

# TRASDUTTORI

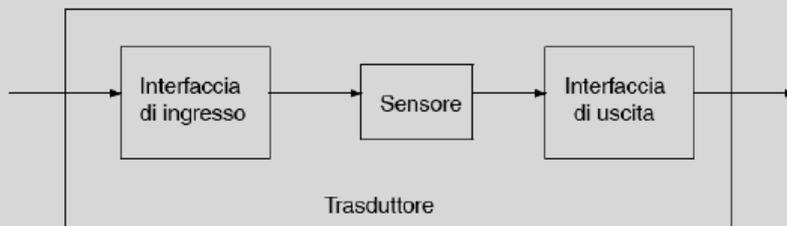
Un trasduttore (o sensore) è un dispositivo in grado di rilevare una grandezza fisica di tipo qualsiasi (termico, luminoso, magnetico, meccanico, chimico, ecc.) e di trasformarla in una grandezza di altro tipo, generalmente elettrica (tensione o corrente) al fine di poterla :

- misurare
- confrontare con una grandezza della stessa natura
- elaborare ( amplificare, traslare, digitalizzare ) ( **condizionamento del segnale** )
- acquisire tramite un sistema di elaborazioni dati e/o trasportare a distanza tramite un sistema di comunicazione dati per poter essere memorizzata e / o visualizzata .
- usare in un sistema di controllo

## Terminologia

**Trasduttore:** il dispositivo nel suo complesso, che trasforma la grandezza fisica da misurare in un segnale di natura elettrica.

**Sensore:** Il sensore è l'elemento sensibile che converte la grandezza fisica in ingresso in una grandezza fisica in uscita facilmente acquisibile per via elettrica.



In molti casi la distinzione tra sensore e trasduttore non è così netta e delineata e molto spesso nella letteratura tecnica e nella pratica comune i due termini sono utilizzati come sinonimi.

## Grandezza Fisiche e Segnali

I trasduttori misurano le **grandezze fisiche**:

- Grandezze continue, che possono assumere valori continui all'interno di un certo intervallo (es. temperatura di un utensile, velocità di rotazione di un motore, ecc...).
- Grandezze discrete, che assumo un insieme discreto di valori (es. verso di rotazione di un motore, numero di pezzi lavorati al minuto, ecc...).

Le informazioni associate alle grandezze fisiche sono dette **segnali**.

Le grandezze continue sono descritte da **Segnali analogici**.

Grandezze discrete sono descritte da **Segnali codificati** oppure da **Segnali logici**.

# CLASSIFICAZIONE

I trasduttori possono essere classificati in molti modi :

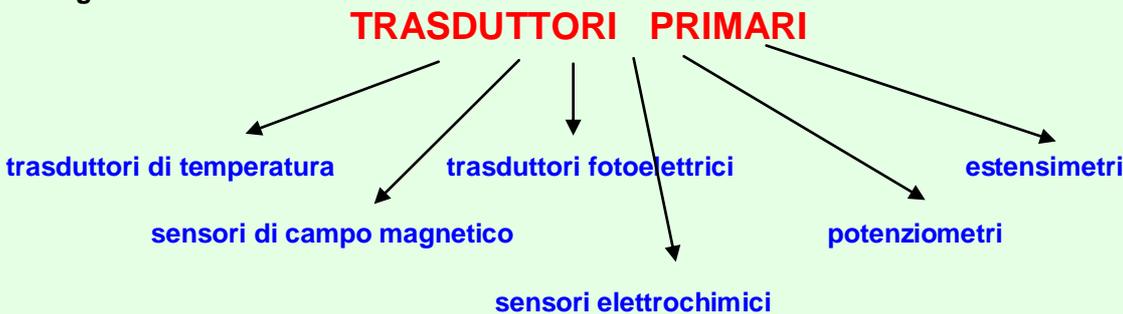
1. Possiamo distinguerli in 2 tipi :

- **attivi** ( producono direttamente tensione o corrente )
- **passivi** ( hanno bisogno dall'alimentazione per funzionare )

2. I trasduttori vengono anche classificati in :

- **“primari”** o **“fondamentali”**  
( trasduttori di temperatura, di luminosità, di posizione, di campo magnetico, ecc...)
- **“secondari”** (trasduttori di forza, di accelerazione, di pressione, ecc...) che dipendono dai primari e che quindi vengono definiti “variazioni dei primari”.

Nei trasduttori primari la grandezza di ingresso viene trasformata **direttamente** nella grandezza di uscita. Nei secondari, viceversa, la grandezza di uscita si ottiene dalla grandezza di ingresso in modo indiretto. Ovvero la grandezza di ingresso viene convertita in una grandezza **intermedia** e quest'ultima viene convertita nella grandezza di uscita.



## Trasduttori Secondari

- sensori di **forza**, **accelerazione** e **pressione** ( basati sugli estensimetri ).
- la maggior parte dei sensori di **posizione** (basati sui sensori fotoelettrici e sui sensori di campo magnetico).
- sensori di **velocità**, basati sui sensori di posizione.

3. I trasduttori possono poi essere suddivisi in :

- **Analogici** : trasduttori che danno in uscita un segnale che, **entro un dato intervallo**, varia **con continuità**.
- **Digitali** : trasduttori che danno in uscita un segnale che varia in modo discontinuo, cioè ciascun valore può differire dal precedente non meno di una **quantità costante q**.  
L'uscita non potrà cioè variare con continuità, ma solo di quantità multiple di **q**.

Apparentemente un trasduttore analogico sembrerebbe avere una **risoluzione** migliore di un trasduttore digitale; ciò non è assolutamente vero in quanto possono aversi trasduttori digitali in cui l'unità di base **q** ha un valore piccolissimo e trasduttori analogici che riescono a rilevare due ingressi come diversi tra di loro solo se la loro differenza " $\Delta_{in}$ " supera un dato limite, che può essere anche di molto superiore all'unità di base **q** del trasduttore digitale. Tutto dipende, cioè, dalla **sensibilità** del trasduttore.

Definiamo :

$Y_m$	valore minimo del segnale in uscita dal trasduttore
$Y_M$	valore massimo del segnale in uscita dal trasduttore
$Y_s = Y_M - Y_m$	Intervallo di valori che può assumere l'uscita

Se rappresentiamo il valore continuo del segnale d'uscita del trasduttore  $Y$  mediante una **codifica binaria a  $N$  bit**, ogni bit corrisponde ad un valore (detto **LSB, least significant bit**) pari a:

$$LSB = \frac{Y_s}{2^N}$$

Questo valore corrisponde alla risoluzione della codifica digitale e viene anche detto *quanto*

4. I trasduttori possono anche essere suddivisi in funzione dei principi fisici che sono alla base del loro funzionamento.

## Principi Fisici utilizzati per i sensori

### 4.1

**Sensori di tipo resistivo:** Questi sensori convertono la grandezza da misurare in una variazione di resistività. La resistività può essere espressa come:

$$R_s = \rho \frac{l}{A}$$

dove  $\rho$  è la resistività del materiale (solitamente dipendente dalla temperatura),  $l$  ed  $A$  sono la lunghezza e la sezione trasversale del materiale. La variazione di resistenza può essere prodotta da:

- **variazione di geometria:** prodotta da contatti striscianti (potenziometri) o forze deformanti (estensimetri).
- **variazioni di temperatura** (termistori).
- **illuminazione** (fotoresistori).

**Sensori di Tipo Induttivo:** Questi sensori si dividono in due categorie:

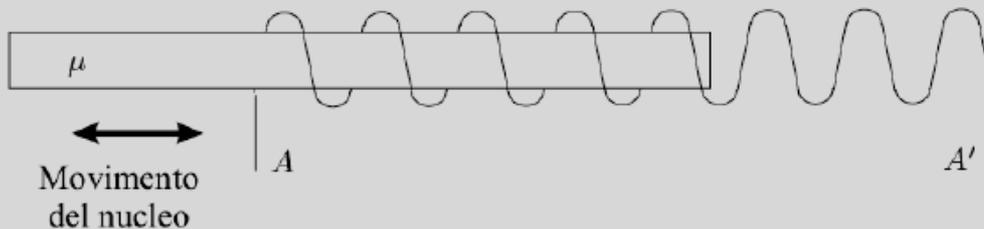
- Singolo Avvolgimento
- Trasformatore

### Sensori induttivi a singolo avvolgimento

I sensori a singolo avvolgimento sono dei circuiti elettrici per cui l'induttanza vale:

$$L_s = \mu FN^2$$

dove  $\mu$  è la permeabilità magnetica del nucleo su cui si avvolgono le spire,  $F$  è una costante che dipende dalla geometria e  $N$  è il numero di spire.

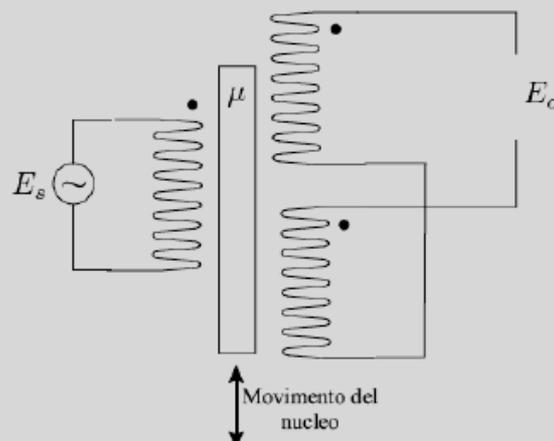


Il sensore converte la grandezza da misurare in una variazione dell'induttanza che viene acquisita utilizzando un circuito apposito.

### Sensori induttivi a trasformatore

Consiste in due o più avvolgimenti (un primario e uno o più secondari) ed ha un funzionamento del tutto simile a quella di un trasformatore.

Il sensore converte la grandezza da misurare in una variazione dei parametri del sistema



#### 4.3

### Sensori di Tipo Capacitivo:

Per una capacitore a facce piane parallele, la capacità vale:

$$C_s = \varepsilon \frac{A}{d}$$

dove  $\varepsilon$  è la costante dielettrica,  $A$  l'area delle facce e  $d$  la distanza tra le due facce. Il sensore capacitivo converte la variazione della grandezza da misurare in una variazione di uno di questi parametri.

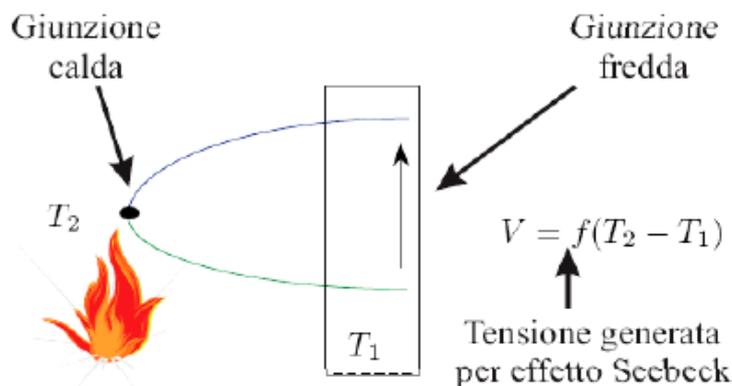
Il sensore capacitivo converte la variazione della grandezza da misurare in una variazione di uno di questi parametri:

- Variando la geometria del sensore, ad esempio modificando la posizione relativa dei piatti, si otterrà un sensore di posizione
- Un'altra applicazione consiste nel misurare il livello di liquidi. La costante dielettrica tra due elettrodi parzialmente immersi in un liquido varia al variare del livello del liquido.

#### 4.4

### Sensori di Tipo Termoelettrico (termocoppia):

Questo sensore converte un flusso di calore (differenziale di temperatura) in una differenza di potenziale.



La termocoppia è costituita da una giunzione fra due metalli differenti. Quando la giunzione si trova ad essere ad una temperatura differente da quella delle estremità libere, si crea una differenza di potenziale a tali estremità (**Effetto Seebeck**)

## 4.5

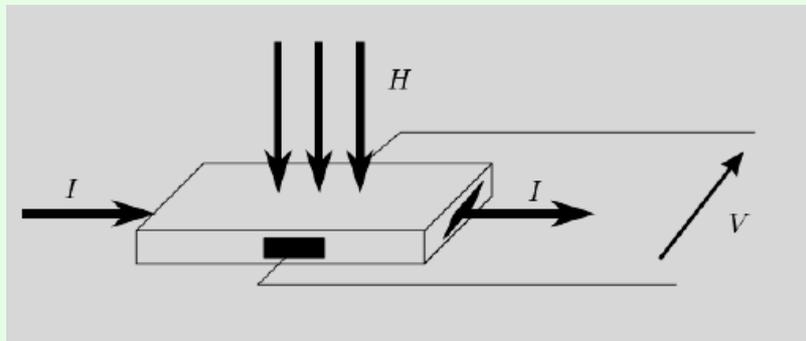
### Sensori ad effetto Hall:

Quando un campo magnetico viene applicato perpendicolarmente ad una superficie conduttrice percorsa di corrente, si genera un campo elettrico perpendicolare sia al verso di scorrimento della corrente che alla direzione del campo magnetico. La differenza di potenziale così generata dipende dall'intensità e dalla direzione del campo magnetico e della corrente:

$$V = K |\vec{H} \parallel \vec{I}| \sin(\varphi)$$

dove H e I rappresentano il campo magnetico e la corrente, mentre  $\varphi$  è l'angolo tra i loro vettori, e K è una costante che dipende dalla geometria del sensore. Tale principio è utilizzato per

- Misura di spostamento lineare o angolare (senza contatto).
- Misura di corrente.



## 4.6

- **Sensori di tipo piezoelettrico:** Questi sensori sono basati sul fenomeno fisico secondo il quale alcuni materiali cristallini (es.: quarzo) producono una differenza di potenziale elettrico quando sono sottoposti ad una certa pressione.
- **Sensori di tipo fotovoltaico:** I fotoni incidenti su di un reticolo cristallino semiconduttore sono in grado di trasferire la loro energia cinetica agli elettroni di valenza del cristallo. Questo fenomeno crea delle coppie elettroni-lacune libere che, in corrispondenza della giunzione p-n, generano una differenza di potenziale e quindi una corrente elettrica.

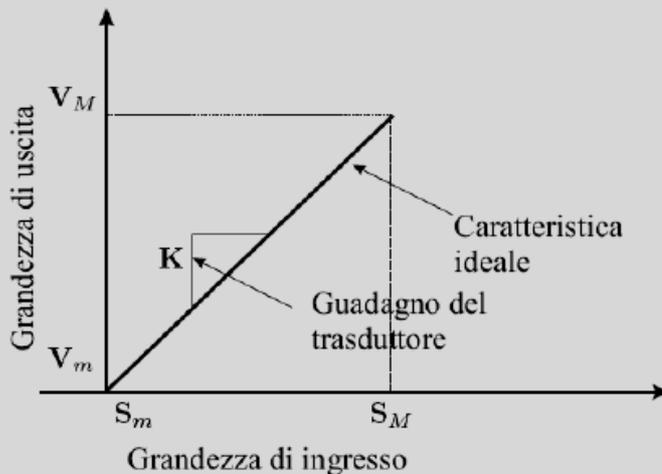
## Specifiche sulle funzionalità dei Sensori

**Caratteristica statica.** La caratteristica statica si ottiene variando molto lentamente la variabile di ingresso del sensore e registrando la corrispondente variabile di uscita.

**Caratteristica dinamica.** Quando la variabile di ingresso varia molto velocemente il trasduttore può assumere un comportamento dinamico, cioè la variabile di uscita introduce un certo ritardo ed una certa attenuazione alla caratteristica statica. È quindi chiaro che la caratteristica dinamica del trasduttore pone un limite alla banda passante di tutto il sistema di controllo.

### Caratteristica Statica Ideale

La caratteristica statica rappresenta il legame statico tra le grandezze da misurare e l'uscita del trasduttore. Idealmente questa caratteristica è lineare



[ Detta anche **TRANSCARATTERISTICA** ]

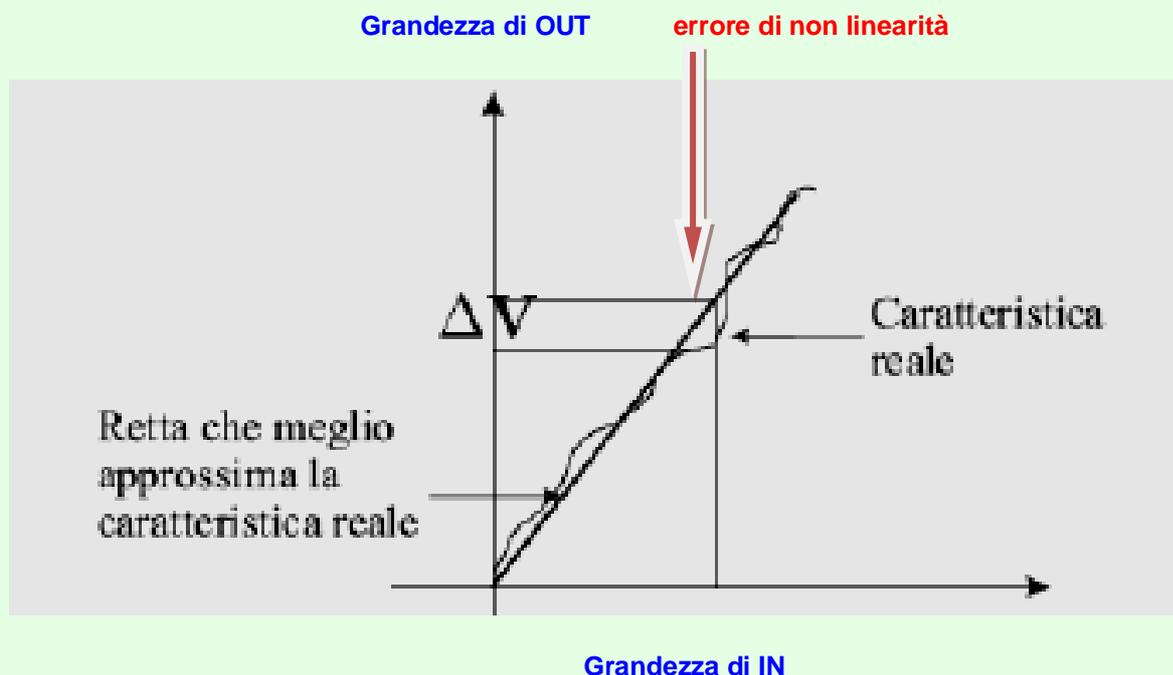
### Errori sulla caratteristica statica

I trasduttori commerciali hanno però una caratteristica statica reale che si differenzia da quella ideale a causa di inevitabili imperfezioni costruttive. La qualità di un sensore si misura in base a quanto la caratteristica reale si scosta da quella ideale. I costruttori di trasduttori forniscono alcuni indici che misurano la qualità del sensore.

**Errore di Linearità  
(linearity error)**

$$e_L \% = \frac{\Delta V}{V_M - V_m} 100$$

dove  $\Delta V$  è il massimo scostamento dalla caratteristica lineare

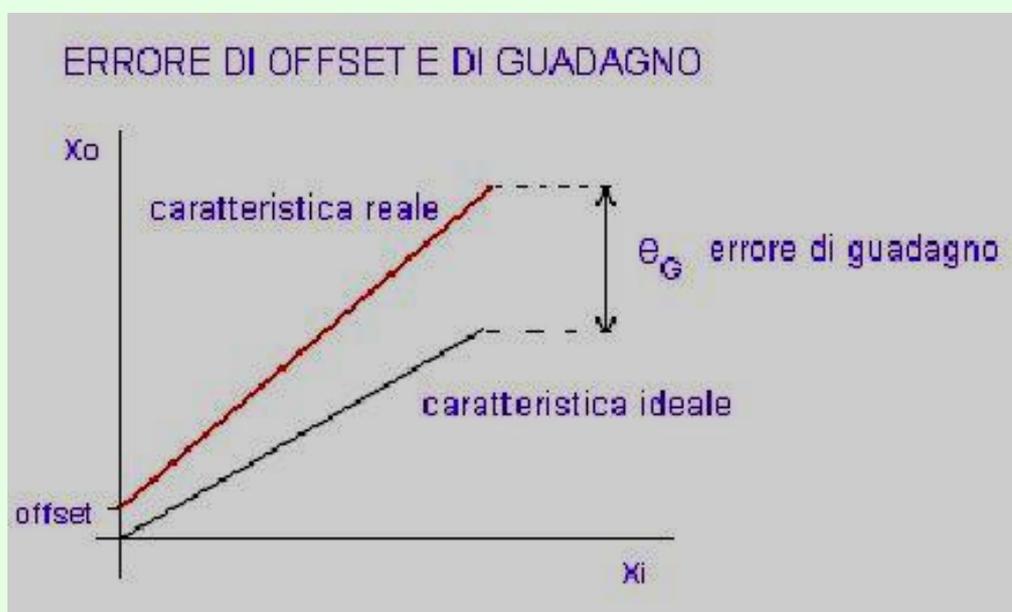


### Errori sulla caratteristica statica

**Errore di fuori zero (offset error).** È il valore che assume l'uscita del trasduttore quando la grandezza da misurare è nulla.

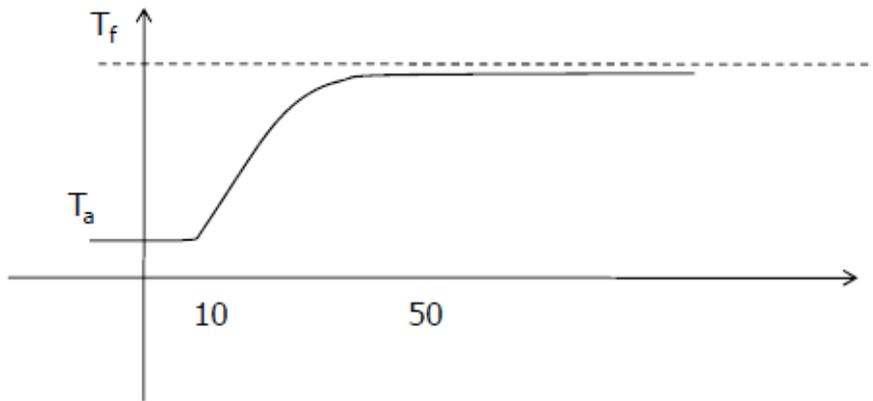
**Errore di guadagno (gain error).** È la differenza tra il guadagno della caratteristica ideale del trasduttore ( $K$ ) e il guadagno della retta ( $K_1$ ) che approssima al meglio la caratteristica ideale del trasduttore. L'errore di guadagno è solitamente espresso in percentuale:

$$e_G \% = \frac{|K_1 - K|}{K} 100$$



## Caratteristica Dinamica

Il trasduttore è un sistema fisico avente necessariamente un comportamento dinamico che si evidenzia quando la sua grandezza di ingresso varia rapidamente.



Risposta di una termocoppia a temperatura  $T_a$  immersa in un fluido a temperatura  $T_f$

La risposta è approssimabile con quella di un sistema del primo ordine con una costante di tempo di 10 s. a causa del pozzetto in cui è incapsulata la termocoppia per proteggerla da fenomeni corrosivi. Raramente la costante di tempo scende sotto i 10 s.

Parametri tipici dei trasduttori :

- [Range di Ingresso](#)
- [Trascaratteristica monotonica](#)
- [Linearità](#)
- [Sensibilità](#)
- [Risoluzione](#)
- [Errore di non linearità](#)
- [Errore di Offset in uscita](#)
- [Tempo di risposta](#)
- [Ripetitività](#)
- [Precisione](#)
- [Isteresi](#)
- [Condizioni di impiego](#)
- [Sovraccarico](#)
- [Affidabilità](#)
- [Vita di un trasduttore](#)
- [Banda Passante](#)

## Range di IN ( DINAMICA di IN )

E' l'intervallo di valori in cui il trasduttore lavora secondo i parametri stabiliti.

Appena esce dal range, il trasduttore non funziona più e ritorna a lavorare appena rientra nell'intervallo.

Il range di ingresso (o dinamica di ingresso) definisce i limiti entro cui può variare l'ingresso, mentre il range di uscita (o dinamica di uscita) definisce i limiti entro cui può variare l'uscita.

## Transcaratteristica ( Caratteristica IN / OUT ) monotonica

Il grafico corrispondente alla relazione tra IN e OUT del trasduttore (TRANSCARATTERISTICA), **non** deve presentare variazioni nell'andamento della pendenza (curva crescente o decrescente), almeno nel range di funzionamento.

## Linearità

E' una qualità altamente apprezzabile : la sensibilità del trasduttore è **costante** ( quindi precisa per tutta la scala ) e con due soli punti si può individuare completamente la sua transcaratteristica.

La maggior parte dei trasduttori è progettata per presentare una transcaratteristica lineare, ove questo non è possibile è necessario prevedere opportuni circuiti di linearizzazione.

## Sensibilità

La sensibilità **S** del trasduttore è il rapporto fra la variazione della grandezza d'uscita e quella dell'ingresso che l'ha determinata. Lo strumento risulta essere molto sensibile quando a parità di grandezza di ingresso, la grandezza di uscita è molto elevata.

$$S = \Delta_{OUT} / \Delta_{IN}$$

## Risoluzione

La risoluzione **R** indica il limite inferiore alle variazioni rilevabili in ingresso.

$$R = 1 / \Delta_{IN \min}$$

dove  $\Delta_{IN \min}$  è la variazione minima di ingresso rilevabile.

**Un buon trasduttore presenta una BASSA risoluzione**, cioè può apprezzare segnali di piccolo valore, in riferimento alla portata del dispositivo.

## Errore di non linearità

Di solito, l'errore che il costruttore fornisce è l'errore di non linearità ed è espresso come **spostamento massimo** rispetto alla transcaratteristica ideale.

$$\text{Errore linearità \%} = (e_{\max} / V_{FS}) \cdot 100$$

$V_{FS}$  = Valore max d'uscita di Fondo Scala

## Errore di offset in uscita

Valore presente in uscita con gli IN a massa .

L'offset indica la bontà del trasduttore che risulterà essere migliore quanto minore sarà il valore assunto da tale parametro.

## Tempo di risposta

Rappresenta il **tempo necessario all'uscita per passare dal 10 al 90% del valore su cui l'uscita si stabilizza** ( in genere è misurato su una variazione a gradino, di ampiezza opportuna, dell' ingresso ).

**I migliori trasduttori hanno un tempo di risposta molto basso.**

## Ripetitività

Un altro parametro importante, anche se la sua definizione precisa varia da costruttore a costruttore, è la ripetibilità, vale a dire la **costanza nel tempo delle caratteristiche del trasduttore (la sua resistenza all'invecchiamento).**

## Isteresi

Alcuni trasduttori presentano una caratteristica diversa a seconda che l'ingresso passi dal valore minimo al massimo o viceversa

## Condizioni di impiego

Caratteristiche limite di impiego entro cui il trasduttore funziona correttamente.

## Sovraccarico

Valore massimo del segnale di ingresso, oltre il campo di misura, che può essere applicato senza che il trasduttore si danneggi.

## Affidabilità

Minima variazione dei parametri del trasduttore con l'uso.

## Vita di un trasduttore

E' il tempo espresso in ore, o più spesso in numero di cicli, numero di giri, ecc., oltre il quale non è più garantito il corretto funzionamento del trasduttore.

## Banda Passante

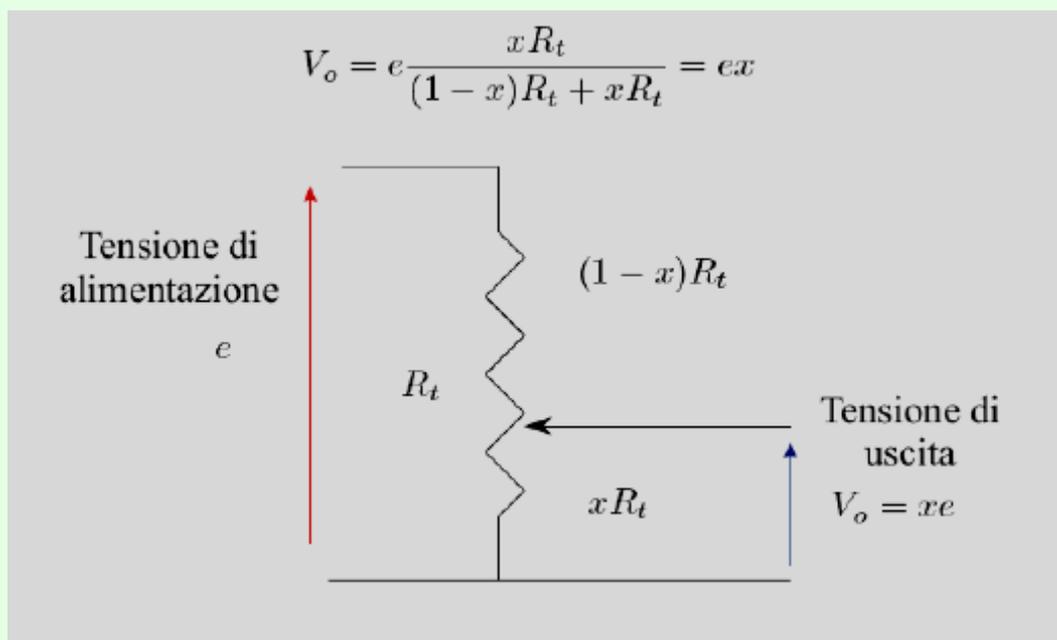
**Intervallo di frequenze del segnale di IN in cui il trasduttore può lavorare.** Il valore superiore della Banda indica la massima velocità di variazione del segnale di IN che il trasduttore riesce a "seguire" e riprodurre.

## TRASDUTTORI DI POSIZIONE

1.

### Potenziometro

- Il principio di funzionamento è basato sulla variazione di resistenza in un circuito elettrico determinata dallo spostamento dell'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.
- È un sensore di tipo assoluto ed è disponibile sia in versione rotativa che lineare. Costruttivamente si tratta di un dispositivo in cui un cursore mobile è libero di scorrere su di un resistore fisso (realizzato a filo avvolto o a film). La resistenza misurata fra il cursore ed un capo della resistenza fissa dipende dalla posizione del primo.
- Il potenziometro è un sensore "modulante", in quanto per ricavare una informazione elettrica utile occorre inserirlo in un circuito in cui sia presente una sorgente di alimentazione ausiliaria. Analizzando il componente mediante la legge di Ohm, la tensione di uscita risulta essere una frazione di quella di alimentazione e pertanto l'azione meccanica (la grandezza da misurare) agisce modulando in uscita la tensione di alimentazione.



## Problemi di interfacciamento di un potenziometro

- **Tensione di Alimentazione:**
  - **Stabilità:** la precisione e l'accuratezza del sensore dipendono dalla **tensione di alimentazione** del potenziometro, e quindi è necessario utilizzare un generatore che garantisca caratteristiche migliori della precisione che si desidera ottenere nella misura.
  - **Rapporto/segnale rumore e riscaldamento:** Un valore elevato di tensione produce un buon rapporto segnale/rumore, tuttavia produce anche maggior riscaldamento (**autoriscaldamento**) a causa di dissipazione del dispositivo. Questo comporta temperature di esercizio più elevate, che possono portare alla variazione della resistenza Nominale del potenziometro.

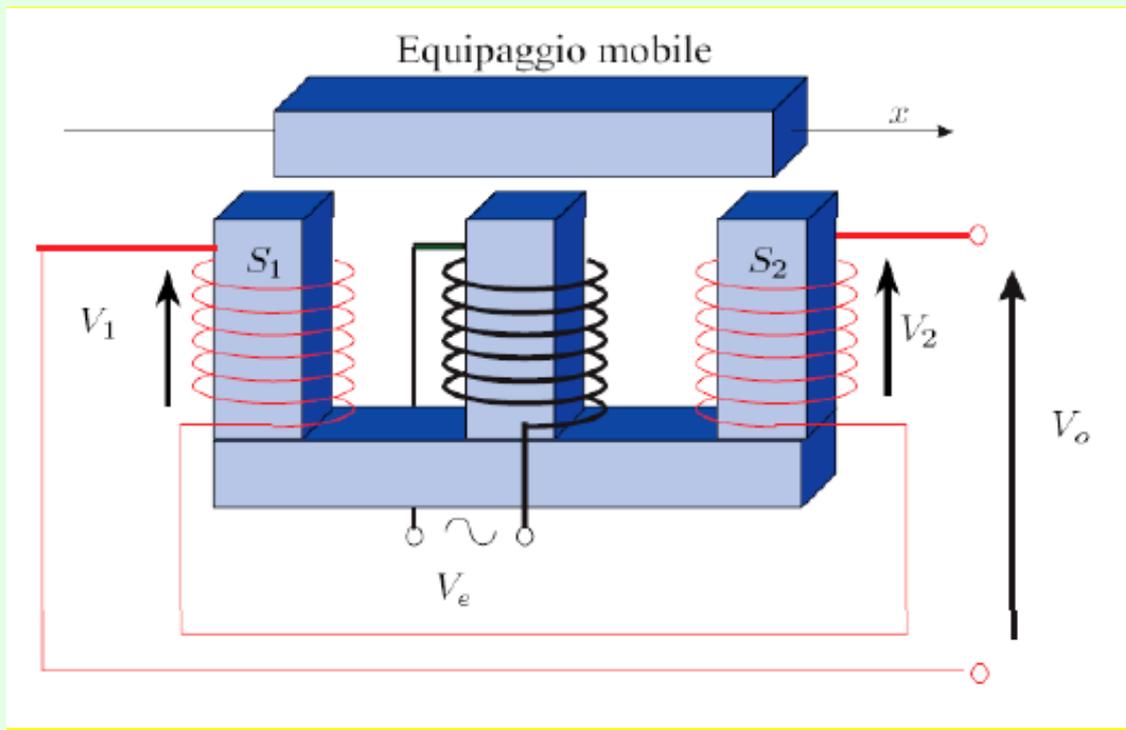
**Impedenza di uscita:** Il sensore ha inoltre una **impedenza di uscita rilevante**, che quindi deve essere tenuta in conto in modo da evitare errori di misura dovuti a problemi di interfaccia elettrica. L'impedenza di uscita elevata del sensore produce anche una estrema sensibilità ai disturbi, in quanto il tratto di conduttore tra il sensore e il circuito di amplificazione funziona da antenna per i disturbi elettromagnetici ambientali.

2.

## Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)

Il Trasformatore Lineare Differenziale funziona in base al principio dell'induzione elettromagnetica. Il circuito si compone di un cursore di materiale ferromagnetico mobile, un avvolgimento primario e due avvolgimenti secondari. Lo spostamento del cursore provoca una variazione di mutua induttanza (e quindi di flusso concatenato) nel circuito trasformatorico, rilevata da un opportuno circuito elettrico.

Sull'avvolgimento primario viene impressa una tensione sinusoidale  $V_e = V_m \sin(\omega t)$  e sui due avvolgimenti vengono indotte, per accoppiamento, due tensioni sinusoidali  $V_1$  e  $V_2$  (di pulsazione  $\omega$ ) e la cui ampiezza dipende dalla posizione del cursore mobile. La differenza  $V_0$  delle due tensioni consente di rilevare la posizione del cursore ed è l'uscita del sensore.



3.

### Encoder Ottico

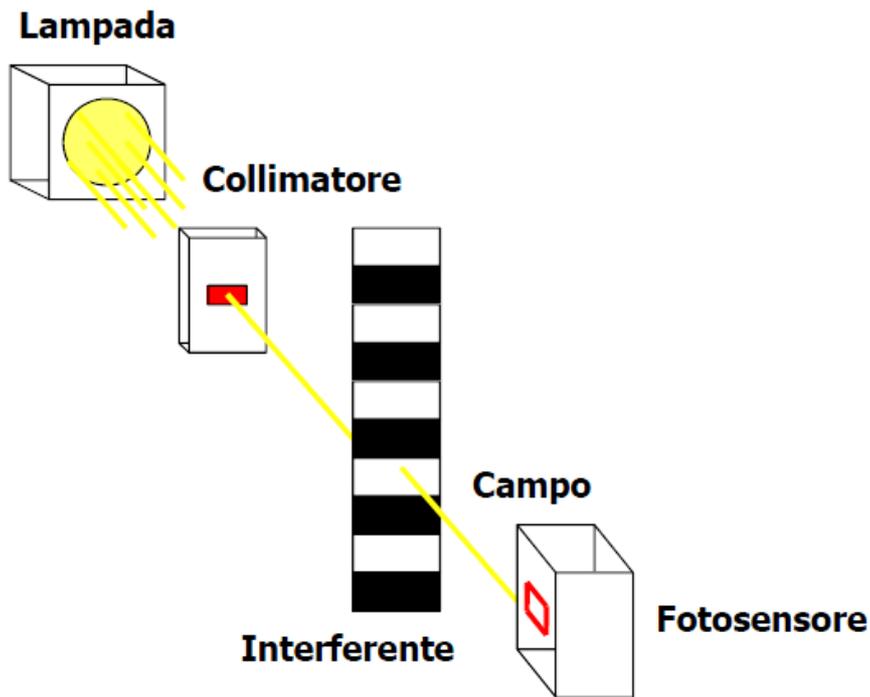
L'encoder è un sensore per la misura della posizione (encoder assoluto) e della velocità (encoder incrementale) che fornisce un'uscita digitale anziché analogica.

L'encoder è disponibile sia in versione per l'acquisizione di posizioni angolari che per per l'acquisizione di spostamenti lineari (denominato in questo caso Inductosyn o Riga Ottica, in relazione al principio di funzionamento utilizzato).

L'encoder per l'acquisizione di posizioni angolari è costituito da un disco di materiale trasparente su cui sono depositate strisce radiali di materiale opaco. L'encoder può essere di due tipi:

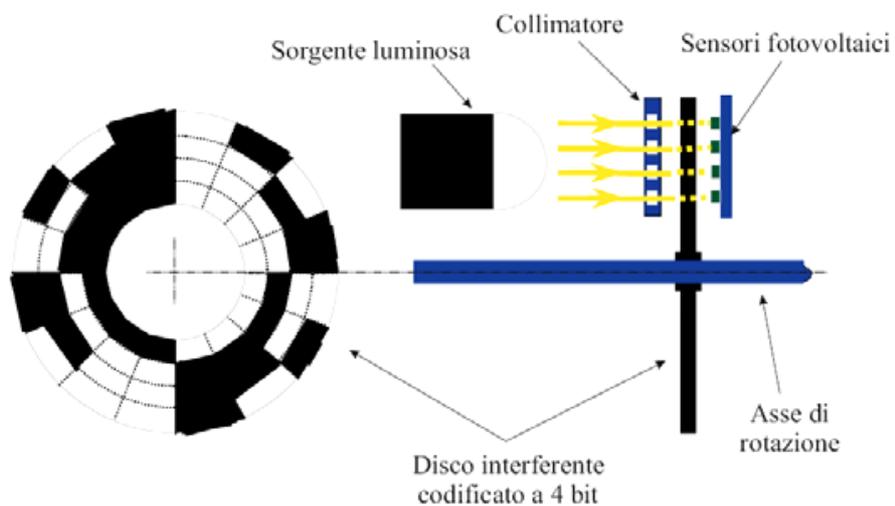
- Encoder Assoluto
- Encoder Incrementale

## Encoder Ottico - Principio di Funzionamento



## Encoder Assoluto

Le strisce opache sono disposte su corone circolari, ad ogni corona circolare corrisponde un bit di risoluzione del dispositivo. Le strisce opache e trasparenti si alternano in modo da codificare la posizione corrente in una configurazione binaria.



La posizione corrente viene acquisita mediante una batteria di sensori fotovoltaici pari al numero di bit di risoluzione dell'encoder. Tali sensori sono in corrispondenza ad un uguale numero di sorgenti luminose, da cui sono separati dal disco dell'encoder. Ad ogni posizione del disco corrisponde una configurazione binaria di strisce opache e trasparenti, acquisite dalla batteria di sensori fotovoltaici.

La codifica dei settori angolari come stringa di bit va scelta opportunamente.

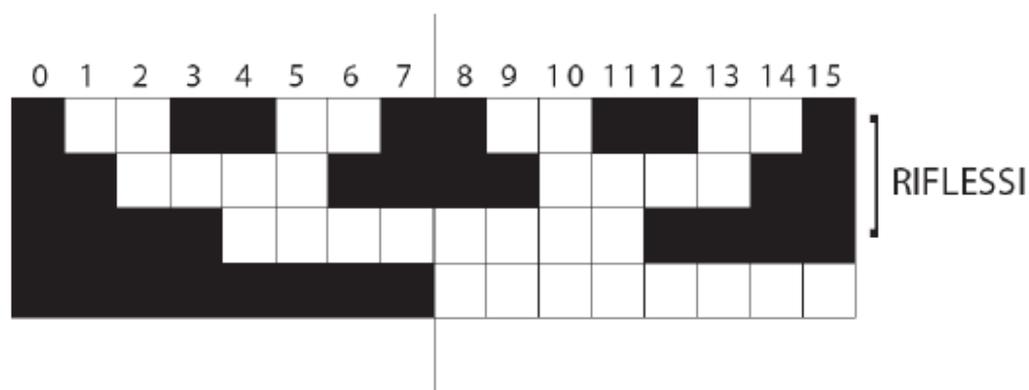
Il codice binario puro è soggetto a problemi di transizione spurie, dovute a variazione di più bit tra settori contigui:

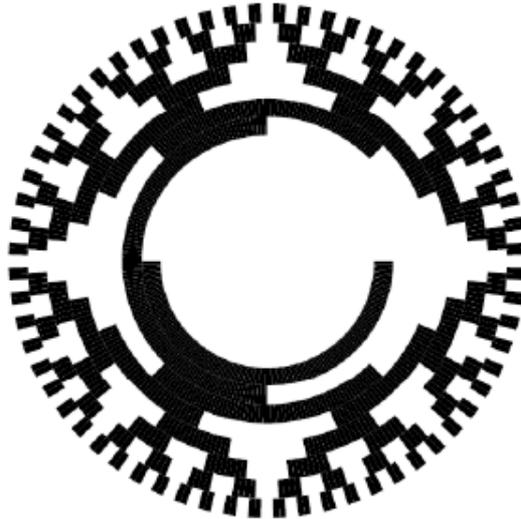
**Esempio (codifica con 3 bit):** dal settore 3 al settore 4 avviene il passaggio: 011 → 100. Se il circuito di acquisizione rileva, per imperfezioni costruttive, prima la variazione dei bit di posizione 2 e 3 e poi quella del bit di posizione 1, la sequenza sarà: 011 → 101 → 100, corrispondente a 3 → 5 → 4.

### Codifica Gray per l'Encoder Assoluto

- La codifica Gray (o binaria riflessa) risolve il problema delle transizioni spurie.
- I valori in codice Gray non possono essere utilizzati per operazioni matematiche.
- La conversione in binario puro (e viceversa) è eseguibile semplicemente in un PLC o altro dispositivo a microprocessore.

### Codifica Gray per l'Encoder Assoluto





### **ENCODER INCREMENTALE**

L'encoder incrementale è un dispositivo che serve a rilevare gli spostamenti angolari (rotazioni) di un asse. Nella sua forma più semplice è costituito da un disco calettato sull'asse di rotazione su cui è praticata una ghiera di **N fori equispaziati** (in realtà possono essere delle zone trasparenti fotoincise). Una barriera fotoelettrica di solito costituita da una coppia **LED / fototransistor** rileva la presenza o meno dei fori nella ghiera (eventualmente la circuiteria del fototransistor può incorporare un Trigger di Schmitt per eliminare incertezze di commutazione). Se il disco ruota, in uscita al fotosensore si ha un treno di impulsi. Contando gli impulsi si è in grado di determinare l'angolo di cui il disco si è spostato. **La risoluzione** angolare è evidentemente data da  $360^\circ / N$ .

In questa forma l'encoder non è in grado di rilevare il verso della rotazione e il suo uso è limitato a misurare la velocità di rotazione ottenuta contando gli impulsi su una base di tempo data.

Se **f** è la frequenza del segnale generato, **N** il numero dei fori, "n" la velocità di rotazione espressa in **giri/s** si ha :

$$n = f / N \text{ [ giri / sec ]}$$

(se **N è 60 la frequenza coincide con il numero di giri al minuto**).

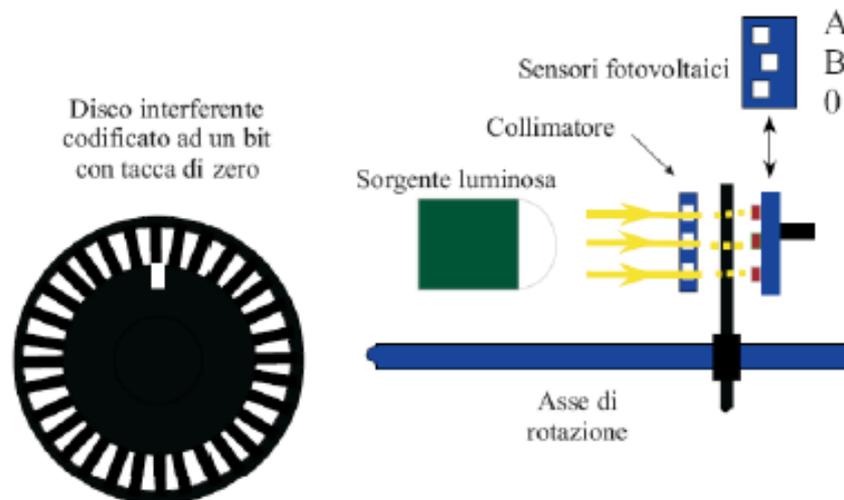
#### **Encoder incrementale a due (o tre) fasi**

Per poter risalire anche al verso di rotazione si deve utilizzare un encoder con due ghiere concentriche di settori trasparenti. Le due ghiere hanno lo stesso numero di settori, ma i settori sono sfasati di un angolo corrispondente a mezzo settore rispetto ai settori dell'altra.

Ad ognuna delle ghiere corrisponde un'uscita con un treno di impulsi definito **Fase A** e **Fase B** (in alcuni modelli c'è un ulteriore **Fase C** utile perché la sua frequenza è in rapporto 1:1 con la velocità di rotazione **n** in **giri/s**).

**Se l'encoder ruota in senso orario viene rilevato il segnale di Fase A in anticipo di 90° sul segnale in Fase B, viceversa sarà il segnale Fase B ad essere in anticipo di 90° sul segnale di Fase A.**

## Encoder Incrementale



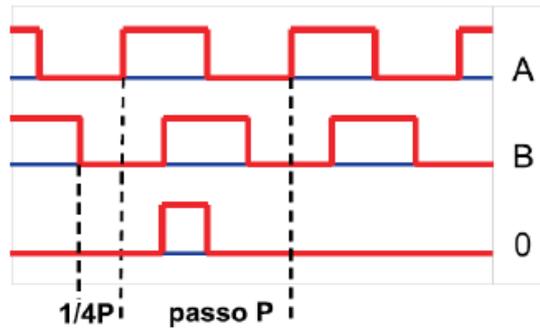
## Encoder incrementale

Il sistema di rivelazione del segnale dell'encoder incrementale è analogo al caso precedente: vi è una sorgente luminosa e **tre sensori fotovoltaici**, uno per rilevare la tacca di zero e due per determinare il verso di rotazione dell'encoder.

La tacca di zero è una striscia trasparente posta in corrispondenza dello zero convenzionale dell'angolo di rotazione dell'encoder. Il rilevamento di questa posizione è molto importante in quanto consente di stabilire lo stato iniziale necessario per il circuito di conteggio.

I due sensori fotovoltaici (A e B) di rilevazione del verso **sono sfasati di 1/4 di passo tra di loro**.

## Encoder Incrementale



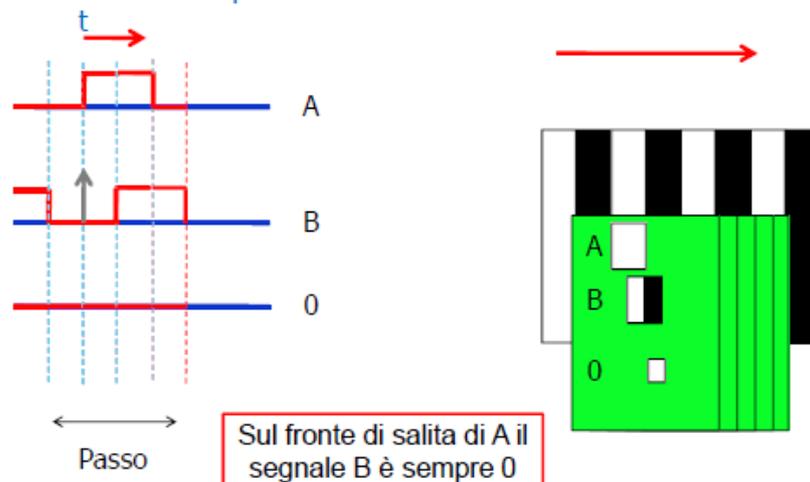
Ci sono due segnali in quadratura (A e B) e un segnale di zero (0)

L'utilizzo di A e B (e non solo uno di essi) è necessario per riuscire a discriminare il verso di rotazione

## Encoder Incrementali

### Discriminazione del verso di rotazione

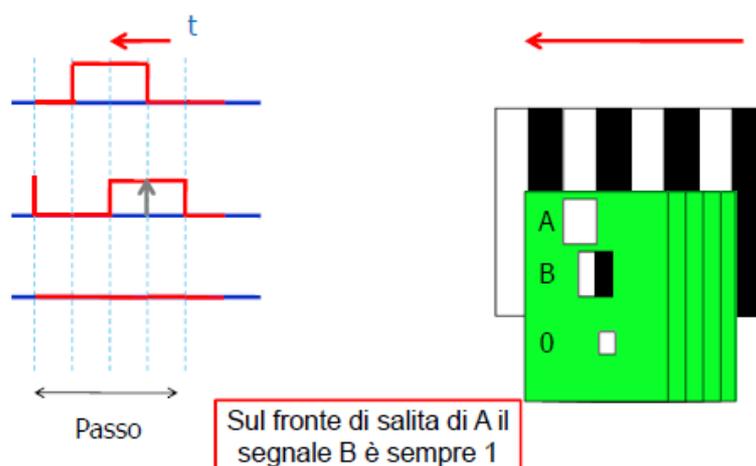
Rotazione Oraria: A precede B



## Encoder Incrementali

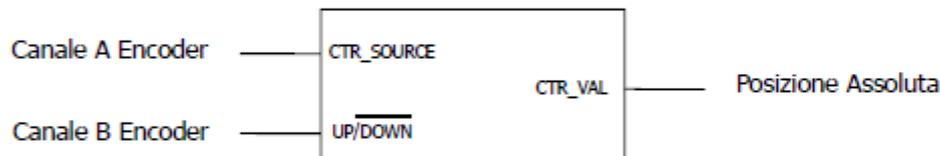
### Discriminazione del verso di rotazione

Rotazione Antioraria: A segue B



## Encoder Incrementale - Conteggio Impulsi

Un semplice circuito di conteggio potrebbe essere un **contatore Up-Down** hardware:



Il contatore conta i fronti di salita di A. Se la rotazione è oraria, il conteggio è crescente perchè il fronte di salita è in corrispondenza di B = 0. Se la rotazione è antioraria, il conteggio è decrescente perchè il fronte di salita è in corrispondenza di B = 1.

## Encoder come sensori di velocità

La velocità di rotazione può essere misurata in modo molto semplice, fissando un tempo di campionamento T:

$$V_{el}[kT] = \frac{\text{Conteggio}[kT] - \text{Conteggio}[(k-1)T]}{T}$$

Chiaramente il tempo di campionamento T e la risoluzione dell'encoder determinano il rumore della misura, dovuto alla discretizzazione.

Se la velocità diminuisce il rumore aumenta, fino al raggiungimento di una velocità limite non rilevabile



**Nessun impulso di conteggio nel tempo T.**

# SENSORI DI TEMPERATURA

## 1. Termoresistenze

Molti sensori di temperatura, come le termoresistenze, sono basati sul fatto che la conduttività di un materiale (conduttore o semiconduttore) dipende più o meno fortemente dalla temperatura.

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha T)$$

dove  $R_0$  è la resistenza a zero °C e  $T$  è la temperatura in gradi centigradi.

Infine " $\alpha$ " è un coefficiente positivo (misurato in °C<sup>-1</sup>).

I termoresistori hanno ampio range di utilizzo (da -200 a +800 [°C]), hanno una buona linearità, sono precisi e stabili.

I metalli che si utilizzano sono **rame, nichel e platino**.

Il difetto principale è che " $\alpha$ " è piccolo per cui sono necessari circuiti amplificatori con forte amplificazione.

Inoltre per trasformare la variazione di resistenza in una variazione di tensione occorre farli attraversare da corrente e ciò comporta una variazione di resistenza per **effetto joule**, il che introduce un errore nella misura.

Un esempio di termoresistenza è la PT100 al platino che presenta 100 [Ω] a 0 [°C] e 375 [Ω] a 800 [°C]

## 2. Termistori NTC

Se invece di utilizzare dei metalli si utilizzano semiconduttori puri il sensore che si ottiene ha coefficiente di temperatura NEGATIVO e molto elevato.

Si ottiene cioè una maggiore sensibilità rispetto ai termo resistori.

I termistori NTC sono realizzati con miscele di semiconduttori composti (ossidi di Nichel e Manganese) e non con silicio o germanio.

La resistenza di questi ultimi materiali è infatti troppo sensibile alla presenza di impurità nel cristallo.

La caratteristica di un termistore NTC è del tipo:

$$R = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}$$

Dove:

$T$  è la temperatura ASSOLUTA,

$T_0$  è una temperatura assoluta di riferimento (298 °K)

$B$  è una costante.

La caratteristica dei termistori è pesantemente **non lineare**: si prestano perciò a lavorare bene solo dove la linearità non è importante (controlli di temperatura) o dove i range di lavoro sono ristretti (termometria clinica).

Possono anche venire utilizzati in alcuni trasduttori secondari come dei misuratori di flusso per fluidi.

### 3. Termistori PTC

Materiali semiconduttori fortemente drogati possono presentare comportamento simile a quello dei metalli: avere cioè un coefficiente di temperatura POSITIVO, col vantaggio rispetto a quello dei metalli di essere più molto grande. La maggiore sensibilità va a scapito tuttavia della minore linearità. All'aumentare della temperatura aumenta la resistenza.

### 4. Sensori di temperatura a giunzione semiconduttrice

Se in una giunzione PN polarizzata direttamente la corrente è mantenuta costante, la diminuzione di tensione è lineare nella temperatura su un range molto ampio. In altre parole, in un diodo, fermi i presupposti precedenti, **la tensione diminuisce in maniera lineare all'aumentare della temperatura.** Il difetto sta nella scarsa riproducibilità poiché non essendo espressamente progettato come trasduttore, ogni esemplare deve avere una taratura specifica.

### 5. Sensori di Temperatura Integrati .

**Es : AD590**

Esistono sul mercato dei dispositivi integrati che comprendono oltre al sensore a semiconduttore, degli appositi circuiti per amplificare il segnale fornito dal sensore e per linearizzarlo.

Il più noto è l'AD 590 della Analog Devices, il quale si comporta come un generatore di corrente ad alta resistenza.

Tale dispositivo va alimentato con una tensione fra 4 e 30 [ V ] e produce ai suoi poli una corrente che dipende linearmente dalla temperatura:

$$I = KT \quad \text{con } T \text{ in gradi Kelvin} \quad (\text{Transcaratteristica lineare})$$

$$K = 1 \quad [\mu\text{A} / ^\circ\text{K}] \quad (\text{SENSIBILITA'})$$

**Quindi la corrente in mA coincide numericamente, entro i limite di errore, con la temperatura in Kelvin.**

Il funzionamento in corrente presenta il vantaggio di rendere il sistema di misura insensibile alle cadute di tensione e permette quindi di tenere il sensore **lontano** dall'apparato di misura . Il segnale di uscita è inoltre indipendente da eventuali variazioni della tensione di alimentazione ( pila parzialmente scarica oppure alimentazione disturbata) .

Il contenitore metallico di tipo TO52 consente una elevata velocità di risposta (costante di tempo termica bassa: la costante di tempo termica è la costante di tempo dell'esponenziale che esprime l'andamento dell'uscita nel tempo quando la temperatura subisce una variazione a gradino).

# TRASDUTTORI FOTOELETTRICI

Trasformano le variazioni di intensità luminosa in grandezza elettrica e possono essere distinti in tre grandi gruppi :

## 1. Dispositivi fotoemissivi

Sono basati sull' **effetto fotoelettrico** propriamente detto : i quanti di luce colpiscono un catodo costituito da un **metallo a basso lavoro di estrazione** causando la **ionizzazione** di una certa percentuale degli atomi del metallo stesso.

**Gli elettroni liberati danno luogo ad una corrente proporzionale all'intensità luminosa incidente .**

A questo gruppo appartengono le **cellule fotoelettriche** ( usate in passato per la lettura delle colonne sonore nei cinema) e i **fotomoltiplicatori** usati in dispositivi specialistici come ad esempio per misure fotometriche in astronomia o per rivelare radiazioni nucleari.

## 2. Celle Fotovoltaiche

Il loro funzionamento è basato sul fatto che **esponendo alla luce una giunzione PN ( polarizzata inversamente) con gli estremi chiusi su un carico resistivo, in essa circola una corrente inversa, tanto più grande quanto più intensa è la luce incidente .**

Le cellule fotovoltaiche basate su tale fenomeno raramente vengono usate come trasduttori, sono però utilizzate per la conversione diretta di energia solare in energia elettrica tramite **batterie solari** che arrivano a un rendimento di conversione di oltre il 10% ( **batterie al silicio** ).

## 3. Elementi fotoconduttori

Per lo stesso principio delle celle fotovoltaiche ( illuminamento Giunzione PN ), **la conduttività di un materiale aumenta al crescere dell'intensità luminosa ( in altre parole la resistenza diminuisce al crescere dell'intensità luminosa ).** **Ciò avviene perché i fotoni incidenti cedono la propria energia ad alcuni elettroni riuscendo a liberarli dai legami covalenti.**

Questo fatto è usato nei fotosensori di più larga applicazione :

### • Fotoresistenze

**Sono dispositivi in cui l'informazione luminosa è tradotta in una variazione di resistenza.**

Sono costituite da materiale semiconduttore ( **CdS** ).

**Pregi** : Sono robuste, economiche e hanno un'elevata sensibilità : la loro resistenza varia da oltre un **1 [ M $\Omega$  ]** in oscurità a poche decine di  **$\Omega$**  a **1000 [ lux ]**.

**Difetti**: ha una **limitatissima banda passante ( tempi di risposta molto lenti )** infatti una fotoresistenza può impiegare tempi nell'ordine del **secondo** per ritornare al valore di oscurità e ciò preclude applicazioni "veloci".

Il rapporto resistenza/Illuminamento appare lineare in scala log-log. Quindi :

$$\text{Log}(R) = - a\text{Log}(L) + \text{Log}(k) \quad (a \text{ costante positiva, e } k \text{ resistenza a } 1 \text{ lux})$$

### • Fotodiodi

**Il loro funzionamento è basato sul fatto che esponendo alla luce una giunzione PN polarizzata inversamente, alla corrente inversa  $I_0$  tipica del diodo si somma una corrente  $I_L > 0$  che varia in maniera lineare con il flusso luminoso.**

Per tensioni inverse nell'ordine del volt la corrente nella giunzione è  **$I = - ( I_L + I_0 )$** .

I fotodiodi sono quindi diodi in cui la zona di giunzione è resa accessibile alla radiazione luminosa.

**Pregi** : sono piuttosto sensibili anche se i bassi valori di corrente richiedono opportuni circuiti di condizionamento e sono abbastanza veloci (possono essere utilizzati nei sistemi di trasmissione in fibra ottica).

### • Fototransistor.

Rappresentano un' evoluzione dei fotodiodi. Sono essenzialmente dei transistor a giunzione (BJT) polarizzati normalmente, ma con il circuito di base aperto la cui giunzione **BC ( base-collettore ) è esposta alla luce.**

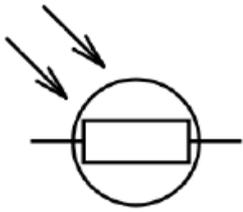
In tale giunzione, polarizzata inversamente ,si genera una corrente inversa analogamente a quanto avviene nei fotodiodi.

La sensibilità è molto elevata, la risposta in frequenza è buona e il rumore è minore di quello presentato da un fotodiode.

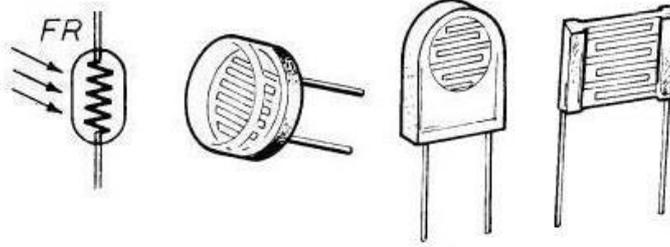
L'alta sensibilità consente al fototransistor di comandare direttamente dispositivi logici.

Sono spesso utilizzati nei sensori di posizione ( encoder )

## FOTORESISTENZE



Il simbolo di un fotoreistore



Un resistore dipendente dalla luce

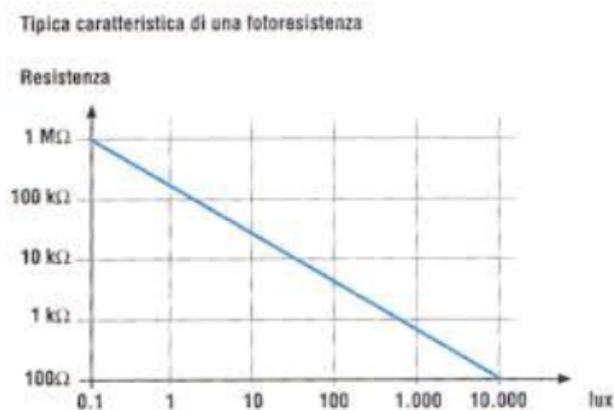


Componente interno ad un tipico lampione stradale americano

La fotoreistenza è un componente elettronico la cui resistenza è inversamente proporzionale alla quantità di luce che lo colpisce. Si comporta come un tradizionale resistore, ma il suo valore in ohm diminuisce mano a mano che aumenta l'intensità della luce che la colpisce. Ciò comporta che la corrente elettrica che transita attraverso tale componente è proporzionale all'intensità di una sorgente luminosa. In tale maniera si realizza una sorta di potenziometro attuabile tramite la luce anziché tramite forze meccaniche o segnali elettrici.

Questo componente è utilizzato anche per la realizzazione di crepuscolari (circuiti che permettono di accendere una o più luci al calare del sole).

Fondamentalmente essa è composta da materiale semiconduttore. L'energia radiante fornita ad un semiconduttore provoca la produzione di coppie elettrone-lacuna in eccesso rispetto a quelle generate termicamente che causa una diminuzione della resistenza elettrica del materiale (effetto fotoconduttivo). Quando la radiazione incidente viene interrotta i portatori di carica in eccesso si ricombinano riportando la conducibilità del semiconduttore al suo valore iniziale in condizioni di oscurità.

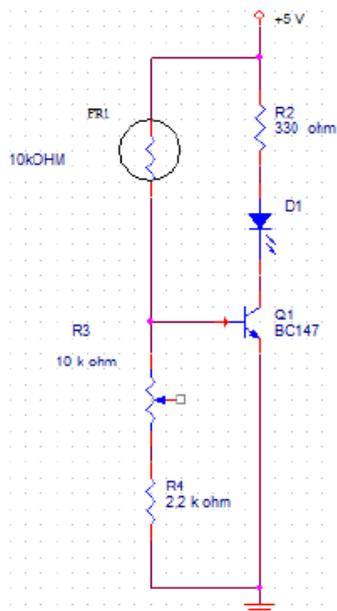
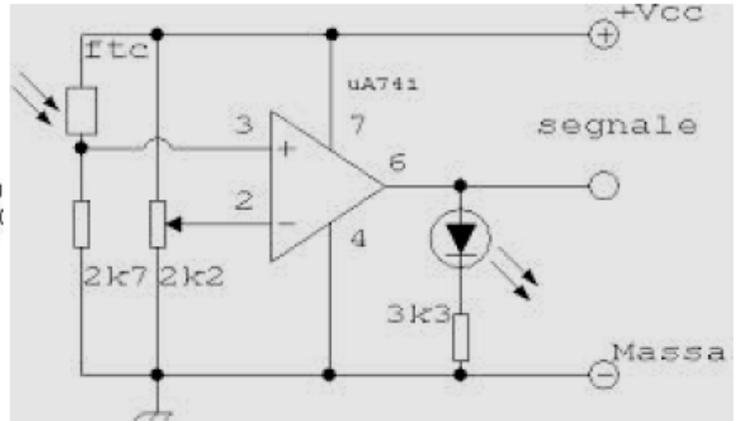
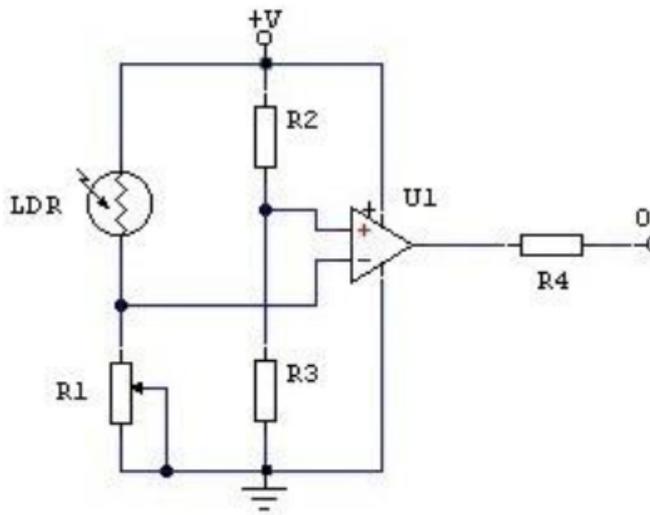


Caratteristica di una foto resistenza

## Applicazioni

Con un fotoresistore è possibile realizzare una sorta di potenziometro, attuabile tramite la luce anziché tramite forze meccaniche o segnali elettrici, che può essere integrato in dispositivi come radiosveglie, dispositivi d'allarme, lampioni stradali o, in generale, in dispositivi automatizzati per l'illuminazione.

### Interruttore crepuscolare



---=Elenco Componenti=---

FR1 = FOTORESISTENZA 10 K OHM

R1 = 390 OHM

R2 = 2,2 K OHM

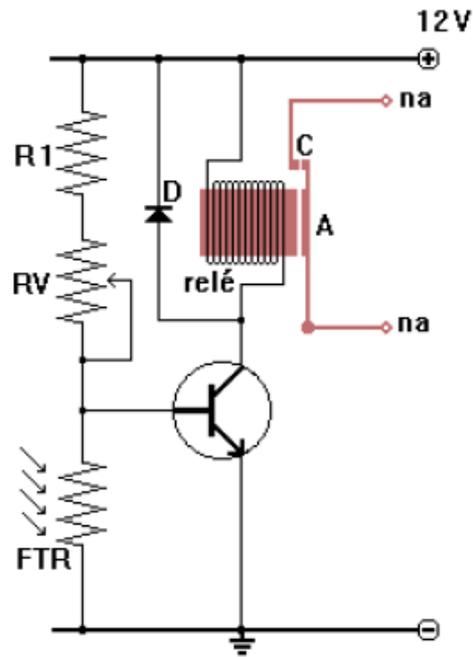
R3 = 10 K OHM ( TRIMMER )

R4 = 2,2 K OHM

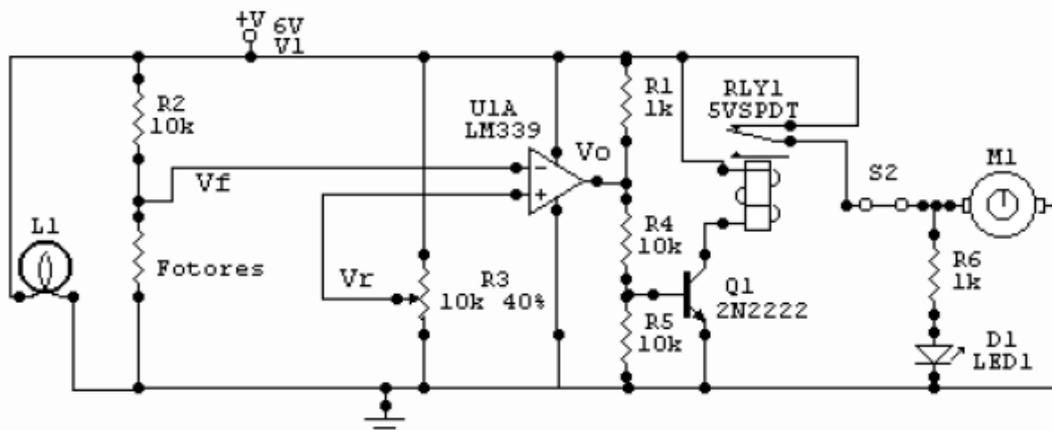
Q1 = BC147 TRANSISTOR

D1 = LED DIODE RED

Circuito per pilotare un carico ( ad alta tensione), con un relè



CIRCUITO PER PILOTARE UN MOTORE



La tensione  $V_f$ , quando la fotoresistenza viene illuminata tende a diminuire.

Quando la fotoresistenza è oscurata  $V_f > V_r$  e quindi  $V_o = L$  il relè è diseccitato, il motore gira.

Quando la fotoresistenza è illuminata dalla lampada,  $V_f$  diventa inferiore a  $V_r$ , e l'uscita  $V_o = H$  il relè si eccita ed il motore ss spegne.

## ESTENSIMETRI

Sono basati sul fatto che un conduttore ohmico di lunghezza  $L$  e sezione  $S$ , dove la resistenza è espressa dalla

$$2^{\circ} \text{ Legge di Ohm : } R = \rho * L / S$$

(dove  $\rho$  è la resistività del materiale in  $[\Omega * \text{mm}^2 / \text{m}]$ ), sottoposto a trazione,  $L$  aumenta e  $S$  diminuisce ed entrambe le variazioni fisiche contribuiscono ad aumentare la resistenza. L'opposto si verifica se il conduttore viene compresso. Nei limiti delle deformazioni elastiche, come espresse dalla legge di Hooke, le deformazioni sono proporzionali alle forze che li determinano.

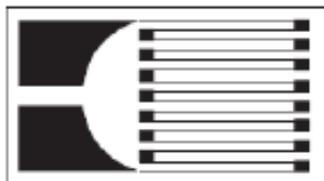
Gli estensimetri a semiconduttore hanno sensibilità maggiori, ma costi più elevati.

**Un difetto molto grave degli estensimetri soprattutto a semiconduttore è che la loro resistenza varia anche con la temperatura sia perché varia la resistività sia perché la stessa variazione di temperatura provoca deformazioni per dilatazione.**

### Estensimetro

Costruttivamente gli estensimetri metallici sono ricavati su di un supporto isolante su cui viene depositata una traccia di lega metallica (tipicamente nichel, nichel-cromo, manganina, costantana, platino) avente una forma a zig-zag per aumentare la deformazione complessiva. La dimensione tipica di un estensimetro è di circa 1 cm quadrato.

Gli estensimetri a semiconduttore sono invece costituiti di silicio opportunamente drogato. La sensibilità di questi sensori è molto più elevata e quindi forniscono un segnale molto più forte a parità di superficie utile. Per questo motivo gli estensimetri a semiconduttore sono estremamente piccoli (valori tipici sono dell'ordine di 0.5 mm). Di contro sono molto sensibili alla variazione di temperatura ambientale e sono di difficile manipolazione a causa della loro piccola dimensione.



Estensimetro per deformazioni lungo l'asse X

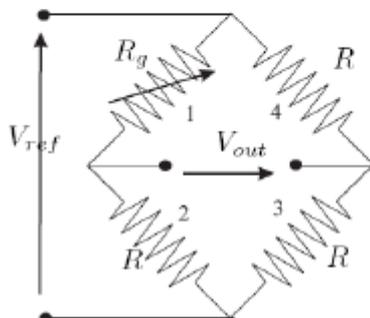


Estensimetro per deformazioni lungo l'asse X e l'asse Y

Per compensare le variazioni causate da temperatura è bene usarli in coppie montati **a ponte**, facendo in modo che uno solo sia soggetto a sollecitazione o che magari si deformino, ma in senso opposto.

## Estensimetro

L'acquisizione del segnale generato dall'estensimetro non è semplice, in quanto la sua entità, soprattutto per estensimetri metallici, è molto modesta. Nella quasi totalità dei casi si utilizza una configurazione a ponte di Wheatstone con le resistenze di riferimento 1,2,3 tutte di egual valore  $R$  e la resistenza di misura (l'estensimetro)  $R_g$ .



## Estensimetro

Risolviendo il circuito si ottiene:

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R}{2R} - \frac{R}{R + R_g} \right)$$

Se la resistenza di misura  $R_g$  a riposo ha una resistività pari a  $R$ , allora in assenza di deformazione il ponte è perfettamente bilanciato e quindi  $V_{out} = 0$ .

Quando si applica una forza deformante, la resistività dell'estensimetro si modifica di  $\Delta R$ , e quindi la tensione di uscita dal ponte diventa:

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{R}{2R} - \frac{R}{R + R + \Delta R} \right)$$

dopo pochi passaggi si verifica che:

$$V_{out} = V_{ref} \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}}$$

Se consideriamo che  $\Delta R/R \ll 1$  allora è possibile approssimare la caratteristica del sensore in:

$$V_{out} = V_{ref} \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

- **Celle di carico.**

Sono tipicamente dei **trasduttori di forza**. In pratica sono costituiti da ponti estensimetrici montati in strutture di metallo con caratteristiche di elasticità note e calibrate. La deformazione elastica, misurata dagli estensimetri, permette di risalire alla forza che l'ha determinata. Le celle di carico differiscono per forma, campo di forze misurato e sensibilità. Ogni singolo esemplare è accompagnato da un certificato di taratura (fondo scala, sovraccarico ammissibile, alimentazione, sensib. Nominale, Err.non.linear., err.offset, etc.).

- **Sensori di pressione.**

Sono basati sul principio del **barometro aneroide** : una camera sottovuoto è chiusa da una membrana flessibile. La membrana si flette a seconda della pressione che agisce sul lato esterno. La deformazione è rilevata dai dispositivi fissati sulla sua superficie. Nei modelli integrati la membrana è costituita da una piastrina di silicio su cui sono incastonate una o più celle estensimetriche a semiconduttore con disposizione solitamente a ponte. Esistono anche sensori di pressione differenziali in cui la membrana separa due camere sottoposte a pressioni diverse, quindi il segnale in uscita è proporzionale in valore e in segno alla differenza fra le due pressioni.

## FOTOMETRIA

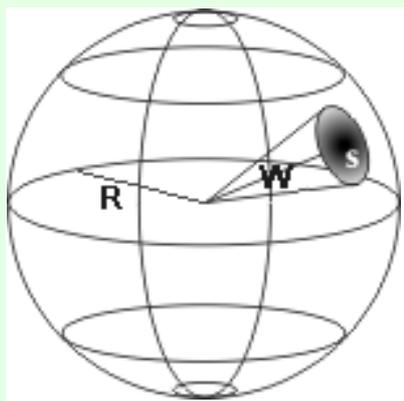
### Intensità luminosa

L'**intensità luminosa** è una grandezza fotometrica e [fisica](#) la cui [unità di misura](#) nel [Sistema Internazionale](#) è la [candela](#). L'intensità luminosa viene quantificata come candele in una data direzione, di una sorgente che emette **radiazione monocromatica di frequenza pari a 540 [THz] e lunghezza d'onda pari a  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 5,4 \cdot 10^{14} = 0,55$  [ $\mu\text{m}$ ] ( colore verde )** e con una intensità radiante in detta direzione di **1 / 683 watt** per [steradiano](#).

Lo **steradiano** (simbolo **sr**; nome derivante dal [Greco](#) *stereos*, solido) è l'[unità di misura](#) del [Sistema Internazionale](#) per l'[angolo solido](#), il corrispondente tridimensionale del [radiante](#).

Lo steradiano è definito come l'**angolo solido sotteso, al centro di una sfera di raggio  $r$ , da una porzione della superficie della sfera avente area  $r^2$**

Poiché l'area dell'intera sfera equivale a  $4\pi r^2$ , ne segue che l'angolo solido sotteso da tutta la sfera è pari a  $4\pi$  [sr]



Angolo solido W sotteso in una sfera di raggio R

L'intensità luminosa può anche essere considerata come il numero di fotoni che attraversa una sezione unitaria di un campione (che può essere anche il vuoto) nell'unità di tempo

### Candela

La **candela** (simbolo **cd**) è l'[unità di misura](#) dell'[intensità luminosa](#), definita come segue:

Una candela è pari all'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente emettente una [radiazione monocromatica di frequenza pari a 540 · 10<sup>12</sup> hertz](#) e di [intensità radiante](#) in quella direzione di 1/683 di [watt](#) per [steradiano](#).

### Illuminamento

L'**illuminamento** è una grandezza (detta fotometrica) risultato del rapporto tra il [flusso luminoso](#) (misurato in [lumen](#)) emesso da una [sorgente](#) e l'unità di superficie dell'oggetto illuminato - è quindi riferita all'oggetto illuminato e non alla sorgente. Si misura in **lux** .

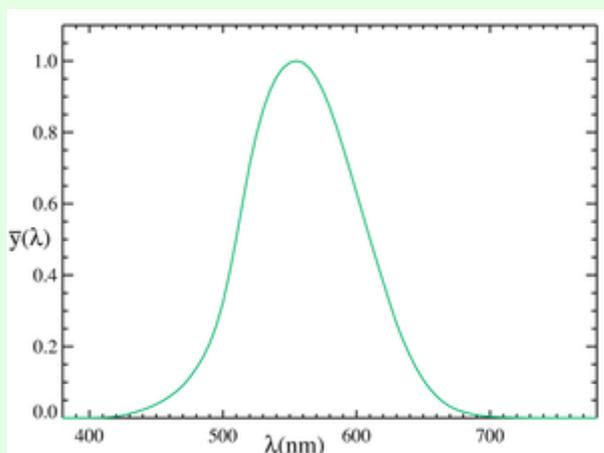
### Flusso luminoso

In [fotometria](#) si definisce la grandezza **flusso luminoso** come il **prodotto tra la potenza emessa da una sorgente luminosa puntiforme e il coefficiente di visibilità  $y(\lambda)$** , dove  $\lambda$  è la [lunghezza d'onda](#).

Il flusso luminoso si misura in [lumen](#).

Il coefficiente di visibilità è stato ottenuto statisticamente come il valore atteso o medio tra un certo numero di soggetti testati. Esso varia, come detto con la lunghezza d'onda tra la zona del violetto e quella del rosso ed è **massimo in corrispondenza della luce giallo-verde**.

La curva di visibilità possiede un andamento a campana ristretta.



**Sensibilità dell'occhio umano al variare della lunghezza d'onda (colore).** L'asse orizzontale è in [ nm]

**Se la sorgente luminosa, considerata puntiforme ,emette un watt di potenza, il flusso corrispondente alla lunghezza d'onda di visibilità massima (555 nanometri) è pari a 683 lumen**, in quanto vale l'azione del coefficiente di visibilità. Per le altre lunghezze d'onda vale il peso della curva  $y(\lambda)$  . Dal flusso luminoso derivano le altre grandezze fotometriche come l'[illuminamento](#), la [radianza](#) e l'[intensità luminosa](#). la quantità di energia può essere considerata secondo due fattori; il fattore di luce monocromatico o eterocromatico. il primo rileva un solo colore mentre il secondo rileva un insieme di più radiazioni con diverso valore di intensità.

### Lumen

Il **lumen**, in sigla **lm**, è l'unità di misura del [flusso luminoso](#).

Equivale al flusso luminoso rilevabile in un [angolo solido](#) di 1 [steradiano](#) emesso da una sorgente [isotropica](#) con [intensità luminosa](#) di 1 [candela](#).

Ne discende che la stessa sorgente [isotropica](#) con [intensità luminosa](#) di 1 [candela](#) emette un flusso luminoso totale di  $4\pi$  lumen.

### Lux

Il **lux** (simbolo **lx**) è l'[unità di misura](#) per l'[illuminamento](#) del [Sistema Internazionale](#). Un lux è pari a un [lumen](#) fratto un [metro](#) quadrato

# SPETTRO ELETTRROMAGNETICO

DENOMINAZIONE		SIGLA	FREQUENZA	LUNGHEZZA D'ONDA
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE		ELF	0 - 3kHz	> 100Km
FREQUENZE BASSISSIME		VLF	3 - 30kHz	100 - 10Km
RADIOFREQUENZE	FREQUENZE BASSE (ONDE LUNGHE)	LF	30 - 300kHz	10 - 1Km
	MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE)	MF	300kHz - 3MHz	1Km - 100m
	ALTE FREQUENZE	HF	3 - 30MHz	100 - 10m
	FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE)	VHF	30 - 300MHz	10 - 1m
MICROONDE	ONDE DECIMETRICHE	UHF	300MHz - 3GHz	1m - 10cm
	ONDE CENTIMETRICHE	SHF	3 - 30GHz	10 - 1cm
	ONDE MILLIMETRICHE	EHF	30 - 300GHz	1cm - 1mm
INFRAROSSO		IR	0,3 - 385THz	1000 - 0,78mm
LUCE VISIBILE			385 - 750THz	780 - 400nm
ULTRAVIOLETTO		UV	750 - 3000THz	400 - 100nm
RADIAZIONI IONIZZANTI		X	> 3000THz	< 100nm

