

Settimana della Cultura Scientifica

Liceo Scientifico *A. Righi* - Cesena 27/3/1998

**Come l'elettronica moderna ha rivoluzionato
la strumentazione e la metodologia della misura:
dalla Clessidra di Galileo allo Strumento Universale.**

Giacomo Torzo

ICTIMA-CNR, Area di Ricerca CNR, Padova

e

Istituto Nazionale Fisica della Materia

Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Fisica "G. Galilei"

L'elettronica oggi

Il termine *elettronica* fa venire in mente a tutti il transistor, la televisione, il telefono cellulare, il personal computer... e tutta la miriade dei diversi dispositivi che fanno ormai parte integrante della nostra vita quotidiana, almeno nel mondo occidentale.

Oggi cercherò di farvi innanzitutto un brevissimo riassunto della *storia* di questa disciplina (che è in parte scienza e in parte tecnologia)

Poi farò una digressione su un tema particolare (*lo strumento di misura*) per mostrare in qualche dettaglio come l'elettronica abbia profondamente mutato il modo in cui si compiono le misure, e per dimostrare come oggi praticamente ogni *strumento di misura* è un *dispositivo elettronico*.

L'evoluzione dell'elettronica

Origine del nome: Lorentz nel 1895 ipotizzò l'esistenza degli *elettroni* come cariche discrete (battezzandoli col nome che gli antichi greci davano all'ambra) e pochi anni dopo Thomson e Millikan ne verificarono l'esistenza sperimentalmente.

Diodo e Triodo: le valvole termoelettroniche furono inventate nel 1905 e rapidamente diedero inizio allo sviluppo delle telecomunicazioni (*telefonia e radiofonia*, già a livello industriale nel 1930)

ENIAC: nel 1946 fu costruito il primo calcolatore elettronico (presso l'Università della Pennsylvania: 18.000 valvole, occupava una intera stanza)

TRANSISTOR: nel 1947 nacque il TRANSfer-reSISTOR, il primo *interruttore elettronico a stato solido* presso i Laboratori Bell, costruito con due contatti a punta e un cristallo di semiconduttore (Germanio).

BJT e AO: nove anni (1956) Bardeen, Brattain e Shockley vinsero il Nobel per l'invenzione del *Transistor Bipolare a Giunzione* (BJT), e la Texas Instruments aveva già cominciato a produrre i primi transistor commerciali in Silicio, e otto anni dopo, nel 1964, la Fairchild vendeva i primi *Amplificatori Operazionali* (AO).

IC: Lo sviluppo dei *circuiti integrati* (IC) è stato da allora rapidissimo:
nel 1960 un chip conteneva fino a 100 componenti (diodi, transistor,...)
nel 1966 , fino a 1000, nel 1969 fino a 10.000, nel 1984 oltre 100.000
nel 1998 (nel Pentium) 7.500.000

Per dare un'idea dell'evoluzione della *microelettronica* si fa spesso il confronto nell'ambito del *calcolo elettronico*: nel 1946 l'ENIAC, con una potenza dissipata di un centinaio di kW e il costo di circa un miliardo, aveva la potenza di calcolo di una calcolatrice tascabile oggi offerta in regalo a chi si abbona ad una rivista.

Velocità, memoria e affidabilità dei computer son cresciute esponenzialmente mentre il loro *costo* è sceso in proporzione alla diffusione commerciale: per questo il computer è *uscito dal mondo del calcolo numerico* invadendo progressivamente *settori sempre più vasti della tecnologia*.

Un modo per capire meglio come e perchè ciò sia avvenuto è quello di esaminare *l'evoluzione degli strumenti di misura*.

La misura

La misura di una grandezza fisica consiste nel confrontare la grandezza in esame con una opportuna “unità di misura” precedentemente scelta.

Ciò può essere fatto in modo *diretto*, o in modo *indiretto*.

Ad esempio se voglio misurare la *lunghezza* di un oggetto posso *direttamente* confrontarlo con un oggetto campione “unità di lunghezza” .

Se voglio misurare la *massa* di un corpo posso misurare l’allungamento prodotto in una molla cui appendo il corpo in questione e confrontare tale allungamento con quelli prodotti da una serie di masse campione (misura *indiretta* con strumento tarato).

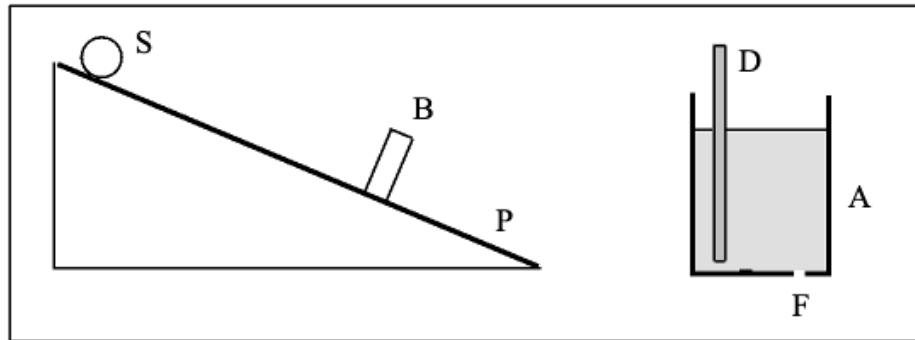
La storia della tecnologia, dai primi albori della civiltà fino ai giorni nostri è segnata da una miriade di invenzioni mirate a produrre dispositivi adatti a produrre una misura.

E lo sforzo è stato sempre indirizzato ad ottenere una più *comoda* tecnica di misura e una sua maggiore *affidabilità*.

Una grandezza fondamentale in ogni fenomeno fisico è il *tempo*: partiamo allora da una famosa misura di intervalli di tempo per scoprire i problemi che si possono incontrare quando si esegue una misura.

Analizziamo cioè l’orologio usato da Galileo nel suo celebre esperimento del *piano inclinato*

Il piano inclinato di Galileo



L'apparato sperimentale di Galileo per lo studio del moto di un grave lungo un piano inclinato includeva:

- un piano inclinato P su cui si fa cadere una sfera S.
- una barriera d'arresto B che può esser fissata in posizione variabile sul piano P.
- un secchio d'acqua A, inizialmente pieno e con un foro F sul fondo. Il foro può essere chiuso con un dito dall'operatore G (Galileo) .
- una sonda di livello D, costituita da un'asta graduata immersa nel liquido.

Le modalità operative dell'esperimento erano le seguenti:

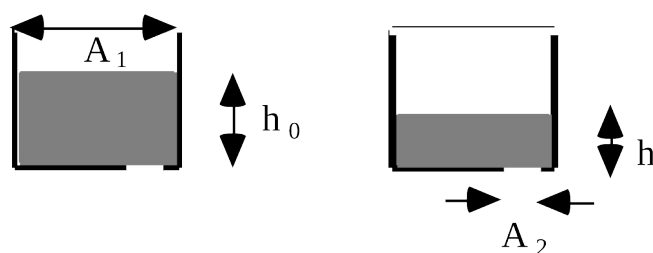
- L'operatore G posa la sfera sul piano, mentre tiene chiuso il foro .
- All'istante iniziale della misura, G lascia andare la sfera, e apre il foro lasciando libera l'acqua di defluire dal secchio.
- L'operatore resta in attesa, fino a quando la sfera colpisce la barriera emettendo un segnale acustico caratteristico.
- Nell'istante in cui percepisce il segnale acustico, G chiude il foro e prende nota del livello di liquido per mezzo della sonda.

In questo esperimento sono coinvolte due grandezze fisiche direttamente misurabili:

- la distanza s fra posizione iniziale della sfera e la posizione della barriera .
- La differenza fra il livello iniziale e quello finale dell'acqua nel secchio. Se si assume che la velocità di deflusso dell'acqua a foro aperto sia costante, allora il dislivello misura il tempo trascorso t , e l'esperimento permette di studiare l'andamento sperimentale di s in funzione di t (Clessidra ad acqua).

La clessidra a livello di Galileo

Si tratta di un recipiente cilindrico di sezione A_1 con un foro sul fondo di sezione A_2 .



Siano h_0 e h i livelli del liquido, rispettivamente all'istante iniziale e dopo un tempo t .

La diminuzione di volume dV per un abbassamento dh del livello è $dV = A_1 dh$

Il volume uscito nel tempo dt può essere scritto anche $dV = v A_2 dt = A_2 \sqrt{2gh} dt$

ov $v = \sqrt{2gh}$ è la velocità di deflusso.

Uguagliando i due volumi si trova la relazione fra dh e dt :

$$dh = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{2gh} dt = S(h) dt \quad , \quad \text{ove: } S(h) = \frac{dh}{dt} = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{2gh}$$

$dh=f(h,dt)$ è l'equazione caratteristica della clessidra, e $S(h)$ è la sensibilità.

La clessidra è come un orologio nel quale l'indicatore a quadrante è sostituito dal livello del liquido.

Il valore h ha il significato di valore-indice Y , di qualsiasi strumento dotato di indicatore visivo continuo. L'altro valore è il valore t della grandezza fisica misurata (X nel caso di uno strumento generico).

Il significato della sensibilità $S=dY/dX$ è quello di un rapporto fra risposta e stimolo.

La sensibilità è quindi una grandezza che, in generale, dipende dal valore misurato.

Solo se pensiamo di poter considerare S costante (ad esempio per piccoli valori del dislivello misurato) l'equazione si semplifica in: $Y= SX$

che è l'equazione caratteristica di uno strumento lineare.

Strumenti lineari e non lineari.

L'assunzione di linearità negli strumenti di misura è spesso data per scontata, mentre strumenti *rigorosamente* lineari non esistono.

Tuttavia se teniamo conto del fatto che tutte le misure sono affette da *errore*, possiamo ridurre il campo di misura fino rendere l'errore di linearità inferiore all'errore di misura, e quindi trascurabile.

Nel caso della clessidra ad acqua possiamo scrivere $S(h)$ come

$$S(h) = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{2g\rho(h_0 - \Delta h)} = \alpha \sqrt{1 - x} \quad x = \frac{\Delta h}{h_0}$$

La variazione ΔS della sensibilità nell'intervallo Δh è allora

$$\Delta S = \alpha (1 - \sqrt{1 - \Delta h / h_0}) \approx -\frac{\alpha}{2} \frac{\Delta h}{h_0} \quad \text{se } \Delta h \ll h_0$$

Il termine a destra è stato ottenuto da uno sviluppo in serie della radice di $x = \frac{\Delta h}{h_0}$

Questi termini sono trascurabili per $x \ll 1$, e cioè quando il livello finale non è troppo diverso da quello iniziale $\Delta h \ll h$. Sviluppi in serie di questo tipo vengono usati tutte le volte che si cercano i limiti di validità di una approssimazione lineare.

Trascurando $O(x^2)$ la variazione relativa di S è:

$$\frac{\Delta S}{S(h_0)} \approx -\frac{\Delta h}{2h_0}$$

Ad esempio per *dislivelli contenuti entro il 10% di h_0* ($\Delta h/h_0 < 0.1$) la variazione relativa di sensibilità è contenuta entro il 5%.

Gli errori di misura nella clessidra a livello.

Nella clessidra a livello ci sono almeno due importanti cause di errore:

- a) *Non-cilindricità del vaso*. Per avere una buona sensibilità occorre lavorare con recipienti di piccola sezione e grande altezza. All'epoca di Galileo, l'unico modo di lavorare il vetro era la soffiatura, e con questa tecnica è impossibile ottenere cilindri a sezione A_1 costante.
- b) *Capillarità*. La grandezza h =livello è definita a meno del menisco che si forma al contatto acqua-recipiente: è difficile definire un livello con precisione migliore di qualche decimo di millimetro. Questo problema sarà tanto maggiore quanto minore è il diametro del vaso.

Assumendo un valore di 1/2 mm per l'errore di lettura di h , per dislivelli $\Delta h \approx 1$ cm si ha un errore relativo del 5%. L'errore di distorsione non lineare diventa trascurabile (per es. 0.5%) rispetto all'errore di lettura per $h_0 > 100 \Delta h = 1$ m. E' evidente che in queste condizioni possiamo parlare di strumento *lineare entro gli errori di misura*.

Tuttavia, si giunge a questo risultato limitando severamente il *campo utile* (o *portata* dello strumento $\Delta h < 1$ cm) e utilizzando un vaso molto alto.

La *precisione* relativa nella misura degli intervalli di tempo dt (supponendo trascurabile la variazione della sezione A_1 del cilindro nel tratto interessato dal dislivello misurato) è proporzionale alla sensibilità, ovvero al rapporto A_2/A_1 .

Se vogliamo crescere la precisione dobbiamo o ridurre la sezione del cilindro o aumentare quella del foro di uscita dell'acqua: in entrambi i casi avremo uno strumento di portata limitata, se vogliamo anche che esso resti "lineare".

La conclusione è che siamo di fronte a un *conflitto irriducibile fra linearità da un lato e precisione e portata dall'altro*. Questo significa in definitiva che la clessidra a livello, come strumento di precisione, non vale un gran che. Galileo se ne accorse subito, e trovò anche il rimedio.

La clessidra gravimetrica

La clessidra ad acqua sfrutta, per misurare il tempo, l'idea che il moto dell'acqua avvenga a velocità costante. Ciò è vero solo in prima approssimazione: la resistenza al flusso opposta dalla viscosità si può considerare infatti costante (dopo un breve transiente), ma la forza agente sulla massa d'acqua che si affaccia al foro di uscita dipende dal livello del liquido sovrastante (legge di Stevino).

Di conseguenza uguali volumi di acqua usciti dal foro (corrispondenti a diversi dislivelli) corrispondono a intervalli di tempo diversi a seconda che il vaso sia più o meno pieno (cioè a seconda del valore di h_0).

E questo problema diventa tanto più evidente quanto più si aumenta la sensibilità dello strumento: in un vaso più stretto e alto (o con un foro più largo) il dislivello per unità di tempo cresce, ma cresce anche la differenza tra i valori misurati per lo stesso intervallo di tempo.

Per ottenere uno strumento *lineare* bisogna mantenere all'incirca costante l'altezza della colonna d'acqua sopra il foro. Ciò si può fare o limitando la misura a brevi intervalli di tempo (*piccola portata*), o usando un vaso largo e un foro piccolo (*piccola sensibilità*).

Esiste un modo diverso per misurare accuratamente il volume dell'acqua spillata senza dover ricorrere a grandi variazioni di livello?

Galileo si accorse che il problema poteva essere risolto (utilizzando un vaso largo o un foro piccolo) misurando il volume, anziché attraverso la *variazione di livello*, attraverso il *peso della massa di acqua uscita*. Egli raccolse cioè l'acqua uscita dal secchio in un secondo recipiente per poi pesarla. (*clessidra gravimetrica*)

Già ai tempi di Galilei si potevano fare pesate di grande precisione con mezzi semplici. Con precisioni di 100 mg, pesando 100 cc. di acqua si raggiunge una precisione relativa dello 0.1%. Tale precisione dipende solo dal volume di acqua fuoriuscita e, lavorando ad altezza quasi costante, si può avere sensibilità quasi costante.

Se ad esempio si usa un cilindro di 30 cm di diametro riempito all'altezza $h_0=35$ cm si ottiene $\Delta h = V/\pi r^2 = 0.14$ cm e $\Delta S/S \approx \Delta h/4h_0 \approx 0.1\%$: linearità eccellente!.

Struttura generale degli strumenti di misura

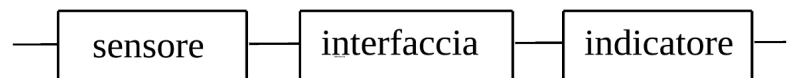
L'esempio della clessidra di Galileo mi è servito per dare un esempio delle problematiche connesse al processo di misura.

Ma mi può servire anche per introdurre una definizione generale della struttura di uno strumento di misura.

La clessidra a livello è uno strumento di misura che opera una *trasduzione*
tempo-volume-livello,

con la quale la grandezza che si vuol misurare (t) viene trasformata in una grandezza che può essere misurata ($=vista$) direttamente (h).

Schematicamente, ne risulta la seguente rappresentazione :



Qui il sensore è Galileo stesso (che opera da interruttore del flusso di acqua) la cui accuratezza dipende dal tempo di risposta del sistema orecchio-cervello-mano. L'interfaccia è il vaso forato con l'acqua, e l'indicatore la superficie libera dell'acqua che scorre sulla scala graduata.

La struttura della bilancia gravimetrica è sostanzialmente la stessa: la diversità principale consiste nel fatto che interfaccia (= vaso forato + vaso di raccolta + bilancia) e visore (= contrappesi e ago della bilancia) operano ora una trasduzione
tempo-volume-massa.

Questo schema è del tutto generale: può cioè considerarsi paradigmatico di tutta la strumentazione moderna: ogni strumento di misura può essere considerato come composto di un *sensore*, una *interfaccia* ed un *indicatore*.

Infine: la maggior difficoltà nella progettazione di uno strumento di misura sta nel trovare il modo di ottenere una *relazione lineare* tra valore letto e grandezza misurata.

Strumento Classico = Sensore + Interfaccia + Indicatore

Nell'*oscilloscopio*

- il *pennello elettronico* che attraversa le armature di un condensatore costituisce il sensore,
- l'*elettronica per generare il campo elettrico periodico* per la deflessione orizzontale del pennello è l'interfaccia,
- lo *schermo fluorescente graduato* è l'indicatore,

Nello *strumento a bobina mobile*

- la *bobina piatta rotante* attorno all'asse è il sensore,
- il *magnete permanente e la molla di richiamo* costituiscono l'interfaccia,
- la *lancetta* su scala graduata è l'indicatore.

Questa struttura generale ci permette di intuire perchè l'elettronica ha potuto avere un impatto enorme nel mondo della strumentazione:

- da un lato lo sviluppo tecnologico ha messo a disposizione una miriade di ***sensori*** che trasformano qualsiasi grandezza fisica in **segnale elettrico**
- dall'altro la straordinaria evoluzione della ***elettronica analogica*** e dei ***calcolatori digitali*** ha reso assolutamente più **economico** ed **efficiente** il processo di manipolazione di ***segnali elettrici*** rispetto a qualsiasi altro tipo di segnali.

Il problema della **linearizzazione** è stato risolto affidandolo ad un **microprocessore**

Lo Strumento Universale = Sensore + Interfaccia + Microprocessore

Vediamo qualche esempio concreto di questa evoluzione:

la bilancia, che utilizzava un dispositivo meccanico per confrontare la massa di un oggetto con quella di masse note, è oggi ovunque sostituita da un *sensore di forza* calibrato, da un circuito per la manipolazione del segnale da esso prodotto, e da un visore numerico che mostra il valore del segnale elaborato .

Il *tachimetro* meccanico nelle vecchie automobili era costituito da un disco magnetizzato rotante, mosso da un cavo metallico collegato meccanicamente alle ruote, e affacciato ad un disco metallico mantenuto in posizione di riposo da una molla: le forze prodotte dalle correnti indotte nel disco metallico dal campo magnetico rotante lo fanno ruotare fino a che la forza elastica di richiamo produce una situazione di equilibrio, così che l'angolo di rotazione misura la velocità.

I moderni tachimetri usano invece un *sensore di posizione* che dà un segnale elettrico ad ogni giro della ruota della vettura: la frequenza degli impulsi viene tradotta da un circuito in un segnale che viene letto su un indicatore digitale.

Il *manometro* meccanico traduce la differenza di pressione tra l'interno e l'esterno di un tubo metallico curvo in uno spostamento della estremità chiusa del tubo (Bourdon Gauge): tale spostamento viene amplificato da un equipaggio meccanico che muove una lancetta davanti ad una scala graduata e ne permette la calibrazione in unità di pressione. Il manometro elettronico usa un sensore di forza (piezoelettrico, resistivo o capacitivo) che produce un segnale elettrico correlato allo sforzo applicato ad una membrana che separa i due ambienti a diversa pressione, un circuito per l'elaborazione di tale segnale ed un visore per la lettura del valore in uscita.

Si delinea la struttura nuova dello strumento di misura:

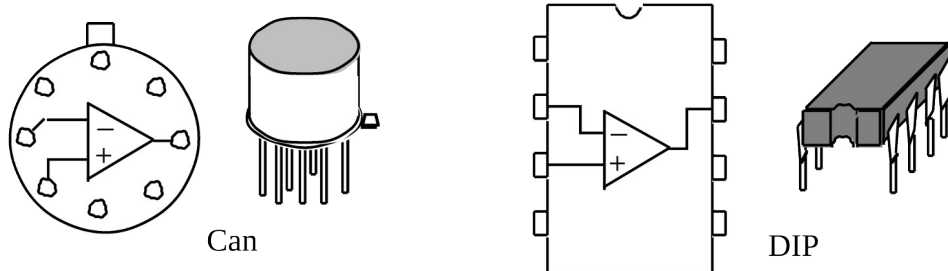
sensore -interfaccia -microprocessore

che consente una maggiore *flessibilità*: ad esempio esso può essere *multifunzione* (usando più sensori contemporaneamente), nella *memoria* del microprocessore si può immagazzinare una serie di dati acquisiti in successione (*data logging*) per ottenere informazioni dalla loro correlazione (valore medio, minimo, massimo, differenze tra valori successivi, integrazione, derivata...), sul monitor si può seguire l'*evoluzione temporale* della grandezza fisica in esame....

La manipolazione dei segnali analogici nella moderna elettronica

Se nell'ambito del calcolo numerico la grande innovazione è stata lo sviluppo di elaboratori *digitali*, nell'ambito dell'elettronica *analogica* la maggiore innovazione dopo il transistor è stata l'introduzione degli *Amplificatori Operazionali* (AO).

L'amplificatore operazionale è un circuito integrato, costituito da una rete di resistenze, capacità, diodi e transistori, funzionante come *amplificatore differenziale ad altissimo guadagno*, che genera al terminale di uscita una tensione proporzionale alla differenza tra le tensioni fornite ai due terminali di ingresso.



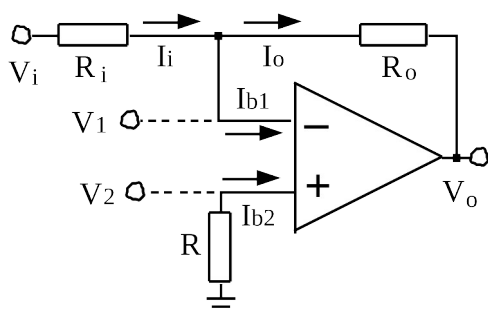
Controreazionando l'AO mediante componenti passivi (resistenze e capacità) si ottengono configurazioni con guadagno inferiore ma *molto più stabili* in un ampio intervallo di frequenze (il meccanismo della *controreazione* consiste nel riportare all'ingresso *invertente* una frazione del segnale che l'AO produce all'uscita).

In questo modo si può utilizzare l'AO per produrre *operazioni algebriche* su segnali di tensione, come somma, sottrazione, derivazione, integrazione e, utilizzando componenti non lineari (diodi), anche logaritmo ed esponenziale.

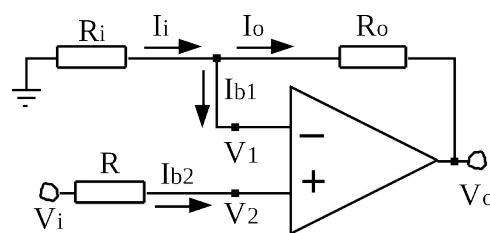
Aggiungendo alla retroazione *negativa* una retroazione *positiva*, si possono ottenere oscillatori, sfasatori...

L'uso degli amplificatori operazionali ha reso molto più facile il ***condizionamento dei sensori*** di grandezze fisiche, e ciò ha allargato enormemente il mercato della sensoristica.

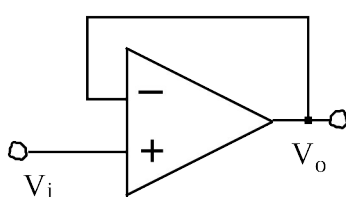
Semplici circuiti con Amplificatori Operazionali



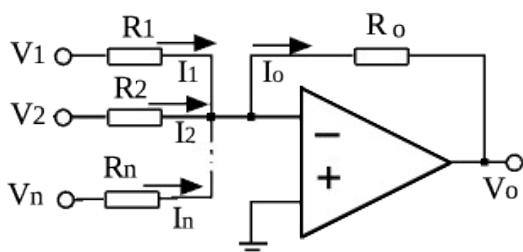
Amplificatore invertente: $G = -R_o/R_i$



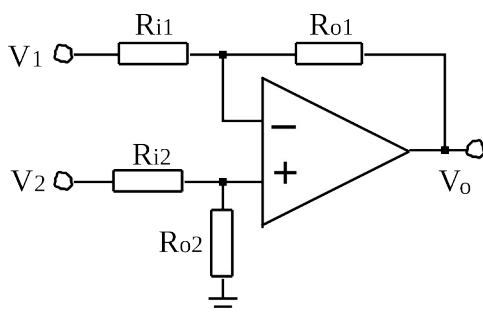
Amplificatore non-invertente: $G = 1 + R_o/R_i$



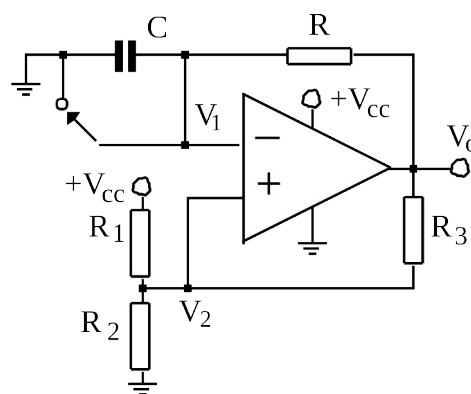
Buffer: $G = 1$



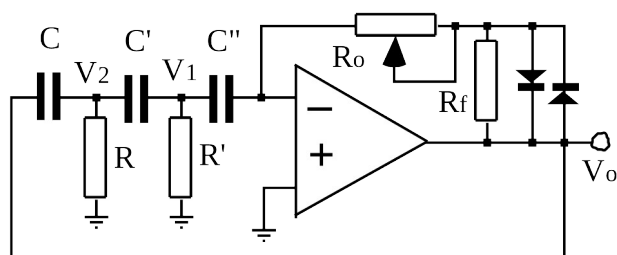
Sommatore: $V_o = -R_o \sum (V_i/R_i)$



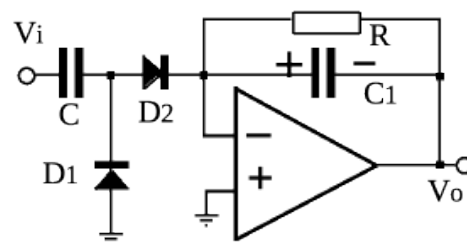
Amplificatore differenziale: $V_o = V_2 - V_1$



Multivibratore astabile



Oscillatore sinusoidale a sfasamento



Convertitore frequenza/tensione

L'indicatore o visore

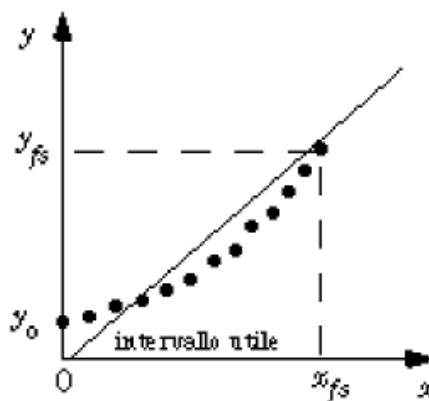
Prendiamo in considerazione innanzitutto l'*indicatore* cioè l'elemento che trasferisce all'utilizzatore l'informazione, acquisita ed elaborata dallo strumento. Esistono indicatori *analogici* e *digitali*. Gli analogici consistono in un indice che scorre su una scala opportunamente graduata, mentre i digitali sono una sequenza di numeri decimali, separati da una virgola opportunamente posizionata.

Per entrambi i tipi è molto più semplice oggi (e meno costoso quando si producono molte unità) progettare e costruire *indicatori pilotati da un segnale elettrico* che indicatori pilotati da altre grandezze fisiche (meccaniche, ottiche, ...).

Sensibilità variabile, Non-linearità

Quando il sensore ha una sensibilità variabile nell'intervallo di misura la risposta risulta non lineare: in altri termini la sua *funzione di trasferimento*, cioè la relazione $Y = T(X)$ che lega il valore letto Y al valore della grandezza rilevata X , non è rappresentata da una retta.

Questo costringerebbe all'uso di una scomodissima *scala graduata non lineare* nell'indicatore, a meno che l'interfaccia non provveda a trasformare una risposta *qualsiasi* in una funzione di trasferimento *proporzionale*.



Quando la risposta di un sensore $Z = T(X)$ non è lineare (ad esempio esponenziale ($Z = a e^{bX}$) o polinomiale ($Z = a + b_1 X^{c1} + b_2 X^{c2} + \dots$) etc.) allora l'interfaccia deve provvedere a *linearizzare* la risposta.

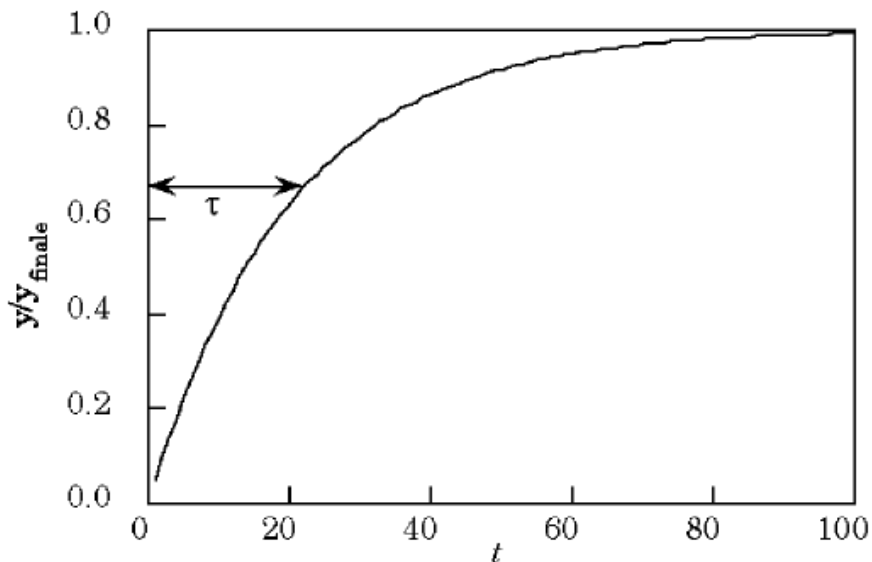
Non è facile progettare il condizionamento di un sensore che linearizzi una qualsiasi funzione mediante elettronica analogica, mentre è relativamente semplice istruire un *microprocessore digitale* ad eseguire una *interpolazione numerica di una curva di taratura* che permette di ottenere la desiderata funzione di trasferimento lineare

Risposta dinamica

Fin qui ho implicitamente assunto che la grandezza da misurare non cambi troppo rapidamente il proprio valore: se invece il fenomeno osservato durante la misura non può essere considerato stazionario dovrò fare attenzione al tempo di risposta dello strumento, cioè alla *dinamica* della sua funzione di trasferimento. Devo cioè tener conto della dipendenza dal tempo : $y = T(x,t)$

La situazione che si riscontra più spesso è quella della funzione di trasferimento che descrive il comportamento di un filtro passa-basso (in notazione complessa $T = k/(1+j\tau/\omega)$, ove τ è la costante di tempo). In questo caso si dice anche che lo strumento è limitato da una *frequenza di taglio superiore* f_s pari a $1/\tau$.

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



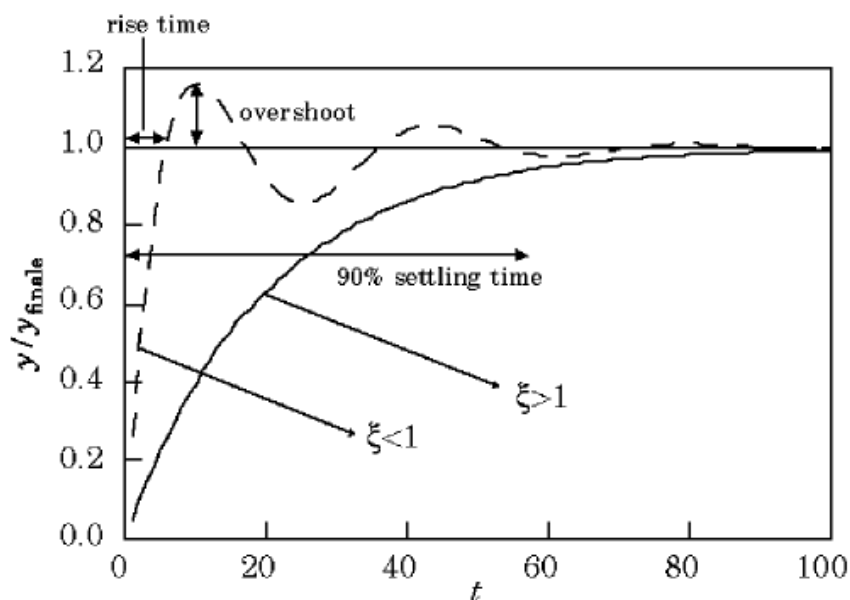
E' abbastanza evidente che, se una misura viene “letta” prima che lo strumento si “porti a regime”, essa sarà affetta da grande errore, e quindi può essere un grande vantaggio poter disporre di uno strumento che sia in grado di *registrare nel tempo* il segnale letto così da mostrarne l'evoluzione temporale.

Un *microprocessore* interfacciato al sensore può registrare in memoria una sequenza di misure (campionando alla frequenza desiderata) e poi fornire su un display opportuno (ad esempio il monitor di un PC) il relativo *grafico in funzione del tempo*, o una sua manipolazione (ad esempio la derivata o l'integrale).

La funzione di trasferimento può essere più complicata di quella accennata, che viene detta *di ordine uno*. 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 $k/[1+2\xi\tau s+\tau^2 s^2]$, 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 dello strumento, 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.



Segnale e Rumore

In ogni strumento di misura il segnale generato dal sensore è affetto da *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.

Con il termine “rumore” qui intendo qualsiasi segnale, di andamento casuale nel tempo, che si mescola al segnale utile limitando così la precisione della misura.

Il rumore può essere dovuto al fatto che il sensore è sensibile anche ai valori di grandezze fisiche diverse da quella in esame (un sensore di forza che risente della temperatura ambiente, un sensore capacitivo sensibile alle vibrazioni acustiche...), oppure può essere introdotto dalla interfaccia tra sensore e visore .

L’interfaccia è spesso dotata di amplificatori ad elevato guadagno per i quali un limite al minimo segnale rilevabile è posto dal rumore elettrico *intrinseco* o dal rumore dovuto all’interferenza di segnali elettromagnetici esterni all’apparato (*pick-up*).

Sorgenti di rumore

Le sorgenti di rumore sono numerose e di natura molto varia.

Un modo semplice per distinguere i vari tipi di rumore è quello di suddividerli in base all'intervallo delle loro frequenze caratteristiche.

All'estremo inferiore (rumori a bassissima frequenza) trovate le *derive termiche* e gli effetti di *invecchiamento*: questi effetti di solito non vengono considerati come rumore, ma come “errori di *offset*”.

Per i dispositivi elettronici vi è poi il *flicker noise*, detto anche “rumore $1/f$ ” perchè cresce in modo inversamente proporzionale alla frequenza, che è dovuto alle fluttuazioni nella generazione e ricombinazione di coppie di portatori di carica nei semiconduttori.

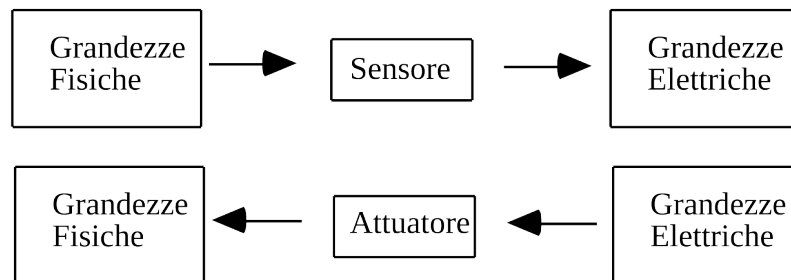
Vi sono poi due tipi di rumore elettrico che hanno uno spettro “bianco”, con ciò intendendo che essi sono uniformi su tutte le frequenze: il *Johnson noise* (o rumore termico) causato dal movimento caotico di agitazione termica degli elettroni, e lo *shot noise* causato dalla natura quantizzata della carica elettrica. In entrambi i casi il valore quadratico medio del segnale di rumore è proporzionale alla banda passante.

Un altro rumore importante è quello dovuto all'interferenza della tensione di *alimentazione di rete* (in Europa 220 V a 50 Hz). Dato che si tratta di una tensione di ampiezza elevata, presente in tutti gli strumenti di misura che non sono alimentati a batteria, essa può generare un rumore di interferenza per difetti di schermaggio.

Per effetto di accoppiamenti capacitivi possono tradursi in rumore elettrico anche le *vibrazioni meccaniche* cui è sottoposto lo strumento di misura, così come possono essere importanti i segnali indotti da *lampade fluorescenti*, *motori elettrici*, *scariche elettriche nell'atmosfera...*

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*.

Oggetto	attuatore		sensore
bobina + magnete =	altoparlante	⇔	microfono
avvolg.+ spazzole =	motore elettrico	⇔	dinamo tachimetrica
giunzione PN =	diode LED	⇔	fotodiodo

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* ...

Per dimostrare quanto sia vasto l'insieme di sensori reperibile in commercio, e quindi quanto ormai siamo vicini al momento in cui scompariranno gli strumenti tradizionali, cedendo il posto allo strumento universale, farò una breve rassegna di alcuni tipi di sensori in sequenza scandita per tipo di grandezza fisica.

SENSORI DI TEMPERATURA

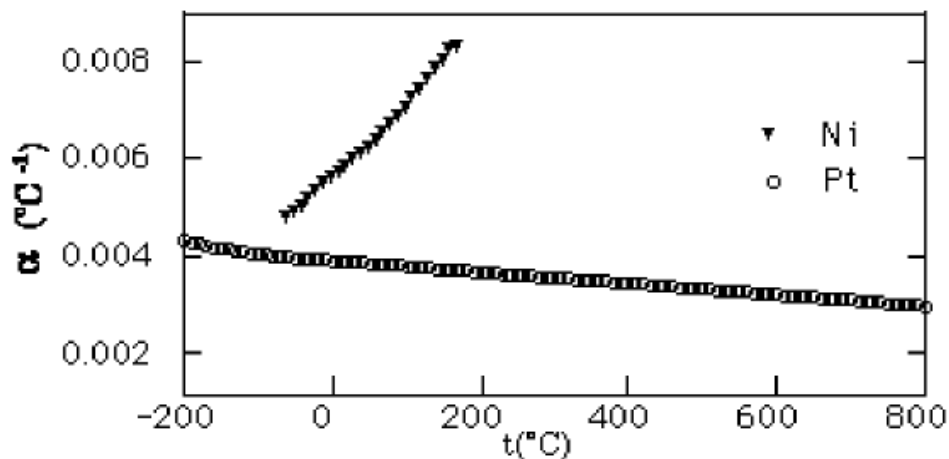
1) *resistivi (RDT) (metallici o a semiconduttore)*

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

I termometri a sensore di platino hanno rimpiazzato i termometri a mercurio ovunque si richieda una misura accurata di temperatura

Thermistor NTC e PTC

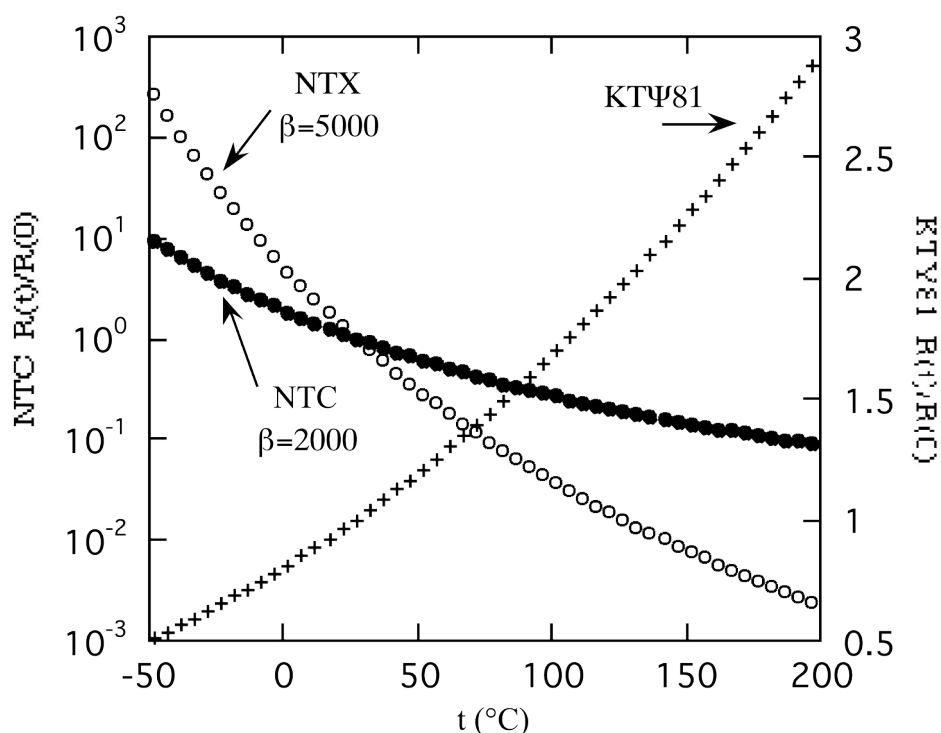
Gli RTD a *semiconduttore* possono essere a coefficiente di temperatura negativo (NTC) positivo (PTC)

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

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 che è dell'ordine di 10^{-3} /anno.

I termistori offrono valori ohmici a 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 ridurre la non-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.

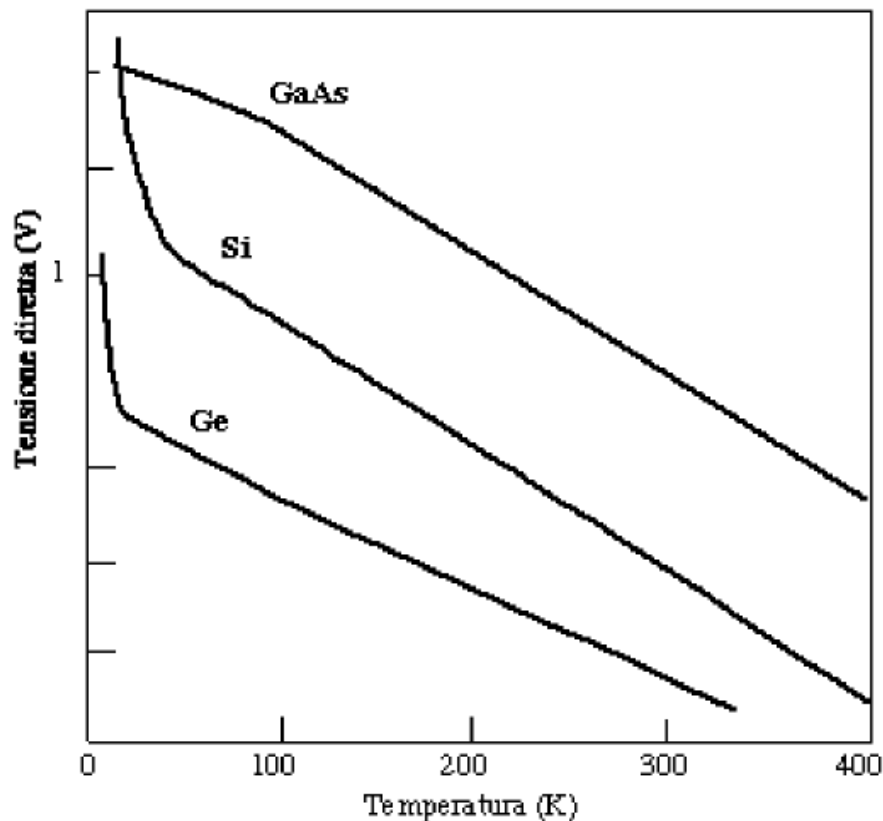
Il termistore è l'elemento sensibile che spesso legge la vostra temperatura corporea quando avete la febbre

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)

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

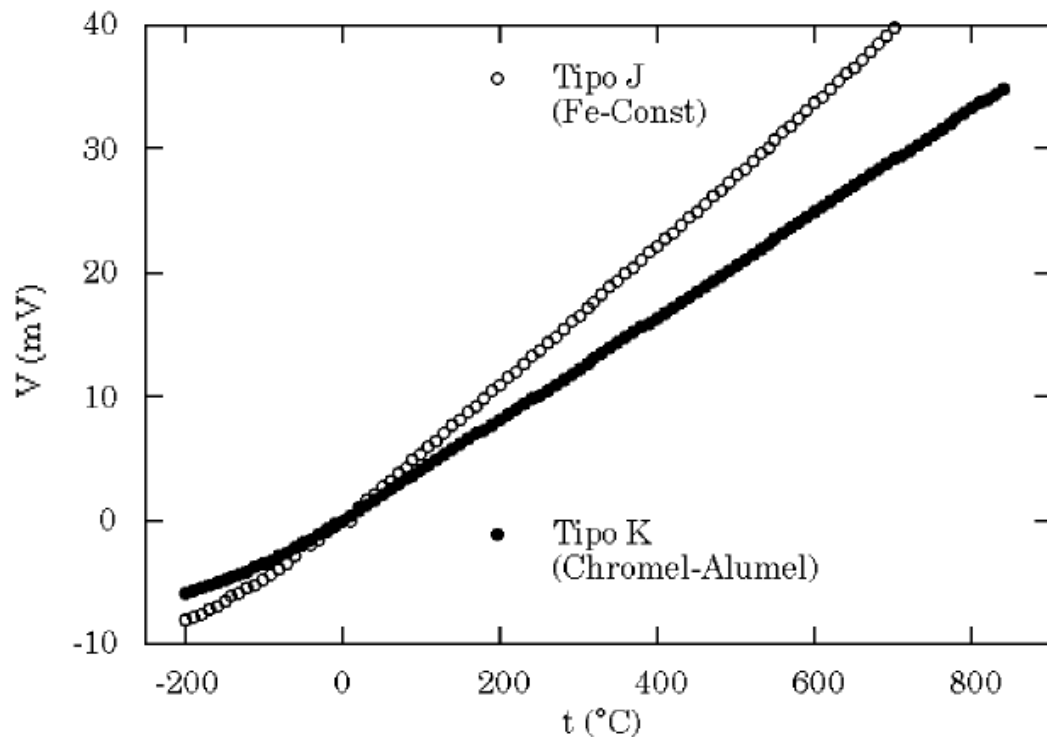
I sensori a diodo integrati sono i termometri più usati nei sistemi di termoregolazione fine a temperatura ambiente

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*

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 integrato 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 ($dV_{\text{out}}/dT=10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$) .

Questo è il tipo di termometro che spesso regola il forno elettrico nella vostra cucina

SENSORI DI FORZA E DI PRESSIONE

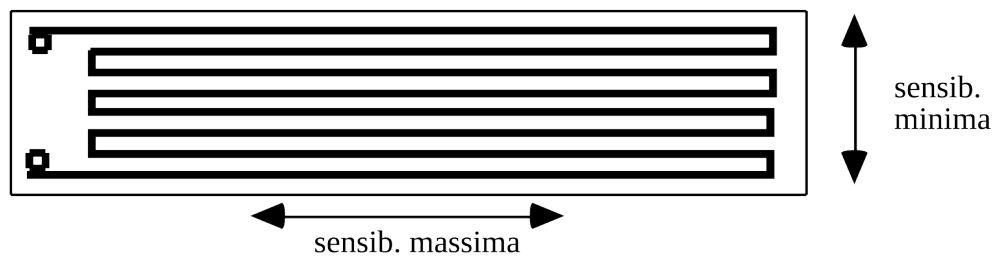
I sensori di forza misurano essenzialmente la *deformazione* di un supporto elastico soggetto alla forza: la costante elastica del supporto (k che lega forza F e spostamento s , mediante la legge di Hooke $F = k s$) stabilisce la sensibilità e la portata del sensore.

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



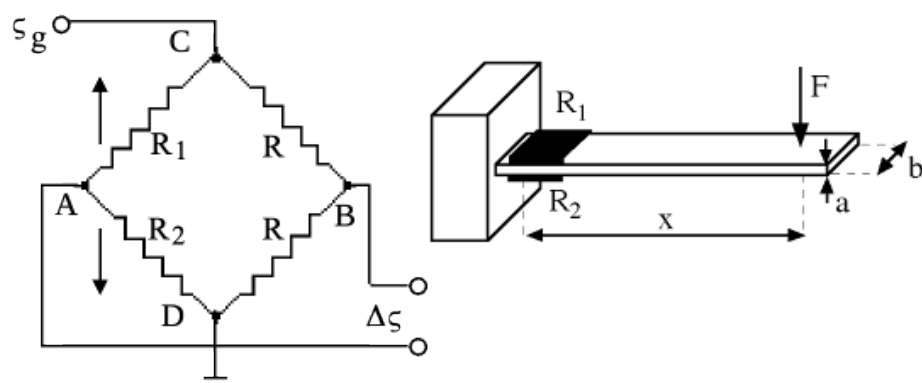
Tipica configurazione della pista di un estensimetro a film

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

La forza da misurare viene applicata all'estremo libero della lamina che, flettendosi, provoca l'*allungamento relativo* $\varepsilon = \Delta L/L$ di uno dei due films resistivi e l'*accorciamento relativo* $-\varepsilon$ 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 $\Delta R/R$ e infine della forza applicata F :

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



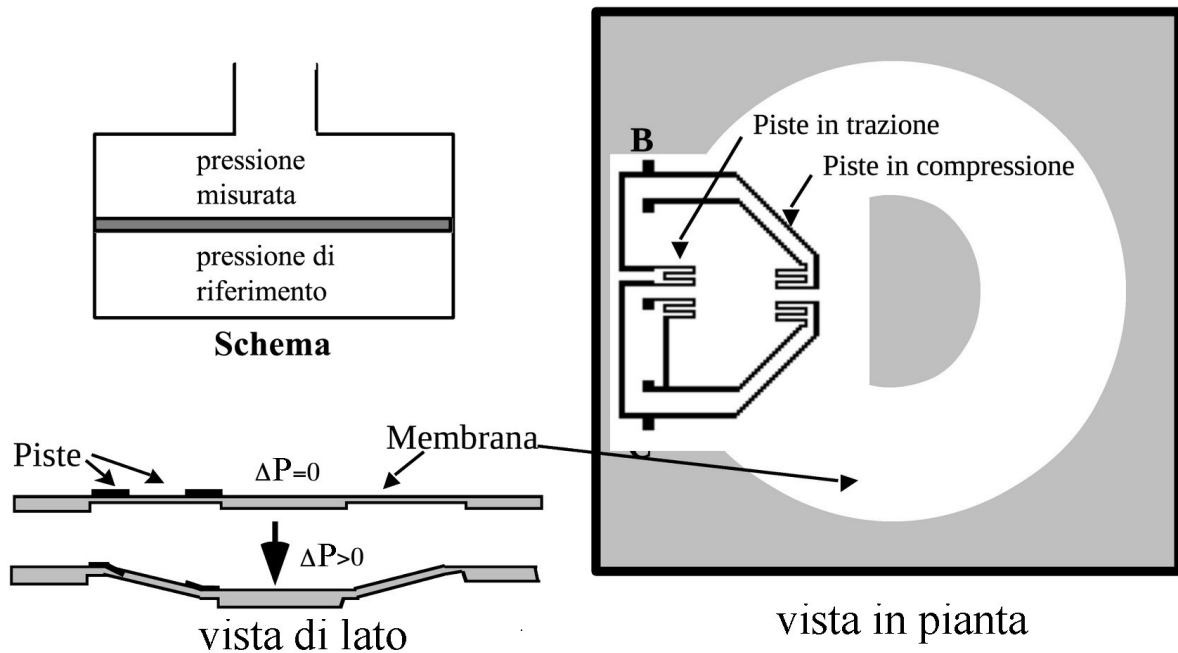
Ponte di Wheatstone e schema del sensore di forza

Questo è il tipo di sensore utilizzato in molte bilance commerciali

Manometro a ponte piezoresistivo

E' una sottile membrana di silicio su cui sono ricavate le piste di 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.



Questo è il tipo di sensore contenuto nei dispositivi che trovate in farmacia per la misura della pressione arteriosa, o nell'altimetro utilizzato da chi vola in deltaplano.

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.

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

Si possono quindi distinguere due grandi categorie di sensori optoelettronici:

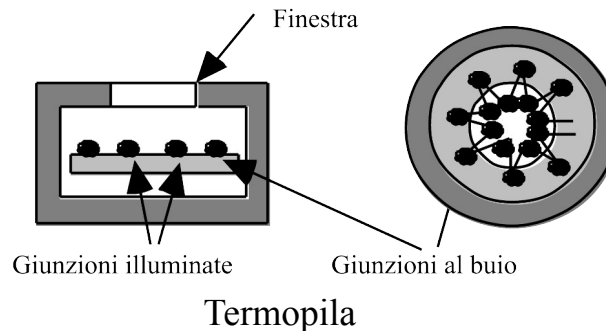
I sensori *termici* (termopile, cristalli piroelettrici): hanno risposta piatta in funzione della frequenza della luce incidente, cioè sensibilità costante dall'infrarosso all'ultravioletto. Tuttavia, dato che si comportano cioè come filtri passa-alto (con frequenza di taglio tra 1 Hz e 100 Hz), devono 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.

I sensori a *semiconduttore* (fotoresistenze, fotodiodi, fototransistor): 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.

Sensori di luce termici

Termopila

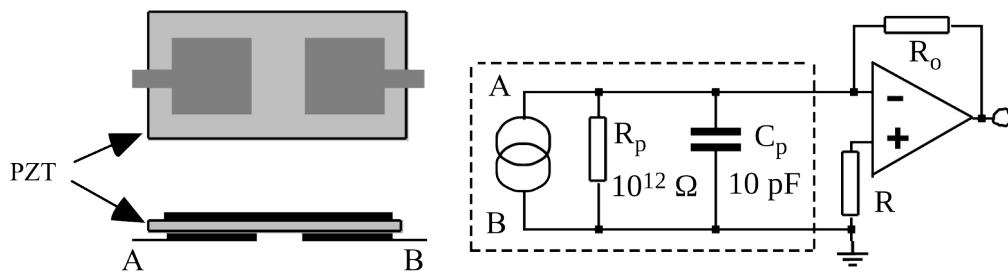
La *termopila* è una versione miniaturizzata di termocoppia, costituita di numerose coppie di giunzioni in serie, con le giunzioni di riferimento mantenute al buio e le giunzioni di misura esposte alla luce. I modelli commerciali hanno le dimensioni di ingombro di un normale transistor e un'area sensibile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



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 *piezoelettrici* 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.



Sensore Piroelettrico

I bolometri possono anche diventare termometri se usati come sensori dell'emissione di "corpo nero" (come nei pirometri ora in vendita nelle farmacie per misurare la temperatura dell'interno dell'orecchio)

Le fotoresistenze

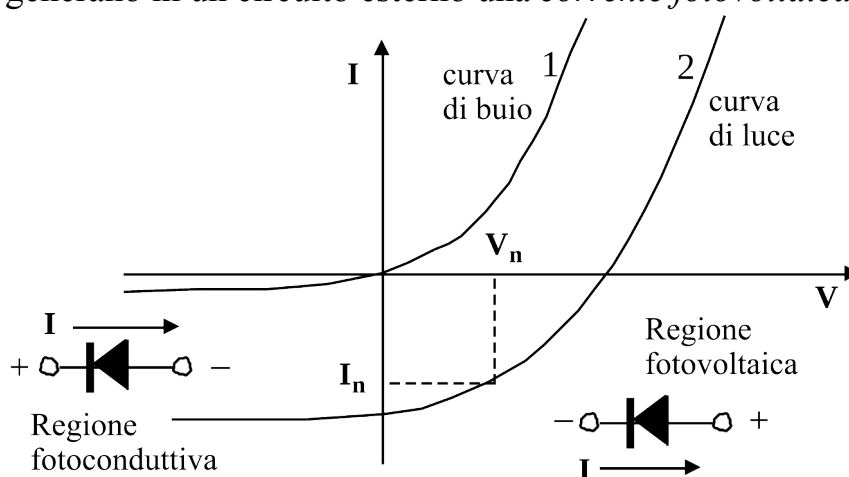
Le fotoresistenze sono costituite da un materiale *semiconduttore* (di solito PbS, CdS, CdSe). Il numero di portatori di carica, e quindi la conducibilità, aumenta in proporzione all'intensità della luce incidente, e la resistenza cala.

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 .

La elevata sensibilità (che può raggiungere valori di alcuni V/ μ W) è incompatibile con la rapidità. 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, 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*.



Curve caratteristiche della cella fotovoltaica

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

I sensori che nella vostra macchina fotografica automatica consentono una corretta regolazione di tempi di esposizione, sono anche di questo tipo

SENSORI DI POSIZIONE

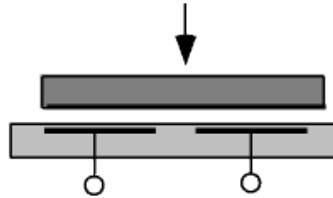
I dispositivi che possono essere usati per misurare la posizione di un oggetto sono molteplici.

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

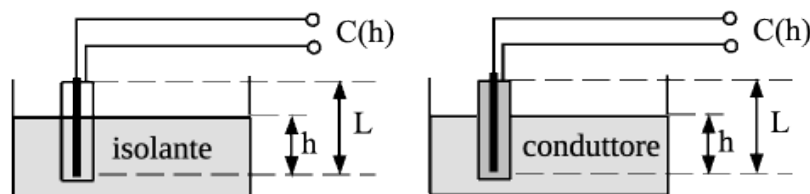
Nei sensori capacitivi la modulazione di capacità può essere indotta dal movimento di una delle armature rispetto all'altra che resta fissa, oppure l'accoppiamento capacitivo tra due armature fisse può essere variato tramite una terza armatura mobile (spesso costituita proprio dall'oggetto di interesse).



Schema di sensore capacitivo con due elettrodi adiacenti

Di questo tipo sono i sensori dei monitor “touch-screen” che usate alla stazione per cercare le informazioni sugli orari dei treni

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.

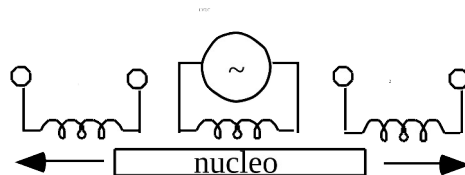


Misuratori di livello capacitivi

Di questo tipo sono i sensori che nella vostra automobile vi avvertono che è ora di “fare il pieno”

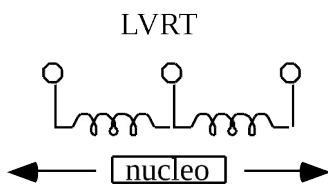
Sensori di posizione induttivi

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).

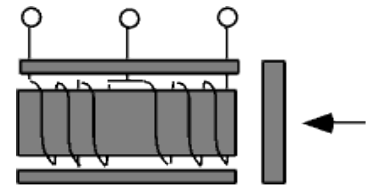


Sensore induttivo a trasformatore

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



Sensore induttivo a riluttanza



Sensore a riluttanza con nucleo fisso

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.

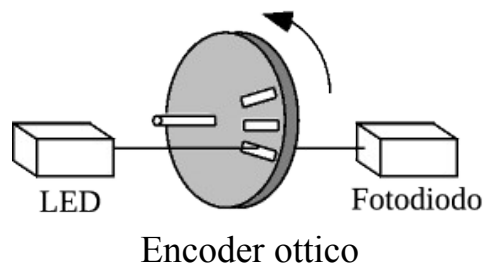
I principali vantaggi di questi sensori sono la robustezza meccanica, la affidabilità, e la possibilità di rendere trascurabile l'attrito per l'assenza di contatti striscianti.

E' su questi sensori che si basa spesso l'efficienza del servosterzo della vostra automobile

Sensori di posizione ottici

I sensori ottici di rotazione (*encoder*) *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 la posizione angolare del disco rispetto ad una origine arbitraria. 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.



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

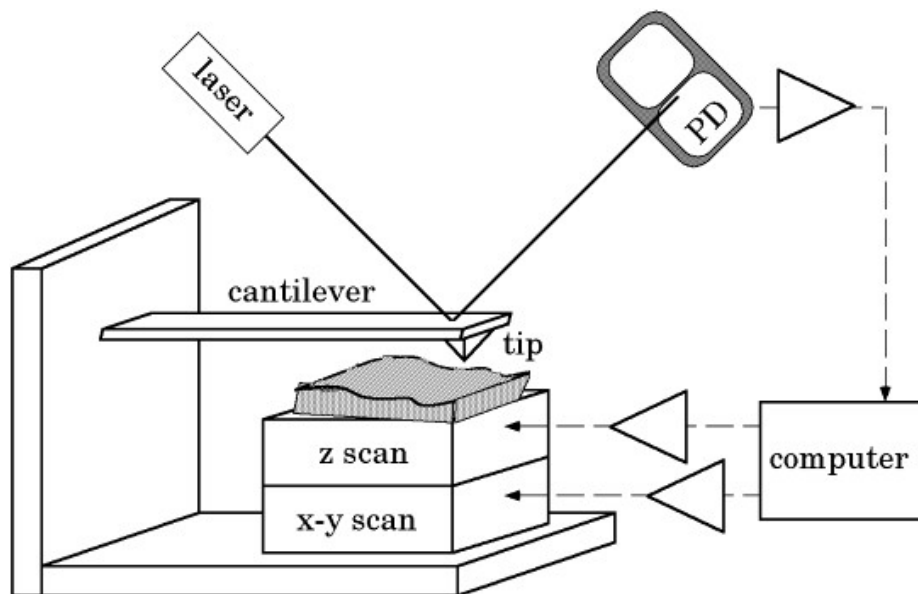
Una delle applicazioni più comuni di encoder ottici è il dispositivo di ingresso nei moderni PC detto “mouse”.

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.

Sensore ottico differenziale (Fotodiodo a due settori)

La sensibilità di un sensore ottico di posizione può essere resa straordinariamente elevata se si utilizza una *coppia di fotodiodi* connessi a ponte per rivelare la deflessione di un sottile raggio di luce (ad esempio emesso da un diodo-laser) che viene riflesso dall'oggetto in esame.

Questo è il sistema (detto a “leva ottica”) impiegato anche nei moderni microscopi a forza atomica (AFM) capaci di rivelare spostamenti verticali della punta esploratrice dell'ordine di 1 \AA (10^{-10}m).



Schema di AFM con sensore di posizione a leva ottica

Sensori ottici a matrice di punti (CCD)

Se una *matrice di fotodiodi* viene accoppiata ad un sistema di lenti che focalizzi sul piano della matrice l'immagine di un oggetto di nostro interesse (come l'equipaggio ottico della nostra macchina fotografica focalizza l'immagine sul piano ove è posta la pellicola), otteniamo un *sensore di immagini*.

La risoluzione del sensore è definita dal *numero* di fotodiodi e dalla loro dimensione: è ciò che si intende quando si dice che produciamo una immagine ad esempio di 600x800 punti (*pixel*).

L'acronimo CCD (Charge-Coupled-Device) deriva dal fatto che ciascun fotodiodo quando viene illuminato produce una carica elettrica, proporzionale alla quantità di luce assorbita, che viene trasferita ad una capacità che la immagazzina: poi il circuito di interfaccia con il microprocessore provvede ad interrogare lo stato di carica della matrice di capacità e ricostruisce l'immagine come *matrice di valori di tensione*

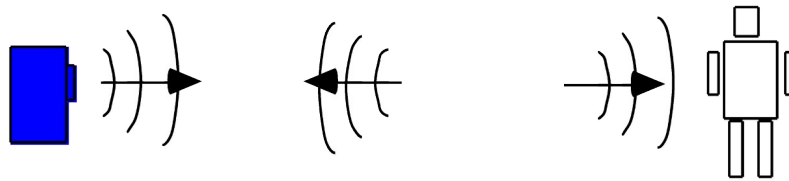
Il calcolatore registra una *matrice di valori numerici* e se a ogni valore si attribuisce un *tono di grigio* o un *colore* diverso, l'immagine registrata può poi essere presentata su un monitor.

Questo è grossolanamente lo schema di principio su cui sono basati ad esempio gli scanner, oltre che le telecamere portatili.

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.

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.

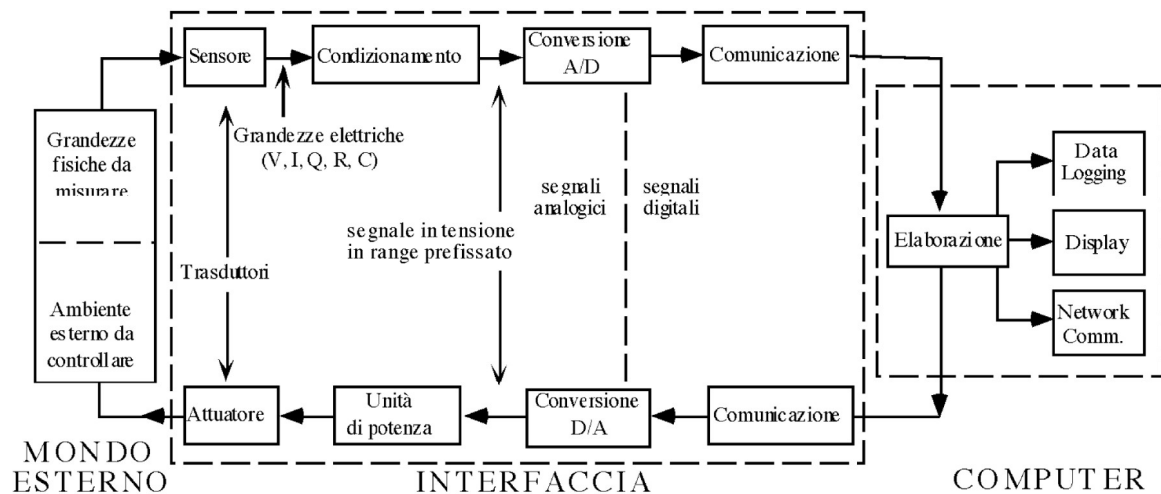


Nota la velocità del suono in aria alla temperatura ambiente, si può tradurre il tempo misurato in distanza percorsa dall'onda sonora: se c è la velocità del suono [$c=(331+0.6t)\text{m/s}$ in aria, ove t è la temperatura dell'aria in gradi Celsius] e T è il tempo di andata e ritorno del segnale, allora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

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

Schema generale di interfaccia fra trasduttori e computer



La figura rappresenta un esempio di come sia possibile realizzare un sistema di misura (e controllo), tramite l'impiego di un elaboratore anziché con le tradizionali tecniche analogiche.

Con questo tipo di soluzione si ottengono un generale numerosi vantaggi ad esempio dal punto di vista della *ripetibilità* e della *stabilità del sistema a lungo termine*. I sistemi digitali sono infatti intrinsecamente ripetibili: se facciamo eseguire cento volte la stessa addizione a cento calcolatori diversi otterremo infatti diecimila risultati uguali.

Altri aspetti importanti a favore della scelta digitale sono la *flessibilità*, cioè la possibilità di cambiare senza interventi hardware, semplicemente modificando il programma, le modalità di risposta del sistema, la facilità nell'archiviare i dati relativi al processo o alla misura o nel trasmetterli ad una postazione remota, la possibilità di implementare algoritmi che non sono realizzabili con l'approccio analogico.

Conversione AD / DA

Dato che la maggior parte dei trasduttori produce in uscita (e/o richiede in ingresso) un segnale analogico, e che i moderni calcolatori sono tutti di tipo digitale, per attuare una comunicazione fra trasduttori e computer è necessario che l'interfaccia disponga di blocchi di conversione A/D e D/A.

Comunicazione

I blocchi intitolati “comunicazione” tra convertitori AD/DA e computer devono provvedere a trasferire il segnale tra convertitore e computer, cioè in sostanza a stabilire il *linguaggio* da utilizzare per dialogare con l'elaboratore.