

8- Sensori e trasduttori

Lorenzo Sabattini

lorenzo.sabattini@unimore.it

0522 522666

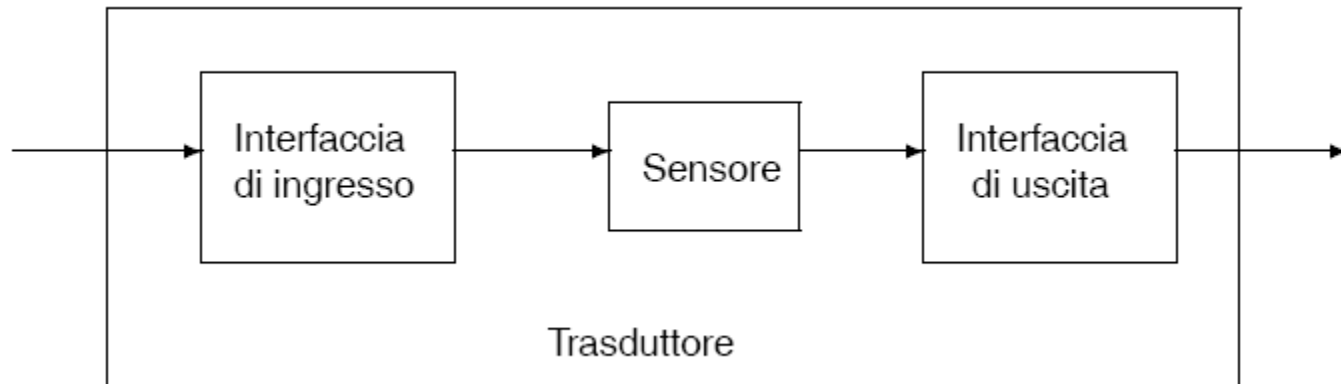
<http://www.arscontrol.org>

Sensori e Trasduttori

- I dispositivi di misura sono elementi **fondamentali** dei sistemi di controllo in retroazione
- Scelte inappropriate dei dispositivi, della loro localizzazione e della modalità di installazione possono influire molto negativamente sulle prestazioni del sistema di controllo
- È evidente l'importanza della precisione statica della misura:
 - non meno importante però è la sua **risposta dinamica**
- Ritardi e rumori di misura devono, per quanto possibile, essere minimizzati:
 - sia con l'attenta scelta delle caratteristiche intrinseche dello strumento,
 - sia mediante la sua localizzazione e installazione.

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. Quindi, 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 assumono un insieme discreto di valori (es. verso di rotazione di un motore, numero di pezzi lavorati al minuto, ecc...).

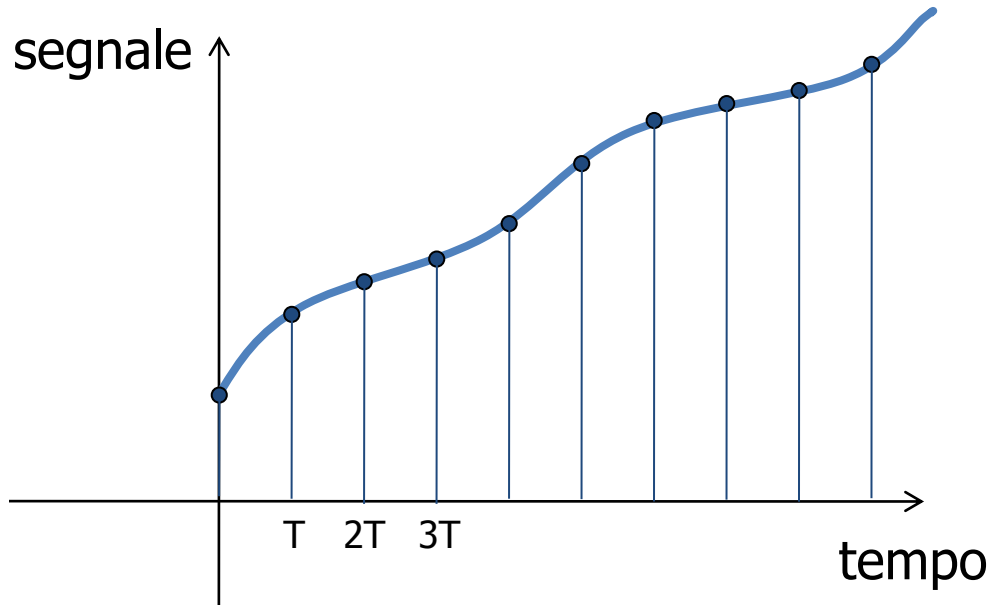
Le informazioni associate alle grandezze fisiche sono dette **segnali**:

- Le grandezze **continue** sono descritte da **Segnali analogici**.
- Le grandezze **discrete** sono descritte da **Segnali codificati** oppure da **Segnali logici**.

Acquisizione del Segnale

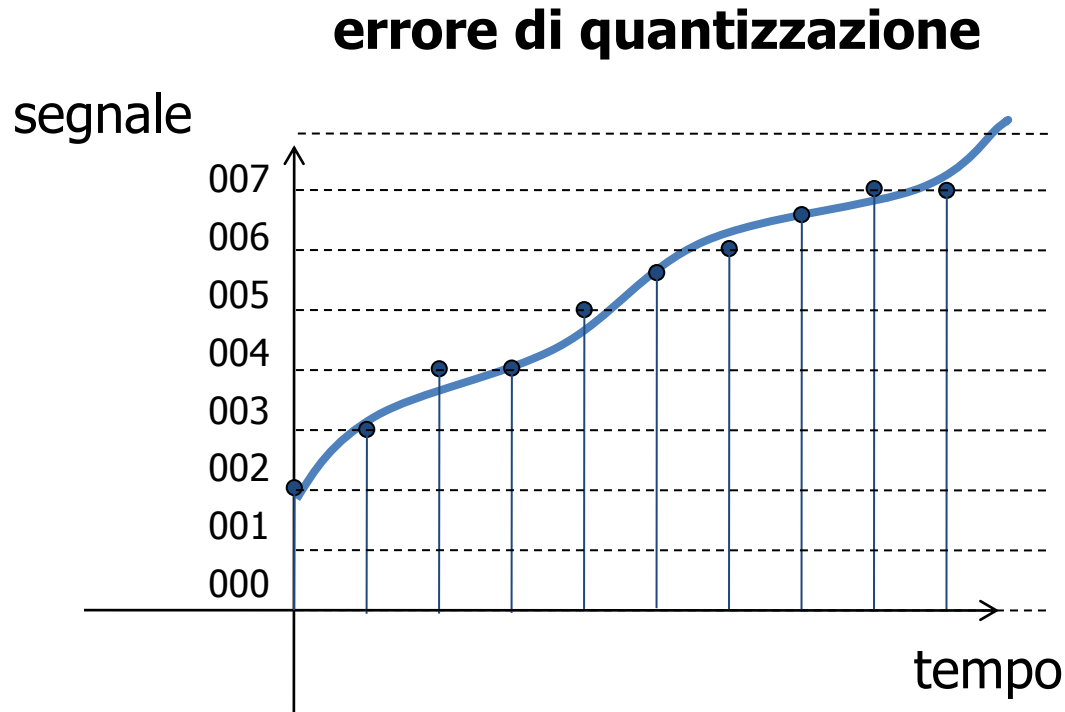
- Il segnale analogico ha la caratteristica di essere continuo nel tempo ed assumere valori continui all'interno di un certo intervallo.
- Il calcolatore impiega un certo intervallo di tempo per elaborare i segnali di ingresso, e quindi **non può seguire l'evolversi continuo del segnale analogico**, ma dovrà acquisire campioni del segnale analogico ad istanti discreti di tempo. Questa operazione viene detta **campionamento del segnale**.
- Il segnale campionato ancora non può essere elaborato dal calcolatore in quanto tale segnale assume **valori continui**, e quindi **teoricamente infiniti**, mentre **il calcolatore può rappresentare un numero finito di valori** in base alla massima dimensione di parola rappresentabile dall'unità aritmetica.
- Occorre quindi eseguire un'operazione di **quantizzazione** sul segnale campionato in modo che questo possa venire rappresentato dall'aritmetica del calcolatore.

Acquisizione del Segnale



Se la frequenza di campionamento rispetta il Teorema di Shannon, il segnale è tempo continuo è ancora ricostruibile

Acquisizione del Segnale



- L'operazione di campionamento non produce, in via teorica, un degrado dell'informazione associata al segnale (se si rispettano le condizioni del teorema del campionamento).
- Invece, **l'operazione di quantizzazione comporta inevitabilmente una riduzione del contenuto informativo.**

Acquisizione del Segnale

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

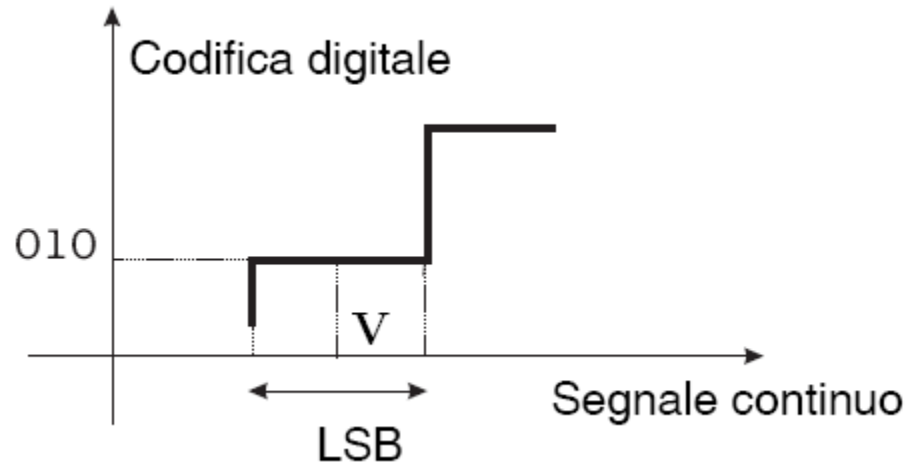
- Se rappresentiamo il valore continuo del segnale d'uscita del trasduttore Y mediante **una codifica binaria a N bit**, ogni bit corrisponde ad un valore (detto **LSB, least significant bit**) pari a:

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

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

Acquisizione del Segnale

- A causa della quantizzazione, tutti i valori di Y compresi nell'interno di un LSB sono rappresentati da un'unica codifica digitale Y_d .
- Quindi, **l'errore massimo** commesso prendendo il valore quantizzato Y_d del segnale al posto del suo valore continuo Y é pari a **metà LSB**.



$$e_q \leq \frac{1}{2} LSB$$

$$Y_q = Y \pm e_q$$

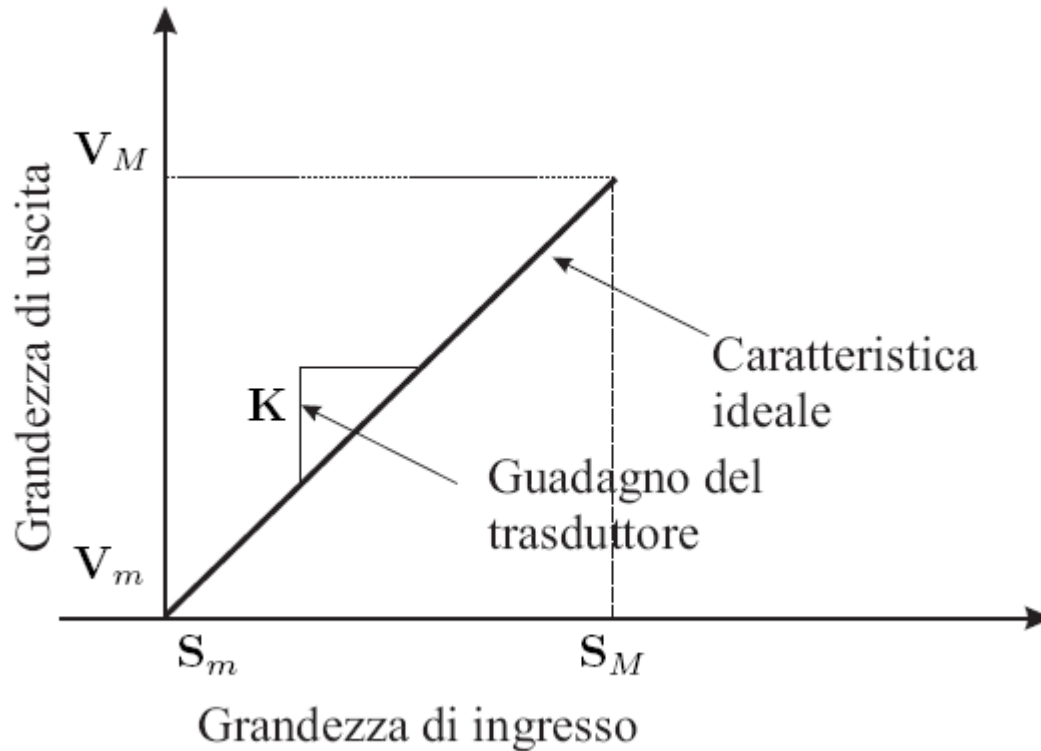
- L'errore di quantizzazione si può modellare come un disturbo limitato sull'anello di retroazione.
- Tale disturbo va eventualmente considerato nel progetto dell'algoritmo di controllo

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: la variabile di uscita introduce quindi 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.
- **Dipendenza da variabili ambientali:**
 - Il trasduttore è progettato per rilevare una certa grandezza fisica. Tuttavia, risulta molto difficile costruire un dispositivo selettivo che non risulti influenzato da altre grandezze fisiche.
 - Ad esempio la temperatura influenza le caratteristiche fisiche di quasi tutti i materiali, ed in particolare quelli a semiconduttore.
- **Affidabilità:**
 - L'affidabilità del trasduttore è di fondamentale importanza per il corretto funzionamento del sistema di controllo.
 - L'affidabilità si misura in senso statistico fornendo il tempo medio che precede un guasto del dispositivo (Mean Time Between Failure MTBF).

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



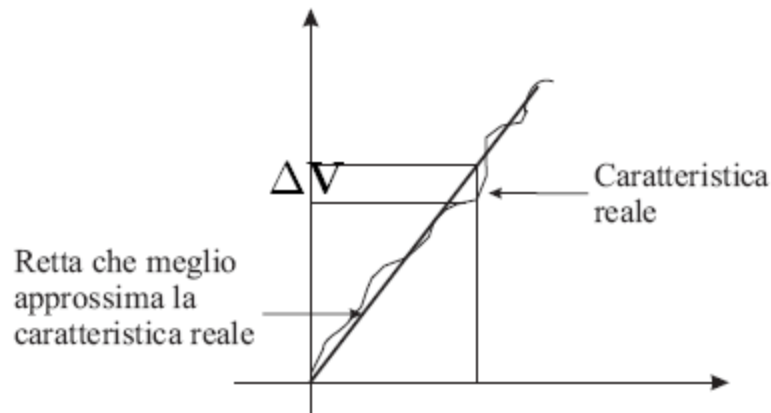
Errori sulla caratteristica statica

- 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 ΔV é 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 reale del trasduttore. È solitamente espresso in percentuale:

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

- **Risoluzione:** È la massima variazione dell'ingresso che non dà luogo a nessuna variazione dell'uscita.

$$e_R \% = \frac{\Delta V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} 100$$

Precisione e Accuratezza

- **Precisione (precision, repeatability):**

- È una misura di quanto l'uscita del sensore si mantiene costante su esperimenti ripetuti nelle stesse condizioni.
- In sostanza, può accadere che ripetendo lo stesso esperimento più volte il sensore non fornisca l'identico risultato.
- La ripetibilità di un sensore è in genere indicata fornendo un intervallo di errore massimo (\pm errore) oppure una percentuale di errore rispetto al campo di uscita:

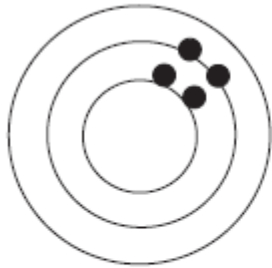
$$e_p \% = \frac{|e_{MAX}|}{V_M - V_m} 100$$

- **Accuratezza (Accuracy):**

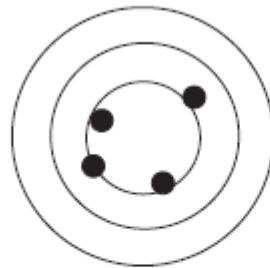
- È una misura di quanto l'uscita del trasduttore si scosta da quello che dovrebbe essere la sua uscita ideale, cioè quell'uscita che avrebbe un trasduttore ideale che misurasse la stessa grandezza di quello reale.

$$e_A \% = \frac{\text{errore}}{\text{valore vero}} 100$$

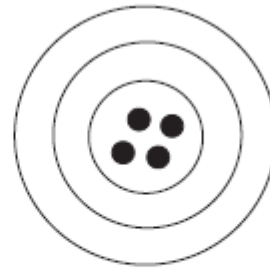
Precisione e Accuratezza



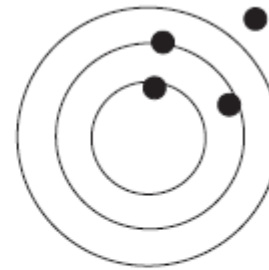
Preciso
non accurato



Non preciso
accurato



Preciso
accurato

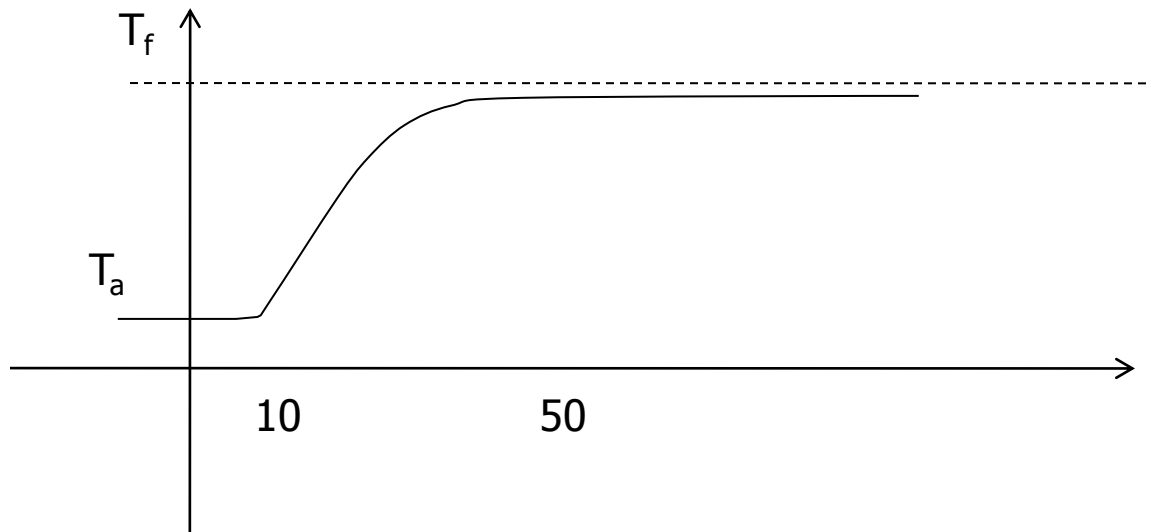


Non preciso
non accurato

Nell'ambito dei controlli, la precisione finisce di solito con l'essere più importante dell'accuratezza, considerando che questa comporta costi maggiori

Caratteristica Dinamica

Il trasduttore è un sistema fisico, che ha quindi un **comportamento dinamico** che si evidenzia quando la sua grandezza di ingresso varia rapidamente.

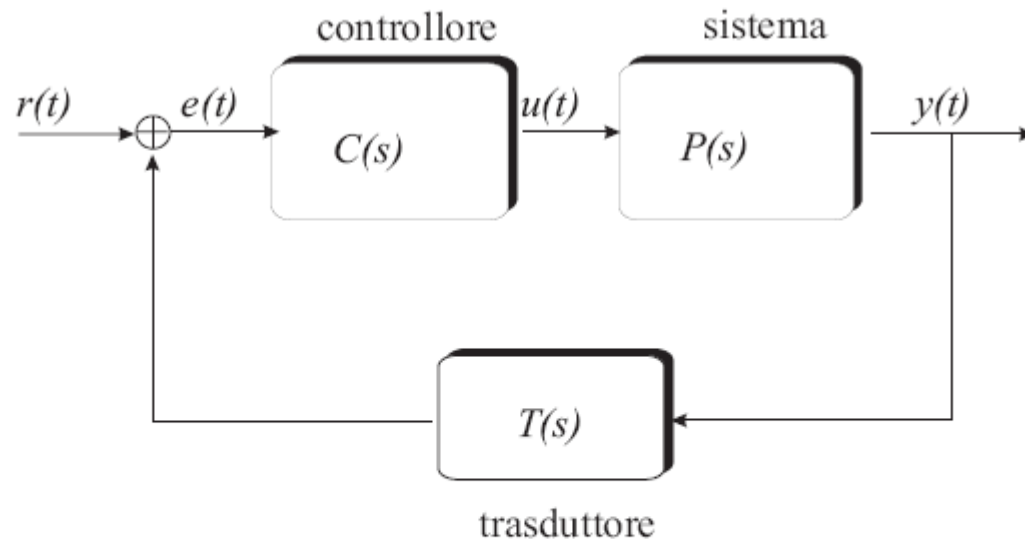


Risposta di una termocoppia a temperatura T_a immersa in un fluido a temperatura T_f

In questo esempio, 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.

Caratteristica Dinamica

- Un sensore può essere descritto da una funzione di trasferimento $F(s)$
- Tipicamente i costruttori si limitano a fornire solo alcuni elementi caratteristici qualificanti della $F(s)$, come la banda passante, il tempo di risposta ed eventuali risonanze
- La dinamica del sensore spesso è trascurabile rispetto a quella del processo **ma in alcuni casi può avere un'influenza rilevante sul comportamento complessivo dell'anello di controllo**
- La velocità di risposta è quindi un elemento da valutare attentamente nella scelta, nella localizzazione e nell'installazione di un sensore per un anello di controllo di prestazioni elevate.

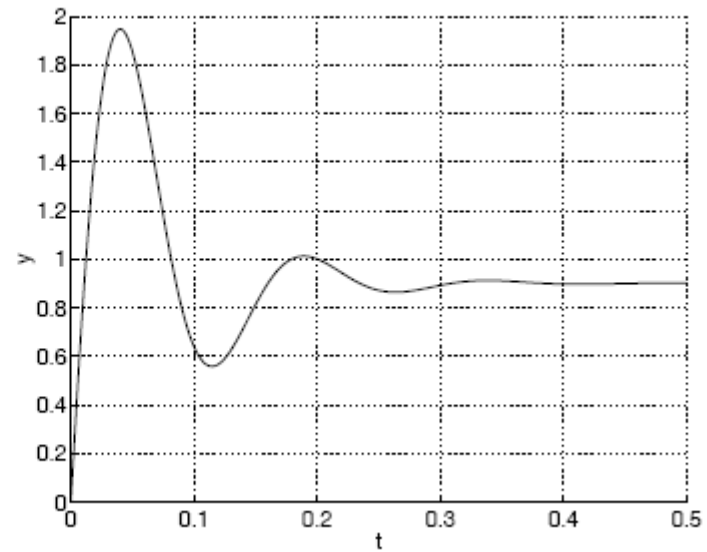
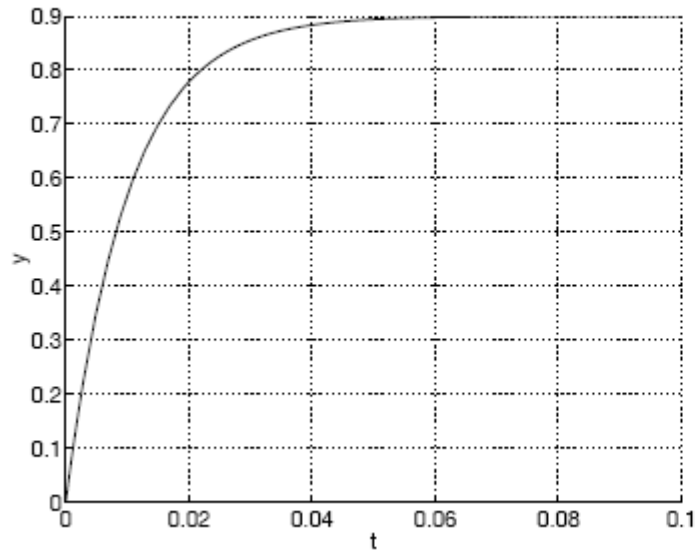


$$P(s) = \frac{1}{1 + 0.1s}$$

- Si consideri un controllore $u(t) = Ke(t)$ che consenta di controllare il tempo d'assestamento del sistema nel caso ideale $T(s) = 1$.
- Si consideri poi il comportamento del sistema quando il trasduttore ha una dinamica del primo ordine, con una costante di tempo pari alla metà della costante di tempo del sistema.

Caratteristica Dinamica

Risposta del sistema ipotizzata in fase di progetto (sinistra) e reale (destra):



Criteri per la scelta di un sensore

- Il campo, o range (es.: 200-600 °C) e l'intervallo, o span (es.: 400°C) di misura
 - L'accuratezza, la precisione e la risoluzione desiderate
 - Le caratteristiche dinamiche
 - Il livello di affidabilità (es.: in termini di MTBF)
 - I costi (di acquisto, installazione e manutenzione)
 - I problemi particolari di installazione e pericolosità
 - Il materiale di costruzione
-
- Altri criteri di scelta sono poi specifici per i particolari tipi di sensore che si desidera scegliere.

Criteri per la scelta di un sensore

Il campo di misura e la risoluzione complessiva sulla misura si influenzano mutuamente, a causa della conversione digitale del segnale fornito dal sensore

Esempio: Termocoppia

Campo di misura	Bit di conversione	Risoluzione
0-1000 °C	12 (0-4095)	0.25 °C
0-100 °C	12 (0-4095)	0.025 °C

N.B.: Non è sempre consigliabile scegliere il sensore con il massimo campo di misura, in quanto ciò potrebbe comportare una degradazione della risoluzione e, di conseguenza, un aumento del rumore di quantizzazione

Esempio di DataSheet di un sensore

- Giroscopio della Analog Devices Inc.

[AD_Gyroscope.pdf](#)

- È possibile scaricare i datasheet di sensori dai siti dei produttori principali (es.: www.analog.com).

Principi fisici utilizzati per i sensori

- I sensori basano il proprio funzionamento sulle leggi naturali che regolano il rapporto fra le grandezze fisiche.
- Quindi, per poter progettare un sensore che riveli una certa grandezza fisica, occorre conoscere la natura fisica che regola il rapporto tra tale grandezza e la grandezza di uscita del sensore.

Principi Fisici utilizzati per i sensori

- **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 ρ 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:

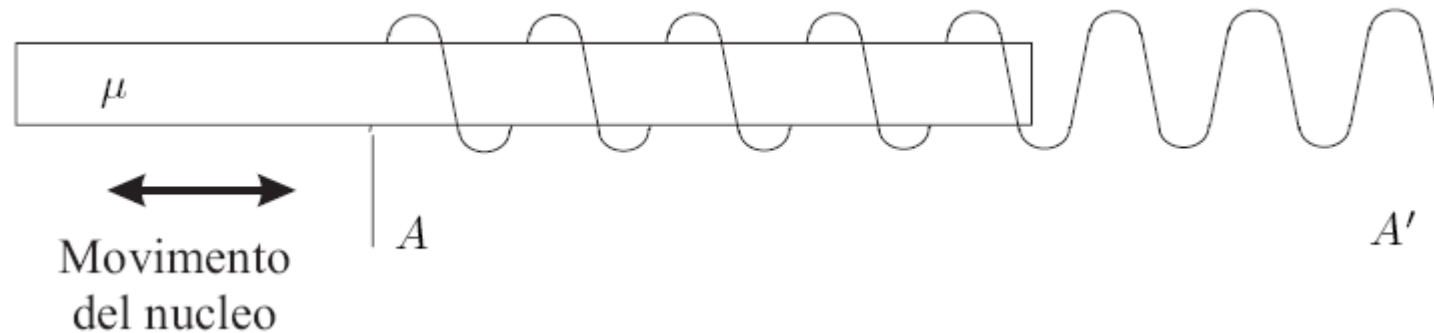
- variazione di geometria: prodotta da contatti striscianti (potenziometri) o forze deformanti (estensimetri).
 - variazioni di temperatura (termistori).
 - illuminazione (fotoresistori).
-
- **Sensori di Tipo Induttivo:** Questi sensori si dividono in due categorie:
 - Singolo Avvolgimento
 - Trasformatore

Sensori induttivi a singolo avvolgimento

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

$$L_s = \mu FN^2$$

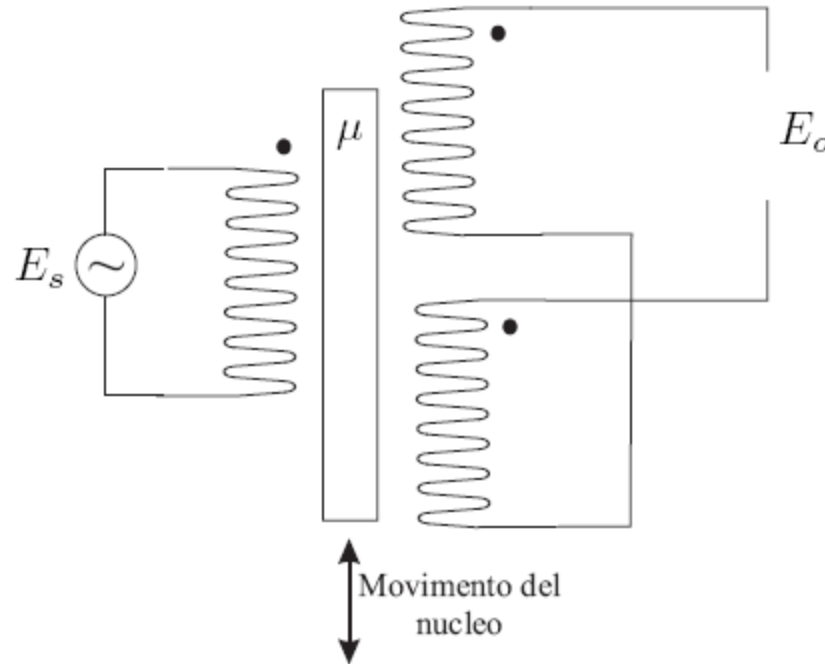
dove μ è la permeabilità magnetica del nucleo su cui si avvolgono le spire, F è una costante che dipende dalla geometria e N è il numero di spire.



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



Principi Fisici utilizzati per i sensori

Sensori di Tipo Capacitivo:

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

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

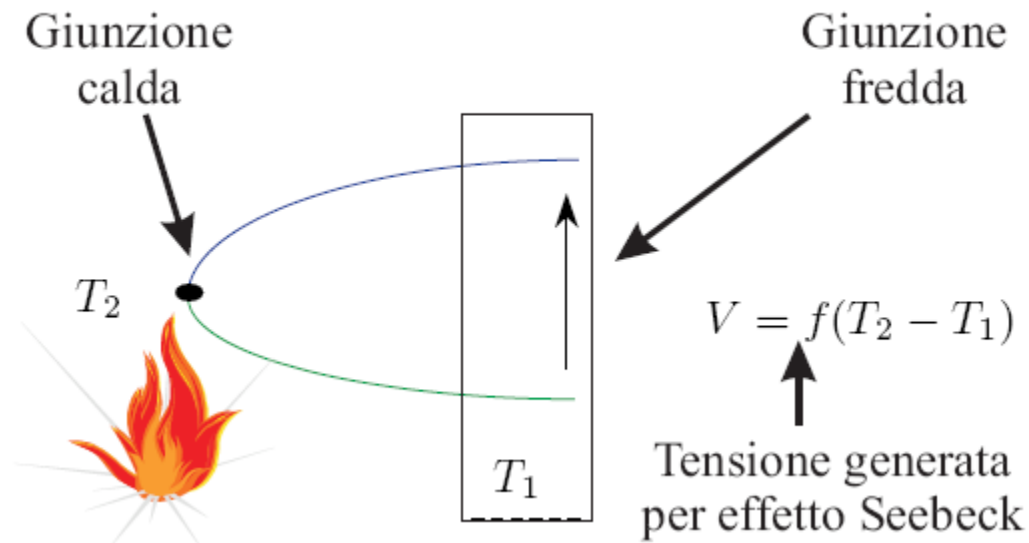
dove ε è la costante dielettrica, A l'area delle facce e d la distanza tra le due facce.

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

Principi Fisici utilizzati per i sensori

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**)

Principi Fisici utilizzati per i sensori

Sensori ad effetto Hall:

- Quando un campo magnetico viene applicato perpendicolarmente ad una superficie conduttrice percorsa da 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:

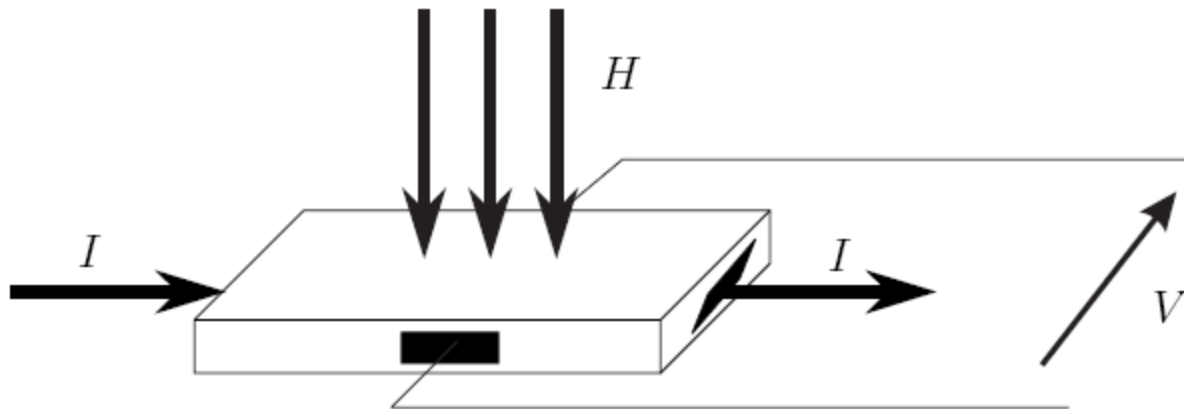
$$V = K \cdot |\vec{H}| \cdot |\vec{I}| \cdot \sin(\varphi)$$

dove H e I rappresentano il campo magnetico e la corrente, mentre ϕ 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.

Principi Fisici utilizzati per i sensori

Sensori ad effetto Hall:



Principi Fisici utilizzati per i sensori

- **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.

Esempi di sensori per l'acquisizione di segnali

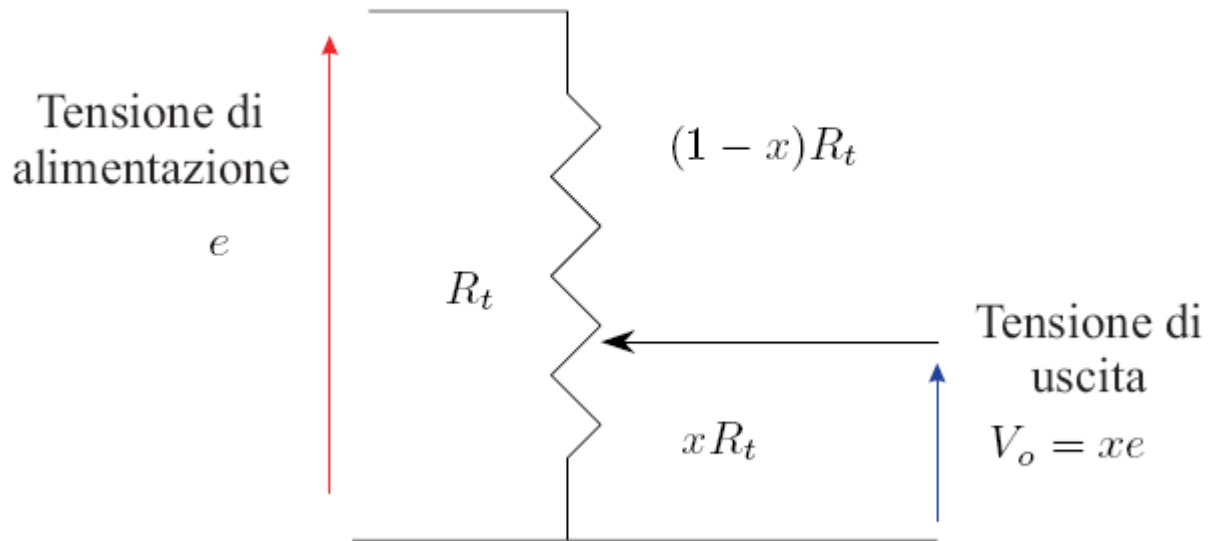
- **Sensori per grandezze meccaniche**
 - Posizioni: Potenzometro, Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT), Resolver, Encoder
 - Velocità: Dinamo Tachimetrica
 - Deformazione, forza e pressione: estensimetro, cella di carico.
 - Accelerazione: accelerometri
- **Sensori di temperatura**
 - Termocoppia e termoresistenza
- **Sensori di corrente**
 - Sensore di corrente isolato ad effetto Hall
- **Sensori di prossimità**
 - Contatto Reed, effetto Hall, induttivi, capacitivi, a ultrasuoni, optoelettronici

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”:
 - 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: pertanto l'azione meccanica (la grandezza da misurare) agisce modulando in uscita la tensione di alimentazione.

Potenziometro

$$V_o = e \frac{xR_t}{(1-x)R_t + xR_t} = ex$$



Potenziometro

- **Tecnologia:**
 - Potenzometro a filo: l'elemento resistivo è normalmente costituito da un filo di leghe a base di Nichel–Cromo.
 - Potenzometro a film: l'elemento resistivo viene realizzato per deposito di un materiale metallico su un supporto di plastica, oppure utilizzando un particolare materiale ceramico conduttivo detto Cermet.
- **Risoluzione:**
 - Nei potenziometri a filo dipende dal numero e dalla spaziatura delle spire;
 - Nei potenziometri a film la risoluzione è limitata dalla granularità residua del film e dalle incertezze del contatto.
- **Linearità:** < 0.1%
- **Resistenza totale:** da 10^3 a 10^5 Ω per il sensore a filo; da 10^3 a 10^6 per il potenziometro a film.
- **Ampiezza campo di misura:** da 1 a 10 giri.
- **Coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura:** da 10 a 1000ppm/°C

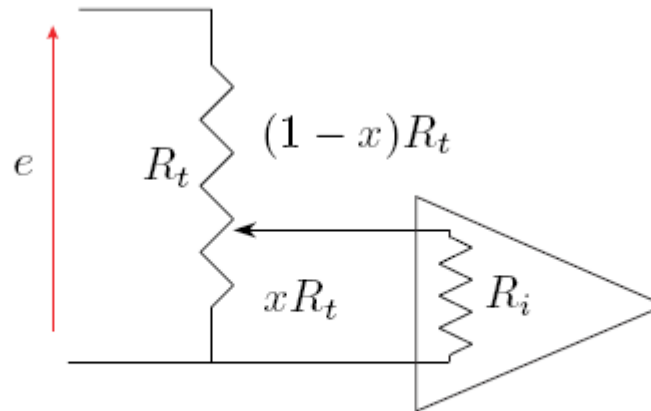
Problemi di interfacciamento di un potenziometro

- 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.

Problemi di interfacciamento di un 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.



$$V_o = e \frac{x R_t R_i}{(1-x) R_t R_i + (1-x) x R_t^2 + x R_t R_i} \stackrel{\lim_{R_i \rightarrow \infty}}{=} ex$$

Potenziometro

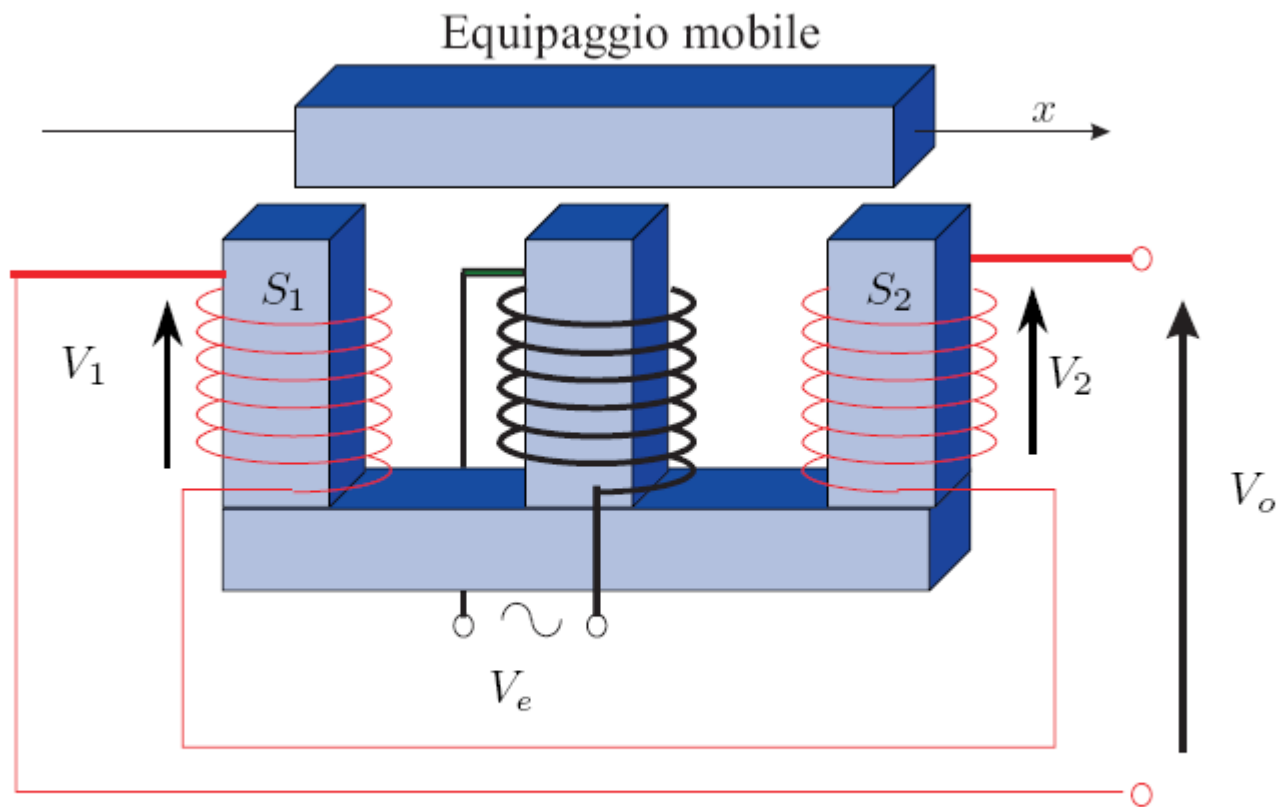
- È possibile concludere che il potenziometro è un dispositivo economico ma poco affidabile, a causa del contatto strisciante che può deteriorarsi e risentire di vibrazioni e shock meccanici.
- È scarsamente utilizzato nelle macchine automatiche per misurare posizioni di parti importanti o critiche, mentre è spesso utilizzato come generatore di “setpoint” negli anelli di controllo.
 - In questo caso al cursore, che viene azionato dall’operatore di impianto, è associata una scala numerata che indica approssimativamente all’operatore il valore corrente del set-point.

Esempio: [**AD5174**](#)

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 trasformatore, 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_o delle due tensioni consente di rilevare la posizione del cursore ed è l'uscita del sensore.

Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)



Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)

Il segnale di uscita è una tensione alternata caratterizzata da:

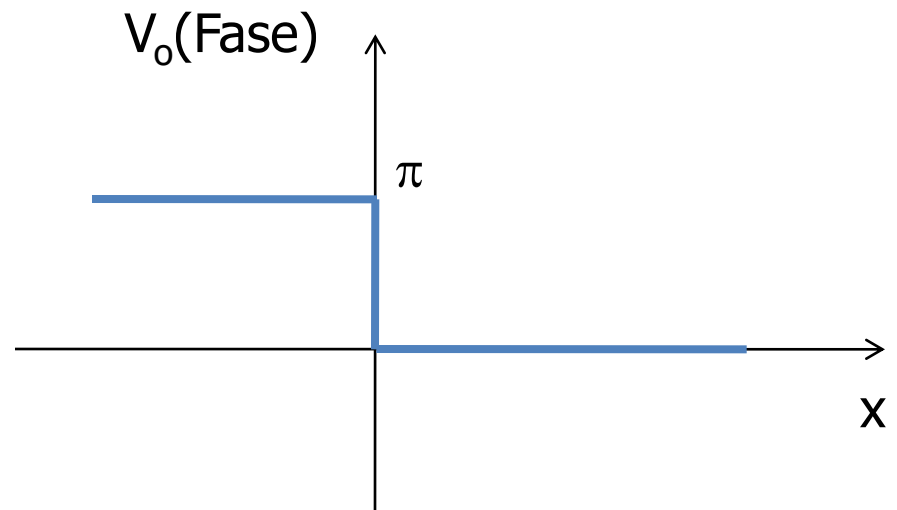
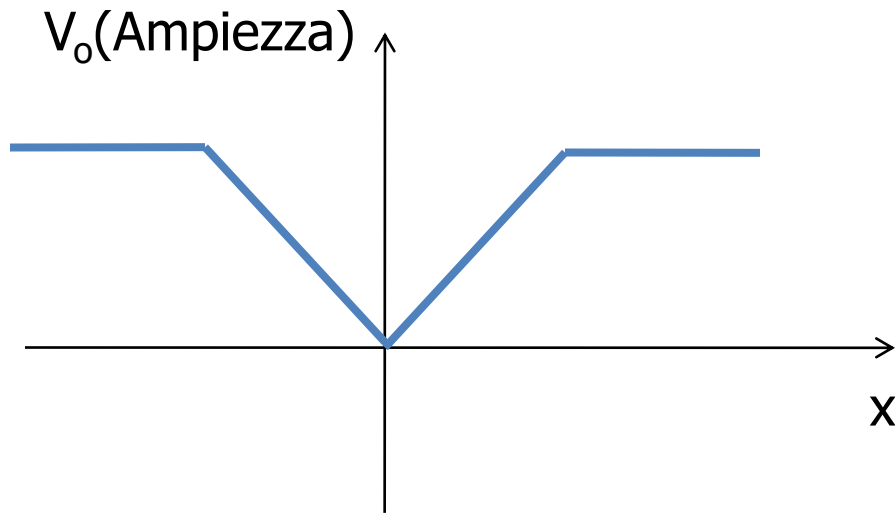
- Una **pulsazione** pari a quella del segnale applicato al circuito primario (detto portante).
- Una **ampiezza** dipendente dalla posizione dell'equipaggio mobile,

$$V_o = (V_2 - V_1) = V_m (X) \sin (\omega t + \varphi)$$

- Una **fase** concorde o in opposizione rispetto alla portante in funzione del segno dello spostamento.

$$\varphi = \begin{cases} 0 & \text{se } x \geq 0 \\ \pi & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)



Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)

- **Risoluzione:** da 2 a 20 μm per sensori lineari; da 10^{-5} a 10^{-4} rad per sensori rotativi
- **Sensibilità:** da 50 a 100 mVo/(mmVe).
- **Linearità:** da 0.1 a 0.5%
- **Ampiezza del campo di misura:** da 1 a 10 cm per sensori lineari; $\pm 45^\circ$ per sensori rotativi. I modelli a più elevata risoluzione hanno un campo di misura ridotto.
- **Frequenza di eccitazione:** da 1 a 50 Khz

L'elettronica di interfacciamento deve essere progettata con cura!

- Infatti il segnale di uscita è modulato in ampiezza, e quindi occorre un circuito che ricavi il valore di cresta di una sinusoide e che ne rilevi la fase rispetto alla portante.
- Esiste un dispositivo elettronico denominato **LVDT-to-Digital Converter** che estrae ampiezza e fase del segnale del trasformatore differenziale effettuandone anche il campionamento e la conversione in formato digitale.
- Inoltre è necessario garantire una buona stabilità del generatore di riferimento.

Il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)

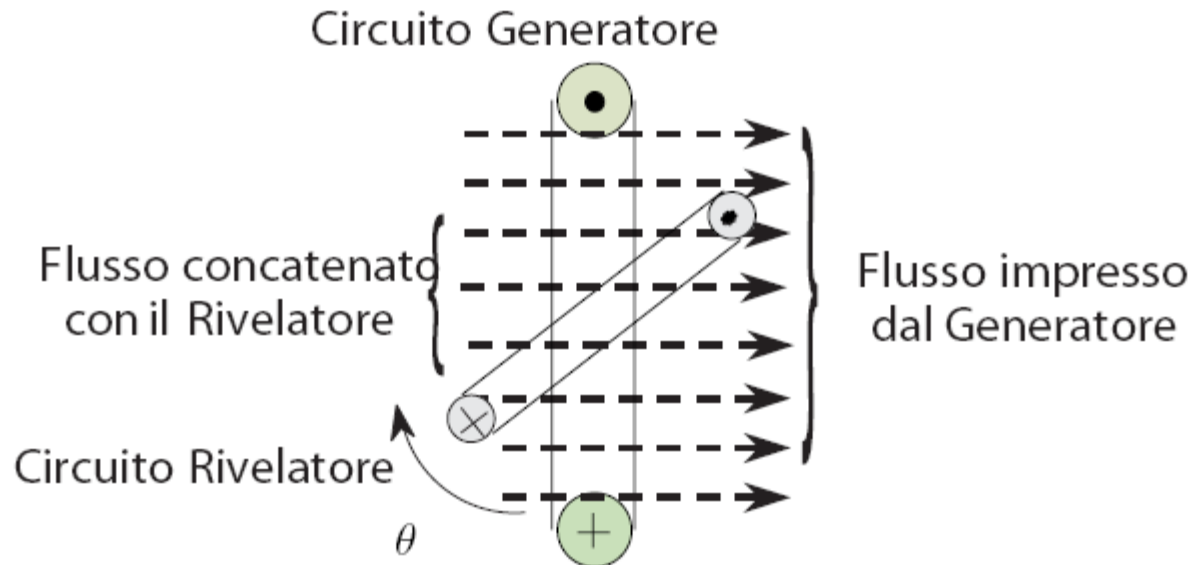
Applicazioni:

- Nelle applicazioni dove la risoluzione e la linearità sono più importanti dell'ampiezza del campo di misura.
- È un sensore affidabile e ripetibile.
- Il suo costo è però abbastanza elevato.
- Richiede una circuiteria aggiuntiva di alimentazione e soprattutto di demodulazione abbastanza costosa.

Esempio: [AD598](#)

Resolver

Sensore di posizione che si basa sulla variazione dell'accoppiamento (trasformatorio) tra due sistemi di avvolgimenti elettrici ruotanti l'uno rispetto all'altro:



Il primo sistema (il sistema **Generatore**) genera un flusso magnetico che si accoppia con il secondo sistema (il sistema **Rivelatore**) creando una tensione indotta che dipende dalla posizione relativa dei due sistemi.

Resolver

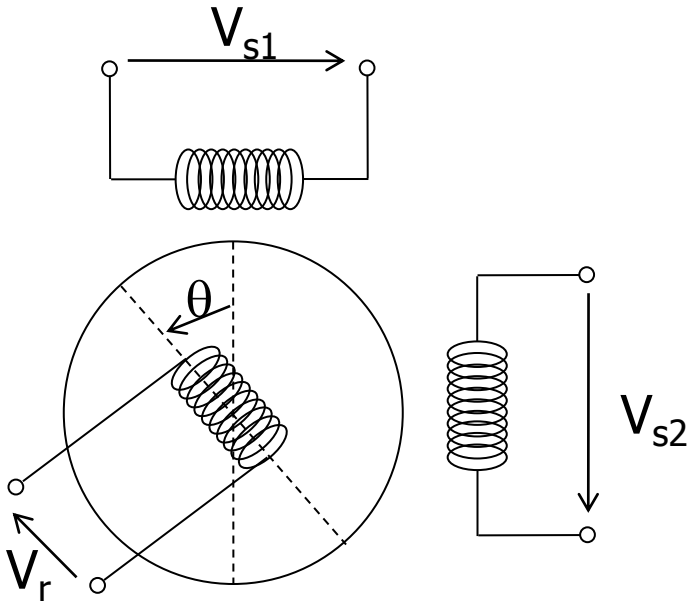
Tensione generatore

$$V_r = V_m \sin(\omega t)$$

Tensioni Indotte

$$V_{s1} = KV_r \cos \theta = KV_M \sin(\omega t) \cos \theta$$

$$V_{s2} = KV_r \sin \theta = KV_M \sin(\omega t) \sin \theta$$

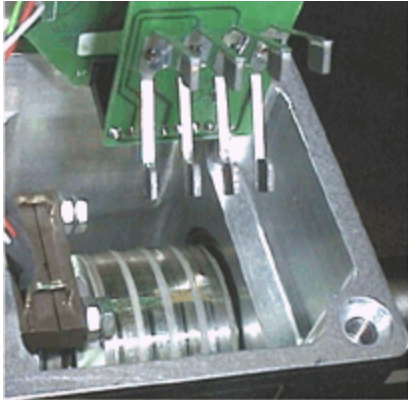


dove θ è l'angolo relativo tra il circuito di rotore e quello di statore e K è una costante di proporzionalità dipendente da parametri costruttivi del sensore.
Le due tensioni di uscita risultano pertanto modulate sinusoidalmente con la posizione ed in quadratura tra loro.

Resolver

L'avvolgimento rotorico viene eccitato con una tensione alternata generata con l'impiego di contatti rotanti striscianti (slip-rings) oppure con un trasformatore rotante

- **slip ring**



+ economici

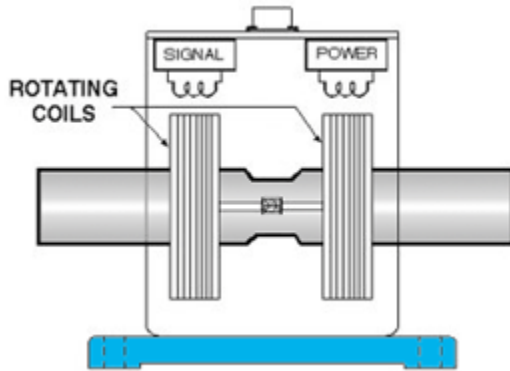
- le spazzole (e anche gli anelli) si usurano e hanno vita breve

- Le spazzole inducono un disturbo nella trasmissione della tensione che deteriora la misura

Un gruppo di anelli di materiale conduttivo ruotano solidali con l'avvolgimento rotorico e una serie di spazzole in contatto con gli anelli trasmette la tensione all'avvolgimento

Resolver

- **Trasformatore Rotante**



- + Nessuna usura meccanica
- + Nessun disturbo meccanico
- Costo più elevato degli slip-ring

La tensione è trasmessa mediante un trasformatore di cui un avvolgimento è l'avvolgimento rotorico

Resolver

Il sensore fornisce come segnale di uscita una coppia di tensioni alternate caratterizzate da:

- pulsazione pari a quella del segnale applicato al circuito primario;
- ampiezza dipendente dalla posizione del rotore ed in quadratura reciproca;
- fase concorde rispetto alla tensione impressa sul primario.

N.B.: Grazie alla presenza dei due circuiti di statore sfasati di 90° , il resolver fornisce la **posizione assoluta** dell'asse rotante all'interno di un giro.

Disturbi dovuti alla velocità di rotazione

- Il Resolver è usato molto frequentemente per rilevare la posizione del rotore negli azionamenti con motori Brushless, e quindi deve funzionare correttamente a velocità di rotazione molto elevate.
- Purtroppo la velocità di rotazione produce l'insorgere di tensioni spurie che si traducono in errori di misura.
- Esempio, supponiamo che:
 - Il motore ruoti a velocità costante: $\theta(t) = \theta_0 + \alpha t$
 - I circuiti di rotore e di statore siano puramente induttivi.
 - La tensione di rotore sia $V_r = V_M \sin(\omega t)$.

Disturbi dovuti alla velocità di rotazione

- Su di un circuito elettrico in movimento rispetto alle linee di flusso ϕ di campo magnetico, si viene ad imprimere una tensione v secondo la legge $v=d\phi/dt$.

- Il flusso di eccitazione vale

$$\varphi_r = -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t)$$

- I flussi concatenati valgono

$$\varphi_{cs1} = -\frac{K}{\omega} V_M \cos(\omega t) \cos(\theta_0 + \alpha t)$$

$$\varphi_{cs2} = -\frac{K}{\omega} V_M \cos(\omega t) \sin(\theta_0 + \alpha t)$$

Disturbi dovuti alla velocità di rotazione

Tensioni Spurie

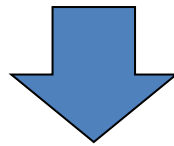
La tensione indotta sui circuiti secondari:

$$V_{s1} = \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} = KV_M \sin(\omega t) \cos(\theta_0 + \alpha t) + \frac{K\alpha}{\omega} V_M \cos(\omega t) \sin(\theta_0 + \alpha t)$$
$$V_{s2} = \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} = KV_M \sin(\omega t) \sin(\theta_0 + \alpha t) + \frac{K\alpha}{\omega} V_M \cos(\omega t) \cos(\theta_0 + \alpha t)$$

- Le tensioni ai due avvolgimenti di statore contengono due termini:
 - Il primo corrisponde al termine utile
 - Il secondo costituisce l'errore dinamico, in quanto la sua ampiezza è proporzionale alla velocità di rotazione del circuito secondario.
- Inoltre, come si può notare dalle precedenti relazioni, l'errore dinamico è un segnale sinusoidale sfasato in quadratura rispetto al segnale portante.

Disturbi dovuti alla velocità di rotazione

L'errore dinamico è inversamente proporzionale alla pulsazione della portante

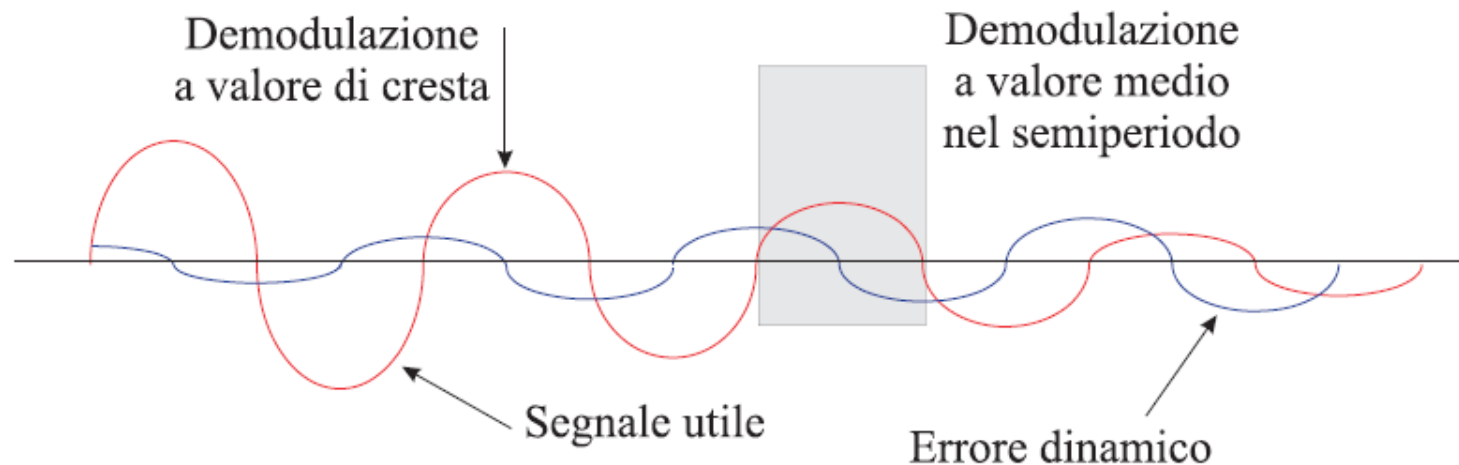


- I Resolver operanti ad elevata velocità necessitano di una tensione portante a pulsazione elevata.
- Occorre però considerare che gli avvolgimenti reali di un Resolver non sono puramente induttivi:
 - al crescere della frequenza i segnali di statore diminuiscono di ampiezza e si sfasano rispetto a quelli di rotore.
- Occorre pertanto un Resolver idoneo al funzionamento ad elevata frequenza.

Disturbi dovuti alla velocità di rotazione

L'errore dinamico è un segnale in quadratura con quello utile, quindi l'informazione si può estrarre:

1. Utilizzando il segnale della portante per estrarre il valore di cresta dal segnale utile (demodulazione a valore di cresta), in quanto l'errore dinamico è nullo in corrispondenza del valore di cresta
2. Utilizzando il segnale della portante per estrarre il valore medio nel semiperiodo della portante stessa (demodulazione a valor medio), poiché l'errore dinamico ha valor medio nullo in tale semiperiodo.



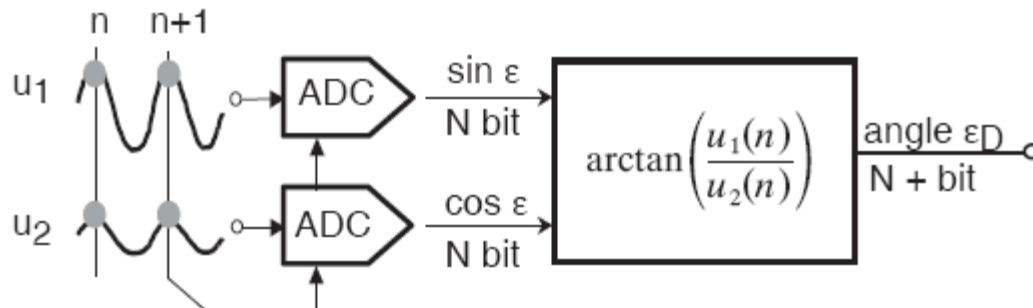
Caratteristiche del Resolver

- **Errore di Linearità:** da 0.1 a 0.5%
- **Ampiezza del campo di misura:** sensore rotazionale. Fornisce informazioni assolute nell'ambito del giro elettrico.
- **Frequenza di eccitazione:** da 500 hz a 20 Khz

N.B.: Il segnale di uscita è modulato in ampiezza! Occorre un circuito demodulatore dedicato, che estragga il valore di cresta o il valor medio dei segnali, determini l'angolo ($\theta = \arctan(V_{s2}/V_{s1})$) e ne faccia la conversione Analogico/Digitale: **Resolver-to-Digital Converter**

Resolver-to-Digital Conversion con μp

Dispositivi con μ -processore, ADC e generatori PWM (per alimentare l'avvolgimento primario con frequenza nota) possono essere usati per effettuare autonomamente la conversione digitale del segnale del Resolver:



Resolver-to-Digital Conversion con circuito integrato

- Una estrazione implicita dell'angolo (senza calcolare una arcotangente), realizzabile con un circuito integrato, si può invece ottenere considerando che:

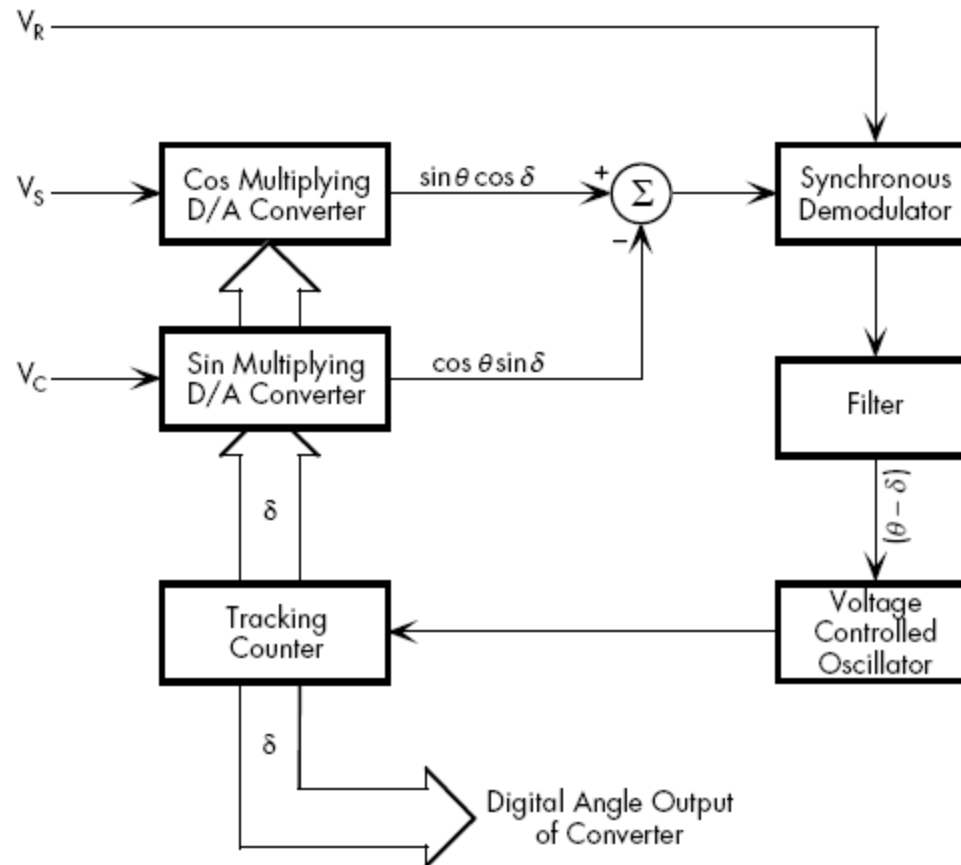
$$\sin(\theta - \delta) = \sin \theta \cos \delta - \cos \theta \sin \delta$$

- Inoltre se la differenza tra θ e δ è piccola, si può considerare valida l'approssimazione:

$$\sin(\theta - \delta) \approx \theta - \delta$$

- Pertanto si può pensare di “approssimare” l'angolo reale θ con un valore δ , mantenuto con un contatore digitale. Una volta effettuata la moltiplicazione incrociata di seni e coseni dell'angolo reale e di quello digitale, il risultato $(\theta - \delta)$ andrà a determinare un incremento o decremento del contatore, finché i due angoli non siano uguali.

Resolver-to-Digital Conversion con circuito integrato



Esempio: [AD2S44](#)

Resolver

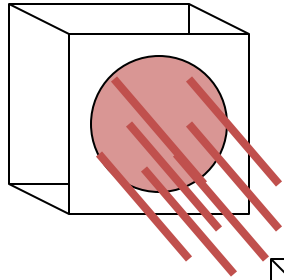
- Il Resolver è un sensore di posizione molto affidabile, abbastanza preciso, non troppo costoso, in grado di essere applicato su sistemi in rotazione continua fornendo una informazione assoluta in un giro elettrico dell'asse di rotore.
- Esso trova attualmente la sua massima applicazione come sensore di posizione del rotore negli azionamenti con **motore Brushless** (sincrono a magneti permanenti) a campo sinusoidale. La sua robustezza, la tecnologia elettromagnetica simile a quella realizzativa di un motore e la sua relativa insensibilità agli sbalzi di temperatura lo rendono idoneo all'integrazione all'interno del motore, favorendo così la compattezza e la riduzione dei costi dell'insieme.
- L'inconveniente principale nelle applicazioni digitali è la necessità di un circuito di demodulazione e conversione digitale abbastanza complesso e costoso.

Encoder Ottico

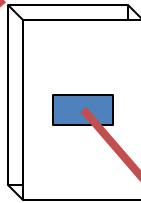
- L'encoder è un sensore per la misura della posizione (encoder assoluto) e della velocità (encoder incrementale) che fornisce un'uscita digitale anziché analogica.
- L'encoder è disponibile sia in versione per l'acquisizione di posizioni angolari che per l'acquisizione di spostamenti lineari (denominato 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

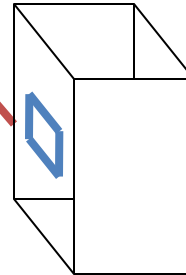
Lampada



Collimatore



Campo

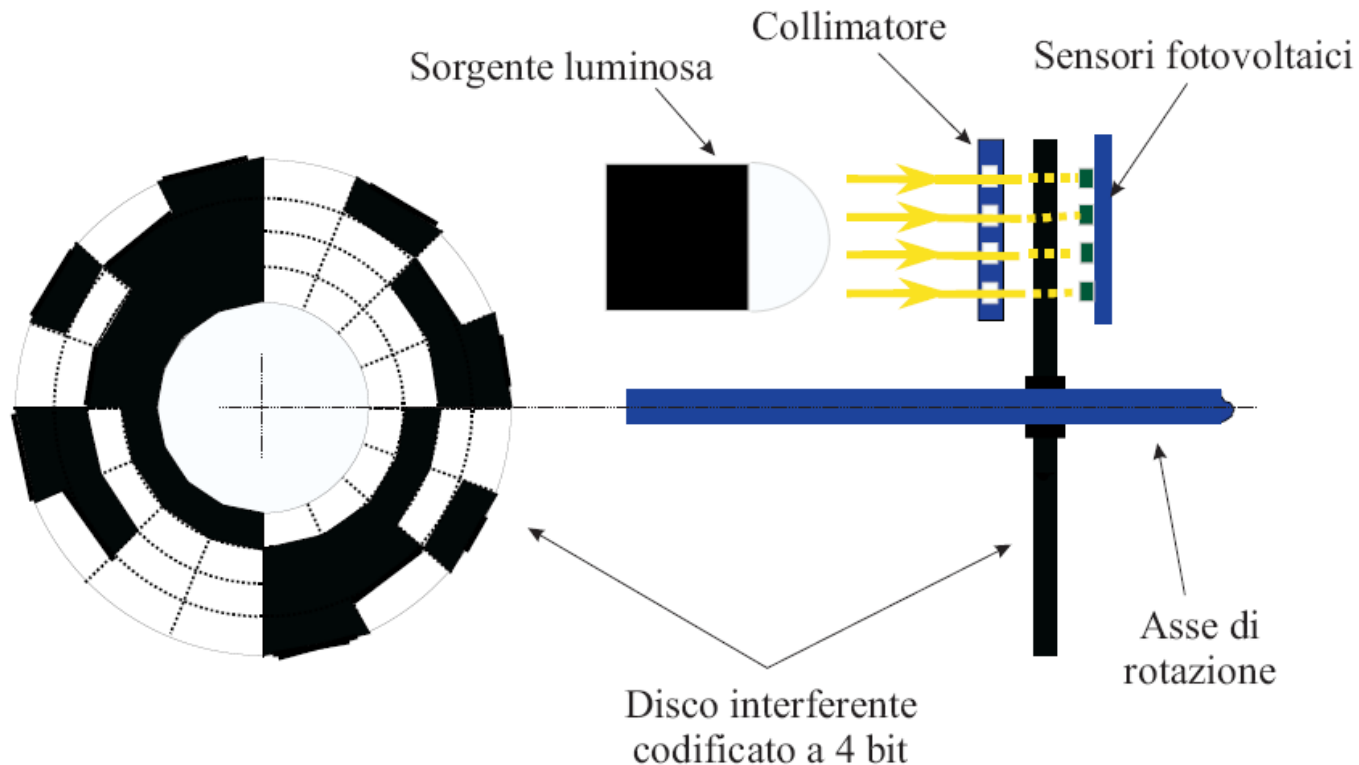


Interferente

Fotosensore

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.



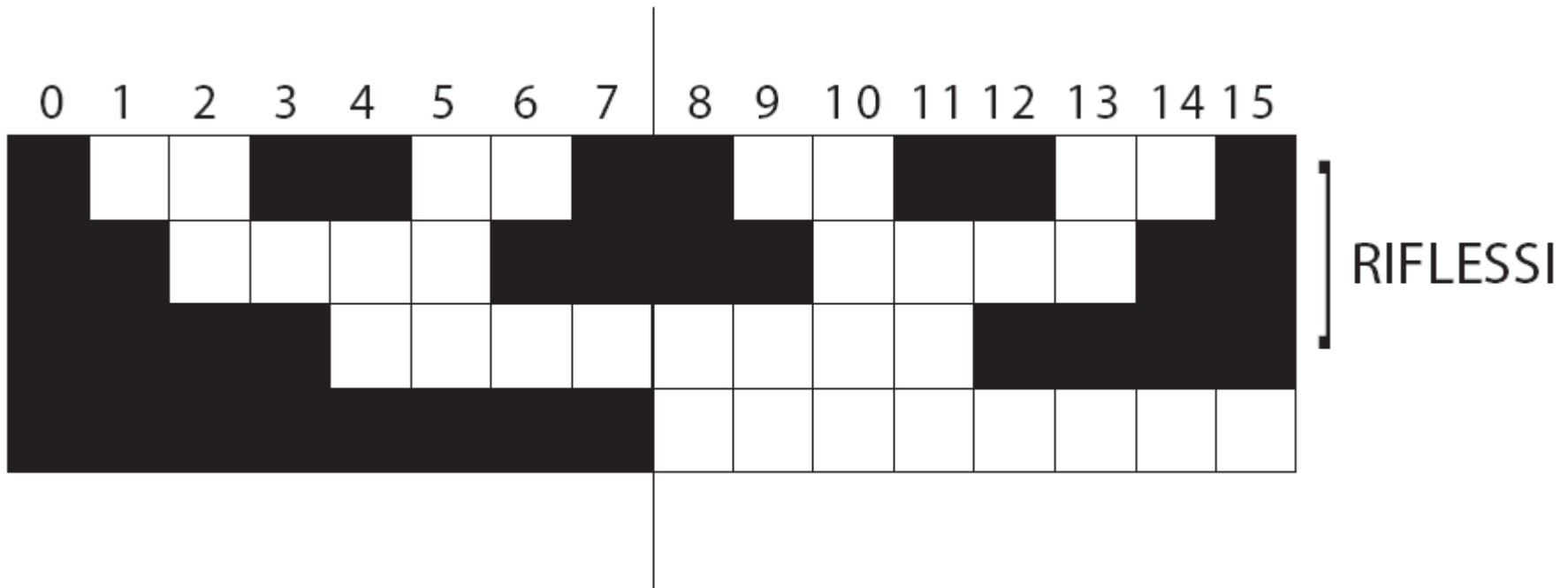
Encoder Assoluto

- 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.

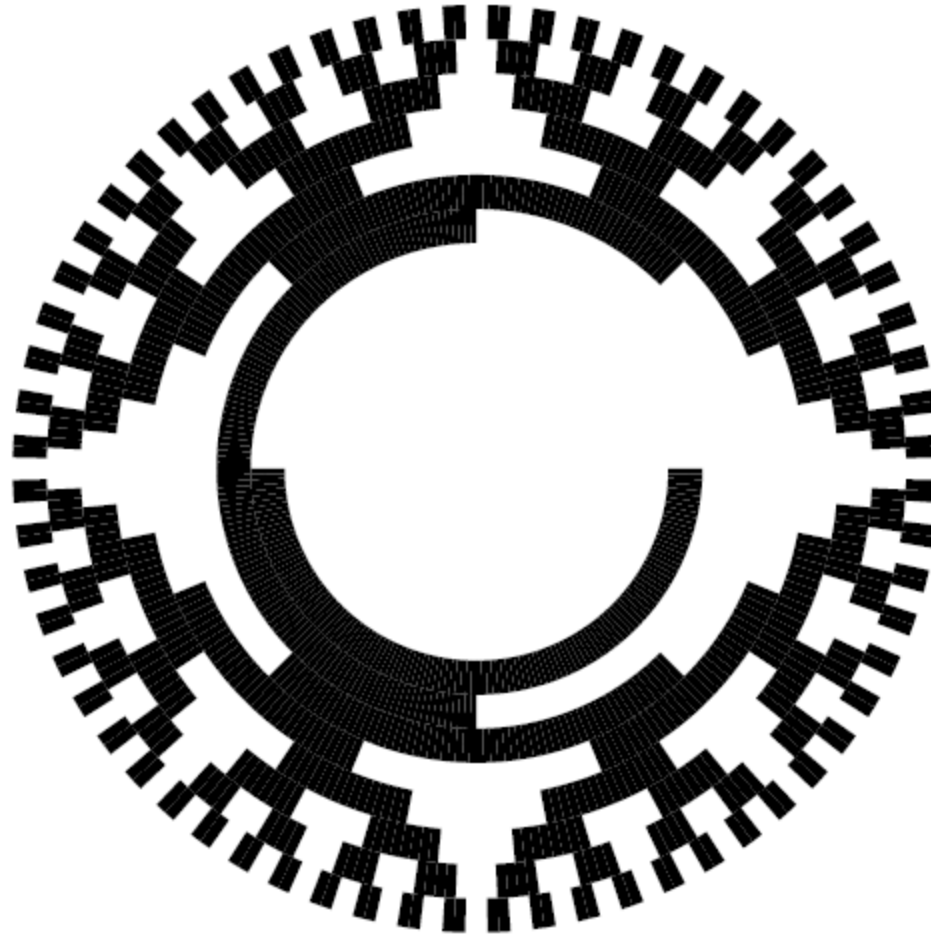
Codifica Gray per l'Encoder Assoluto

- La codifica Gray (o binaria riflessa) risolve il problema delle transizioni spurie.
- Questa codifica prevede che si passi da un numero a quello successivo modificando sempre un solo bit.
- **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 a 8 bit in Codice Gray



Encoder Assoluto

- Pregi
 - uscita direttamente utilizzabile dalla unità di elaborazione
 - non necessita di azzeramento (sensore assoluto)
 - mantiene l'informazione di posizione anche in assenza di alimentazione

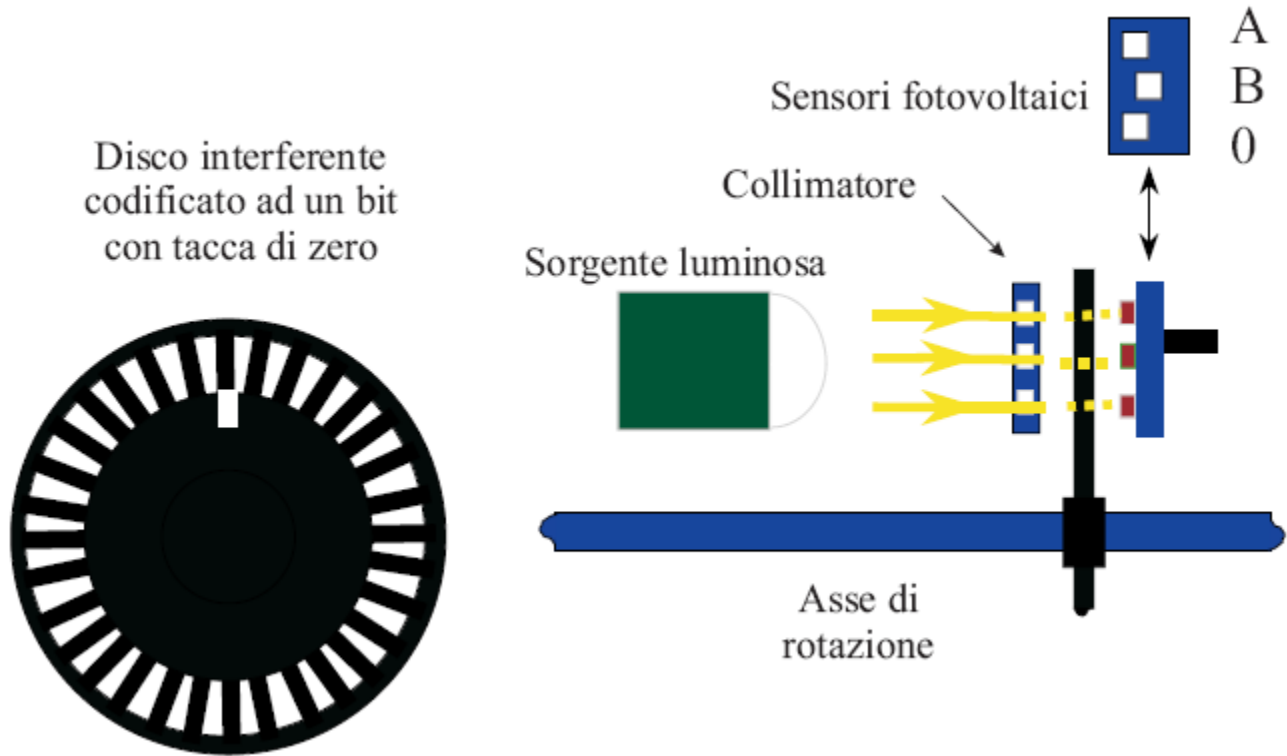
Esempio: [AEAS7000](#)

- Difetti
 - costo elevato
 - Il costo cresce con la risoluzione
 - Il numero massimo di bit per la risoluzione è 12-14
 - Sensore assoluto su un giro
 - se lo si deve usare su più giri è necessario utilizzare dell'elettronica esterna

Encoder incrementale

- Nell'encoder incrementale le strisce trasparenti si trovano su di una sola corona circolare, alternate a strisce opache.
- La distanza tra due strisce trasparenti si chiama **passo dell'encoder**.
- Non essendoci una relazione tra una posizione e la configurazione di settori opachi e trasparenti, l'encoder incrementale non può fornire una informazione di posizione diretta, ma necessita di un **circuito di conteggio** che tenga il conto del numero di transizioni tra settori opachi e trasparenti avvenuti durante il movimento del sensore a partire da una posizione di zero.

Encoder Incrementale

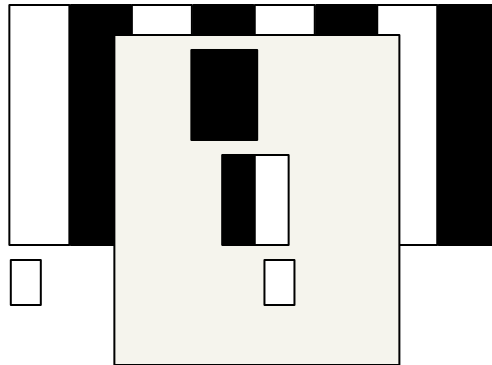


Encoder incrementale

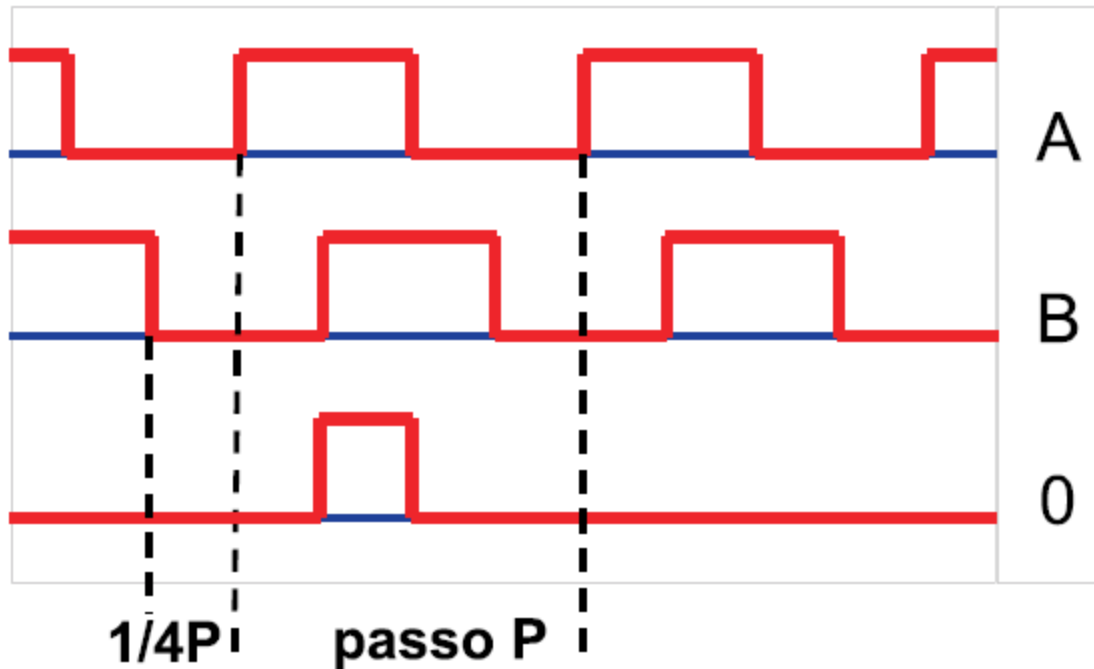
- Il sistema di rivelazione del segnale dell'encoder incrementale è analogo al caso precedente:
 - vi è una sorgente luminosa e **tre sensori fotovoltaici**:
 - uno per rilevare la tacca di zero
 - due per determinare il verso di rotazione dell'encoder.
- La tacca di zero è una striscia trasparente posta 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 $\frac{1}{4}$ di passo tra di loro.

Riga ottica lineare

- È un sensore per spostamenti lineari, realizzato come un encoder incrementale ma con una geometria lineare
- Il disco è sostituito con una barra lineare sulla quale si alternano zone opache e zone trasparenti
- Caratteristiche Standard:
 - lunghezza anche maggiore di un metro
 - precisione dell'ordine di qualche μm



Encoder Incrementale

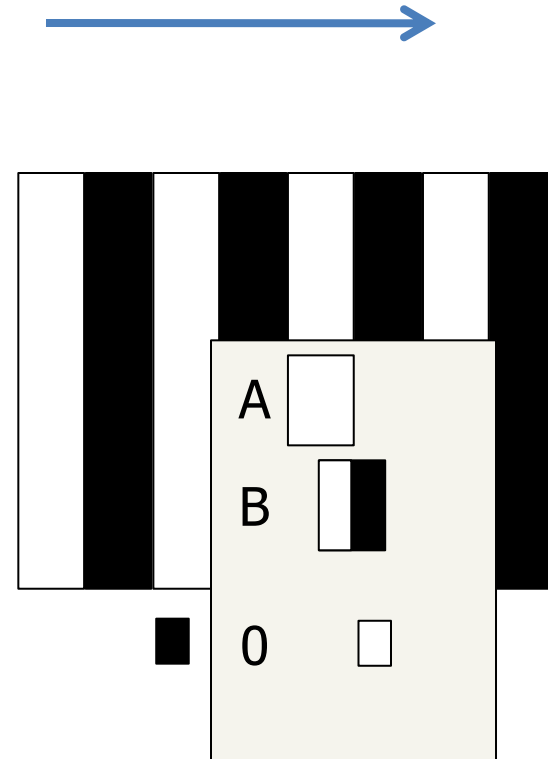
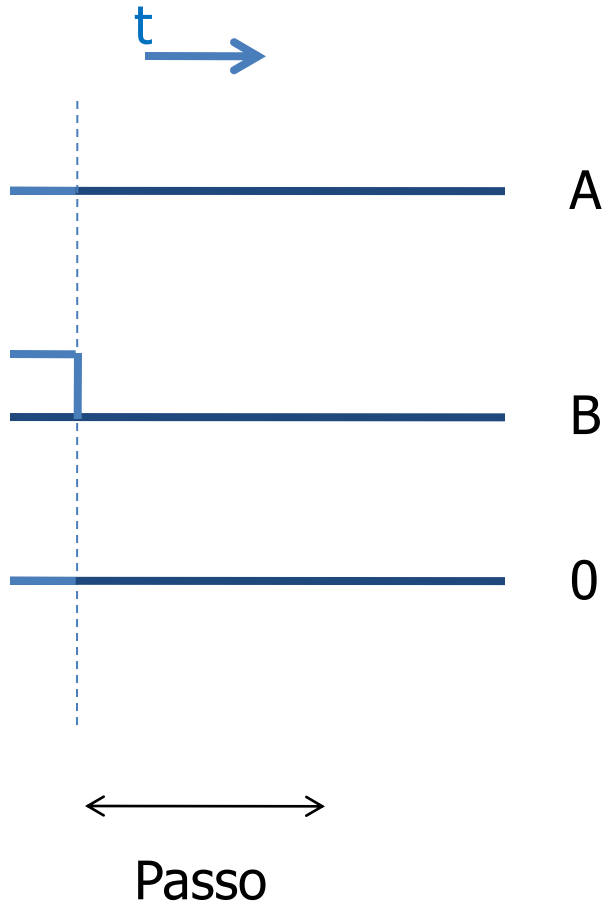


- Ci sono due segnali in quadratura (A e B) e un segnale di zero (0)
- L'utilizzo di A e B (e non solo uno di essi) è necessario per riuscire a discriminare il verso di rotazione

Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

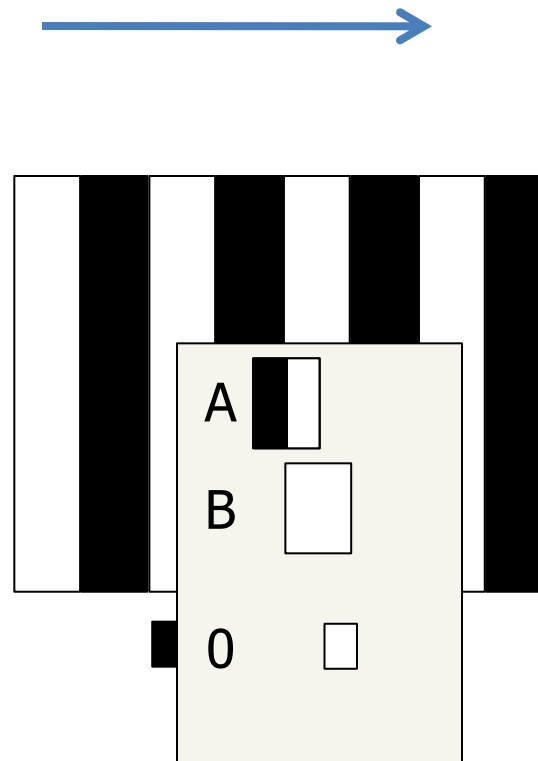
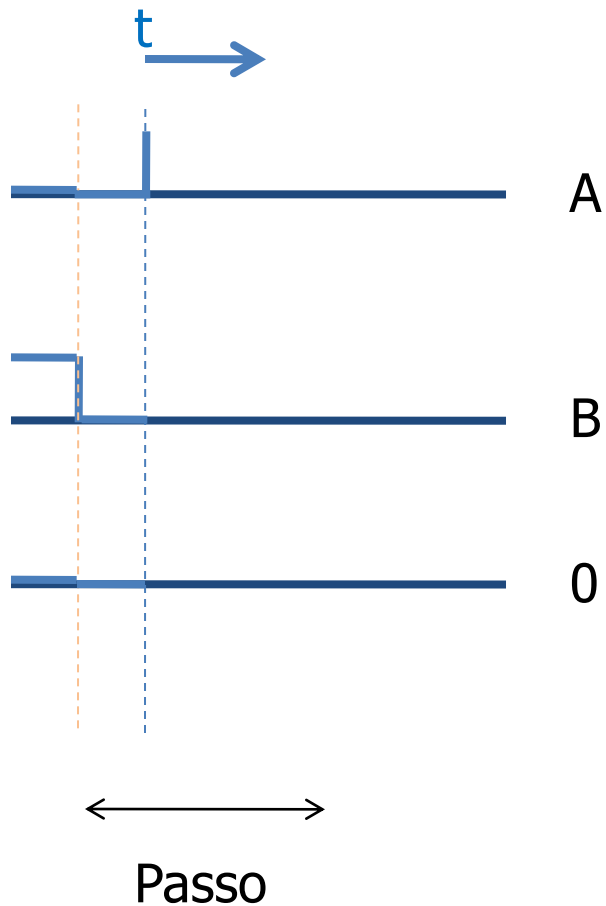
Rotazione Oraria: A precede B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

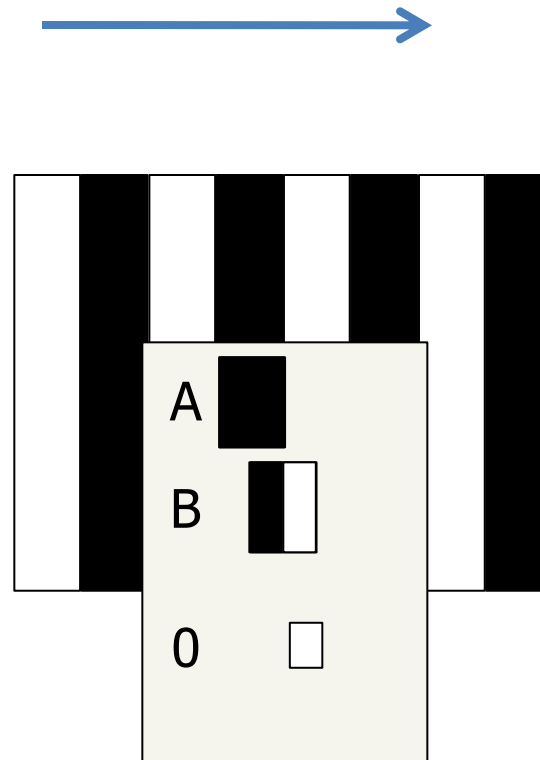
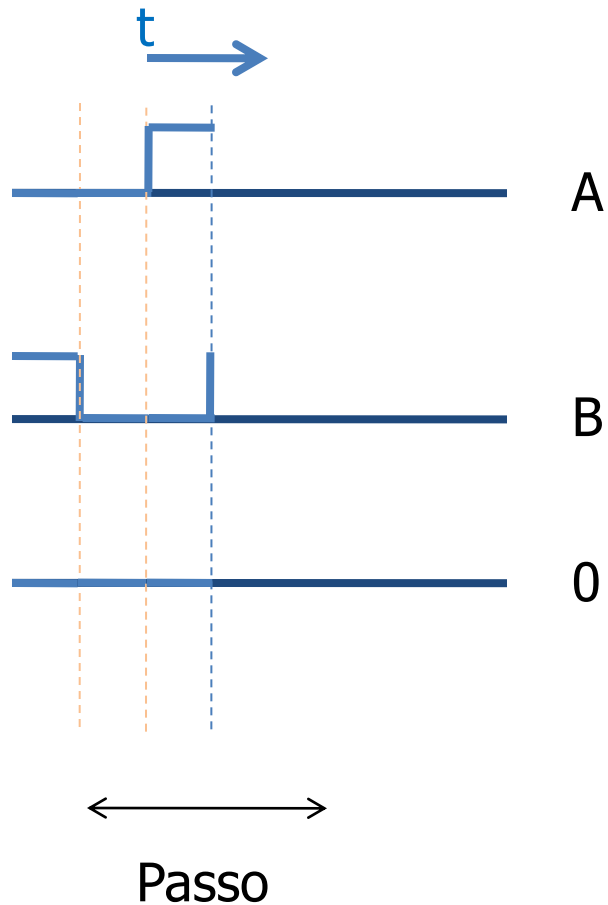
Rotazione Oraria: A precede B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

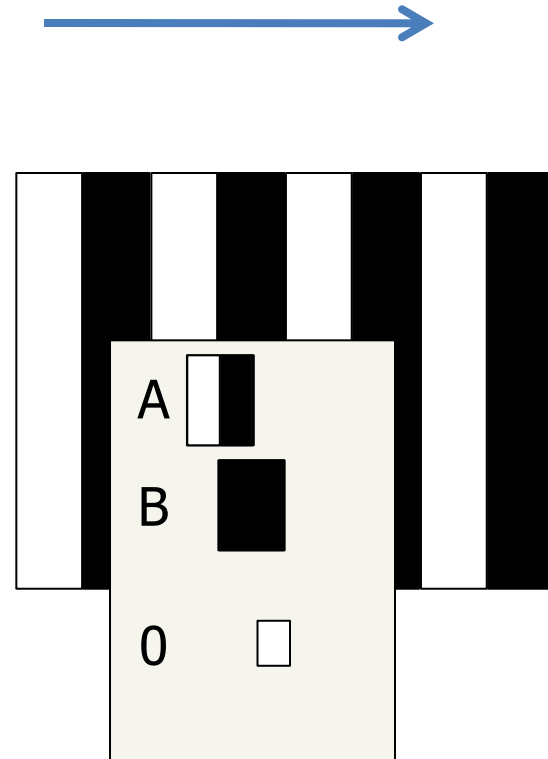
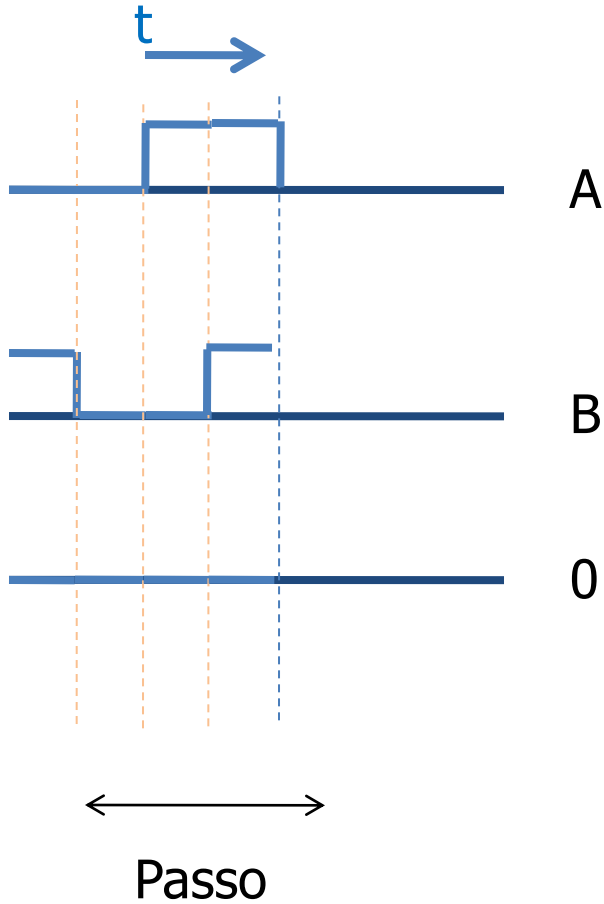
Rotazione Oraria: A precede B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

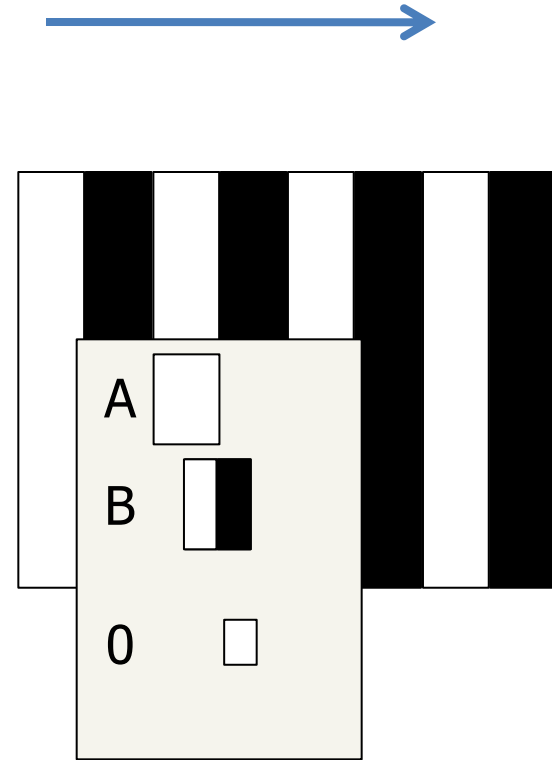
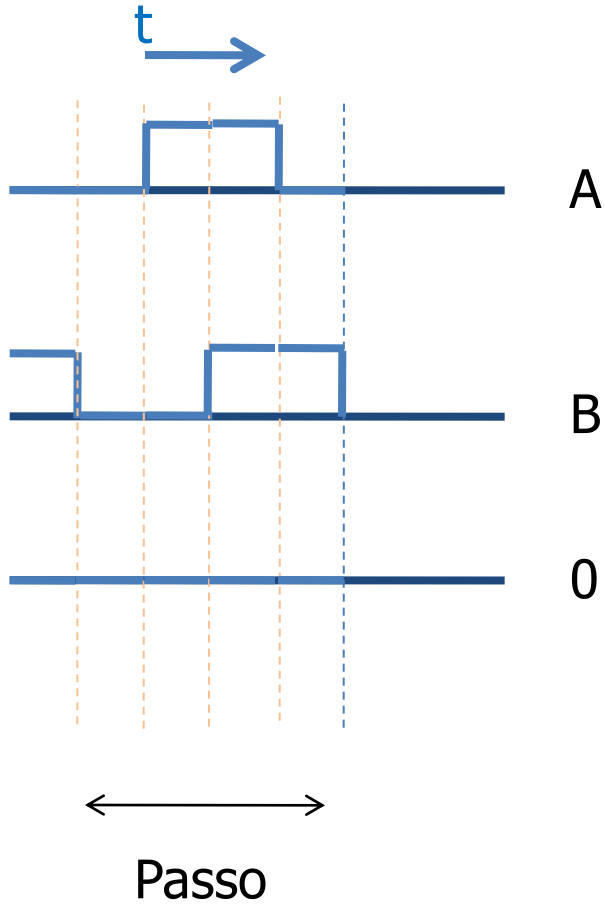
Rotazione Oraria: A precede B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

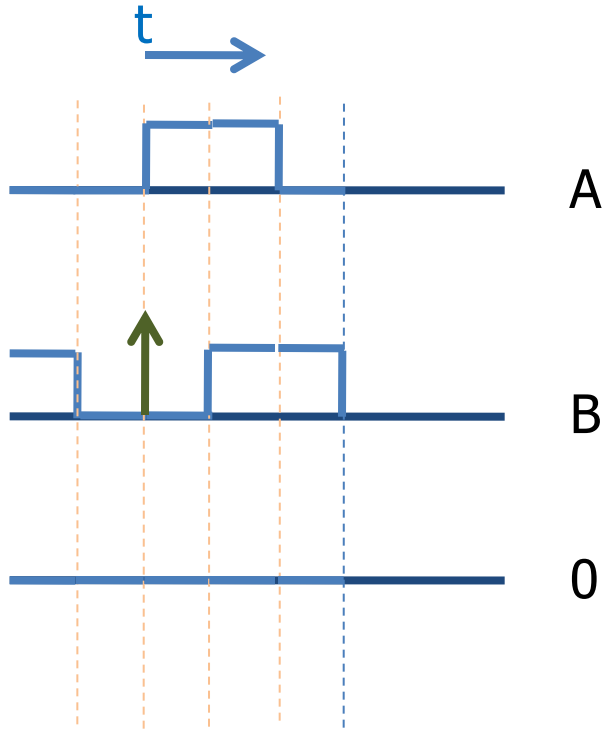
Rotazione Oraria: A precede B



Encoder Incrementali

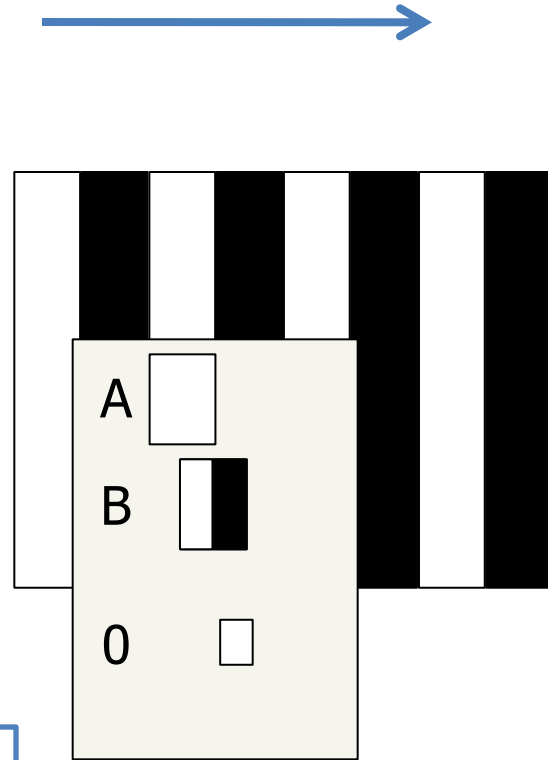
Discriminazione del verso di rotazione

Rotazione Oraria: A precede B



←→
Passo

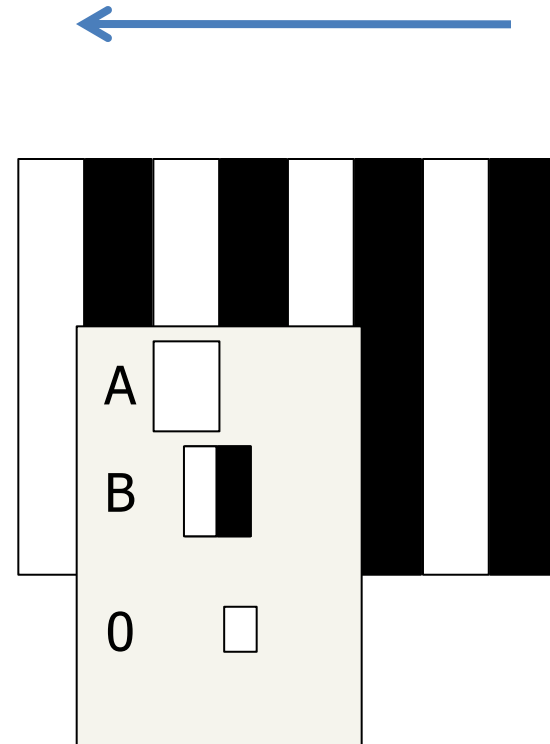
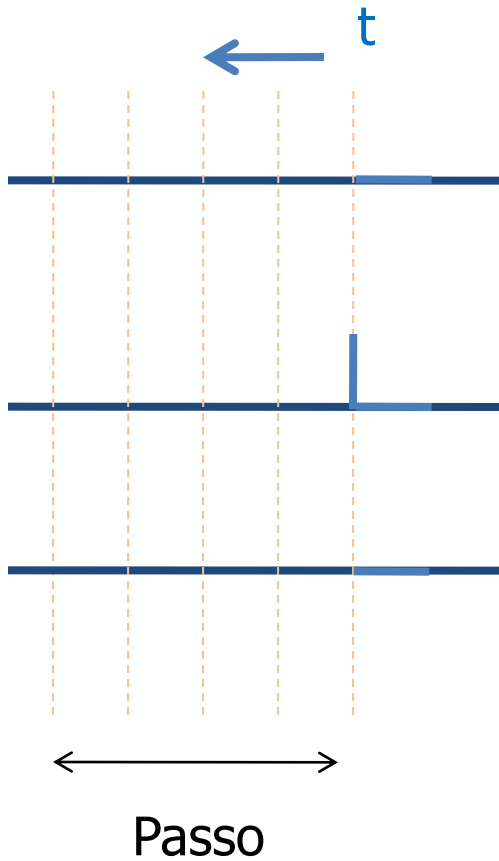
Sul fronte di salita di A il segnale B è sempre 0



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

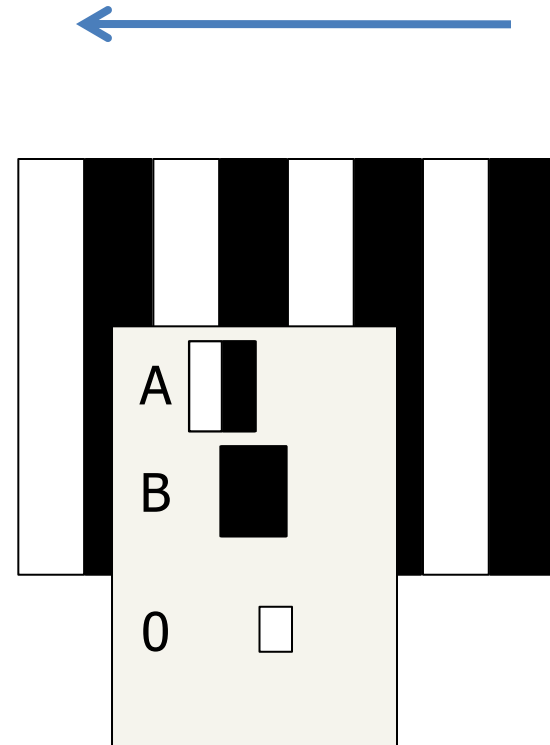
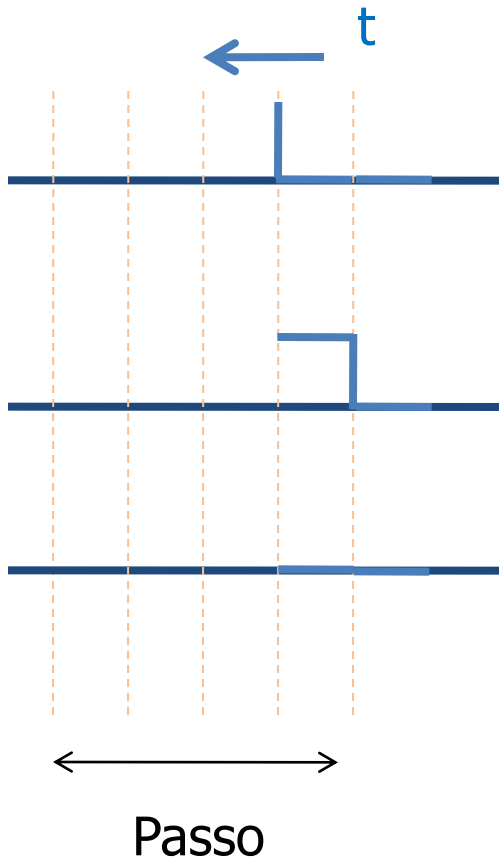
Rotazione Antioraria: A segue B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

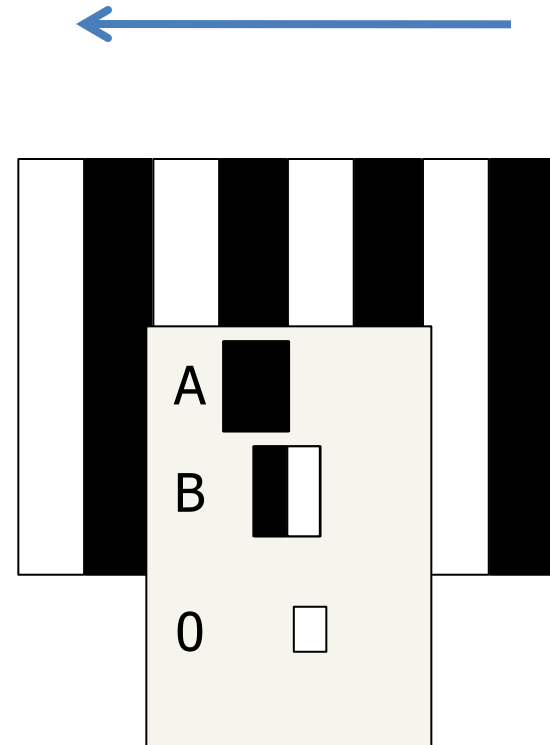
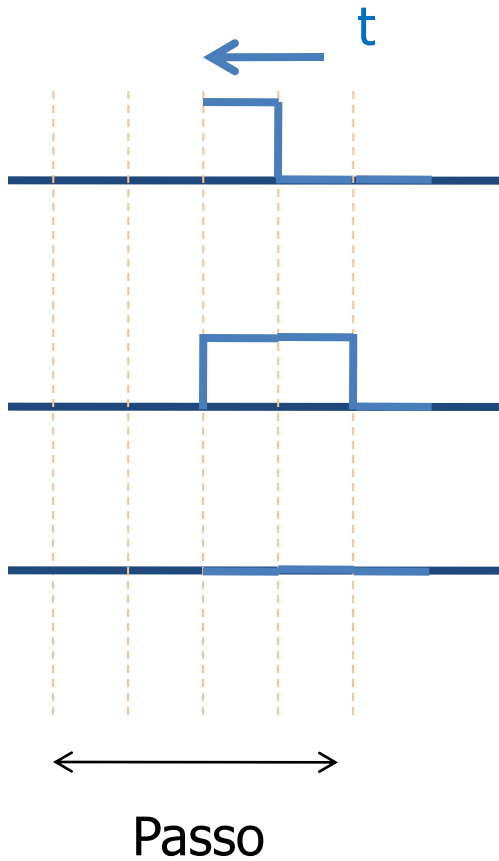
Rotazione Antioraria: A segue B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

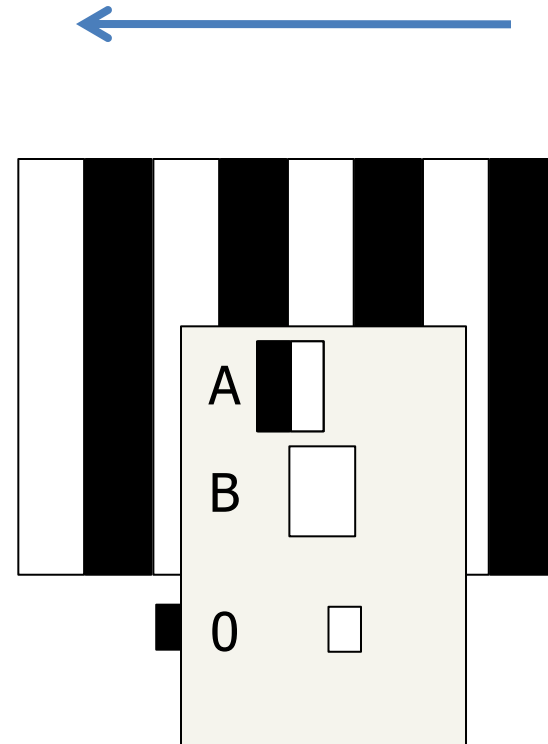
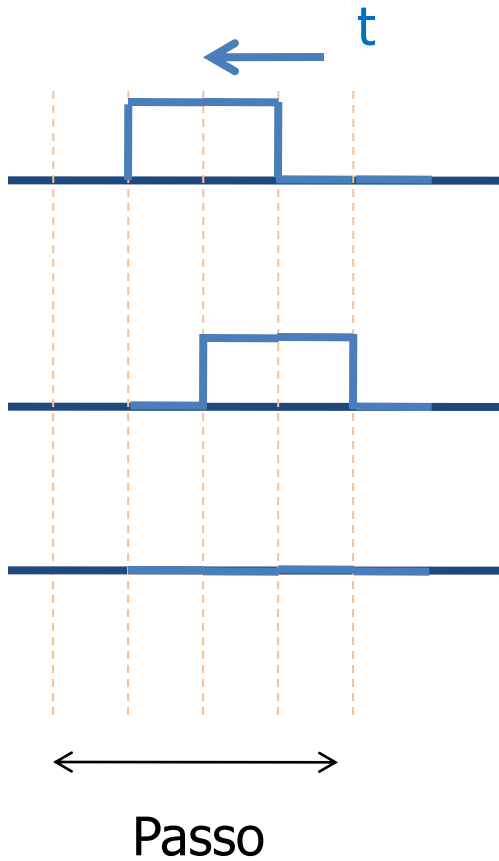
Rotazione Antioraria: A segue B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

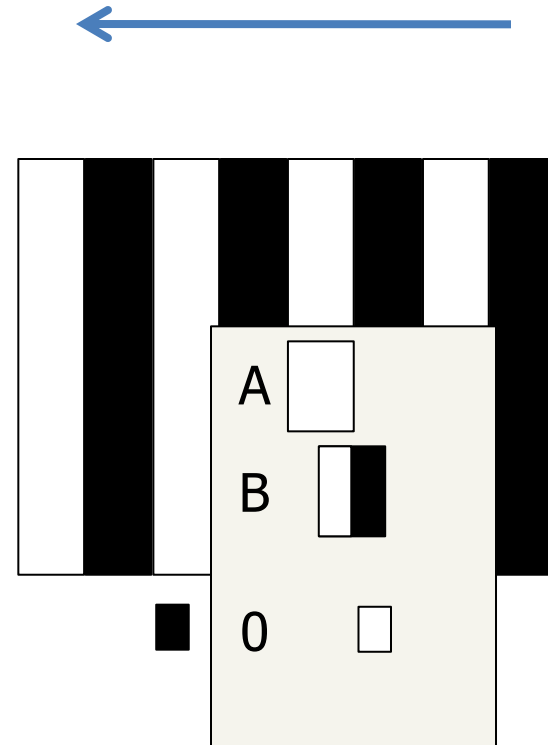
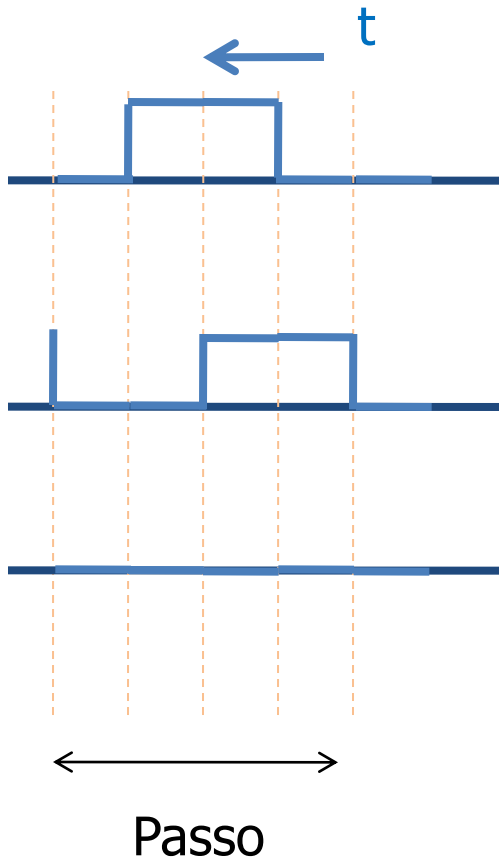
Rotazione Antioraria: A segue B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

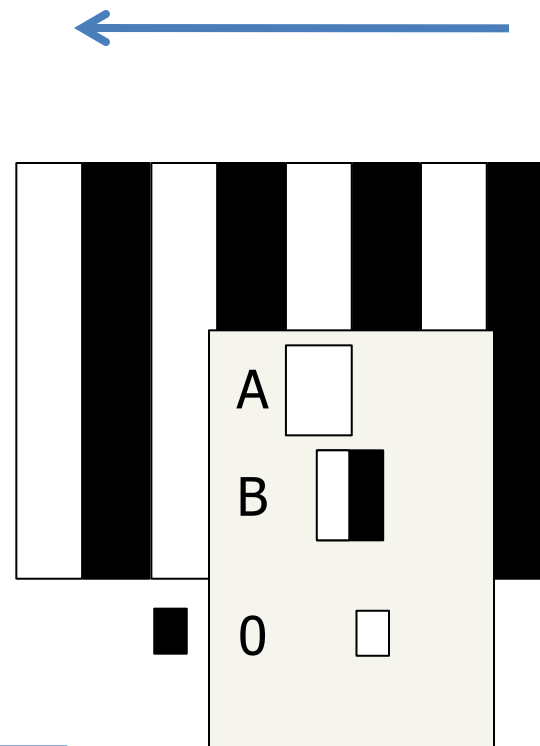
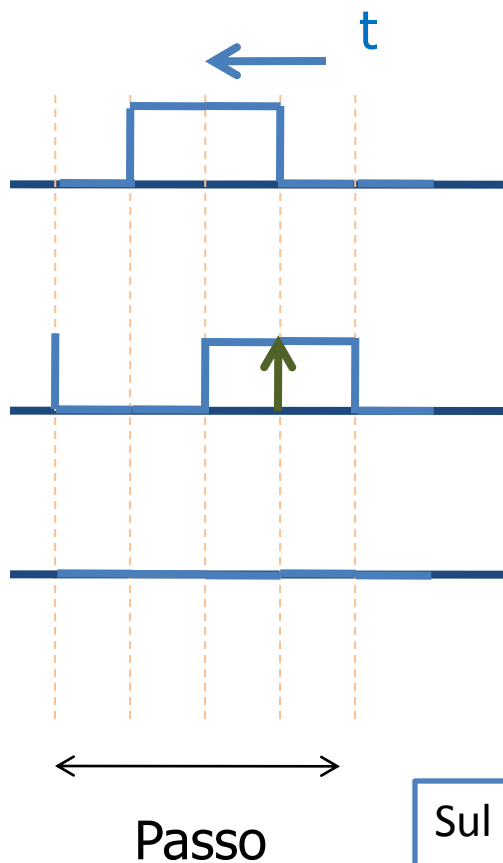
Rotazione Antioraria: A segue B



Encoder Incrementali

Discriminazione del verso di rotazione

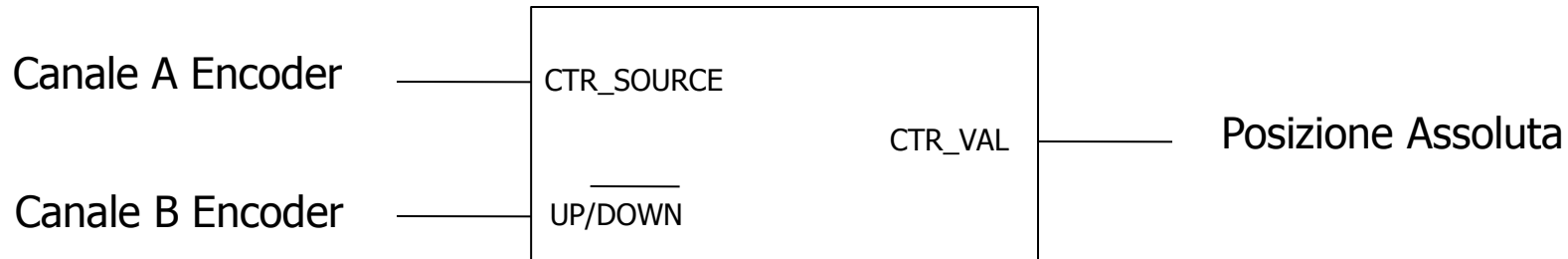
Rotazione Antioraria: A segue B



Sul fronte di salita di A il segnale B è sempre 1

Encoder Incrementale – Conteggio Impulsi

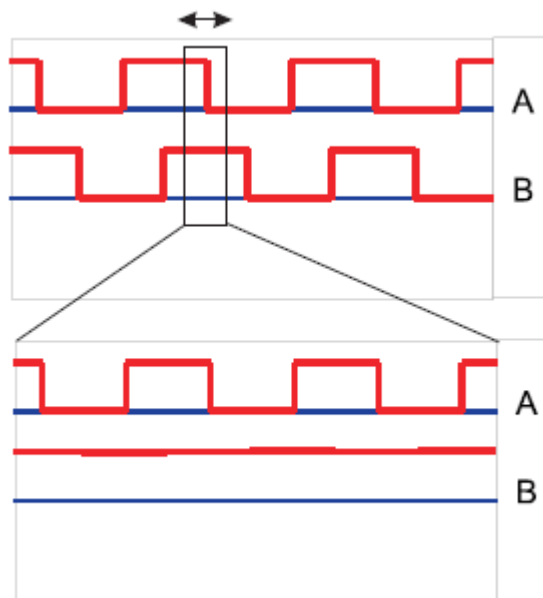
Un semplice circuito di conteggio potrebbe essere un **contatore Up-Down** hardware:



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

Encoder Incrementale – Problemi Meccanici

- Questa soluzione non viene utilizzata nella pratica in quanto è molto sensibile a commutazioni spurie.
 - Ad esempio supponiamo che l'encoder sia utilizzato per rilevare la rotazione di un motore elettrico.
 - Se il motore elettrico è fermo nell'intorno di una posizione di commutazione del sensore A, le inevitabili vibrazioni del sistema meccanico accoppiato al motore possono produrre commutazioni spurie sul segnale A che a loro volta possono venire erroneamente interpretare come una variazione di posizione.

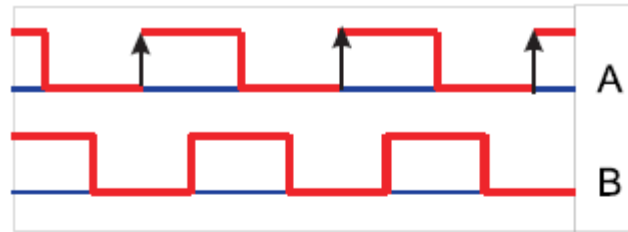


Encoder Incrementale – Conteggio Impulsi

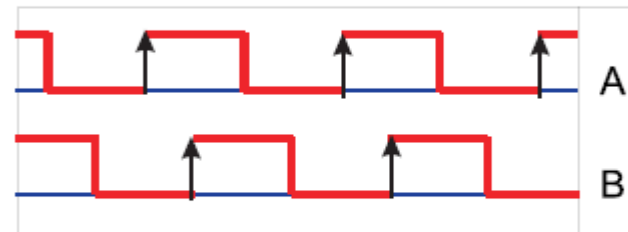
È preferibile mettere a monte del contatore un circuito di interfaccia per i canali dell'encoder (es. LSI Computer Systems LS7083), che:

- trasformi gli impulsi ad onda quadra in impulsi one-shot (filtraggio digitale)
- eventualmente moltiplichi il conteggio per 2 o per 4
- determini il verso di rotazione

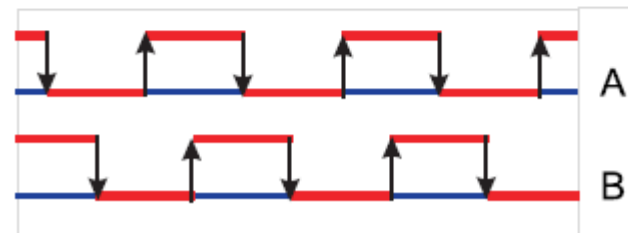
Encoder Incrementali



Conteggio normale



Conteggio x 2



Conteggio x 4

Problematiche legate al roll-over del contatore

Roll-over: quando il contatore raggiunge il proprio valore massimo e si auto-resetta

- Se il valore di roll-over può essere impostato allo stesso numero di passi per giro dell'encoder, non ci sono problemi.
- Se il valore di roll-over vale 2^M e i passi per giro dell'encoder sono 2^N , è sufficiente mascherare gli $M - N$ bit più significativi del valore di conteggio espresso in codice binario.
- Altrimenti occorrono maggiori accortezze nel software di controllo, per tenere traccia della posizione raggiunta all'interno del giro encoder e della "posizione virtuale" del giro encoder all'interno del range di conteggio.

Encoder Incrementale

- Pregi
 - costo contenuto
 - incremento di costo limitato con la risoluzione
 - standard fino a 5000 impulsi/giro

Esempio: [HEDT9000](#)

- Difetti
 - sensore incrementale
 - elettronica esterna di conteggio e discriminazione verso di rotazione
 - Necessita di azzeramento (sensore incrementale)
 - Perde l'informazione di posizione in assenza di alimentazione

È il sensore di posizione/velocità standard industriale

Encoder come sensori di velocità

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

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

- 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 .**

Encoder come sensori di velocità

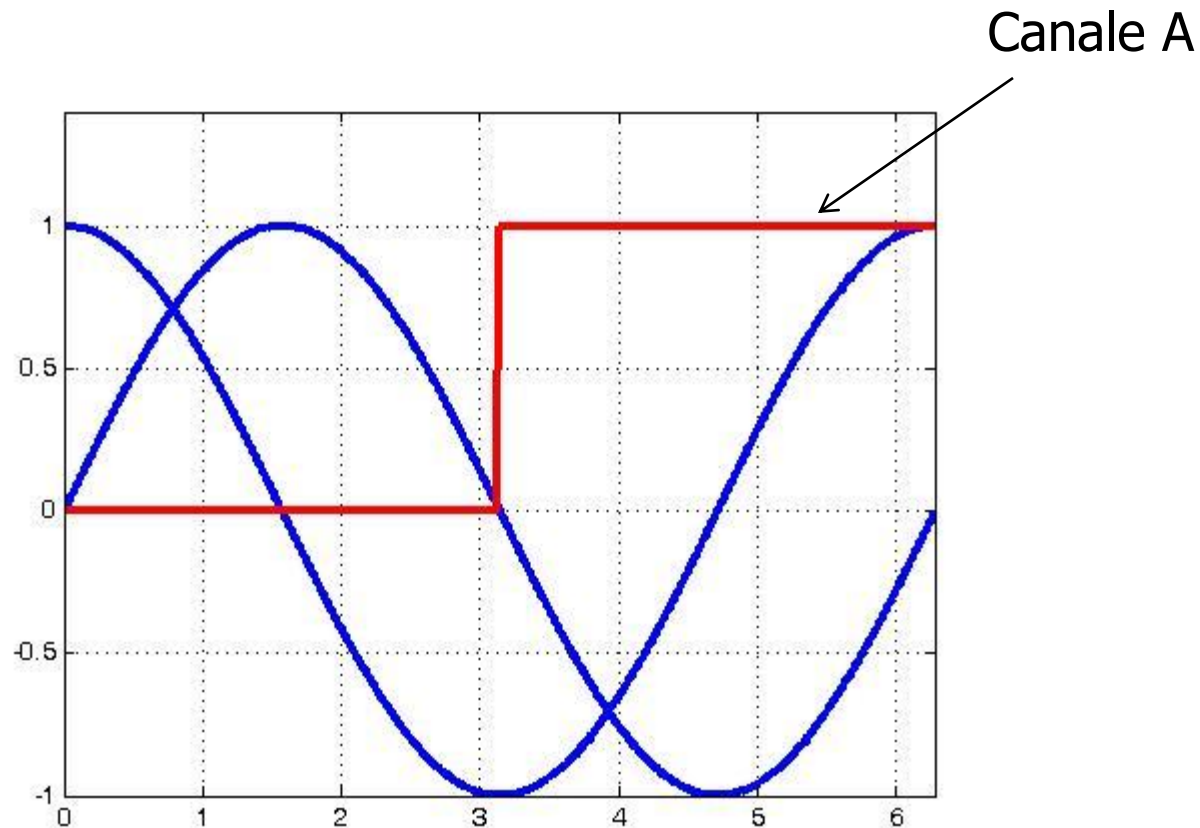
- Una possibile soluzione per rilevare correttamente velocità molto basse consiste nel misurare il tempo tra gli impulsi rilevati e calcolare una velocità media in base alla conoscenza del passo encoder
 - Errore di quantizzazione legato al conteggio del tempo
- La soluzione adottata in genere è quella di aumentare la risoluzione

Encoder Sin/Cos

- Gli encoder di tipo Sin/Cos sono molto simili, dal punto di vista costruttivo, agli encoder incrementali (o assoluti), tanto che ne possono essere considerati una variante.
- La parte meccanica di un encoder Sin/Cos è infatti identica a quella di un encoder “standard”, ma l’elettronica che amplifica i segnali provenienti dai sensori fotovoltaici è progettata per ottenere delle forme d’onda (quasi) sinusoidali, invece che squadrate, per i due segnali di uscita A e B, i quali diventano così segnali **analogici** anziché digitali
- La luce della sorgente illumina gradualmente, al ruotare del disco interferente, i sensori fotovoltaici e non in modo brusco, pertanto le uscite dei sensori hanno un andamento ondulatorio.
- Condizionando opportunamente l’uscita dei sensori fotovoltaici, si ottengono un uscita due segnali analogici approssimativamente sinusoidali rispetto alla rotazione dell’encoder, sfasati tra loro di un quarto di passo dell’encoder stesso.
- Il periodo di questi segnali è pari proprio al passo encoder. Inoltre, questi segnali sono in relazione tra loro come il seno ed il coseno di un angolo, in modo analogo a quanto avviene per il Resolver

Encoder Sin/Cos

Mentre nel Resolver il periodo di seno/coseno (V_{s1} e V_{s2}) è effettivamente l'angolo giro completo, per l'encoder Sin/Cos tale periodo è solamente una frazione molto piccola di tale angolo, suddiviso in base al numero totale di passi dell'encoder.

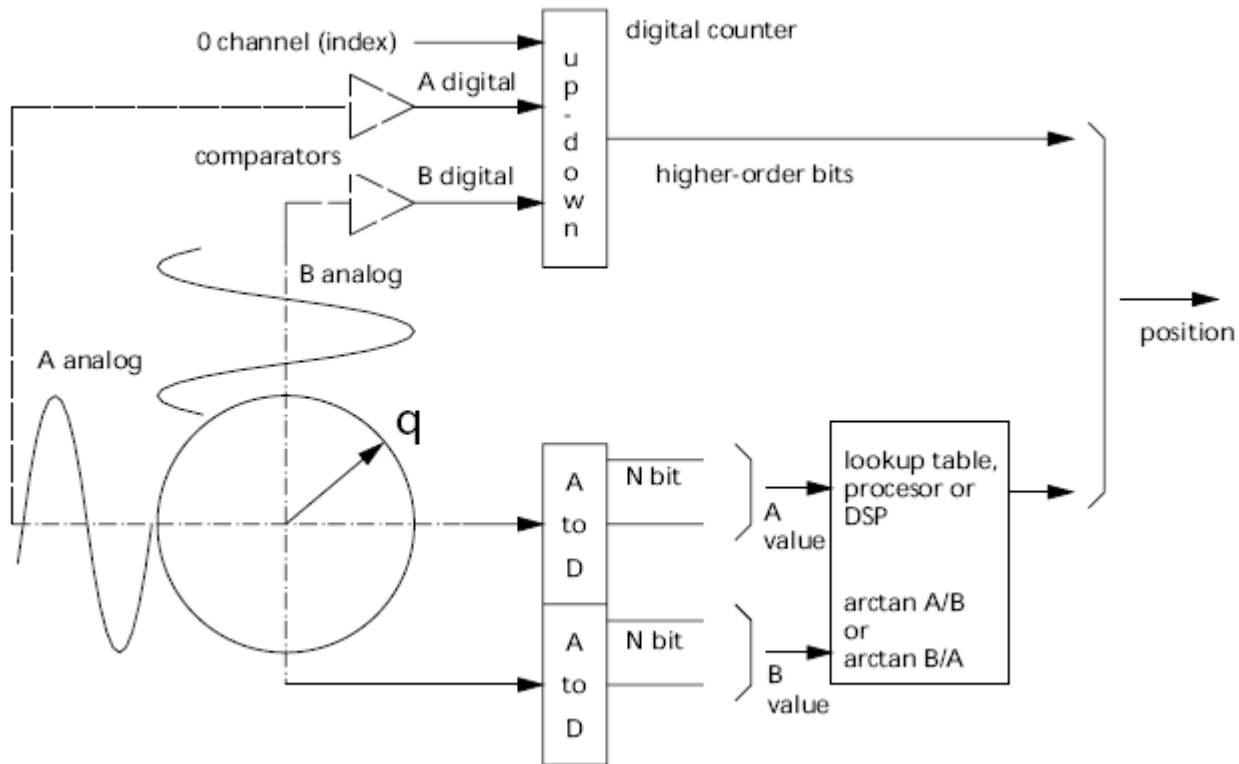


Encoder Sin/Cos

- L'encoder Sin/Cos **non** può essere considerato un sensore assoluto, in quanto per ricostruire la posizione esatta del sensore all'interno di un giro è necessario anche contare i passi effettuati a partire dal riferimento di zero.
 - L'informazione ottenuta dai segnali analogici di un encoder Sin/Cos è infatti "assoluta" solo all'interno di un singolo passo.
- Gli encoder Sin/Cos disponibili in commercio forniscono in uscita sia i segnali digitali A e B "standard" per un encoder incrementale che i segnali analogici seno/coseno.
 - I segnali digitali si utilizzano per il conteggio dei passi
 - I segnali analogici si utilizzano per ottenere la posizione precisa all'interno del passo con lo stesso principio del resolver.

$$\theta = \arctan \frac{A}{B}$$

Encoder Sin/Cos



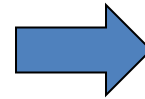
q rappresenta la posizione all'interno di un passo

Encoder Sin/Cos

- Grazie ai segnali analogici è possibile incrementare notevolmente la risoluzione dell'encoder
- L'incremento di risoluzione dipende unicamente dalla risoluzione con cui sono trattati i segnali analogici seno/coseno di A e B.

Esempio:

- Encoder sin/cos con $2^{10}=1024$ passi giro
- Conversione digitale dei segnali analogici con un ADC a 8 bit



Risoluzione totale:
 2^{18}

Risoluzione senza sin/cos

$$360/2^{10}=0.351 \text{ } ^\circ$$

Risoluzione con sin/cos

$$360/2^{18}=0.0014 \text{ } ^\circ$$

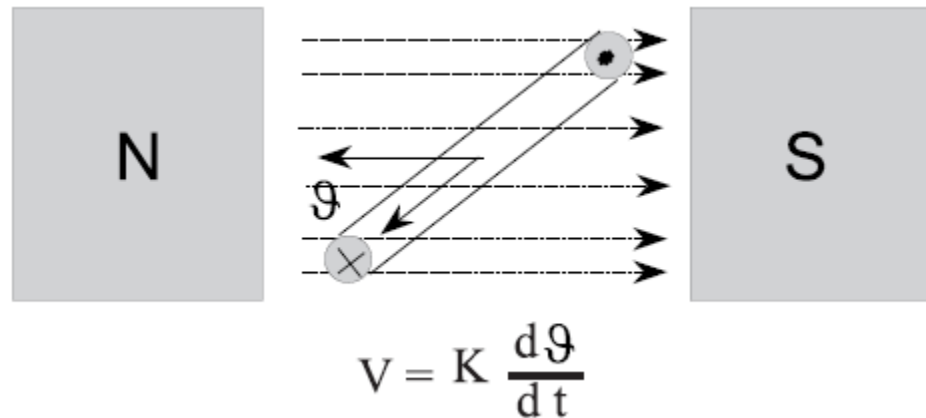
Encoder Sin/Cos

- Pregi
 - Elevatissima risoluzione
 - 8 milioni di impulsi giro, risoluzione migliore di 10^{-6} rad
 - Basso rumore di quantizzazione durante la differenziazione
- Difetti
 - Costo Elevato
 - Necessita di un'elettronica di acquisizione abbastanza sofisticata

Sono utilizzati in applicazioni che richiedono un'elevata precisione (controllo hard-disk, robotica,...)

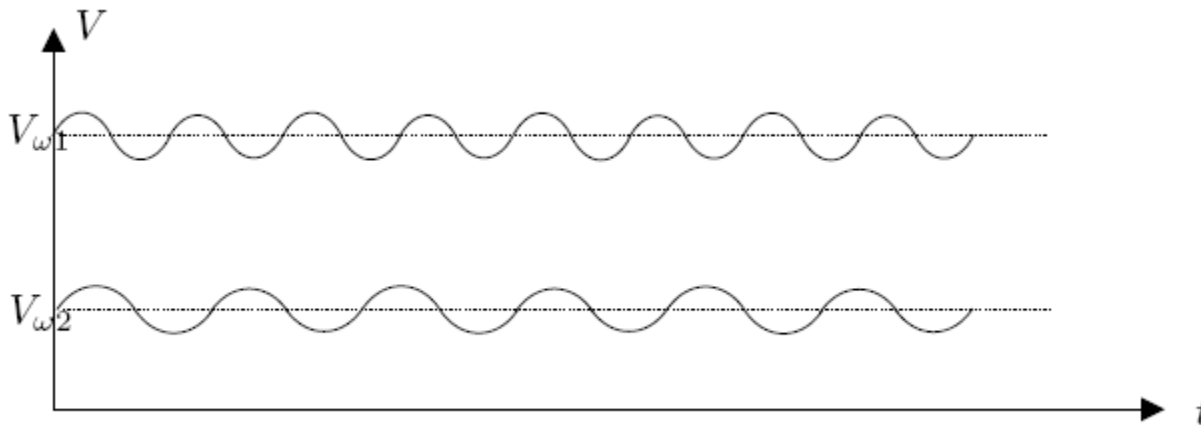
Dinamo Tachimetrica

- Il principio di funzionamento corrisponde a quello del motore elettrico a corrente continua:
 - La parte mobile del sensore è costituito da un circuito elettrico solidale alla parte di cui occorre misurare la velocità.
 - Il circuito elettrico è immerso in un campo magnetico fisso generato da un magnete permanente.
 - Quando il circuito elettrico ruota si viene a generare una tensione ai capi di uscita proporzionale alla velocità di rotazione del sensore.



Dinamo Tachimetrica

La presenza di spazzole striscianti sul circuito elettrico, necessarie per prelevare il segnale, ne riduce l'affidabilità e allo stesso tempo peggiora la qualità del segnale di uscita, caratterizzato da **oscillazioni** generate durante il passaggio delle spazzole sulle zone isolate del collettore.



Dinamo Tachimetrica

- Pregi
 - Sensore assoluto
 - Sensore a basso costo
 - Sensore attivo (no tensione di alimentazione)
 - Adatto al funzionamento in ambienti ostili (es.: interno di un motore)
- Difetti
 - Facilmente deteriorabile a causa dei contatti striscianti
 - Ripple strutturale sull'uscita

È il sensore di velocità standard negli azionamenti per motori a collettore (Motori DC)

- Linearità: 0.5-1%
- Sensibilità: 5-10 V/1000 rpm
- Ampiezza del ripple: 1-2%

Estensimetro

- L'estensimetro, detto **strain gauge**, è un sensore che rileva deformazioni meccaniche (e conseguentemente forze applicate) trasformandole in **variazioni di resistività**.
- Sfrutta le variazioni di lunghezza l e sezione S di fili conduttori vincolati alla parte meccanica sottoposta ad una forza.
- Quando una forza agisce su di una struttura meccanica questa si deforma di una quantità approssimativamente proporzionale alla forza incidente secondo la legge di Hooke:

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

dove σ è la forza normale riferita alla superficie, E è la costante di proporzionalità, detta modulo di Young e $\Delta l/l$ è la deformazione relativa.

Estensimetro

Considerando un corpo cilindrico di lunghezza l e sezione S sottoposto ad una forza F longitudinale risulta:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$$

L'allungamento è quindi:

$$\Delta l = \frac{l}{E} \frac{F}{S} = \frac{1}{C} F$$

Il termine $C = SE/l$ viene chiamato **costante elastica del materiale**, che dipende quindi da caratteristiche geometriche (S e l) e fisiche (E).

Estensimetro

Oltre all'allungamento il materiale subisce una diminuzione della sua sezione pari a:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l}$$

Il parametro μ viene anche detto modulo di Poisson e vale circa 0.3 per quasi tutti i metalli.

L'estensimetro è costituito da un materiale che può essere una lega metallica (**estensimetri metallici**, per applicazioni comuni) oppure un semiconduttore (**estensimetri a semiconduttore**, per applicazioni integrate) che, sottoposto a deformazione modifica la sua resistività a causa della variazione della sua geometria.

Estensimetro

- Resistenza di un filo conduttore $R = \rho \frac{l}{S}$

- Differenziando $\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$

- Trascurando la variazione di ρ (dipendente in prevalenza dalla temperatura)

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2\mu \frac{dl}{l} = (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} = K \frac{dl}{l}$$

Il parametro K viene detto **gauge factor** e misura la **sensibilità** del sensore

Estensimetro

- Si può risalire alla forza applicata ad un corpo (di lunghezza L) vincolando ad esso un estensimetro e considerando che:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \frac{F}{S} = \frac{\Delta l}{l}$$

Siccome l'estensimetro è solidale al corpo, la variazione relativa di lunghezza è la stessa

- e quindi

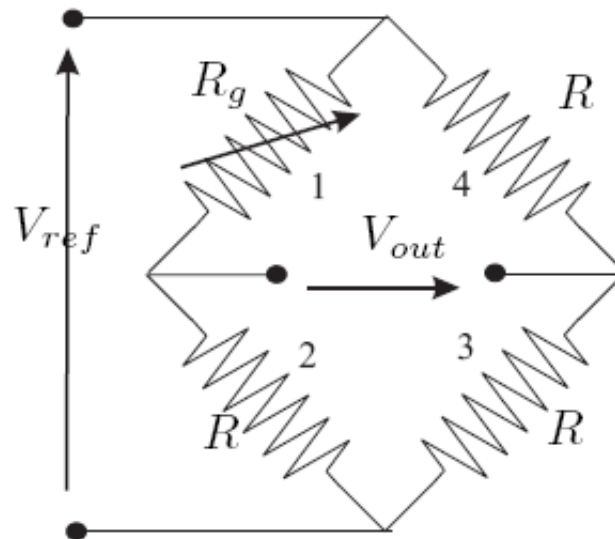
$$F = ES \frac{\Delta l}{l} = \frac{ES}{K} \frac{\Delta R}{R}$$

Estensimetro

<i>Materiale</i>	<i>gauge factor</i>
Metalli conduttori	≈ 2
Manganese	0.5
Nichel	12
Materiali semiconduttori	> 100

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 valore R , e la resistenza di misura (l'estensimetro) R_g .



Estensimetro

Risolvendo 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 ΔR , 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:

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

Estensimetro

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

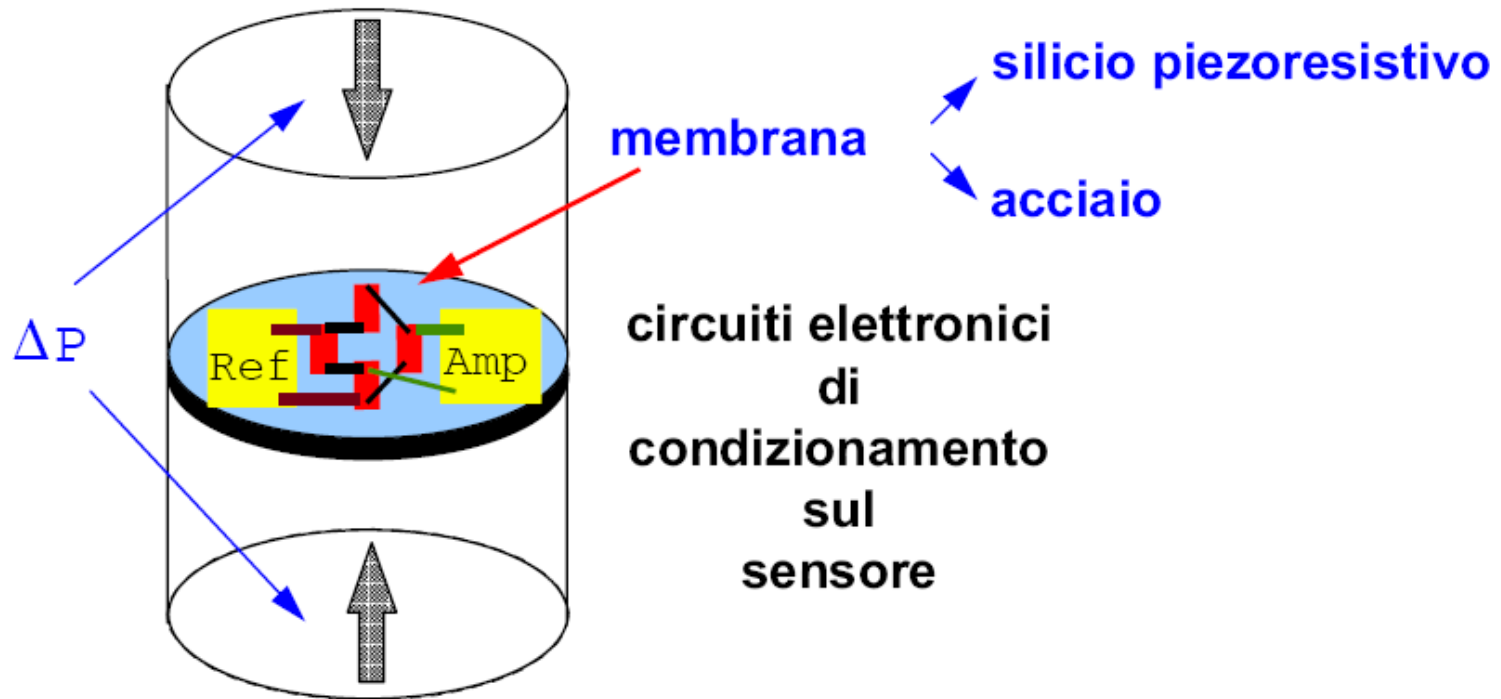
$$V_{out} = V_{ref} \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

- Il ponte di Wheatstone fornisce buoni risultati se le resistenze che compongono il ponte sono di egual valore.
- Per verificare tale condizione solitamente si usano estensimetri non deformati come resistenze di riferimento del ponte, meglio se provenienti dallo stesso lotto di fabbricazione.

Sensore di pressione basato su estensimetri

- Gli estensimetri possono essere utilizzati anche per realizzare misure di pressione.
- La pressione (o meglio la differenza di pressione) provoca la deformazione di una membrana sulla quale sono fissati degli estensimetri opportunamente connessi secondo la configurazione a ponte.
- Possibili realizzazioni:
 - Membrana metallica o di silicio (estensimetri integrati).
 - Estensimetri metallici o a semiconduttore

Sensore di pressione basato su estensimetri

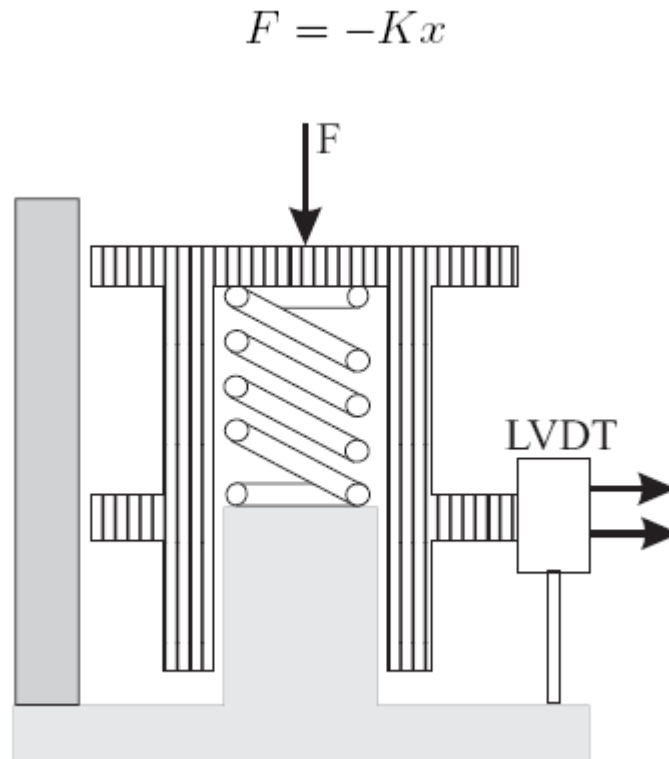


Caratteristiche tecniche all'uscita del circuito elettronico di compensazione

- Sensitività: <1%
- off-set: <1%
- nonlinearietà: <0.5%
- derive termiche: <0.5%
- errore totale: <1.5%

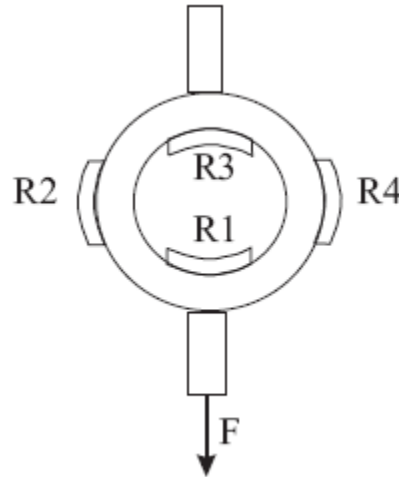
Cella di Carico

- La cella di carico (load cell) è un sensore per la misura della forza peso.
- La forza applicata alla piattaforma comprime la molla e sposta l'equipaggio mobile del LVDT, che fornisce un'uscita proporzionale allo spostamento e quindi alla forza.



Cella di Carico

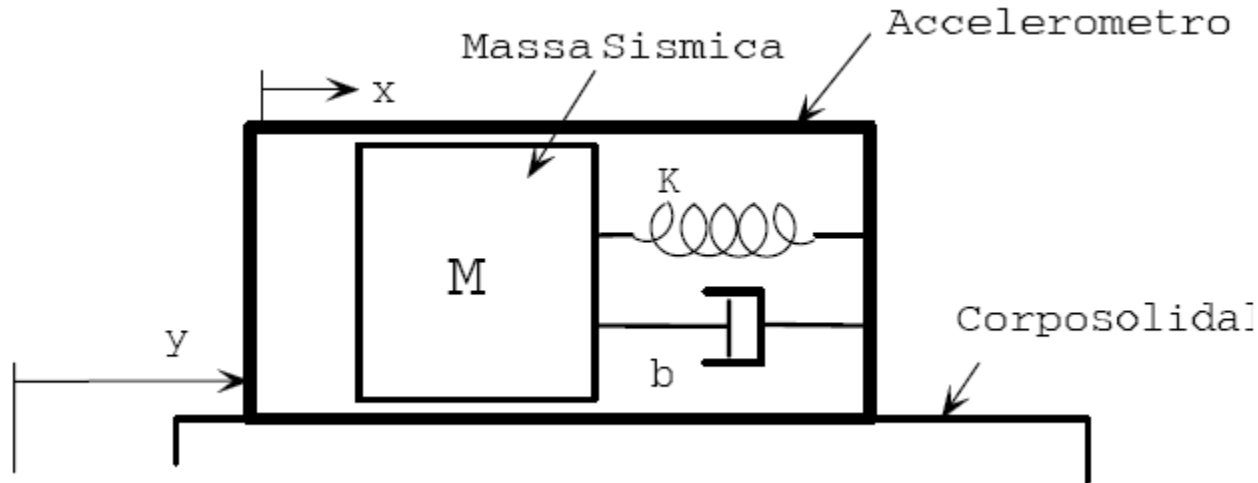
- Molto spesso le celle di carico si basano sugli estensimetri. Ad esempio in figura è riportata una cella di carico per misurare una forza di sollevamento.



- Gli estensimetri sono elettricamente connessi a ponte.
 - La forza F provoca un allungamento degli estensimetri R_2 e R_4 ed una compressione degli estensimetri R_1 e R_3 .
 - È possibile dimostrare che questa configurazione del ponte è tale da dare la massima variazione di tensione a seguito di queste variazioni, mentre le variazioni conseguenti alla temperatura sono minimizzate.

Accelerometro

- L'accelerometro è costituito da una massa sismica che si muove all'interno di un contenitore solidale a corpo di riferimento.
- La massa sismica è quindi connessa ad una molla di coefficiente elastico K e ad uno smorzatore con coefficiente di attrito viscoso b .



Accelerometro

- Equilibrio delle forze applicate alla “massa sismica”:

$$M \frac{d^2 x_m}{dt^2} = -b \frac{dx}{dt} - Kx$$

dove $x_m = y + x$ è la posizione assoluta della massa sismica. Si ha che:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = -M \frac{d^2 y}{dt^2}$$

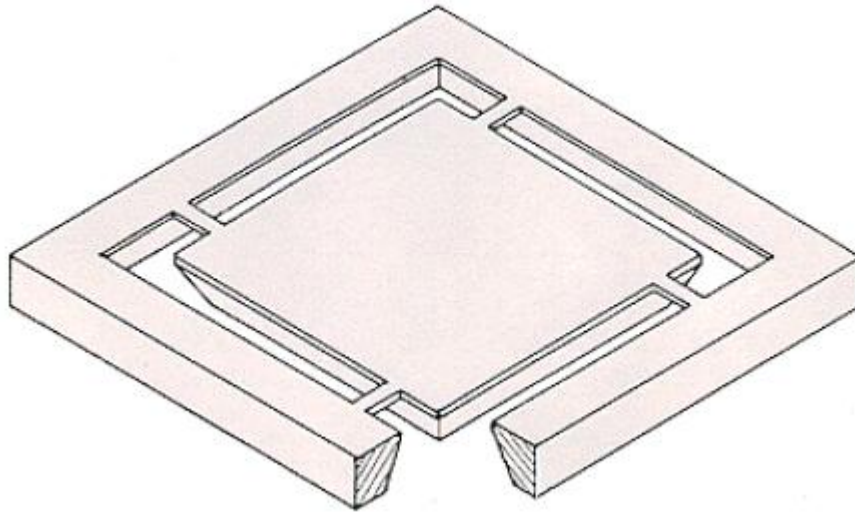
All'equilibrio

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dx}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad a = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{K}{M} x$$

quindi a è misurabile con un sensore di posizione lineare, oppure misurando direttamente la forza $F = Kx$.

Accelerometro

- Nella pratica, nella maggior parte dei casi pratici gli accelerometri sono realizzati sfruttando le capacità di miniaturizzazione del silicio, che permette di realizzare una massa sismica connessa tramite barre di sospensione (che agiscono come molle) ad un supporto, il tutto con lo stesso materiale



- Questi componenti vengono realizzati sfruttando contemporaneamente le proprietà meccaniche ed elettriche di un circuito integrato (**Micro-Electro Mechanical System**)

Accelerometro

- La misura della forza elastica può essere effettuata integrando nelle barre di sospensione:
 - dei resistori estensimetrici, connessi poi con la nota configurazione a ponte di Wheatstone;
 - dei cristalli piezoelettrici, connessi poi ad amplificatori di carica.
- L'accelerometro viene utilizzato anche per effettuare misure vibrazionali su componenti meccanici. Tuttavia, occorre notare che il sistema massa/molla/smorzatore nel contenitore dell'accelerometro è un sistema del secondo ordine, il quale avrà quindi una certa frequenza di risonanza:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

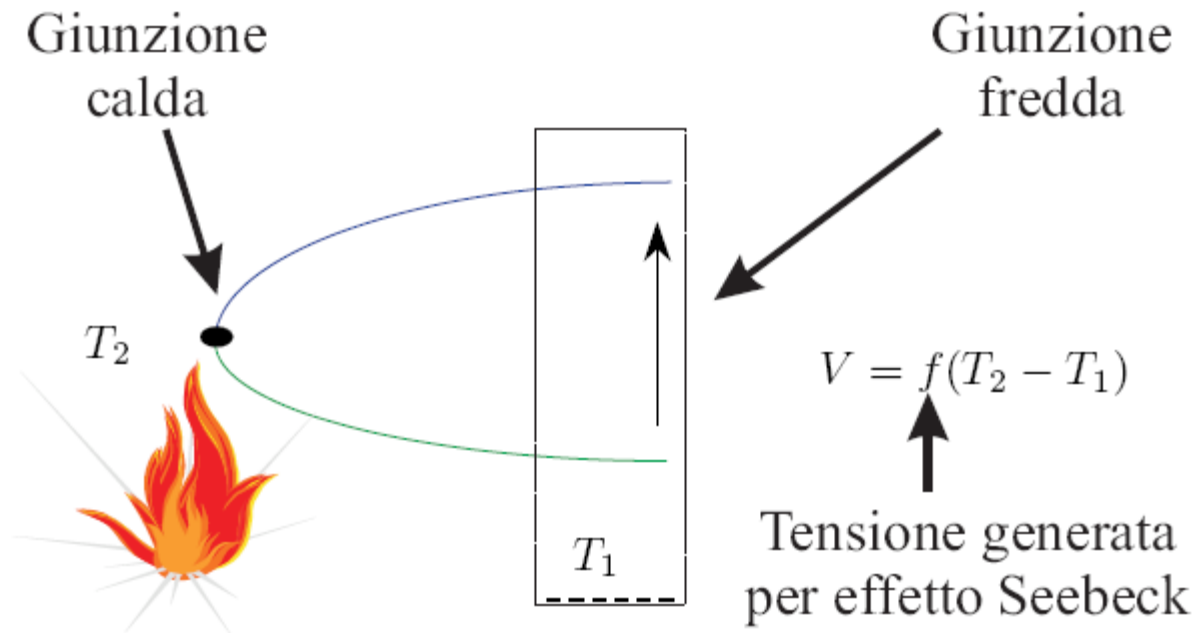
- Occorre quindi prestare attenzione a non imprimere al dispositivo vibrazioni a frequenza vicine a quella di risonanza per evitare picchi nella risposta

Sensori di temperatura

- Termocoppia
- Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)
- Termistore

Termocoppia

- Il principio di funzionamento della termocoppia si basa sull'Effetto Seebeck:
 - quando una giunzione tra due metalli viene riscaldata si produce ai terminali liberi una differenza di potenziale che, per piccole differenze di temperatura è **approssimativamente lineare**.



Termocoppia

In relazione ai metalli usati nella giunzione, le termocoppie vengono classificate secondo lo standard ANSI con lettere maiuscole.

Tipo	E	J	K	R	T
	Nichel-Cromo (+) Costantana (-)	Ferro (+) Costantana (-)	Nichel-Cromo (+) Nichel-Alluminio (-)	Platino-Rodio (+) Platino (-)	Rame (+) Costantana (-)
T_{min}	95 °C	95 °C	95 °C	870 °C	-200 °C
T_{max}	900 °C	760 °C	1260 °C	1450 °C	350 °C
V_{max}	68.78 mV	42.25 mV	50.63 mV	16.74 mV	17.81
Errore	±1.7 °C	±2.2 °C	±2.2 °C	±1.4 °C	±0.8 °C

Termocoppia

- La caratteristica temperatura-tensione della termocoppia è non lineare, soprattutto per escursioni di temperatura rilevanti ($V = f(T)$).
- Per determinare il corretto valore di temperatura a partire dalla misura della tensione è necessario quindi eseguire un'operazione di linearizzazione, che può essere effettuata attraverso l'inversione della relazione $V = f(T)$ ($T = f^{-1}(V)$), oppure attraverso la ricerca di un valore approssimato memorizzato in una tabella di dati noti a priori da osservazioni sperimentali (Look-Up Table).
- La soluzione mediante la Look-Up table è preferibile per l'implementazione software su processori dalle prestazioni computazionali limitate.

Termocoppia

- Pregi
 - Autoeccitante
 - Basso costo
 - adatto per un utilizzo in ambienti ostili
 - Adatto per misurare temperature molto elevate
- Difetti
 - La tensione dipende non linearmente dalla temperatura
 - look up table, polinomi interpolanti
 - Richiede la compensazione del giunto freddo
 - Restituisce segnali di tensione molto bassi

È il sensore di temperatura standard per le applicazioni ad altissima temperatura e, per il suo basso costo, è usato anche in applicazioni domestiche

Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)

- Gli **RTD**, sono dispositivi in cui si sfrutta la variazione di resistività (quindi di resistenza) al variare della temperatura.
- La caratteristica approssimata è data da:

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

dove R_0 è la resistività nominale (a 0 °C).

- **Esempio:** RTD al platino con $R_0=100$ a 0°C (Pt100)

$$\alpha = 39.27 \times 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$$

campo di applicazione [-200,+850]

- Un'approssimazione più precisa, ma non lineare, della caratteristica resistenza-temperatura è data da:

$$R(T) = R_0(1 + AT - BT^2)$$

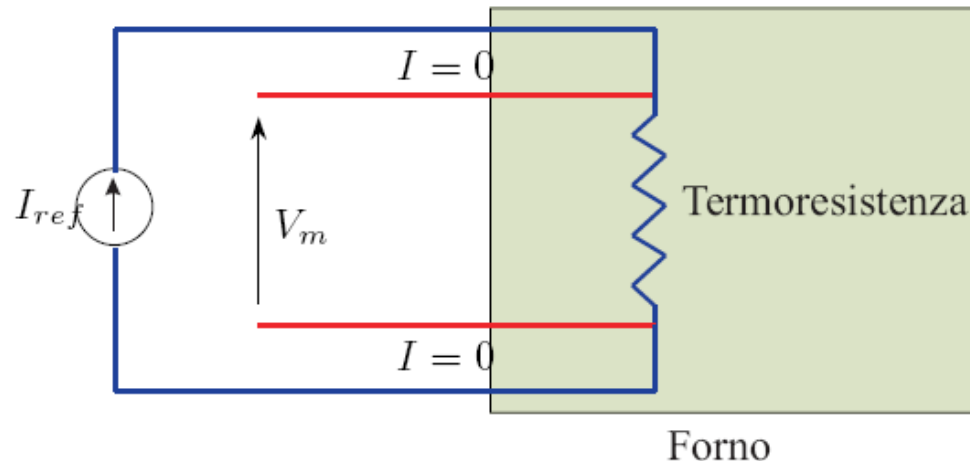
$$A = 3.986 \times 10^{-3} \text{ e } B = 5.88 \times 10^{-7}$$

Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)

La resistenza non può essere misurata direttamente, ma occorre un circuito di alimentazione e di acquisizione. Le possibili soluzioni sono:

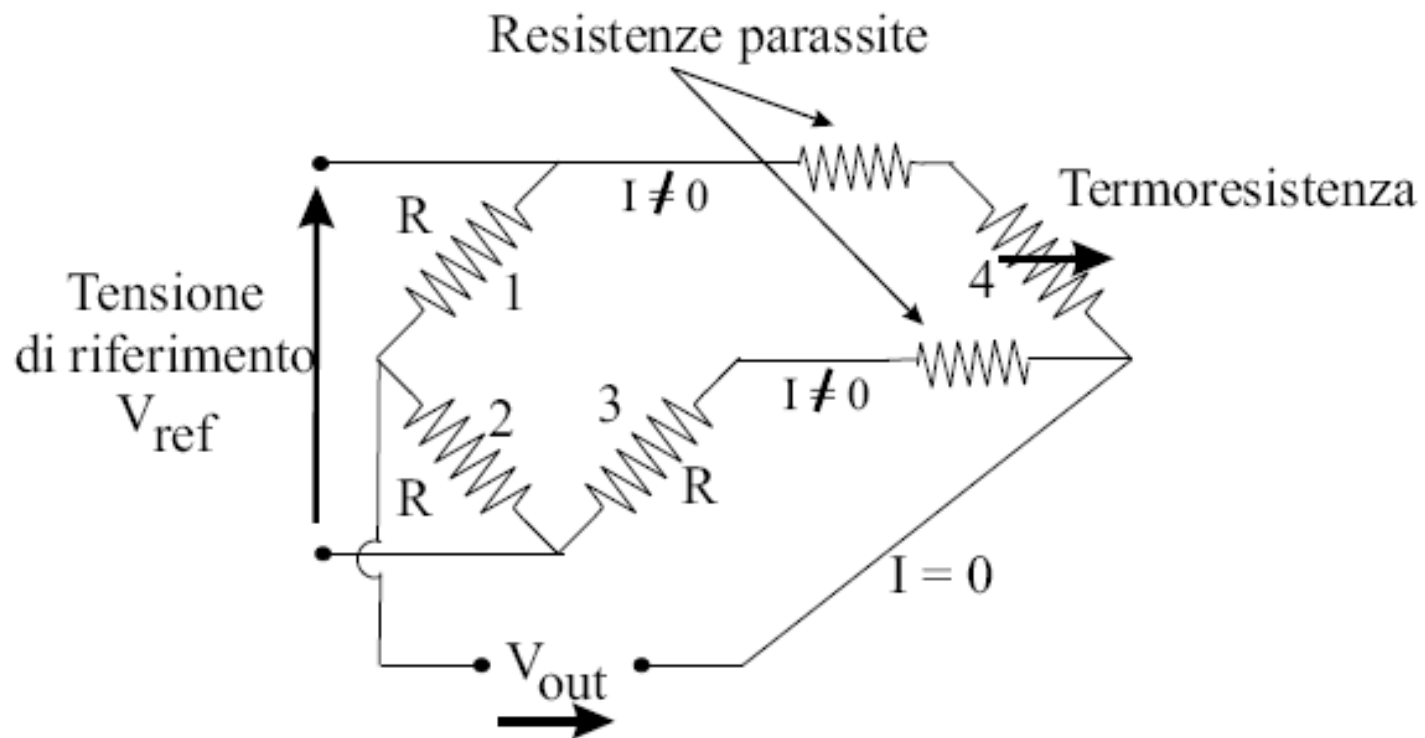
1. Collegamento ad un generatore di riferimento di corrente e misura della tensione ai capi del sensore
2. Utilizzo di un ponte di Wheatstone

Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)



- Quattro collegamenti per assicurare una buona precisione di funzionamento, altrimenti la resistenza dei cavi di collegamento si sommerebbero a quella del sensore.
 - Considerando che la resistività tipica di un buon conduttore è di $0.1/m$, si ha che pochi metri di collegamento producono una resistività pari a quella del segnale utile da acquisire.
- In questa configurazione vi sono due circuiti distinti. Un circuito serve ad imprimere una corrente di riferimento, mentre l'altro circuito serve ad acquisire il segnale.
 - Sul circuito di acquisizione non scorre corrente, e quindi l'effetto di resistenze parassite non produce cadute di tensione spurie.

Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)



Termoresistenza o Resistance Thermal Detector (RTD)

- Pregi
 - Idoneo al funzionamento in ambienti ostili
 - Molto lineare
 - Dimensioni anche molto ridotte
 - elevata velocità di risposta
 - basso costo
- Difetti
 - Richiede un circuito di alimentazione
 - Temperatura massima minore di quella della termocoppia

È il sensore di temperatura standard per le applicazioni ad temperatura intermedia ed è caratterizzato da un'elevata accuratezza

Termistore

- Anche il termistore si basa sull'effetto termoresistivo per misurare la temperatura.
- In questo caso l'elemento sensibile è un materiale semiconduttore nel quale la resistenza varia negativamente al variare della temperatura.
- Dimensione molto minore ed un maggiore coefficiente di temperatura (quindi, maggiore sensibilità) rispetto al RTD
- La dipendenza del valore della resistenza dalla temperatura è fortemente non lineare:

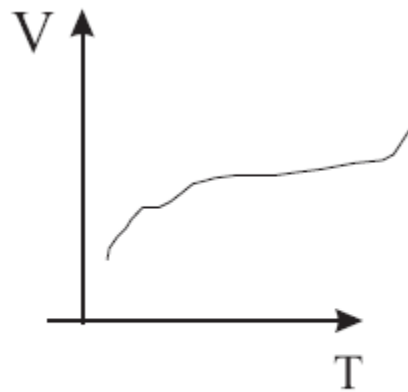
$$R(T) = R_0 e^{\frac{B}{T-T_0}}$$

Termistore

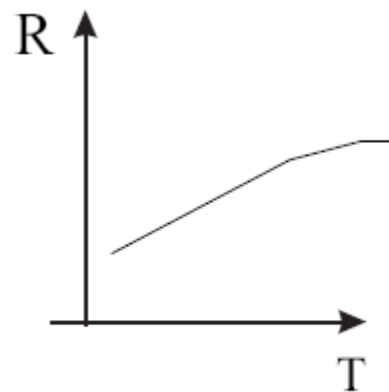
Caratteristiche essenziali del componente sono:

- **Campo di misura:** da -100°C a $+150^{\circ}\text{C}$, (da -30°C a $+100^{\circ}\text{C}$ per versioni lineari)
- **Linearità:** limitata
- **Riproducibilità:** limitata
- **Sensibilità:** elevatissima.
 - Il Termistore viene spesso utilizzato in sistemi di protezione termica nei quali l'elevato guadagno e la notevole nonlinearietà sono utilizzati per realizzare un sensore ad uscita logica, in grado di rilevare il superamento di una certa soglia di temperatura.
- La realizzazione a semiconduttore lo rende abbastanza delicato ed inadatto ad impieghi in condizioni di elevato stress meccanico.
- Il termistore si interfaccia come un RTD se usato come sensore continuo.

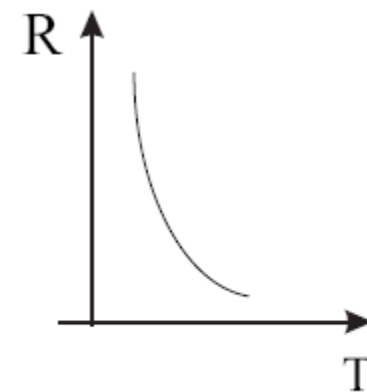
Confronto tra i sensori di temperatura



(a) Termocoppie



(b) RTD



(c) Termistori

Confronto tra i sensori di temperatura

	Termocoppie	Termoresistenze	Termistori
Pro	<ul style="list-style-type: none">• Autoeccitante,• Semplice,• Campo di misura elevato,• Economico.	<ul style="list-style-type: none">• Molto stabile,• Molto accurato,• Molto lineare.	<ul style="list-style-type: none">• Molto sensibile,• Veloce,• Elevato rapporto S/N.

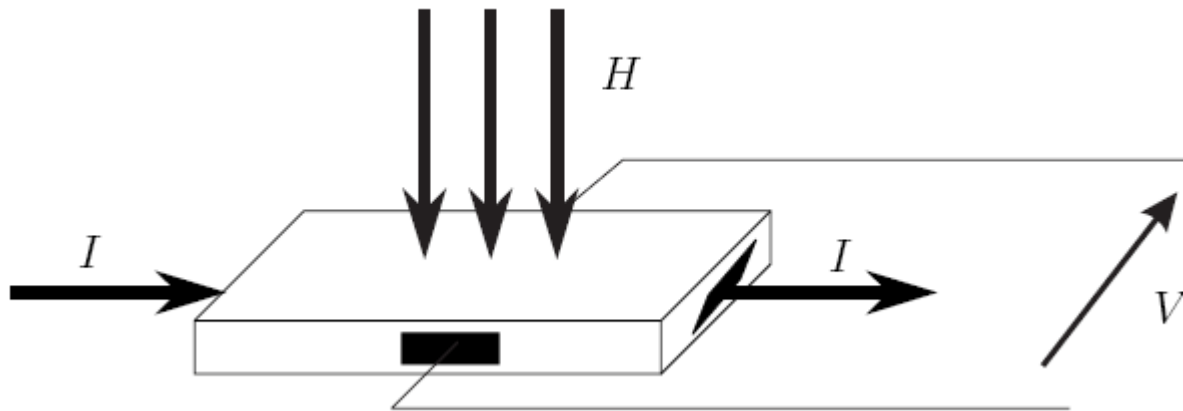
Confronto tra i sensori di temperatura

	Termocoppie	Termoresistenze	Termistori
Contro	<ul style="list-style-type: none">• Non lineare,• Bassa tensione di uscita,• Serve una temperatura di riferimento,• Poco sensibile.	<ul style="list-style-type: none">• Serve un riferimento di corrente,• Bassa resistenza nominale,• Autoriscaldamento	<ul style="list-style-type: none">• Estremamente non lineare,• Campo di misura limitato,• Serve un riferimento di corrente,• Autoriscaldamento

Sensore di Corrente

- Il modo più semplice di eseguire la misura di corrente è il **metodo volt-amperometrico**:
 - **si misura la caduta di tensione su di una resistenza di misura percorsa dalla corrente incognita.**
- Questo metodo molto semplice risulta però inefficace per misurare correnti molto elevate tipiche dei circuiti di controllo dei motori elettrici che possono raggiungere anche le centinaia di Ampère.
- In tal caso si utilizza sensori di tipo isolato, che possono essere di due tipologie:
 - A misura diretta:
 - in questo caso si effettua una misura della tensione prodotta per effetto Hall dalla corrente incognita.
 - A compensazione di campo:
 - in tal caso si induce in un circuito elettrico una corrente proporzionale a quella incognita ma di minore intensità, misurandola poi con un circuito a misura diretta.

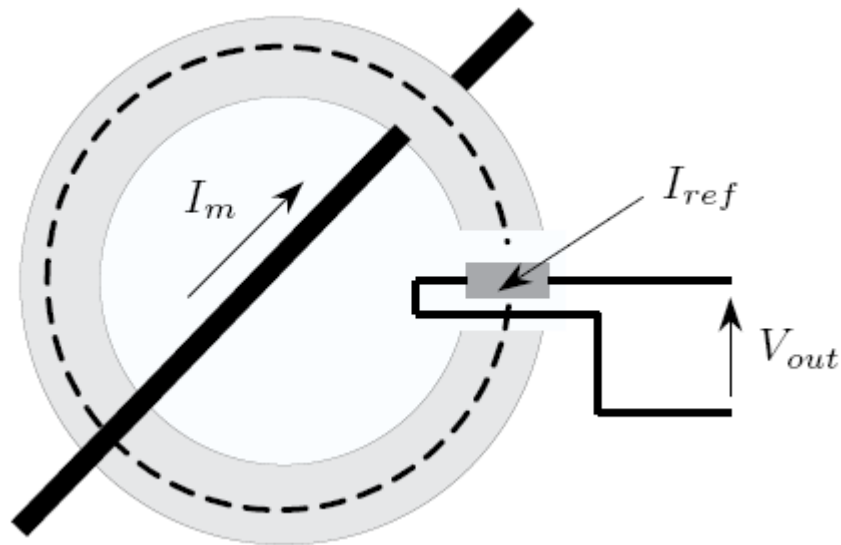
Sensori di tipo isolato: Effetto Hall



- Se 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.

Sensori di Corrente ad effetto Hall a misura diretta

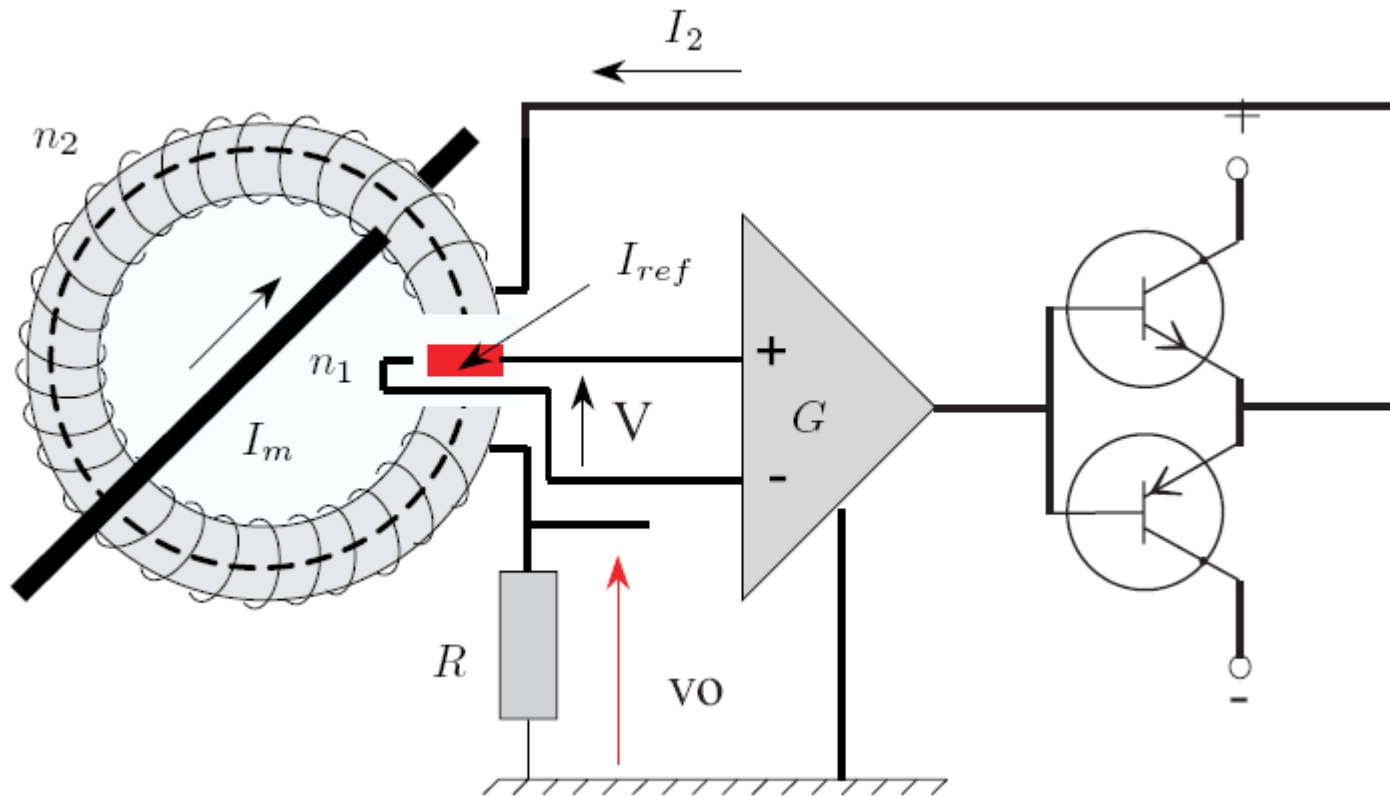
Il flusso indotto in un toroide di materiale ferromagnetico è proporzionale alla corrente I_m , idem per la tensione V_{out} di direzione perpendicolare alla corrente costante I_{ref} :



Sensori di Corrente ad effetto Hall a misura diretta

- In tale schema è presente un circuito magnetico costituito da un nucleo toroidale aperto di ferrite o di altro materiale ferromagnetico.
- Nell'apertura è alloggiato il sensore ad effetto-Hall sul quale il nucleo toroidale concentra il campo magnetico generato dalla corrente elettrica incognita I_m .
- Su questo circuito viene fatta passare una piccola corrente di riferimento I_{ref} che, accoppiandosi con il campo magnetico, genera per effetto Hall una tensione V_{out} proporzionale alla corrente I_m .

Sensori di Corrente ad effetto Hall compensazione di campo



Sensori di Corrente ad effetto Hall compensazione di campo

- La struttura generale è simile a quella del sensore a misura diretta, con la differenza che sul nucleo toroidale trova posto un avvolgimento con n_2 spire pilotato dall'uscita dell'amplificatore (circuito secondario).
- All'ingresso dell'amplificatore vi è la tensione V generata per effetto Hall dalla interazione tra la corrente di riferimento I_{ref} ed il campo magnetico impresso nel nucleo toroidale.
- L'uscita dell'amplificatore pilota un generatore di corrente che imprime una corrente I_2 sull'avvolgimento secondario. L'avvolgimento è fatto in modo tale che la corrente I_2 imprime un campo magnetico che si oppone a quello generato dalla corrente incognita I_m .
- Se i due campi magnetici sono in equilibrio, vale a dire se:

$$|I_m|n_1 = |I_2|n_2$$

dove $n_1 = 1$, allora la tensione V è nulla.

Sensori di Corrente ad effetto Hall compensazione di campo

- L'amplificatore si trova quindi in un circuito retroazionato, in cui si impone un guadagno di anello elevato utilizzando un amplificatore con guadagno opportuno.
- In condizione di stabilità si ha:

$$|I_2| = \frac{|I_m|}{n_2}$$

- A questo punto il problema è riportato alla misura della corrente I_2 , che risulta essere n_2 volte più piccola della corrente originaria, e quindi facilmente misurabile con il metodo volt-amperometrico.
- Questo secondo schema risulta leggermente più complesso del precedente per la presenza dell'avvolgimento secondario.
- Tuttavia esso è preferibile e globalmente non risulta più costoso in quanto consente di utilizzare il sensore ad effetto di Hall nell'intorno della regione di campo nullo nella quale la linearità è garantita anche con dispositivi di classe relativamente economica.

Sensore di Corrente ad effetto Hall

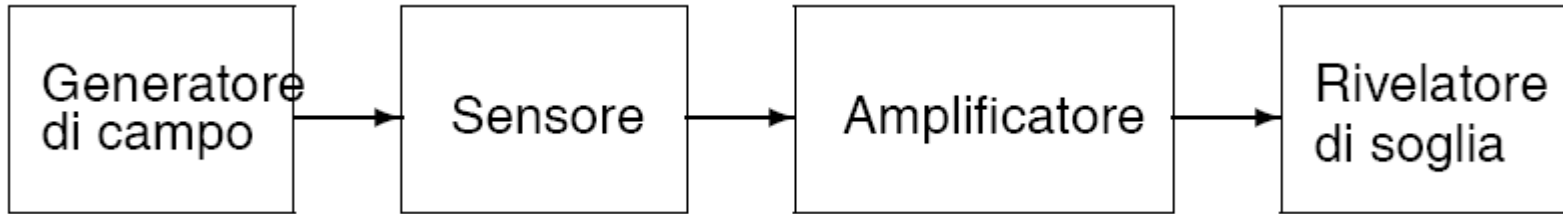
- Pregi
 - Molto lineare
 - Dimensioni anche molto ridotte
 - elevata velocità di risposta
 - basso costo
- Difetti
 - Richiede un circuito di alimentazione

Esempio: [ACS706ELC-20A](#)

È il sensore di corrente standard per misure di correnti superiori ai 5 A ed è dotato di un'elevata accuratezza

Sensori di Prossimità

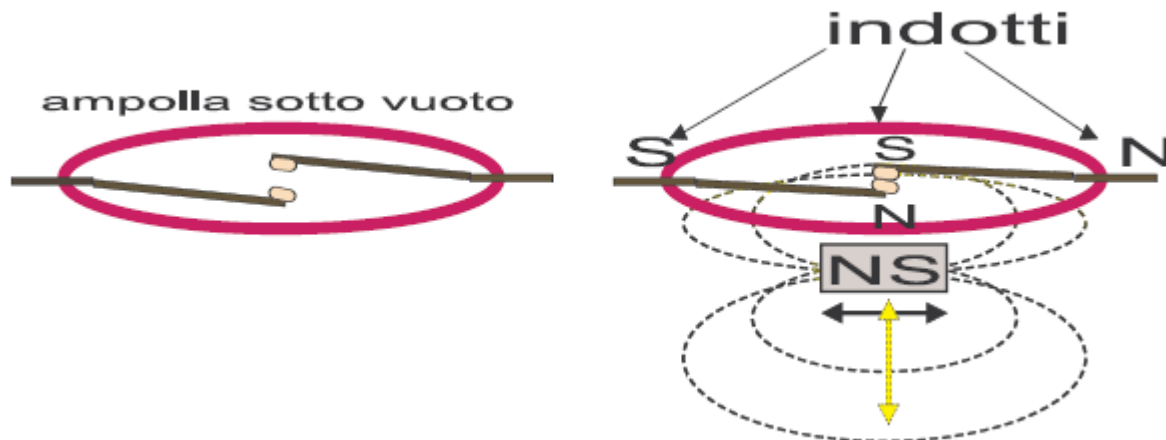
- I sensori di prossimità o di presenza per applicazioni industriali sono molto spesso realizzati per fornire informazioni di tipo logico.
- Lo schema di funzionamento più comune è:



- I vari tipi di sensore si classificano in base alla realizzazione del blocco generatore di campo. In particolare si distinguono generatori di:
 - Campo Magnetico (contatto Reed, effetto Hall)
 - Campo Luminoso
 - Campo Acustico (ultrasuoni)

Sensori di prossimità a Contatto Reed

- Sono costituiti da lamine di materiale ferromagnetico (Ferro-Nichel) a bassa riluttanza racchiuse da un bulbo di vetro.
- Il campo magnetico generato da un magnete permanente o da bobine percorse da corrente, quando si trovano in prossimità del bulbo, induce sulle lamine polarità magnetiche di segno opposto.
- Le due lamine tendono ad avvicinarsi o allontanarsi (a seconda della metodologia costruttiva: *Contatto Normalmente Aperto* o *Normalmente Chiuso*) chiudendo un circuito elettrico.



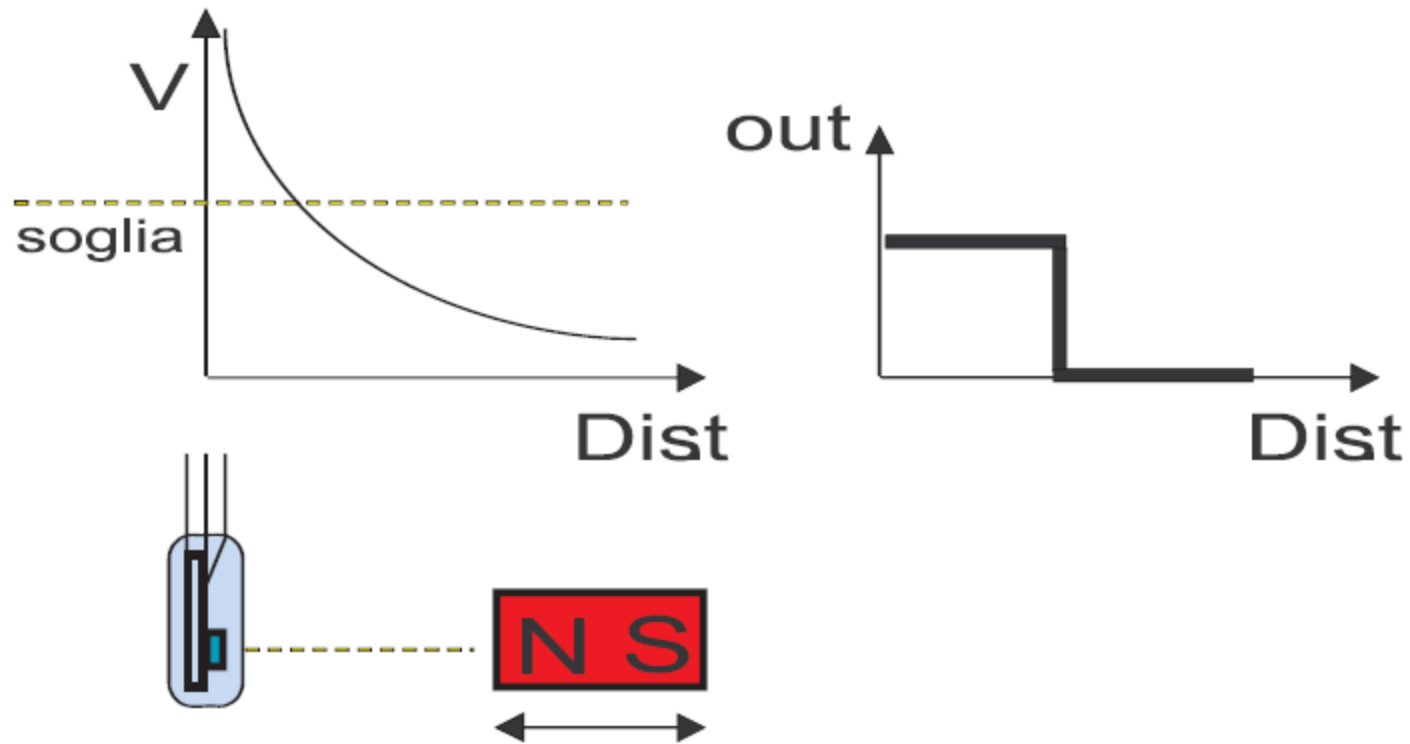
Sensori di prossimità a Contatto Reed

- La realizzazione in un bulbo di vetro garantisce un buon livello di protezione da polveri e umidità.
- **Tempo di Vita:** 10^8 operazioni.
- Valori di tensione o corrente elevati provocano incollamento dei contatti (riduzione tempo di vita).
- Effetti di rimbalzo limitano la frequenza di attivazione.

Sensori di Prossimità ad Effetto Hall

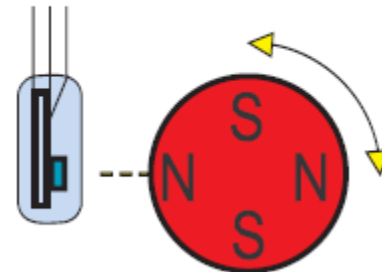
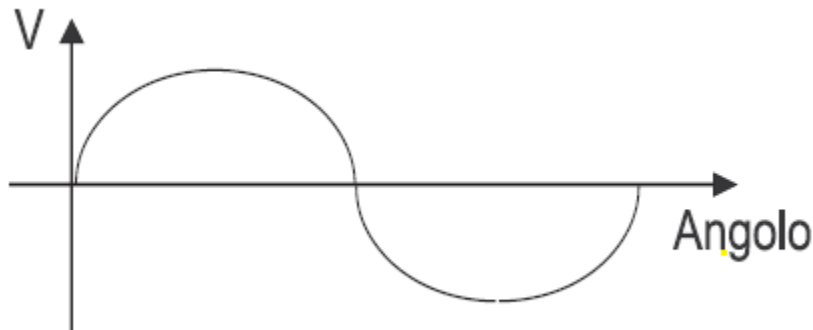
- In questo caso il campo magnetico viene rilevato da un sensore ad effetto Hall, il quale viene alimentato con una corrente costante.
- L'intensità del campo magnetico cala con l'aumentare della distanza del magnete dal sensore Hall, e con esso diminuisce la tensione generata.
- Se tale tensione pilota un rivelatore di soglia (con isteresi, **Schmitt Trigger**), avremo un'uscita alta se il magnete si avvicina oltre la distanza di azionamento, altrimenti bassa.

Configurazioni dei Sensori di Prossimità ad Effetto Hall



Configurazioni dei Sensori di Prossimità ad Effetto Hall

- Esistono realizzazioni nelle quali i magneti sono disposti su un elemento in rotazione. Con questa configurazione è possibile ottenere, oltre a sensori di prossimità:
 - sensori di posizione incrementali.
 - sensori di velocità.
 - dispositivi per il controllo delle posizioni di commutazione delle fasi nei motori Brushless a campo trapezoidale, nei quali occorre rilevare il passaggio del magnete di rotore per le posizioni di commutazione.



Caratteristiche dei Sensori di Prossimità Effetto Hall

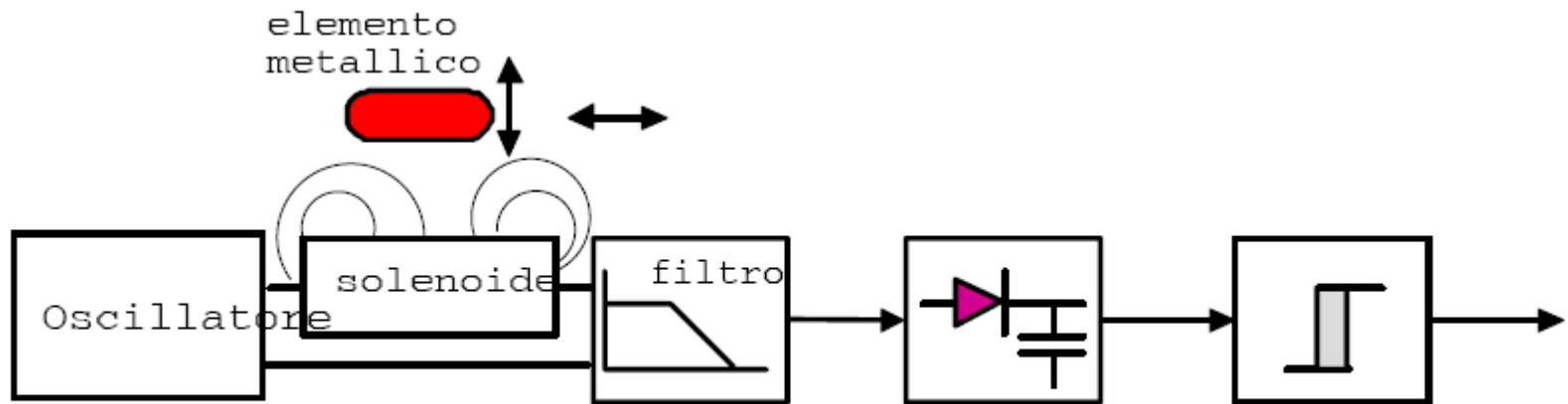
Caratteristiche:

- **Costo limitato:** elemento sensore, amplificatore, regolatore di corrente, Schmitt Trigger integrati in un unico chip.
- **Elevata frequenza di lavoro:** fino a 25 KHz.
- **Elevata linearità** al variare della tensione di alimentazione e della temperatura.
- **Molteplicità di applicazioni.**

Sensori di Prossimità Induttivi

- Si dividono in due categorie: *attivi e passivi*
- Nei sensori induttivi **attivi** un circuito oscillatore alimenta un solenoide avvolto su un nucleo di ferrite aperto, in modo tale da realizzare un generatore di flusso magnetico con linee di flusso che influenzano il campo d'azione nel quale si viene a trovare l'oggetto da rilevare, chiamato **azionatore**.
- La presenza dell'azionatore, un qualunque oggetto con proprietà conduttive (in genere metallico) in prossimità del solenoide, fa sì che il campo magnetico induca delle correnti parassite sul corpo, a causa delle quali parte della potenza del campo magnetico viene dissipato.
- L'ampiezza dell'oscillazione diminuisce al diminuire della distanza dell'azionatore.
- Se l'ampiezza diminuisce oltre una certa soglia il sensore attiva l'uscita.

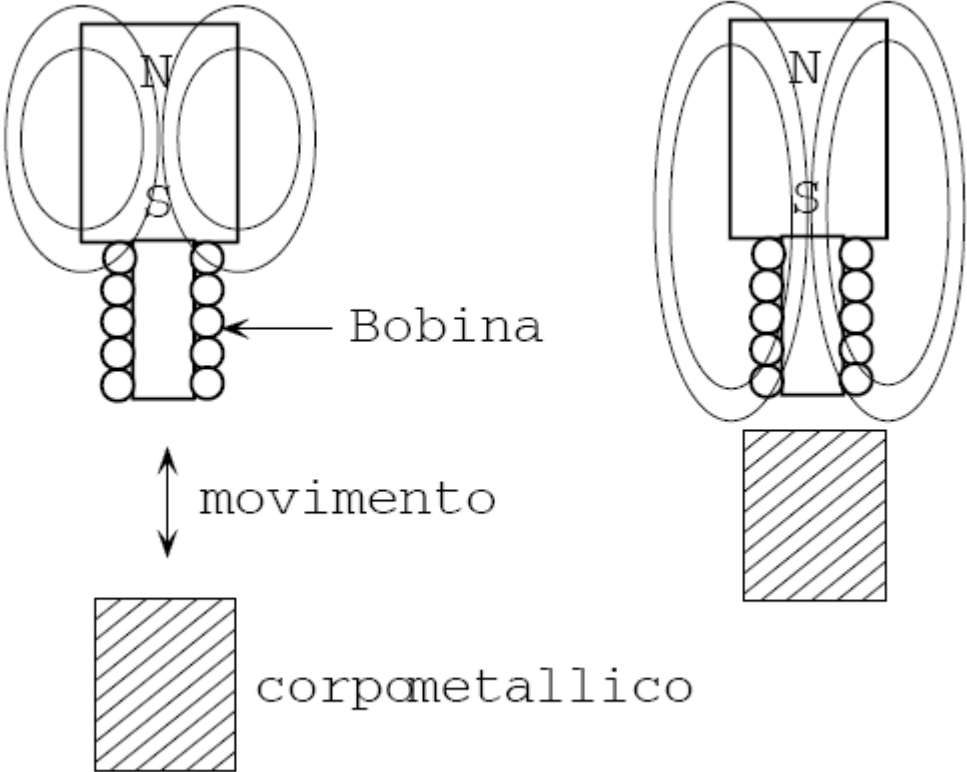
Schema realizzativo dei sensori induttivi attivi



Sensori induttivi passivi

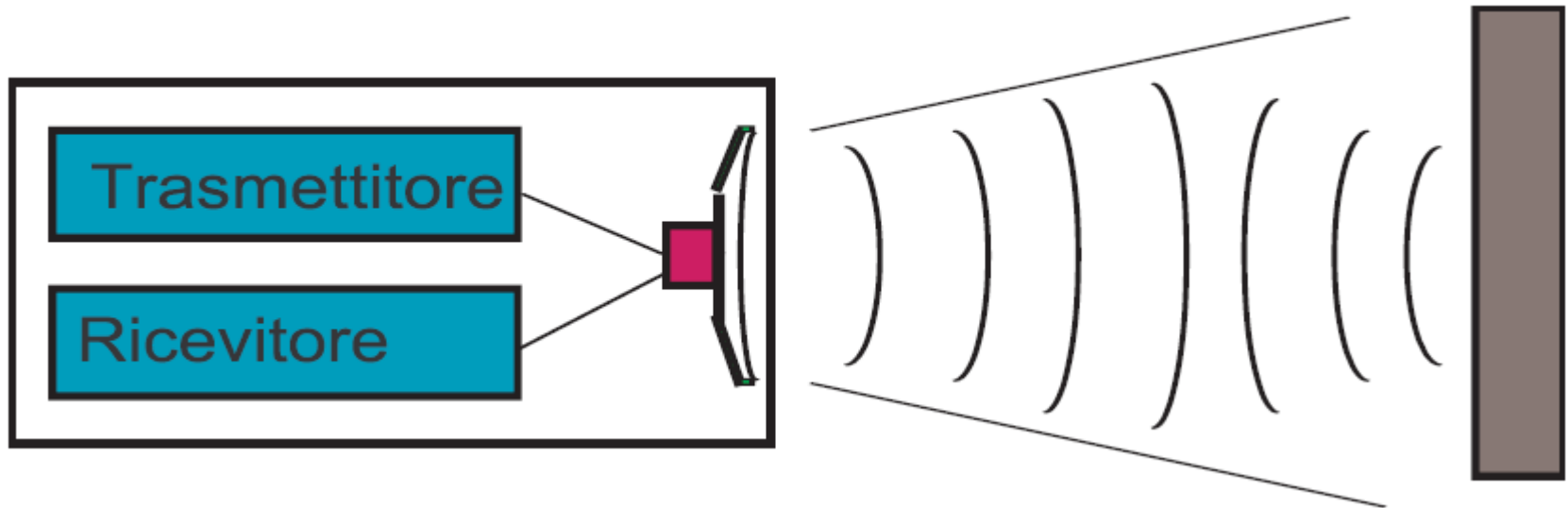
- In queste realizzazioni, il solenoide non è alimentato, ma viene vincolato ad un magnete permanente. In condizioni di riposo, il campo magnetico non si concatena con il solenoide.
- **L'azionatore** metallico, quando si approssima al sensore, provoca questa volta una **deviazione del campo magnetico** verso il solenoide.
 - A causa della *variazione* nel tempo del flusso concatenato, nel solenoide viene indotta una certa tensione.
- Se la tensione di uscita supera la soglia di attivazione, l'uscita logica viene portata al valore alto.
- Questa volta non è la distanza in sé a provocare l'attivazione dell'uscita, ma il movimento dell'azionatore. Di conseguenza, tale tipo di sensore viene spesso utilizzato per misurare la velocità di rotazione di ruote dentate.

Schema realizzativo dei sensori induttivi passivi



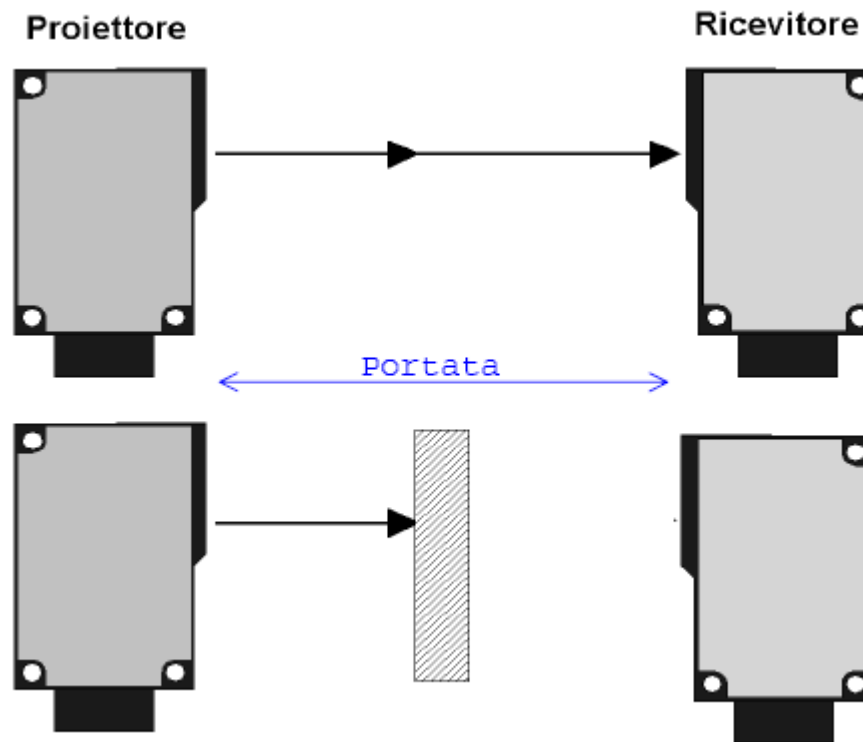
Sensori di Prossimità ad Ultrasuoni

- Viene misurato il ritardo nella riflessione di un treno di impulsi acustici ad alta frequenza.
- Sfruttano la capacità di un qualunque (o quasi) materiale di riflettere il suono.

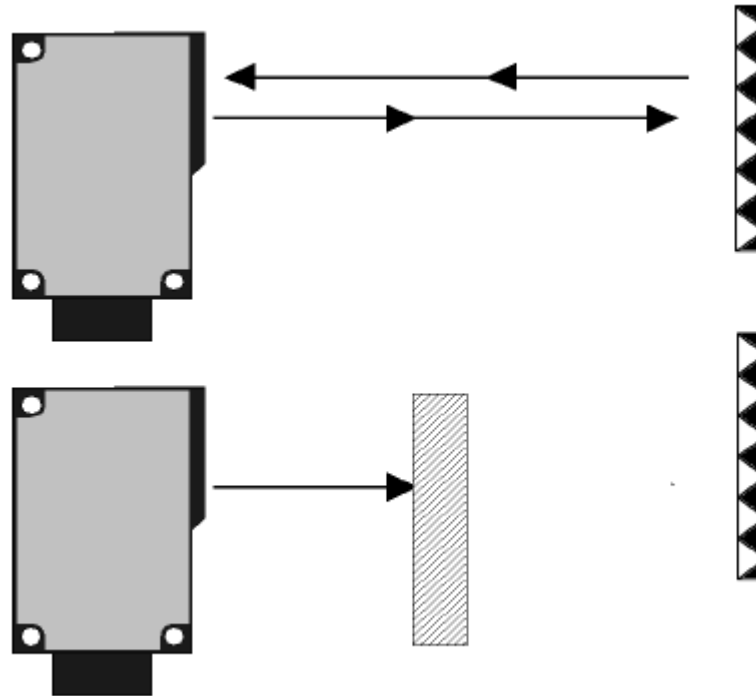


Sensori Logici Optoelettronici

Permettono di rilevare la presenza di oggetto di qualunque materiale, purché interrompa il flusso luminoso.

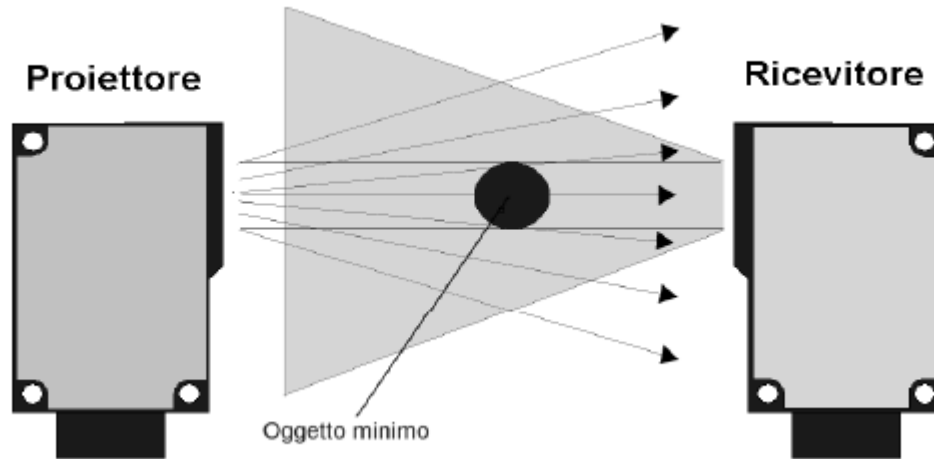


Sensori optoelettronici: realizzazione con catarinfrangente



Trasmittitore e ricevitore sono integrati in un unico dispositivo.

Sensori optoelettronici : apertura angolare



- Il fascio luminoso emesso e lo spazio rilevato dal ricevitore hanno entrambi forma conica (**apertura angolare**).
- Un'apertura angolare più ampia facilita l'allineamento dei componenti in fase di installazione.
- D'altra parte, un'apertura angolare molto grande significa anche distanze di lavoro fra emettitore e ricevitore più basse, in quanto solo una piccola parte della luce emessa (e quindi dell'energia consumata dall'emettitore) viene effettivamente ricevuta.
- Inoltre, una grande apertura angolare può generare errori di rilevazione a causa di effetti di riflessione su superfici lucide.