 50^\circ\text{C}$, $W_{\text{utile}} \approx 1\text{W}$, $W_{\text{dissipata}} \approx 5\text{W}$