

SENSORI E TRASDUTTORI

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E DI CONDIZIONAMENTO DEI SEGNALI

GENERALITÀ

La strumentazione dedicata al controllo dei processi industriali attende principalmente alle seguenti funzioni:

- a) Misura: con componenti/dispositivi, che raccolgono informazioni dal processo:
sensori, trasduttori e trasmettitori
- b) Regolazione: con componenti/dispositivi, che dalle informazioni provenienti dal processo, modulano l'energia fornita al processo stesso: ***regolatori e attuatori***
- c) Controllo/sorveglianza/supervisione: con componenti/dispositivi, che permettono di osservare il funzionamento del processo: ***indicatori, registratori e calcolatori***
- d) Sicurezza: con componenti/dispositivi, che rendono sicuri sia processi pericolosi ad alta pressione e/o temperatura sia processi elettrici, chimici, ecc, verso l'uomo e l'ambiente: ***allarmi, blocchi e protezioni***

In generale quindi, la strumentazione industriale, è una strumentazione di misura, non solo nella funzione a) propriamente di misura, ma pure nelle funzioni b), c), d), in quanto per poter regolare, controllare e garantire la sicurezza, abbisogna di componenti e/o dispositivi interni e/o esterni, che rilevano le informazioni dal processo.

La funzione misura, è pertanto la funzione cardine della strumentazione, che si attua solitamente mediante i seguenti componenti (vedasi anche Fig. 1):

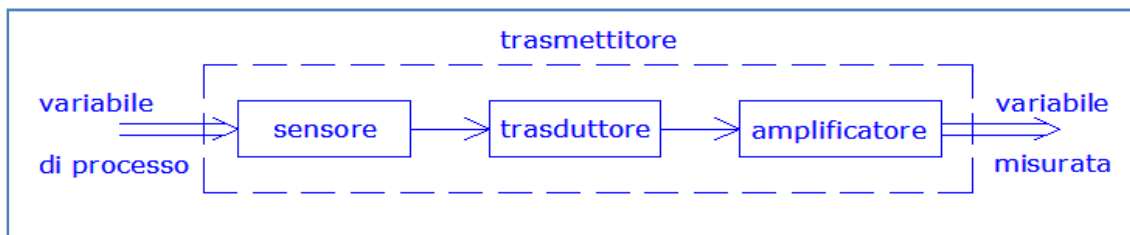


Fig. 1 – COMPONENTI TIPICI DELLA STRUMENTAZIONE DI MISURA

- **Sensore:**

Elemento primario di una catena di misura che converte la variabile di processo in un segnale misurabile, secondo una legge fisica

- **Trasduttore:**

Dispositivo che converte un segnale misurabile o una variabile fisica o chimica (variabile di ingresso) in una variabile di uscita della stessa o diversa natura, secondo una legge definita

- **Amplificatore:**

Dispositivo che converte la variabile di uscita di un sensore/trasduttore in un segnale normalizzato

Tutti questi tre componenti formano il classico:

- **Trasmettitore:**

strumento di misura con segnale di uscita normalizzato (0,2 – 1,0 bar se pneumatico; 4-20 mA o 0-20mA se elettrico)

Lo strumento di misura in genere, ed il trasmettitore in particolare, può essere composto, da un solo sensore, o da un solo trasduttore, accoppiato direttamente ad un circuito amplificatore. Data inoltre, la quasi equivalenza di definizioni tra sensore e trasduttore, che differiscono solo dal fatto, che il sensore rispetto al trasduttore, è sempre un elemento primario di misura, governato da una determinata legge fisica, mentre il trasduttore, può essere anche un elemento intermedio, governato da una definita legge di funzionamento, le figure del componente sensore e trasduttore talvolta svaniscono, e pertanto nel contesto verrà considerato il seguente termine:

Sensore/trasduttore (o semplicemente trasduttore):

elemento primario o dispositivo che converte la variabile di processo o un segnale (variabile di ingresso) in un segnale di uscita (variabile di uscita) secondo una determinata legge.

SENSORE/TRASDUTTORE (O TRASDUTTORI)

Si riportano di seguito i principi di funzionamento dei principali trasduttori di tipo meccanico, elettrico e ottico.

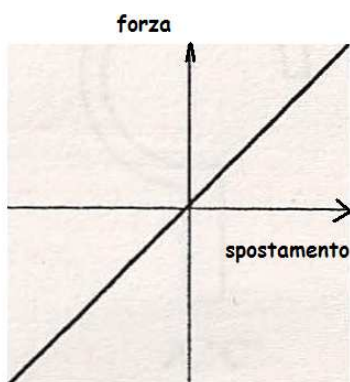
TRASDUTTORI MECCANICI

In questa parte vengono esaminati i principali trasduttori meccanici, che trasducono una grandezza fisica di ingresso in una grandezza meccanica di uscita, che solitamente è uno spostamento oppure una forza se il trasduttore anziché essere del tipo libero è del tipo vincolato. In particolare verranno esaminati i trasduttori:

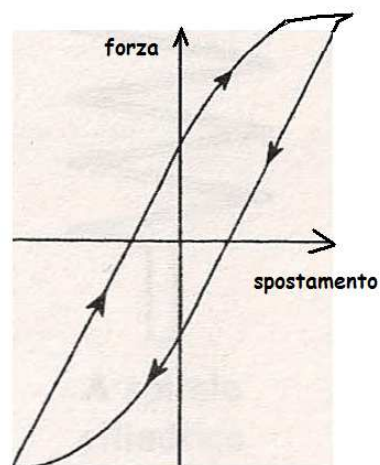
- A deformazione meccanica
- A deformazione elastica
- A deformazione termica

A DEFORMAZIONE MECCANICA

Sono trasduttori di forza o di carico in deformazione o spostamento di uscita. Operano in regime di proporzionalità tra forza applicata e deformazione provocata nel campo della legge di Hooke. La relazione ingresso-forza/uscita-spostamento idealmente lineare, rappresenta realmente fenomeni isteretici dovuti all'imperfetta risposta dei singoli cristalli microscopici che compongono la dimensione macroscopica del trasduttore. La figura 2 rappresenta in (a) la risposta ideale ed in (b) la risposta affetta dall'isteresi meccanica.



a)



b)

Fig. 2 – Risposta ideale a) e reale b) di trasduttori a deformazione meccanica

Tutti i trasduttori operano in regime di proporzionalità con relazioni ingresso/uscita governate dalle relative leggi della meccanica applicata. Per quanto concerne gli spostamenti d'uscita, questi vanno da qualche per mille a qualche per cento rispetto la lunghezza nominale del trasduttore, risettivamente per le celle a trazione o compressione e per le molle e astiche. Nel caso di quest'ultime la relazione funzionale è del tipo:

$$S = \frac{F}{K} \quad \text{dove:}$$

S : spostamento prodotto [m]

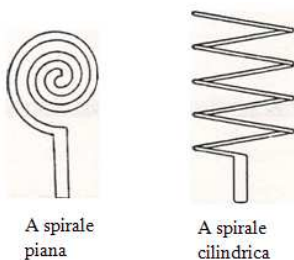
F : forza applicata [N]

Le molle sono pertanto costituite da materiali aventi modulo di rigidità costante e ripetibile.

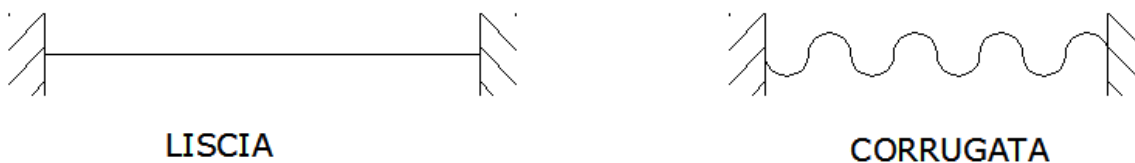
A DEFORMAZIONE ELASTICA

Sono trasduttori sempre a deformazione meccanica nei quali, l'ingresso è solitamente una pressione di fluido statica o dinamica oppure termodinamica dovuta a variazioni di temperatura del fluido in misura, mentre l'uscita è solitamente uno spostamento o una forza a seconda che il trasduttore sia libero o vincolato. Anche questi trasduttori operano nel campo proporzionale ed elastico del materiale che li compone. Tra i vari trasduttori si descrivono:

- Gli elementi elastici (a molla Bourdon)



- Le membrane



A DILATAZIONE TERMICA

Sono trasduttori meccanici di temperatura in spostamento. Sono composti da una lamina bimetallica realizzata da due metalli a coefficiente di dilatazione termica diversi, laminati l'uno sull'altro e avvolti a spirale o a elica. Solitamente il materiale a minor coefficiente di dilatazione è una lega ferro-nichel, mentre quello a maggior coefficiente di dilatazione è una lega ferro-nichel- manganese. Per effetto delle variazioni della temperatura la spirale o l'elica composta dai due materiali vincolata ad una estremità, produce una rotazione dell'estremità libera proporzionalmente alla variazione di temperatura subita. La figura 3 illustra delle tipiche configurazioni di trasduttori bimetallici

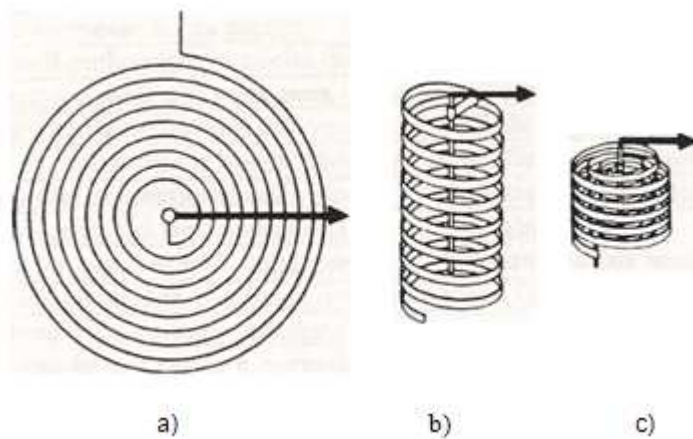


Fig. 3 – Configurazioni di trasduttori a dilatazione termica (bimetallici)

- a) A spirale
- b) A elica singola
- c) A elica doppia

TRASDUTTORI ELETTRICI

I trasduttori elettrici a seconda della tipologia di costruzione possono essere di tipo convenzionale, a film sottile, a film spesso e a semiconduttore. Per la nostra trattazione ci limiteremo a quelli *convenzionali* che utilizzano resistenze, capacità e induttanze per il rilievo di grandezze fisiche quali temperatura, umidità, spostamento e altro.

RESISTIVI

I trasduttori resistivi si basano sulla nota legge che lega la resistenza elettrica alla resistività e alle dimensioni del materiale componente:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad \text{dove}$$

R : resistenza $[\Omega]$

ρ : resistività del materiale $[\Omega \cdot m]$

L : lunghezza $[m]$

A : area $[m^2]$

La resistività del materiale (ρ) è inoltre funzione del numero di portatori di carica (n), della loro mobilità (m) e della carica elementare (e): $\rho = f(n, m, e)$. Pertanto la resistenza di un materiale può essere modulata dalle seguenti variazioni:

1. Variazioni di lunghezza (L) e di area (A)
2. Variazioni del numero di portatori di carica (n)
3. Variazioni di mobilità dei portatori di carica (m)

Sulla base di questi fenomeni che alterano la resistenza del materiale, di seguito vengono riportati i tipi di trasduttori resistivi più comunemente utilizzati:

- Potenzimetri
- Estensimetri
- Estensimetri a semiconduttore (piezoresistivi)

- Termoresistori
- Termoresistori a semiconduttore (termistori)
- Igroresistori
- Fonoresistori
- Fotoresistori

POTENZIOMETRI

Sono dei trasduttori di macrospostamento in variazioni di resistenza. Si compongono di un avvolgimento resistivo sul quale si muove un cursore con spazzole in leghe di metalli nobili. L'avvolgimento è composto da materiali metallici resistenti all'abrasione ed alla corrosione. La Fig. 4 rappresenta dei tipici potenziometri avvolti per spostamenti rettilinei (a) e per spostamenti angolari (b).

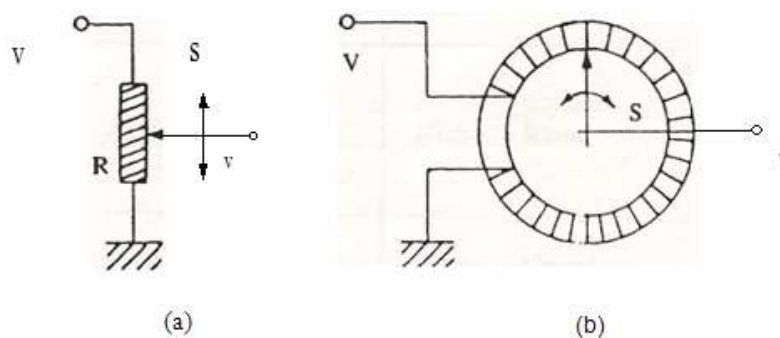


Fig. 4 – Tipi di potenziometri avvolti: a) rettilinei b) angolari

Nel caso di potenziometri alimentati la loro relazione funzionale è del tipo:

$$v = V \cdot \frac{r}{R} = f(S) \quad \text{dove:}$$

v : tensione di uscita in funzione dello spostamento (S) [V]

V : tensione di alimentazione del potenziometro [V]

R : resistenza totale del potenziometro [Ω]

r : resistenza parziale prelevata dal cursore del potenziometro [Ω]

Mediante avvolgimenti a passo costante o variabile si ottengono variazioni di resistenza di uscita lineari o non lineari con lo spostamento.

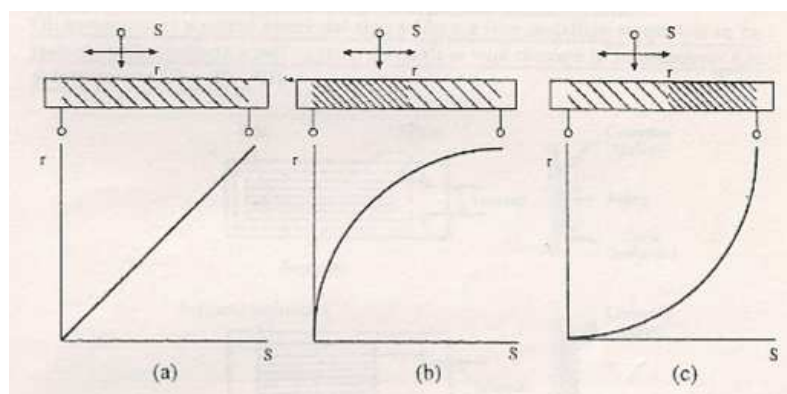


Fig. 5 – Potenziometri lineari e non lineari: a) lineari b) parabolici c) esponenziali

La caratteristica uscita-resistenza/ingresso-spostamento di un potenziometro a filo avvolto è riportata in figura 6 dove si nota l'andamento discontinuo a gradini dell'uscita-resistenza rispetto l'ingresso-spostamento, in funzione del passo del filo avvolto.

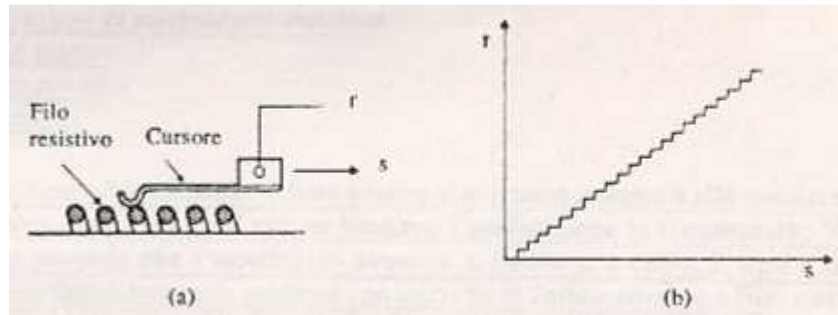


Fig. 6 – Potenziometro a filo avvolto: a) costruzione b) caratteristica resistenza / spostamento

L'andamento discontinuo della resistenza prelevata, può essere minimizzato diminuendo il passo del filo resistivo avvolto, oppure può essere annullato o quasi, ricorrendo a potenziometri a film resistivo che offrono il vantaggio di una minor abrasione spazzola / strato resistivo.

ESTENSIMETRI

Sono dei trasduttori di microspostamento in variazioni di resistenza. Gli estensimetri possono essere del tipo a filo o a film metallico supportati su un isolante sulla struttura o sull'oggetto sul quale si vuole rilevare lo spostamento o la deformazione.

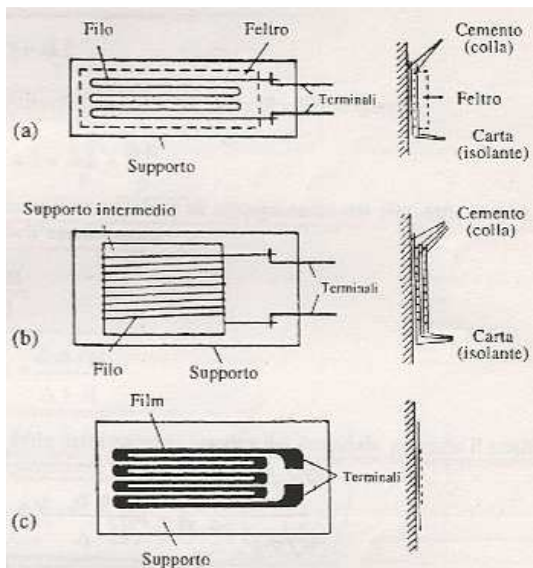


Fig. 7 – Configurazione di estensimetri metallici

- a) A filo piano
- b) A filo avvolto
- c) A film

Mentre il tipo a filo metallico è fatto aderire al supporto isolante e alla struttura di base con cementi e collanti che ne limitano l'applicazione in temperatura: 50 o 150°C, a seconda che l'incollaggio avvenga a freddo o a caldo, il tipo a film metallico è depositato sulla struttura con tecniche di fotoincisione o a film sottile, che ne migliorano l'aderenza e la stabilità in temperatura fino anche 500°C.

In ogni caso comunque la relazione funzionale che lega la resistenza del filo metallico o del film sottile è la formula vista in precedenza:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \text{ dove}$$

R : resistenza $[\Omega]$

ρ : resistività del materiale $[\Omega \cdot m]$

L : lunghezza $[m]$

A : area $[m^2]$

Applicando al filo una tensione meccanica σ (N/mm²) la variazione di resistenza sarà del tipo:

$$\frac{dR}{d\sigma} = \frac{d}{d\sigma} \left(\rho \cdot \frac{L}{A} \right) = \frac{\rho}{A} \cdot \frac{\partial L}{\partial \sigma} - \frac{\rho \cdot L}{A^2} \frac{\partial A}{\partial \sigma} + \frac{L}{A} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \text{ e riferendo tutto alla resistenza iniziale } R = \rho \cdot \frac{L}{A} \text{ risulta:}$$

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial L}{\partial \sigma} - \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \text{ che nella sua formula finale diventa:}$$

FORMULA FINALE: $\frac{dR}{R} = \frac{\partial L}{L} - \frac{\partial A}{A} + \frac{\partial \rho}{\rho}$ tale equazione evidenzia che la variazione di resistenza, rispetto al valore iniziale, dipende da tre fattori:

$\frac{\Delta L}{L}$: variazione di lunghezza

$\frac{\Delta A}{A}$: variazione di area

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$: variazione di resistività

Conoscendo dalle leggi della meccanica, il rapporto tra la deformazione trasversale (del diametro del filo d) e longitudinale (della lunghezza del filo L) chiamato coefficiente di Poisson ν , la contrazione del diametro del filo d sarà;

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \cdot \frac{\Delta L}{L} \text{ mentre la contrazione sull'area A del filo sarà: } \frac{\Delta A}{A} \cong -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Pertanto sostituendo queste due ultime relazioni nella formula finale si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} + 2\nu \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \text{ che rapportata alla variazione di allungamento del filo } \frac{\Delta L}{L}, \text{ fornisce}$$

il fattore di taratura K dell'estensimetro:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}} \text{ dove nel campo della deformazione elastica dei materiali, essendo}$$

il coefficiente di Poisson (ν) uguale a 0,3 diventa:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1 + 2 \cdot 0,3 + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1,6 + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Ipotizzando di lavorare a temperatura costante ($\Delta T = 0$) non ci sono variazioni di resistività cioè $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 0$

La formula sopra quindi nell'ipotesi di deformazioni elastiche a temperatura costante risulta:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1,6 + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1,6 + \frac{0}{\frac{\Delta L}{L}} = 1,6 \Rightarrow \frac{\Delta R}{\frac{\Delta L}{L}} = 1,6 \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 1,6 \cdot \frac{\Delta L}{L} \text{ e il fattore di taratura (K) è } 1,6.$$

TERMORESISTORI

Sono dei trasduttori di variazione di temperatura in variazione di resistenza. Sono basati sul fatto che la resistenza dei metalli e delle leghe aumenta, aumentando la temperatura. La loro relazione è di del tipo:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad \text{dove}$$

$R(T)$ è la resistenza a quella data temperatura

R_0 è la resistenza alla temperatura di riferimento di 0°C

T_0 è la temperatura di riferimento di 0°C

α è il coefficiente medio di temperatura ricavabile da tabelle e manuali in funzione del materiale

IGRORESISTORE

Sono dei trasduttori di variazione di umidità in variazione di resistenza. Si compongono essenzialmente di 2 elettrodi posti ad una certa distanza su una piastrina imbevuta di cloruro di litio. Variando l'umidità in misura, varia l'umidità assorbita dal cloruro di litio e quindi la resistenza tra i due elettrodi.

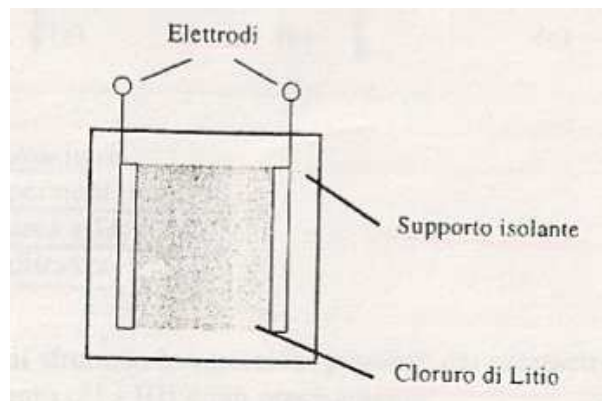


Fig. 8 – Igroresistore al cloruro di litio

CAPACITIVI

I trasduttori capacitivi si basano sulla legge che lega la capacità elettrica di un condensatore alla permittività (costante dielettrica) del mezzo interposto tra gli elettrodi (armature), nonché alla distanza e dimensioni degli stessi:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad \text{dove}$$

C : capacità elettrica [F]

ϵ_r : permittività relativa del mezzo

ϵ_0 : permittività assoluta del mezzo $8,8541853 \cdot 10^{-12}$ [F / m]

A : area delle superfici affacciate degli elettrodi [m^2]

d : distanza degli elettrodi [m]

Pertanto i trasduttori impiegati possono essere del seguente tipo:

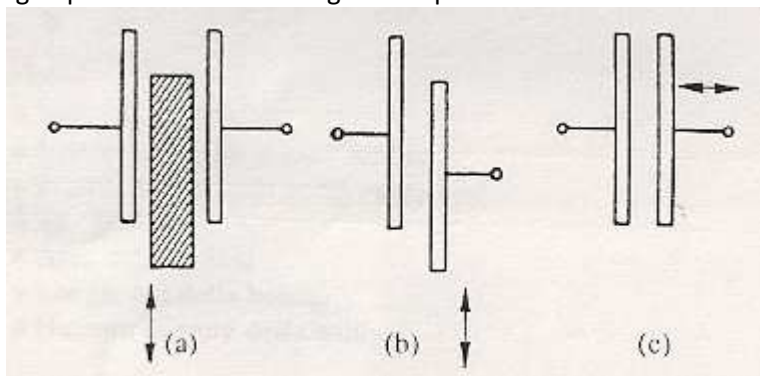


Fig. 9 – Tipi di trasduttori capacitivi
 a) A variazione di permittività
 b) A variazione di area affacciata
 c) A variazione di distanza

INDUTTIVI

I trasduttori induttivi si basano sulla legge che lega l'induttanza elettrica di un induttore (bobina), alla permeabilità del mezzo, nonché all'area, lunghezza e numero di spire della bobina stessa:

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{l} \cdot n^2 \quad \text{dove}$$

L: induttanza elettrica [H]

μ_r : permeabilità relativa del mezzo [-]

μ_0 : permeabilità assoluta del vuoto $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

A: area della bobina [m²]

l: lunghezza della bobina [m]

n: numero di spire della bobina [-]

I tipi di trasduttori induttivi più comuni sono illustrati in figura sotto:

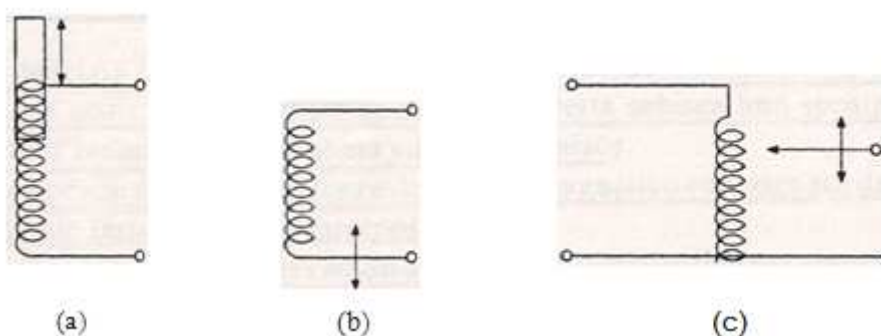


Fig. 10 – Tipi di trasduttori induttivi
 a) A variazione di permeabilità
 b) A variazione di lunghezza
 c) A variazione del numero di spire

TRASDUTTORI OTTICI

I trasduttori ottici sono dei dispositivi che operano nel campo della radiazione elettromagnetica il cui spettro viene riportato in figura sotto:

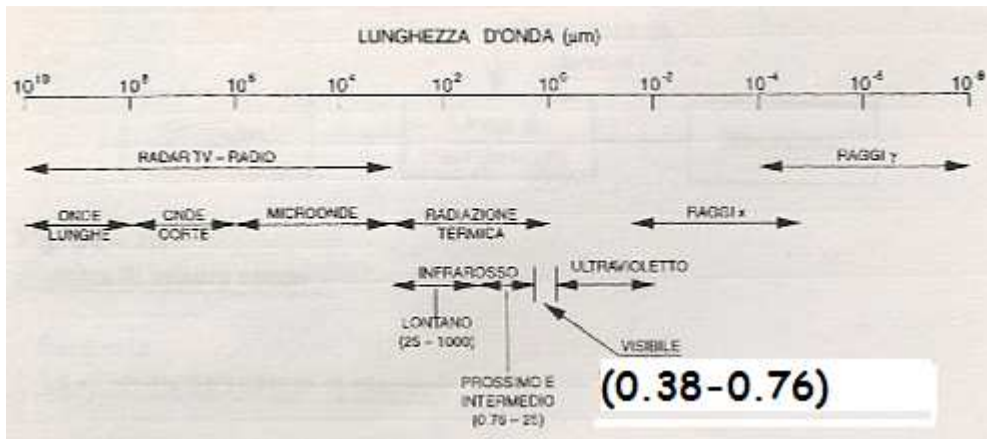


Fig. 11 – Spettro della radiazione elettromagnetica

FIBRA OTTICA

Nella sua forma più generale la fibra ottica è composta essenzialmente da un nucleo interno (denominato core) di vetro e da un mantello esterno (denominato cladding) pure di vetro, ma con indice di rifrazione più piccolo di quello del nucleo. La sezione della fibra è del tipo circolare con diametri tipici di 5-50 μm per il nucleo e 50-500μm per il mantello. La luce iniettata nella fibra si propaga nel nucleo, essendo continuamente riflessa dalla superficie interna del mantello verso l'interno, con angoli che possono essere anche diversi.

A seconda del tipo di propagazione della luce all'interno del nucleo della fibra, la fibra si definisce:

- **Fibra monomodo:** quando il diametro del nucleo è comparabile con quello della lunghezza d'onda iniettata: la loro azione è uni-modale/direzionale ed è utilizzata nelle applicazioni di elevata precisione
- **Fibra multimodo:** quando il diametro del nucleo è molto più grande della lunghezza d'onda iniettata: la propagazione è multi-modale/direzionale ed è utilizzata nelle applicazioni generiche.

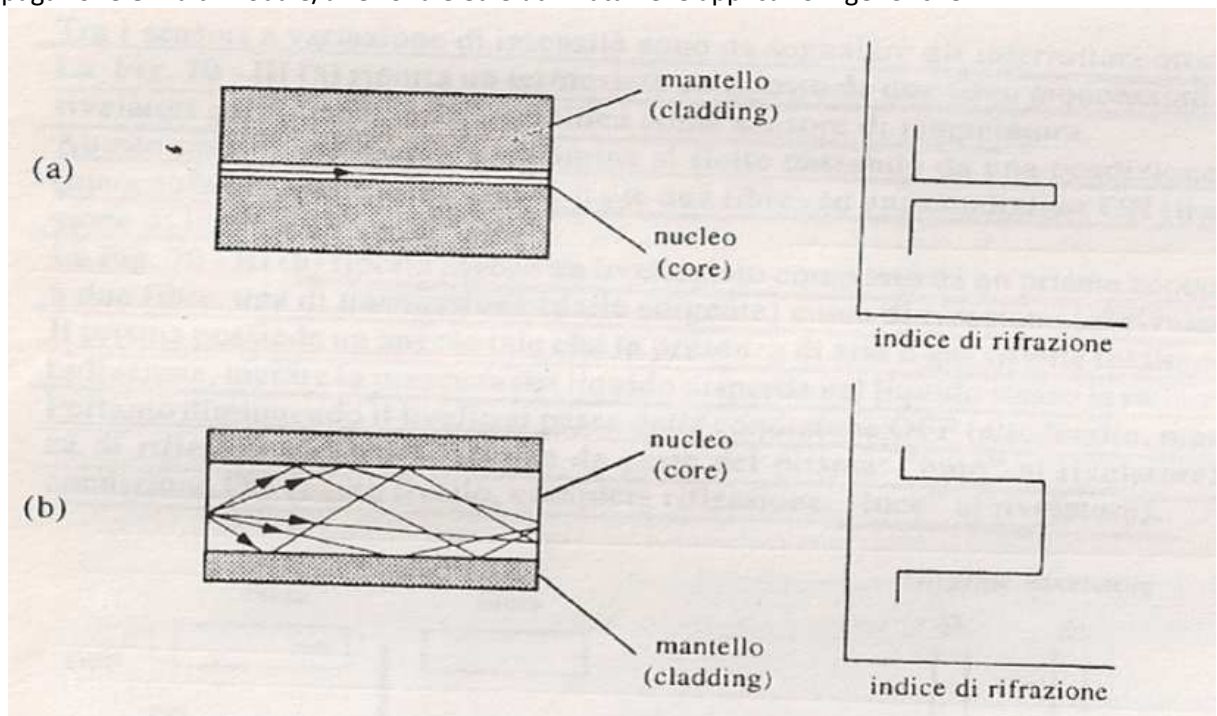


Fig. 12 – Tipi di fibra ottica; a) monomodo b) multimodo

PONTE DI WHEATSTONE

I ponti di misura normalmente adoperati per il rilievo delle variazioni delle caratteristiche elettriche di uscita dei principali trasduttori resistivi, capacitivi e induttivi sono del tipo Wheatstone.

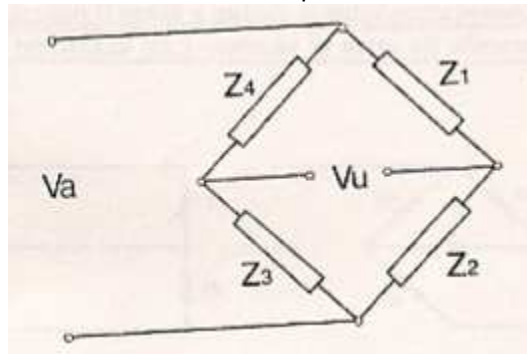


Fig. 13 – Tipico ponte di Wheatstone

La figura sopra rappresenta un ponte di Wheatstone a impedenze nel quale la tensione di uscita \$V_u\$ è nulla quando \$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4\$ ovvero quando \$Z_1/Z_2 = Z_4/Z_3\$. Se restiamo nel caso delle resistenze vediamo come funziona il ponte e come si giunge a queste formule.

Il ponte di Wheatstone è costituito da quattro resistori disposti come i lati di un quadrilatero, le cui diagonali sono costituite rispettivamente da una sorgente di forza elettromotrice (pila) e da un galvanometro. \$R_a, R_b\$ ed \$R_c\$ sono tre resistenze di valore noto, mentre \$R_x\$ è la resistenza in esame.

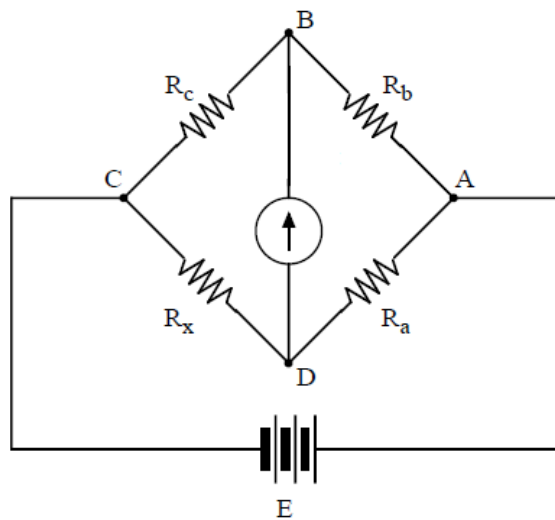


Fig. 13 – Ponte di Wheatstone resistore

In base alla polarità della pila, si può sapere a priori che la corrente circolerà lungo i due rami nel senso A-B-C oppure A-D-C ma non è invece noto a priori il senso della corrente che attraversa il galvanometro percorrendo la diagonale B-D, poiché esso dipende dalla differenza di potenziale fra i due nodi B e D. In particolare, la corrente può essere nulla se B e D si trovano al medesimo potenziale: questa è la condizione di equilibrio del ponte che si deve ricercare. L'assenza di corrente sul lato B-D si controlla per mezzo del galvanometro. Il ponte di Wheatstone è infatti un metodo di riduzione a zero. In condizioni di equilibrio con B e D allo stesso potenziale, senza passaggio di corrente nel galvanometro, si applica il primo principio di Kirchhoff ai nodi B e D.

$$\begin{cases} I_a = I_x \\ I_b = I_c \end{cases} \rightarrow \frac{I_b}{I_a} = \frac{I_c}{I_x}$$

Si applichi ora il secondo principio di Kirchhoff alle **maglie** A-B-D e B-C-D.

$$\begin{cases} R_a I_a = R_b I_b \\ R_x I_x = R_c I_c \end{cases}$$

Si può quindi scrivere:

$$\begin{cases} \frac{R_a}{R_b} = \frac{I_b}{I_a} \\ \frac{R_x}{R_c} = \frac{I_c}{I_x} \end{cases} \rightarrow \frac{R_a}{R_b} = \frac{R_x}{R_c}$$

La resistenza incognita risulta quindi data da:

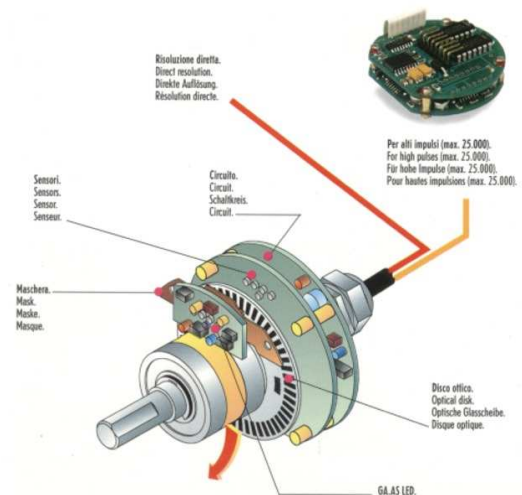
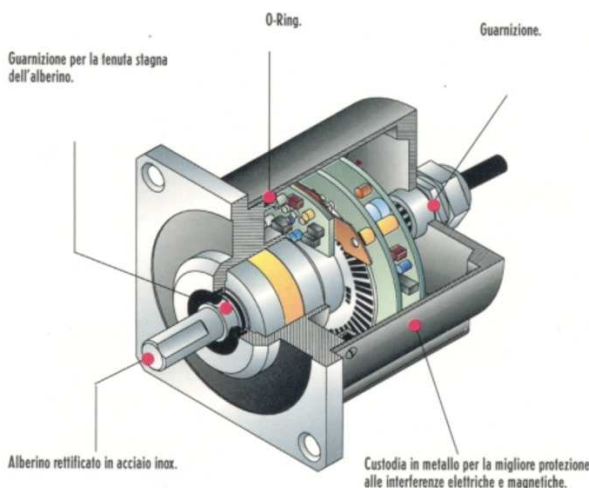
$$R_x = R_c \frac{R_a}{R_b}$$

Questa **espressione** quando il **ponte** è in **equilibrio** permette di conoscere il valore della **resistenza incognita** una volta noti i valori delle altre tre **resistenze** inserite nel ponte. Si noti che nell'**espressione** finale non entrano né le **correnti circolanti**, né la **forza elettromotrice** (che non occorre quindi conoscere), né la **resistenza** della diagonale comprendente il **galvanometro**. I lati A-B e A-D vengono chiamati **bracci del ponte** (resistori R_A ed R_B), il lato B-C è chiamato **lato di paragone** (resistore R_C). La **misura** si effettua applicando il **resistore incognito** al **ponte** (gli altri tre lati sono generalmente fissi) e **regolando** i **bracci** ed il **lato di paragone**, costituiti da resistori variabili, fino all'**azzeramento**. La condizione di maggior **sensibilità** del **ponte** si ottiene facendo in modo che R_A ed R_X , così come R_B ed R_C , abbiano all'incirca il medesimo valore. L'**errore** di **misura** di questi **ponti** è minimo quando si misurano **resistenze** di valore **medio**, comprese fra qualche ohm e qualche decina di $k\Omega$.

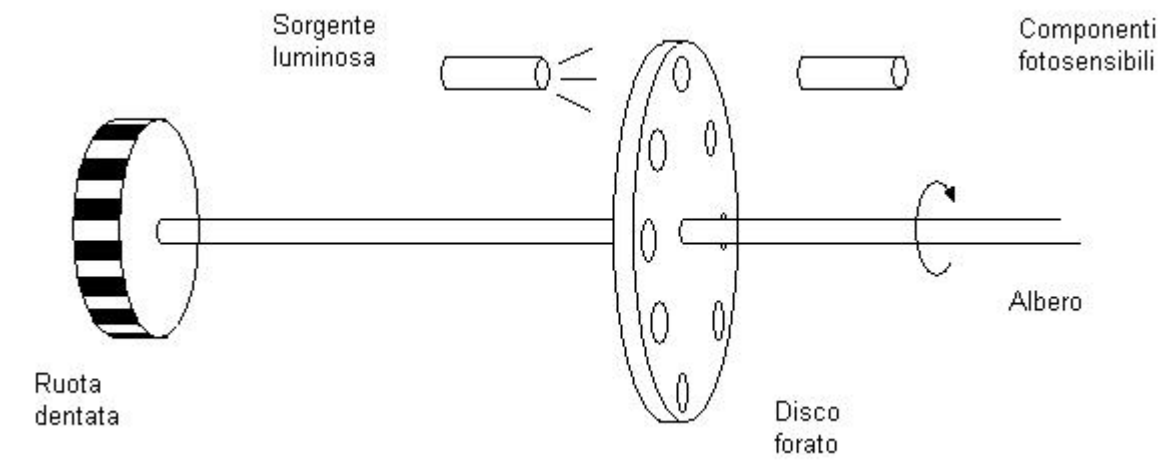
TRASDUTTORI DI POSIZIONE "ENCODER" E "RESOLVER"

ENCODER

Apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale. Esso è un trasduttore di posizione economico, preciso, robusto ed affidabile.



SCHEMA DI FUNZIONAMENTO



L'albero trasmette il moto al disco coronato da settori circolari opachi e trasparenti.

A lato del disco è situata una sorgente luminosa e nel lato opposto i componenti fotosensibili. Con la rotazione del disco abbiamo delle ripetute interruzioni del fascio di luce che li percorre. Questa variazione di luminosità genera l'uscita di un segnale digitale a seconda della posizione dell'albero.

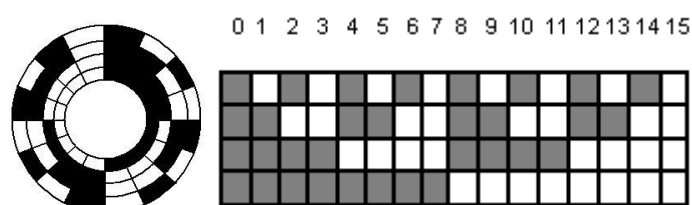
CLASSIFICAZIONE DEGLI ENCODER

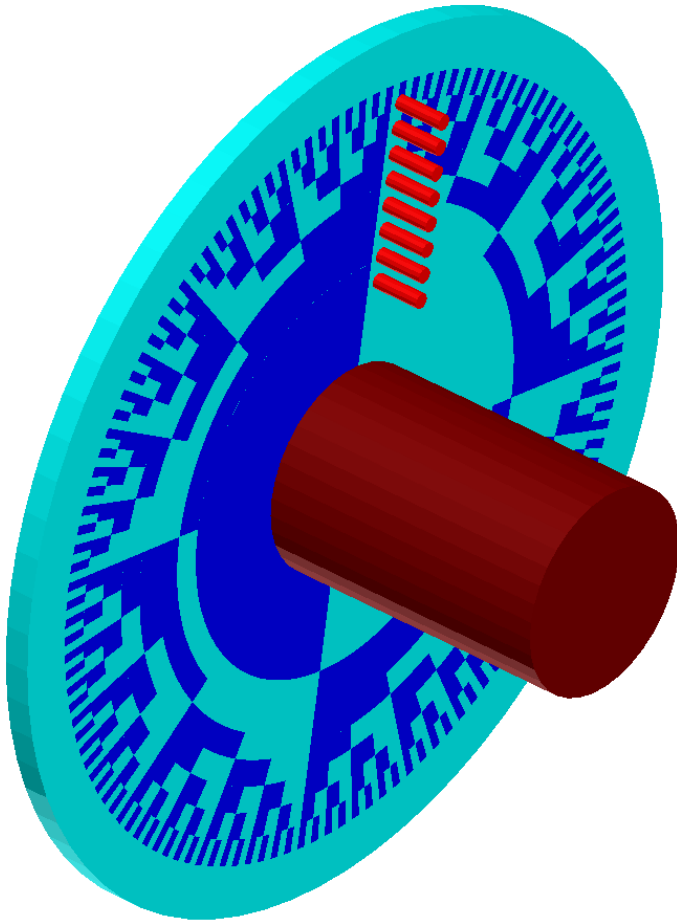
ENCODER ASSOLUTO

Trasduttore di posizione costituito da un elemento mobile a forma di disco, su cui sono state ricavate per fotoincisione maschere di zone opache e trasparenti. Questo scorre davanti a testine di lettura costituite da fotoemettitori e fotorivelatori, che generano segnali dipendenti dallo spostamento. Negli encoder assoluti, non si ha una semplice successione di zone chiare e di zone scure, ma le zone chiare e quelle scure, disposte su più piste concentriche, rappresentano, lette su un raggio, una parola in codice binario. Il codice binario non è tuttavia adatto ad essere utilizzato in un encoder. Infatti si ha molto spesso che passando da un numero binario al successivo, variano più di una cifra. Quindi può accadere che durante un passaggio da un settore all'altro, si possa avere una successione casuale delle cifre con una conseguente lettura di valori non corrispondente al vero.

Per ovviare a questo problema si preferisce utilizzare il codice grey, nel quale il passaggio da un numero al successivo avviene sempre variando un'unica cifra binaria.

Per migliorare la risoluzione di un encoder ottico assoluto, oltre ad aumentare il numero delle piste, si può accoppiare l'encoder all'organo da controllare tramite un demoltiplicatore in modo che, ad esempio, ad un giro della vite, corrispondano tre giri del disco decodificatore. Il demoltiplicatore impiegato deve essere di altissima precisione, ed avere la ripresa automatica dei giochi. La figura sottostante rappresenta un disco mobile, di un encoder assoluto, che utilizza un codice binario a quattro bit.



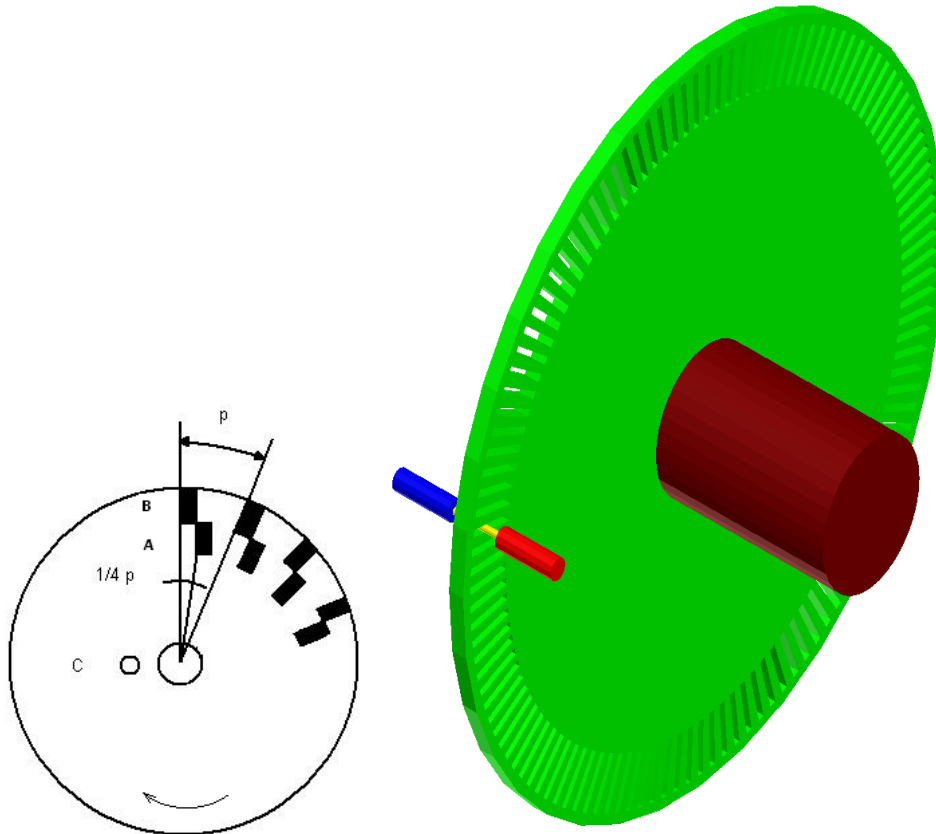


ENCODER INCREMENTALE

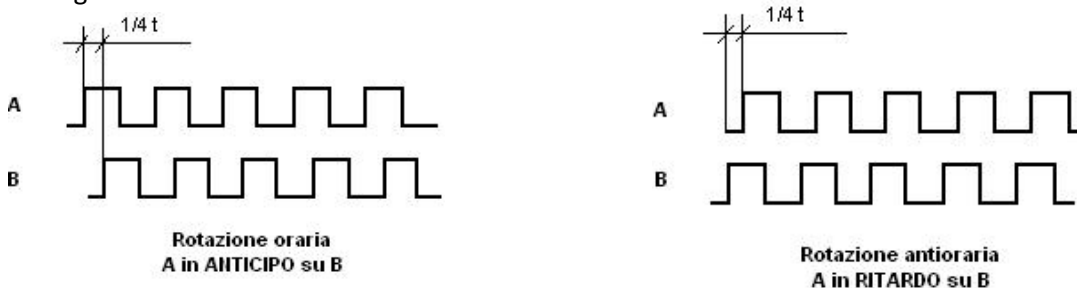
L'encoder di tipo incrementale è il più semplice, in quanto fornisce solamente informazioni di tipo on-off per tenere sotto controllo parametri quali velocità, direzione o distanza. Esso è un trasduttore di posizione, il cui sistema di intercettazione è costituito da un disco sul quale sono state ricavate due corone concentriche di finestrelle rettangolari. Tali finestrelle, poste una sopra l'altra sono sfasate fra di loro di un quarto di passo. Ai lati del sistema di intercettazione sono presenti, da una parte due fotoemittitori e dall'altra due fotorivelatori (un fotoemittitore + un fotorivelatore per ciascuna corona concentrica di finestrelle). I fotoemittitori generano un treno di impulsi il cui numero è pari al numero delle zone trasparenti, alternate alle scure, intercettate dal blocco emettitore-ricevitore.

Il conteggio di questi impulsi, amplificati dall'elettronica di controllo dell'encoder, consente di individuare la rotazione compiuta dal disco ed il corrispondente spostamento. Le due corone concentriche poste sul disco una sopra l'altra, permettono inoltre all'encoder di capire quando il disco gira in senso orario e quando antiorario.

La risoluzione di un encoder incrementale è data dal rapporto tra una rotazione di 360° ed il numero degli impulsi : $R=360/4n$. La figura qui sopra, rappresenta il disco mobile di un encoder incrementale.



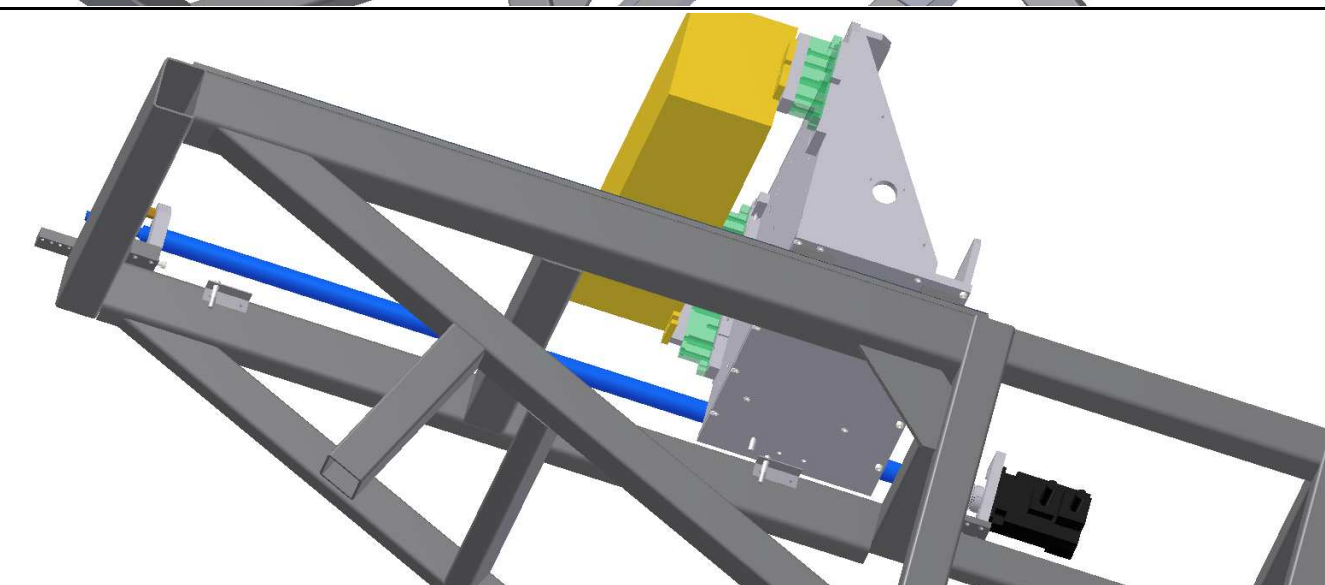
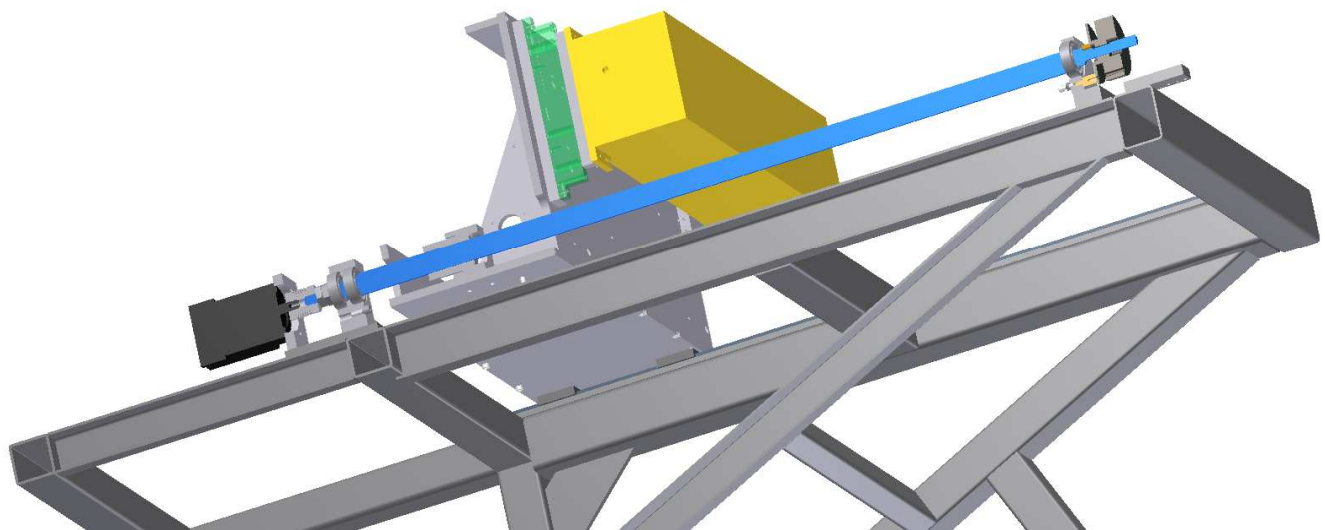
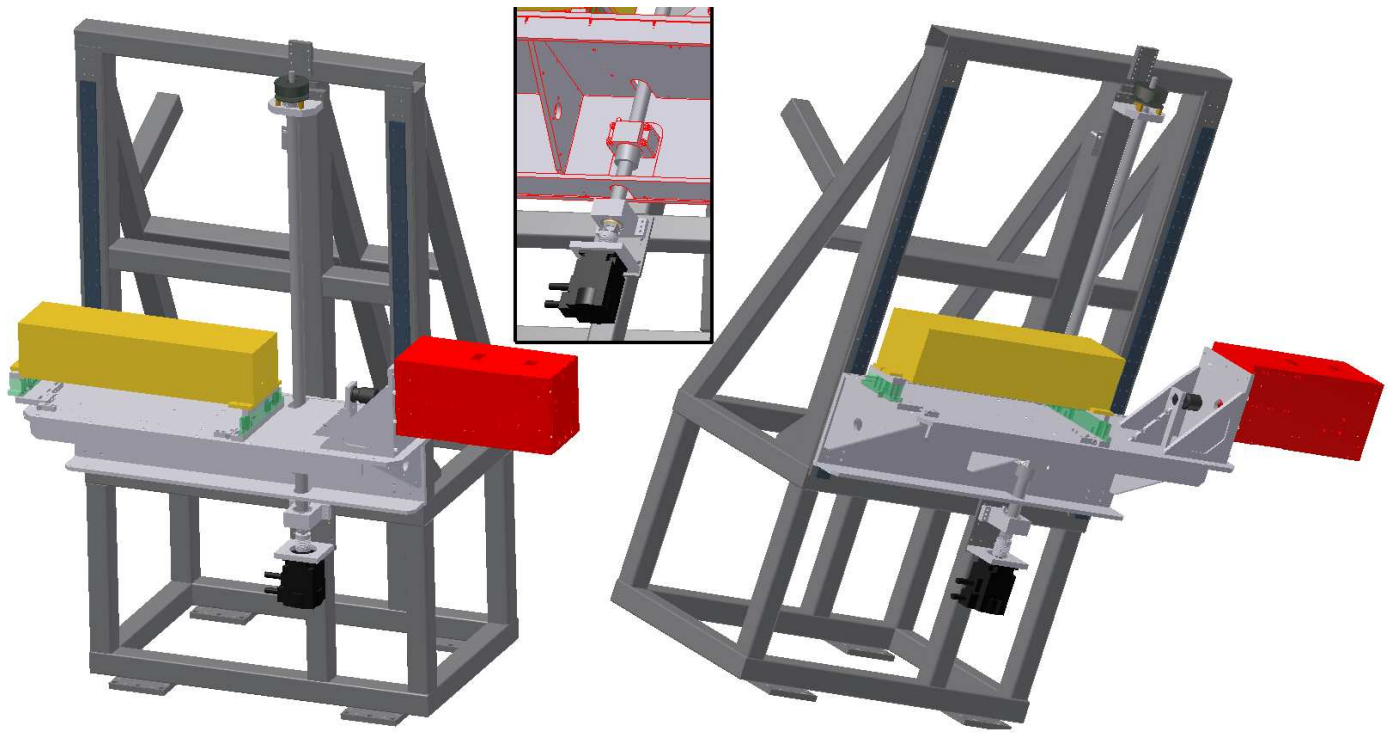
La risoluzione può però, essere migliorata se le tensioni di uscita dei fototransistor vengono squadrate opportunamente e vengono contati sia i fronti di salita che quelli in discesa. Dire che le tensioni di uscita devono essere squadrate vuol dire avere un circuito elettronico che rende costante la tensione di uscita per tutto l'intervallo di tempo in cui la luce dei fotoemittitori, colpiscono i fotorivelatori in modo da avere una forma d'onda come quella nella figura sotto.



Al contrario di un encoder assoluto, quello incrementale, in caso di mancanza di alimentazione, perde tutte le informazioni riguardanti la posizione. Per ovviare a questo problema, si utilizzano sistemi di memorizzazione non volatili, resi tali mediante un batteria a tampone. Negli **encoder relativi** i segnali elettrici d'uscita sono proporzionali allo spostamento del rotore rispetto al corpo; da essi, semplici circuiti possono leggere e visualizzare la velocità e l'accelerazione dell'asse in esame, ma non la posizione istantanea. La posizione assoluta del rotore può essere ricavata mantenendo un costante conteggio dei segnali elettrici d'uscita, previa un'operazione iniziale di *ricerca riferimento*, la quale viene eseguita ad ogni *fine corsa* mediante un impulso apposito.

La **ricerca riferimento** (o **homing**) è un'operazione per cui il circuito di controllo muove l'asse, in modo tale da leggere un segnale di riferimento (generato dall'encoder stesso, o da una fonte esterna) che individua la posizione da considerarsi come lo "zero" dell'asse. Su questo punto vengono azzerati i contatori, e, da quel momento, la posizione del rotore sarà nota per il costante aggiornamento dello spostamento rispetto a questo "zero". In caso di assenza di segnale elettrico, tale riferimento viene perso ed il sistema deve ruotare fino a ritrovare il suo fine corsa per stabilire il punto esatto in cui si trovava.

ESEMPIO DI "HOMING": Si consideri una generica applicazione come la seguente.



IMMAGINI DI ENCODER ROTATIVI:



IMMAGINI DI ENCODER LINEARE:

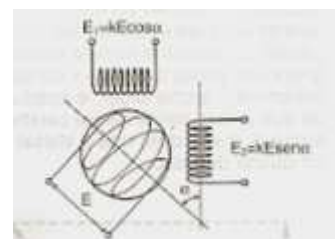
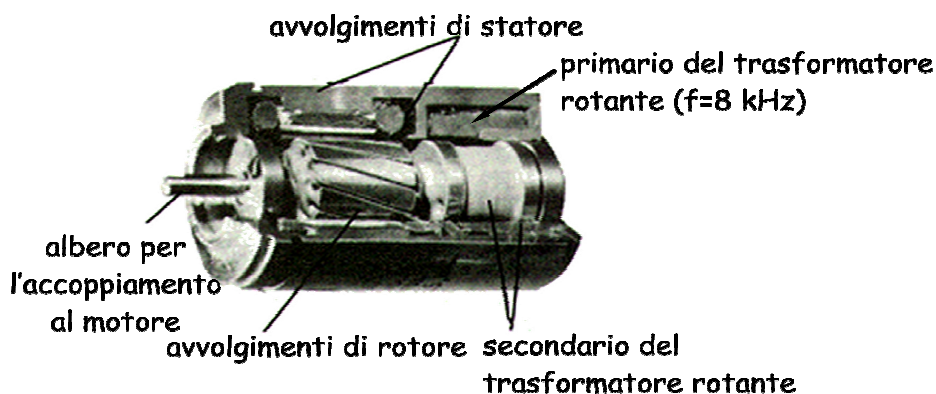


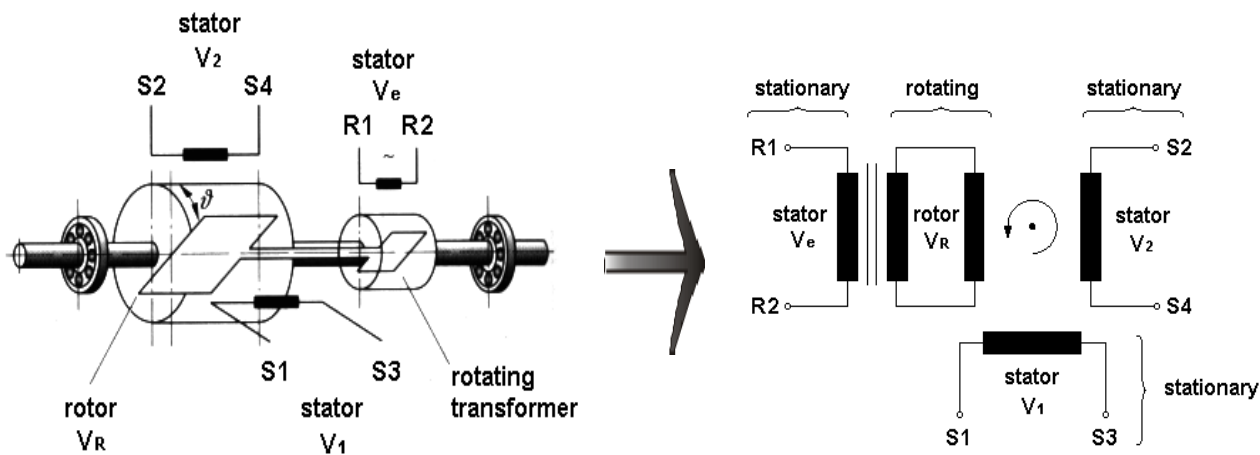
RIASSUMENDO:

	Disco incrementale	Disco assoluto
Uscite	Onda quadra	Codice binario
Caratteristiche	Rileva velocità direzione e distanza della parte in rotazione.	Rileva velocità, direzione e distanza della parte in rotazione oltre che la posizione assoluta su di una rotazione di 360° .
Applicazioni	Nastri trasportatori, retroazione di motori , pulegge, direzione, e velocità di veicoli, misura di distanza in campo tessile o altri materiali avvolgibili.	Robotica, avionica, retroazione di servomotori, posizionamento di antenne satellitari e telescopi.

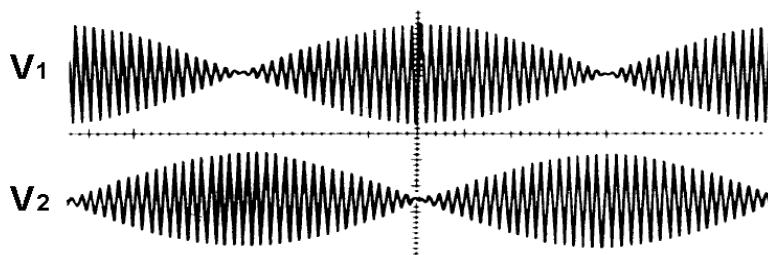
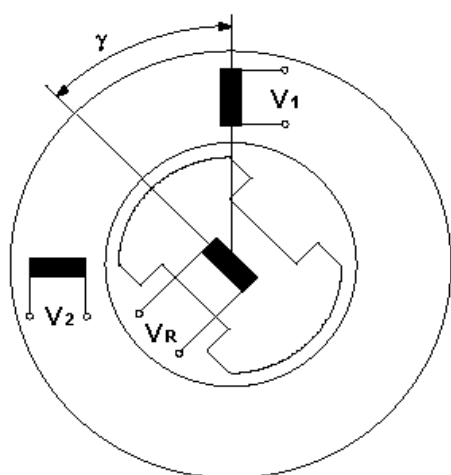
RESOLVER

Come i comunissimi trasformatori, il **resolver** si basa sul principio dell'induzione magnetica e consta principalmente di uno statore, con due avvolgimenti sfasati di 90°, e di un rotore, costituito da due avvolgimenti incrociati e sfasati anch'essi di 90°. Se alimentiamo, per esempio, gli avvolgimenti dello statore con due tensioni alternate identiche E1 ed E2, le tensioni secondarie indotte sugli avvolgimenti del rotore dipenderanno esclusivamente dall'angolazione di questo rispetto allo statore. Nella pratica si preferisce alimentare un solo avvolgimento del rotore con una tensione alternata E, e le tensioni indotte sugli avvolgimenti dello statore valgono: $E_1 = k E \cos(\alpha)$ $E_2 = k E \sin(\alpha)$

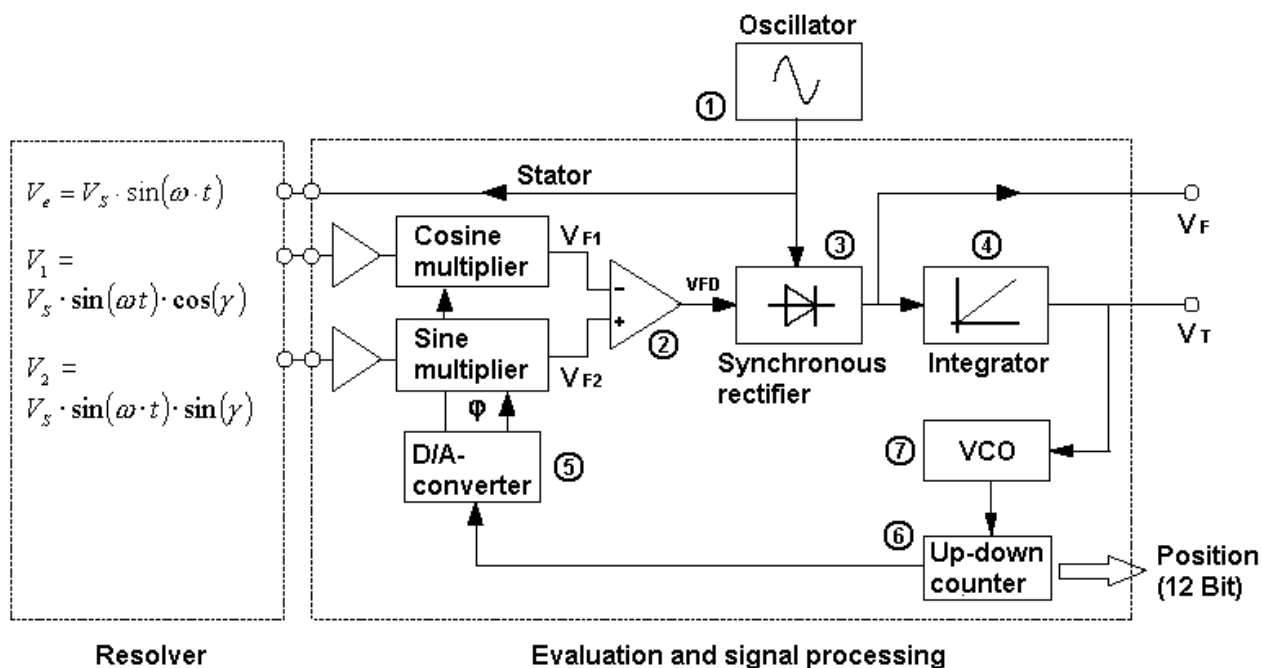




Principio di funzionamento:

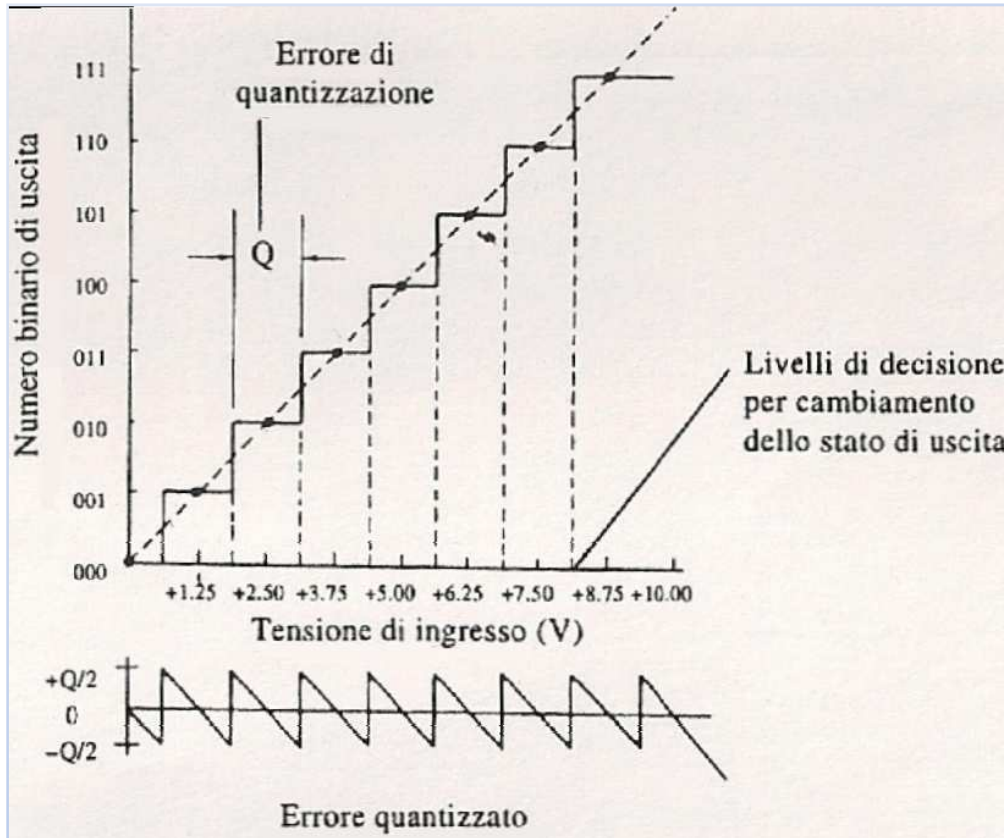


schema di principio del resolver e forme d'onda in uscita al variare della posizione rotorica



CONVERTITORE ANALOGICO / DIGITALE

Il compito dei convertitori è quello di tradurre in forma digitale, le informazioni contenute nei segnali analogici, per presentarle agli stadi successivi di elaborazione, quali calcolatori e microprocessori. I convertitori lineari presentano una caratteristica di trasferimento, segnale analogico di ingresso (per esempio la tensione) in segnale digitale di uscita (per esempio binario) nella quale è indicato l'errore di quantizzazione intrinseco Q, che è inversamente proporzionale al numero di canali in cui è suddiviso il campo operativo del segnale di uscita. Solitamente si hanno convertitori con 2⁸ e 2¹⁶ canali con risoluzioni pertanto a 8 e 16 bit.



Caratteristica di trasferimento ingresso/uscita di un convertitore lineare analogico / digitale

Tra i convertitori più diffusi vi è il **“convertitore ad approssimazioni successive”** che converte per approssimazioni in passi successivi la tensione di ingresso V_i con una tensione convertita di uscita V_u . Se è $0 - V_c$ il campo di ingresso del convertitore, la tensione convertita di uscita V_u viene ottenuta combinando opportunamente dei pesi binari di valore $\frac{V_c}{2^1}; \frac{V_c}{2^2}; \frac{V_c}{2^3}; \frac{V_c}{2^4}; \dots; \frac{V_c}{2^n}$ ottenendo alla fine della conversione una tensione convertita di uscita data dalla seguente formulazione binaria:

$$V_u = V_c \cdot (b_1 \cdot \frac{1}{2^1} + b_2 \cdot \frac{1}{2^2} + b_3 \cdot \frac{1}{2^3} + \dots + b_n \cdot \frac{1}{2^n})$$

dove i coefficienti “b” possono assumere i valori binari 0 o 1.

Per meglio comprendere questa conversione si supponga di voler convertire un segnale $V_i = 0,9V$ con un convertitore con campo di ingresso $V_c = 1V$. Si voglia avere una precisione di conversione almeno del 2% il che caratterizza la scelta della risoluzione del convertitore. Volendo una precisione del 2% il convertitore dovrà avere almeno una risoluzione di 1/50 (perché $1/50 = 0,02 = 2\%$) e pertanto dovrà essere almeno a 6 bit corrispondente ad una risoluzione $1/2^6 = 1/64$ che soddisfa il 2% richiesto. Pertanto la risoluzione dei 6 bit, bit per bit, risulterà la seguente:

- 1°bit : $\frac{V_C}{2^1} = \frac{1}{2} = 0,5$ volt
- 2°bit : $\frac{V_C}{2^2} = \frac{1}{4} = 0,25$ volt
- 3°bit : $\frac{V_C}{2^3} = \frac{1}{8} = 0,125$ volt
- 4°bit : $\frac{V_C}{2^4} = \frac{1}{16} = 0,0625$ volt
- 5°bit : $\frac{V_C}{2^5} = \frac{1}{32} = 0,03125$ volt
- 6°bit : $\frac{V_C}{2^6} = \frac{1}{64} = 0,015625$ volt

Per cui la sequenza con cui la tensione in uscita V_U è approssimata alla tensione in ingresso V_I è data dalla seguente tabella (N.B. $V_I = 0,8$ V e $V_C = 1$ V).

Passo	Confronto tensione	Con	Risultato	bit	Tensione uscita (V)	Tensione avanzo (V)
1°	ingresso	$\frac{V_C}{2}$	.8 > .5	1° = 1	.5	.3
2°	avanzo	$\frac{V_C}{4}$	.3 > .25	2° = 1	.75	.05
3°	"	$\frac{V_C}{8}$	.05 < .125	3° = 0	.75	.05
4°	"	$\frac{V_C}{16}$	.05 < .0625	4° = 0	.75	.05
5°	"	$\frac{V_C}{32}$	.05 > .03125	5° = 1	.78125	.01825
6°	"	$\frac{V_C}{64}$	.01825 > .015625	6° = 1	.796875	.003125

Pertanto il numero binario finale sarà 110011 e quindi la tensione convertita V_U equivalente risulta:

$$V_U = 1 \cdot \left(1 \cdot \frac{1}{2^1} + 1 \cdot \frac{1}{2^2} + 0 \cdot \frac{1}{2^3} + 0 \cdot \frac{1}{2^4} + 1 \cdot \frac{1}{2^5} + 1 \cdot \frac{1}{2^6} \right) = 0,796875 \text{ V}$$

Il numero 0,796875 approssima entro il 2% quella di ingresso ($V_I = 0,8$ V), rispettando il valore di precisione richiesto. La figura sotto riporta la sequenza dei passi di approssimazioni successive condotti in questo esempio.

