

CAPITOLO 1 - I SENSORI PER L'AUTOMAZIONE

1. Introduzione

...

2. Caratteristiche generali dei sensori

...

3. Sensori di posizione

La posizione di un dispositivo meccanico in movimento è una delle grandezze più importanti da acquisire per il controllo di una macchina automatica. In generale possono esservi diverse necessità per la misura di posizione (risoluzione, campo di ingresso) e quindi occorreranno diversi tipi di sensori, ognuno dei quali ottimizzato per un certo scopo.

Una prima classificazione consiste nel tipo di movimento da misurare: lineare o angolare.

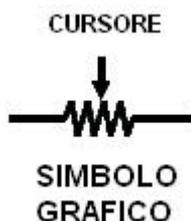
In genere lo stesso sensore non può essere utilizzato per entrambi gli scopi, ma lo stesso principio fisico può invece essere applicato in tutte e due i casi.

Una seconda classificazione è quella di sensori per misure di spostamenti assoluti e sensori per misurare spostamenti relativi (incrementali).

3.1 Sensori di tipo resistivo: il Potenzimetro

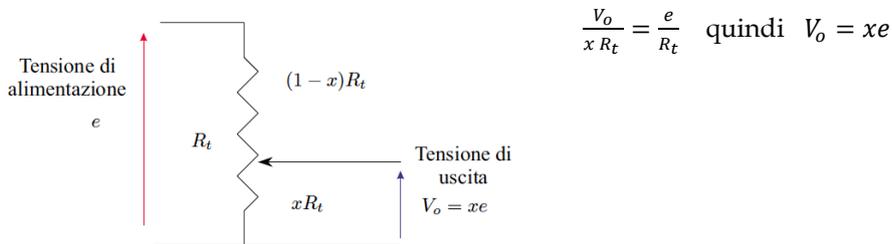
Il principio di funzionamento è basato sulla variazione di resistenza in un circuito elettrico determinata dallo spostamento dell'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.

Il potenziometro è forse il più semplice sensore elettrico di 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 spira o a film). Il resistore può essere realizzato con un **filo** oppure un **film** conduttivo. Nel primo caso l'elemento resistivo è normalmente costituito da un filo di leghe a base di Nichel-Cromo. Nel secondo caso, invece, 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*.



Analizzando il componente mediante la legge di Ohm, la tensione di uscita risulta essere una frazione di quella di alimentazione e pertanto l'azione meccanica (la grandezza da misurare) agisce modulando in

uscita la tensione di alimentazione. In dettaglio, se $0 \leq x \leq 1$ è la variabile che indica la posizione del cursore espressa come frazione del campo di variazione di posizione complessiva (*campo di ingresso* del sensore), il potenziometro si comporta come un partitore resistivo di tensione con valori di resistenze pari a $(1-x)R_t$ e xR_t . La tensione di uscita è quindi proporzionale alla tensione di alimentazione e ed alla posizione x del cursore mobile:



Caratteristiche del potenziometro:

- Risoluzione : Nei potenziometri a spire dipende dal numero e dalla spaziatura delle spire; nei potenziometri a film la risoluzione è teoricamente infinita, in realtà è limitata dalla granularità residua del film e dalle incertezze del contatto.
- Errore di linearità : $< 0.1\%$
- Resistenza totale: da 1 kΩ a 100 kΩ per il sensore a filo; da 1kΩ a 1000 kΩ per il potenziometro a film.

Vantaggi: precisi, leggeri e poco ingombranti.

Limiti:

funzionano per sfregamento di un cursore su una resistenza, questo provoca fenomeni di attrito che possono portare ad un riscaldamento (**autoriscaldamento**) della resistenza, con possibile variazione del suo valore nominale, e all'**usura** dei componenti che ne riduce la vita meccanica. Inoltre lo sfregamento può generare del **rumore elettrico**.

3.2 Sensori di tipo induttivo: il Trasformatore Lineare Differenziale (LVDT)

I sensori di tipo induttivo, cioè basati sul principio dell'induzione elettromagnetica, possono essere distinti tra quelli a *singolo avvolgimento* e quelli a *trasformatore*.

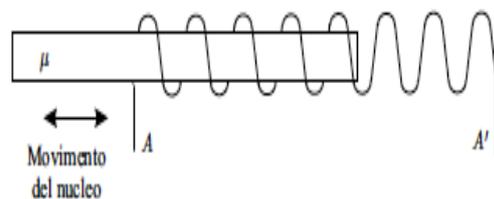
I sensori a singolo avvolgimento sono costituiti da un nucleo di materiale ferromagnetico, solidale con il corpo di cui si vuole misurare la posizione, avvolto in una bobina. L'induttanza del circuito

$$L_s = \mu FN^2$$

μ = permeabilità magnetica del nucleo,

N = numero di spire

F = costante dipendente dalla geometria



Lo spostamento del nucleo di materiale ferromagnetico genera una variazione di induttanza nella bobina. Il sensore converte la grandezza da misurare in una variazione dell'induttanza che viene acquisita utilizzando un circuito apposito.

Lo stesso principio si usa per i sensori a trasformatore: questa configurazione, 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. In questo caso quello che varia è l'accoppiamento magnetico tra due bobine. Il dispositivo di questo tipo più diffuso è il **trasformatore differenziale**. Questo è un sensore di tipo assoluto disponibile sia in versione rotativa (chiamata **Rotary Variable Differential Transformer RVDT**) che lineare (chiamata **Linear Variable Differential Transformer LVDT**). Il principio di funzionamento è lo stesso, pertanto in seguito sarà presentato solo il trasformatore lineare differenziale.

Il circuito si compone di un cursore di materiale ferromagnetico mobile, un avvolgimento primario su cui viene impressa una tensione sinusoidale $V_e = V_m \sin(\omega t)$ e due avvolgimenti secondari su cui si accoppia il circuito magnetico inducendo due tensioni sinusoidali V_1 e V_2 di pulsazione ω e ampiezza dipendente dalla geometria del circuito (in particolare la posizione x dell'equipaggio mobile). La somma di queste due tensioni costituisce il segnale di uscita del sensore. In condizioni di simmetria del circuito, a cui corrisponde uno spostamento nullo dell'equipaggio mobile, le due tensioni V_1 e V_2 sono di uguale ampiezza

$$|V_1| = |V_2| = \frac{N_s l_0}{N_p} |V_e|$$

dove N_s è il numero di spire degli avvolgimenti secondari, l_0 è la lunghezza del nucleo mobile che con $x=0$ concatena i due circuiti e N_p è il numero di spire dell'avvolgimento primario. Inoltre, grazie alla disposizione degli avvolgimenti, V_1 e V_2 sono in controfase, quindi si ottiene in uscita $V_0=0$.

Se l'equipaggio mobile si sposta in una direzione si perde la simmetria tra i due circuiti magnetici, in quanto in uno aumenta la presenza di materiale ferromagnetico e nell'altro aumenta la quantità di aria. Le ampiezze delle due tensioni di uscita V_1 e V_2 risultano pertanto diverse

$$|V_1| = \frac{N_s(l_0 + x)}{N_p} |V_e|,$$

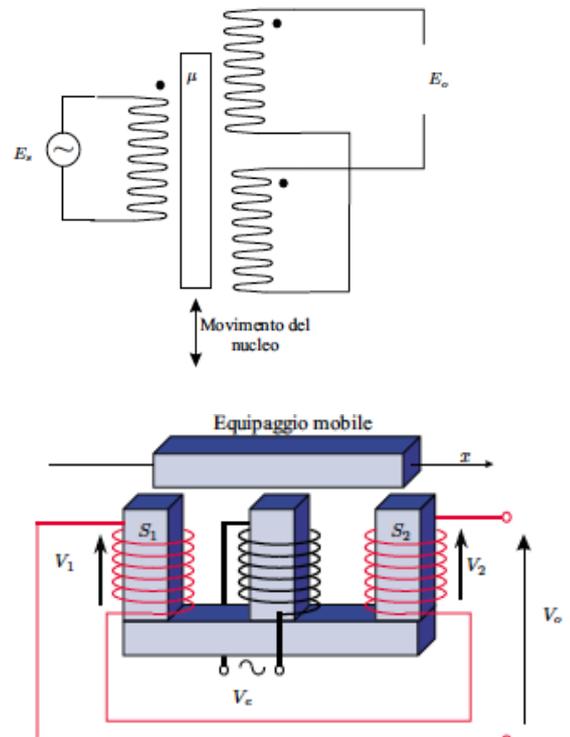
$$|V_2| = \frac{N_s(l_0 - x)}{N_p} |V_e|$$

Ricordando che le due tensioni di secondario sono in controfase, l'ampiezza del segnale di uscita sarà unicamente dipendente dal valore assoluto dello spostamento $|x|$, ma la sua fase sarà concorde con V_1 se $x > 0$, con V_2 se $x < 0$. Riassumendo, V_0 è una tensione alternata caratterizzata da:

- pulsazione pari a quella del segnale applicato al circuito primario (detto portante);
- ampiezza dipendente dalla posizione dell'equipaggio mobile;
- fase concorde o in opposizione rispetto alla portante in funzione del segno dello spostamento.

Caratteristiche del trasformatore differenziale:

- Risoluzione: da 2 a 20 μm per sensori lineari; da 10^{-5} a 10^{-4} rad per sensori rotativi.



- Elevata sensibilità
- 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.
- Errore di linearità: 0.1 % - 0.5%.

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.

L'accuratezza della misura dipende dalla **stabilità del generatore di tensione** che sostiene la portante, quindi è necessario utilizzare generatori di buona qualità. Data la limitata ampiezza del campo di misura del trasduttore, tale applicazione è idonea laddove l'organo meccanico debba effettuare limitati spostamenti nell'intorno di una posizione di riposo (ad esempio, lo stelo di una valvola di regolazione del flusso di un fluido). Il Trasformatore Differenziale trova il suo migliore utilizzo nelle applicazioni dove la risoluzione e la linearità sono più importanti dell'ampiezza del campo di misura. E' un sensore robusto (superfici di scorrimento di bassissimo attrito), affidabile e ripetibile. Il suo costo è però abbastanza elevato ed inoltre la sua applicazione richiede una circuiteria aggiuntiva di alimentazione e soprattutto di demodulazione abbastanza costosa.

3.3 Sensori di spostamento a capacità

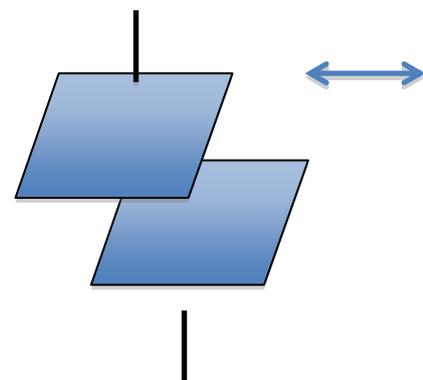
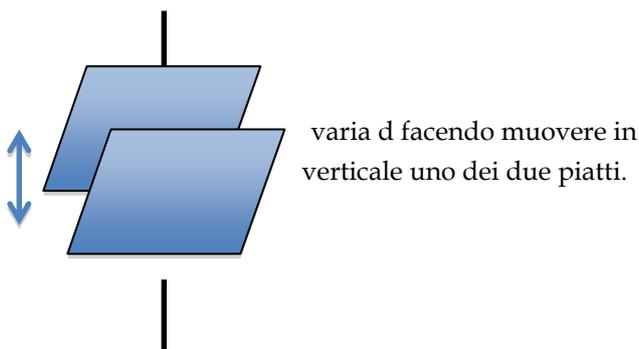
Sono sensori che basano il loro funzionamento sul principio del condensatore a piatti paralleli. La capacità di questi condensatori è data da

$$C = k \frac{\epsilon A}{d}$$

dove k è un fattore di proporzionalità, ϵ è la costante del dielettrico, A è l'area comune ai piatti e d è la loro distanza.

Le capacità del condensatore sono molto piccole, quindi sono piccole le variazioni di capacità che si possono ottenere: è necessario un circuito di trasduzione complesso per la misurazione degli spostamenti.

Il sensore può essere realizzato facendo variare A o d



Varia la superficie in comune A

3.4 Resolver

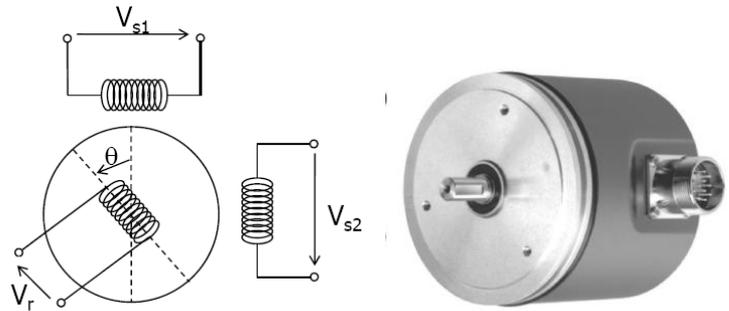
I resolver sono sensori assoluti di posizione angolare, non esiste la versione per la posizione lineare. Il principio di funzionamento del Resolver si basa sulla variazione dell'accoppiamento tra due sistemi di avvolgimenti elettrici rotanti l'uno rispetto all'altro. E' costituito da un rotore con un avvolgimento (circuito primario o **generatore**) alimentato tramite spazzole da una tensione sinusoidale (di ampiezza V_{rif}) e da uno statore su cui ci sono due avvolgimenti sfasati di 90° (circuiti secondari). La tensione sinusoidale alternata genera un flusso magnetico che, accoppiandosi con il circuito del secondo sistema crea una tensione indotta dipendente dalla tensione impressa sul primario e dalla posizione relativa θ dei due sistemi. Le tensioni indotte sono del tipo:

$$V_{rif} = V_M \sin(\omega t)$$

$$V_1 = k V_{rif} \sin\theta = k V_M \sin(\omega t) \sin\theta$$

$$V_2 = k V_{rif} \cos\theta = k V_M \sin(\omega t) \cos\theta$$

$$\theta = \text{atan2} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$



θ è l'angolo relativo tra il rotore e lo statore e k è una costante dipendente dalle caratteristiche costruttive. Questo angolo viene ricavato attraverso le tensioni indotte V_1 e V_2 . Le due tensioni di uscita sono modulate sinusoidalmente con la posizione ed in quadratura tra loro. 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.

La misura è assoluta solo all'interno di un giro, altrimenti fornisce una misura incrementale. Esistono realizzazioni con p coppie di espansioni polari in cui il sensore fornisce la posizione assoluta all'interno di un giro elettrico, a cui corrispondono $1/p$ giri meccanici. Tale soluzione consente di ottenere una maggiore risoluzione del sensore.

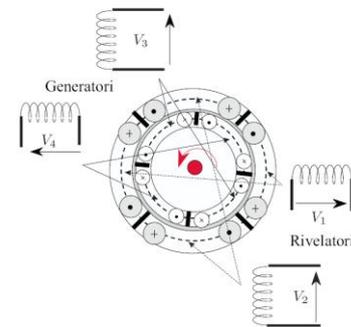


Figura 2.34: Schema costruttivo di un Resolver a due poli.

L'acquisizione del segnale dal Resolver necessita di un circuito demodulante che estragga l'ampiezza delle tensioni sinusoidali del circuito rivelatore e da questo ricavi l'angolo relativo tra i due circuiti. Le due tensioni sinusoidali devono essere trattate da un opportuno convertitore (*Resolver to digital converter*) per poter disporre di una codifica numerica della misura di posizione. Il resolver è una piccola macchina elettrica con un rotore e uno statore, il rotore è avvolto e sullo statore sono riportati due avvolgimenti a 90° elettrici l'uno con l'altro. La qualità (precisione, stabilità) della tensione impressa sul primario è strettamente legata alla bontà della misura. Occorre quindi predisporre un generatore di tensione che fornisca una buona portante.

Misura di posizione in movimento: 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. Quindi le tensioni indotte sui circuiti secondari presentano un secondo termine (errore dinamico)

$$V_1 = kV_M \sin(\omega t) \sin\vartheta + \frac{k \dot{\vartheta}}{\omega} V_M \cos(\omega t) \cos\vartheta; \quad V_2 = kV_M \sin(\omega t) \cos\vartheta - \frac{k \dot{\vartheta}}{\omega} V_M \cos(\omega t) \cos\vartheta.$$

L'ampiezza dell'errore dinamico è proporzionale alla velocità di rotazione ed è un segnale sinusoidale sfasato in quadratura rispetto al segnale portante. L'errore dinamico è inversamente proporzionale alla pulsazione della portante, quindi i Resolver operanti ad elevata velocità necessitano di una tensione portante a pulsazione elevata.

PRO: è 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 ad alte prestazioni con motori Brushless. 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 stesso, favorendo così la compattezza e la riduzione dei costi dell'insieme.

CONTRO: La presenza di spazzole per l'alimentazione del circuito primario porta ad usura dei materiali, nelle applicazioni digitali è necessario un circuito di conversione digitale abbastanza complesso e costoso.

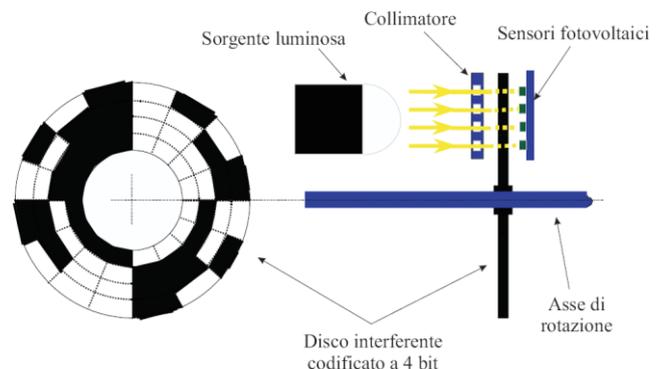
3.5 Encoder digitale

L'encoder è un sensore per la misura della posizione e della velocità che fornisce un'uscita digitale anziché analogica come per i sensori visti fino ad ora.

L'encoder è disponibile sia in versione per l'acquisizione di posizioni angolari che per l'acquisizione di spostamenti lineari, ma la versione per spostamenti angolari è molto più diffusa.

Sono sensori che convertono la posizione angolare del suo asse rotante con un segnale elettrico digitale. Si basano su un principio fotoelettrico, in particolare sul rilevamento fotoelettrico di feritoie su un disco mobile. Gli encoder sono composti da un disco, calettato sull'albero dell'apparecchiatura di cui si vuole rilevare lo spostamento angolare, costituito da zone scure e zone trasparenti, *foto emettitori*, che danno il segnale di input attraverso un segnale luminoso che passa nelle zone trasparenti del disco e *fotorilevatori* che ricevono il segnale luminoso e che a sua volta invierà un segnale di output logico (1 se passa la luce, 0 se non passa).

Esistono encoder assoluti e encoder incrementali. I primi forniscono una misura assoluta dello spostamento, gli altri una misura incrementale rispetto ad un valore di riferimento. Gli encoder incrementali sono usati anche come misuratori di velocità.



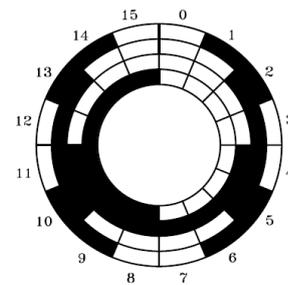
3.5.1 Encoder assoluto

Gli encoder assoluti sono costituiti da un disco di vetro ottico (o di plastica) su cui sono riportate corone circolari (tracce) concentriche, ogni traccia presenta un'alternanza di settori trasparenti ed opachi, quest'ultimi ottenuti per deposizione di film metallico. In corrispondenza di ogni traccia viene emesso un raggio di luce che viene captato dalla parte opposta del disco da un fotodiodo o un fototransistore. Con una opportuna disposizione dei settori è possibile caratterizzare un numero finito di posizioni angolari con una opportuna stringa di bit individuata univocamente. L'uscita avviene direttamente come stringa di bit, e non c'è bisogno di nessun circuito esterno per il conteggio dei giri. Le parti opache e trasparenti si alternano in modo da codificare la posizione corrente in una configurazione binaria. Se si lavora con N bit, il disco è diviso in n corone circolari e in 2^n spicchi. Il bit meno significativo sarà quello della corona più interna.

Un problema che si ha con gli encoder è la scelta del sistema di codifica. L'uso della codifica binaria classica comporta che il passaggio da un numero al successivo può richiedere la modifica di più di un bit (ad esempio su 4 bit per passare da 7 a 8 bisogna passare da 0111 a 1000). Questo potrebbe portare a configurazioni spurie nelle transizioni tra settori trasparenti e opachi, ad esempio a causa di imprecisioni costruttive, si potrebbero rilevare prima le variazioni dei bit di posizione 2 e 3 e poi di quello di posizione 1 e 4. In tal caso si osserverebbe la transizione 0111 → 0001 → 1000, corrispondente a 7 → 9 → 8.

Per ovviare a tale problema si usano codifiche particolari come il **codice Gray** in cui posizioni contigue si differenziano solo per un bit.

Denary	8-4-2-1 binary	Grey code	Denary	8-4-2-1 binary	Grey code
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000



Encoder assoluto a 4 bit (codice Gray)

La risoluzione dipende dal numero di bit dell'encoder: un encoder a 4 bit può fornire solo 16 posizioni in uscita, quindi la risoluzione è di circa 22.5° , se si passa a 8 bit si arriva ad una risoluzione di $1,4^\circ$. I pregi sono il fatto che l'uscita può essere utilizzabile direttamente dall'unità di elaborazione. Non necessita l'azzeramento e non perde informazioni in caso di mancanza di alimentazione.

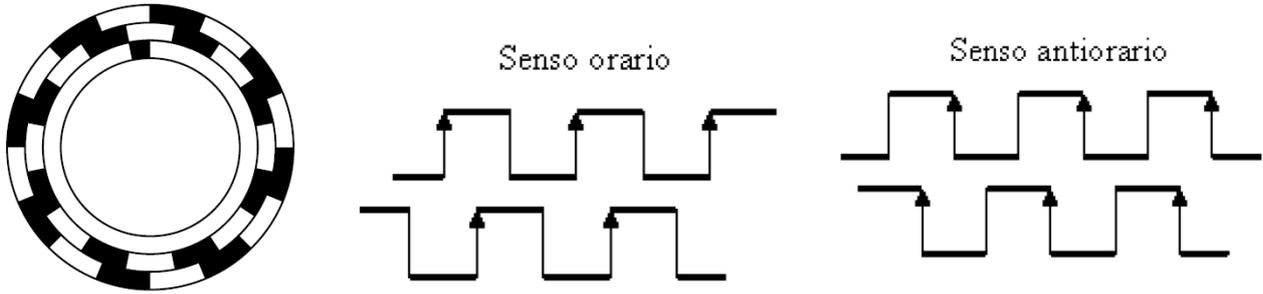
I difetti sono il costo elevato dovuto alla maggiore complessità rispetto agli encoder incrementali.

Nel caso si vogliono fare misure maggiori ad un giro completo è necessario usare comunque un circuito esterno che conta i giri.

3.5.2 Encoder incrementale

Il disco dell'encoder incrementale è costituito da una corona circolare con due tracce in cui i settori trasparenti e opachi (in egual numero nelle due tracce) sono sfasati tra di loro. Rilevando il fascio di luce che viene fatto passare attraverso le feritoie si ottiene in uscita un'onda quadra per ciascuna traccia. La distanza tra due feritoie è detta passo. 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 un certo stato iniziale. La frequenza dell'onda quadra in uscita è funzione della velocità di rotazione e del numero di feritoie. Se si usano due ghiera,

concentriche, con lo stesso numero di feritoie e sfasate di un quarto di passo, è possibile ottenere due onde quadre sfasate, analizzando queste due onde si può individuare il verso di spostamento.



Talvolta c'è una terza traccia con un solo settore opaco, che fornisce una posizione di riferimento (tacca zero). La tacca di zero è posta in corrispondenza dello zero convenzionale dell'angolo di rotazione dell'encoder. Se si usa come misuratore di posizione, bisogna operare una inizializzazione, si muove il dispositivo collegato all'encoder finché non è rilevata la tacca zero. Il rilevamento di questa posizione è molto importante in quanto consente di stabilire lo stato iniziale necessario per il conteggio del numero di impulsi dell'onda quadra.

I pregi sono il costo basso e che varia poco con l'aumento della risoluzione. La risoluzione è data dal rapporto $2\pi/N$, dove N è il numero di feritoie. La risoluzione può aumentare attraverso la cosiddetta moltiplicazione elettronica ottenuta sfruttando i fronti di salita e discesa dell'onda quadra. I difetti sono che necessita di un circuito esterno di conteggio del numero di giri, necessità di azzeramento, perdita delle informazioni in assenza di alimentazione.

4. Misure di velocità

4.1 Fly-ball-governor

Il più antico misuratore di velocità è il *fly-ball-governor*. Sottoposto a rotazione le masse sferiche tendono ad alzarsi per effetto della forza centrifuga convertendo la velocità angolare in spostamento lineare che può essere misurato. Nelle macchine a vapore tali sensori erano usati per l'apertura e chiusura di una valvola.

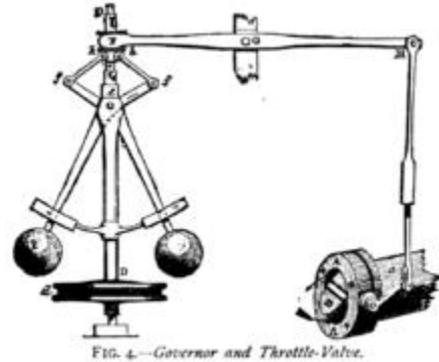


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

4.2 Encoder Incrementali

In molte applicazioni (ad esempio il controllo di motori elettrici), nelle quali il sistema è necessariamente dotato di un trasduttore di posizione angolare, la velocità di rotazione può essere stimata tramite la semplice operazione di derivata fatta rispetto al tempo.

Questa soluzione è tipicamente adottata quando si utilizza un **encoder incrementale**, in quanto per questo sensore la misura di velocità corrisponde anche alla misura di frequenza del segnale generato in uscita. Dividendo il numero di impulsi di conteggio per l'unità di tempo in cui vengono acquisiti si ottiene una stima della velocità di rotazione di un encoder incrementale.

$$\omega = \frac{2\pi N}{N_{enc} T}$$

dove N_{enc} è il numero di feritoie dell'encoder ed N è il numero di impulsi contati nell'intervallo di tempo T . La velocità minima misurabile è quella che si ha con $N=1$ ed è tanto più piccola quanto più grandi sono N_{enc} e la finestra temporale di riferimento T . Si noti che T è il "ritardo" con cui viene aggiornata la misura, pertanto non può essere incrementato a dismisura, per non penalizzare troppo le prestazioni di un eventuale sistema di controllo in retroazione che utilizzi tale misura.

Una soluzione alternativa, per ovviare al problema della velocità minima misurabile, potrebbe essere quella di misurare, anziché il numero di impulsi in un tempo fissato, il tempo che intercorre fra un impulso dell'encoder ed il successivo. In questo caso, ipotizzando che il tempo venga misurato contando gli impulsi di un clock di riferimento, la velocità è calcolata come

$$\omega = \frac{2\pi}{N_{enc}} \frac{1}{N_{clock} t_{clock}}$$

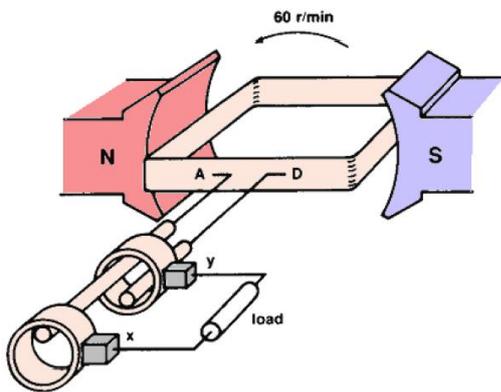
con N_{clock} pari al numero di impulsi di clock rilevati e t_{clock} l'intervallo temporale tra di essi. Si noti che alle basse velocità si avrà N_{clock} molto grande, per cui non ci saranno problemi. Tuttavia, si avrà un limite alle alte velocità dovuto alla risoluzione del temporizzatore, in quanto all'aumentare della velocità N_{clock} diminuisce, fino ad annullarsi quando la frequenza degli impulsi dell'encoder diventa maggiore di quella del clock.

In base a queste considerazioni, la soluzione ideale risulta essere un compromesso fra le due, vale a dire utilizzare il primo metodo se la velocità supera un certo valore di soglia ed il secondo metodo se invece si mantiene al di sotto di tale valore.

4.3 Dinamo Tachimetrica

Il più diffuso sensore per la velocità sono i tachimetri, che sono praticamente dei motori in corrente continua o alternata usati come generatori.

La *dinamo tachimetrica* fornisce una tensione di uscita proporzionale alla velocità di rotazione del rotore. 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.



Tensione di uscita

$$V = k_t \omega$$

con k_t costante tachimetrica, che dipende dalle caratteristiche costruttive (raggio del traferro, dal numero di conduttori, dalla densità del flusso magnetico) e ω velocità di rotazione (rpm).

Pregi: costo basso, sensore assoluto, può funzionare all'intero di motori.

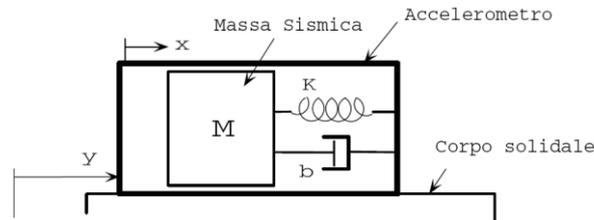
Difetti: usura dovute alle spazzole

La dinamo tachimetrica è un sensore di basso costo, fornisce una informazione assoluta e non necessita di una tensione di alimentazione. Di contro 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. Il sensore ha inoltre una scarsa risoluzione alle basse velocità.

5. Sensori di accelerazione

5.1 Accelerometri a massa sismica

Questi sensori si basano sulla legge di Newton e la conversione in spostamento tramite una molla.



L'accelerometro è costituito da una **massa sismica** che si muove all'interno di un contenitore solidale al 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 . L'equilibrio tra le forze applicate alla massa sismica risulta essere:

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

dove x_m è dato dallo spostamento della massa x rispetto al contenitore solidale al corpo e dallo spostamento del corpo y : $x_m = x+y$

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

quando si raggiunge una situazione di equilibrio in cui la massa è ferma rispetto al contenitore solidale al corpo

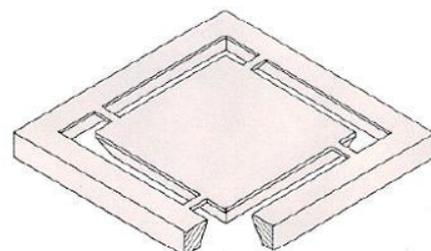
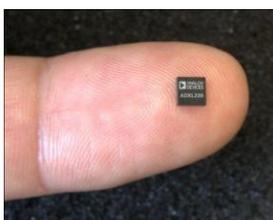
$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dx}{dt} = 0$$

si acquisisce il valore dell'accelerazione attraverso o la misura dello scostamento x tramite un sensore di posizione lineare (es. LVDT) o attraverso la rilevazione diretta della forza elastica kx e calcolo dell'accelerazione:

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{k}{M} x$$

5.2 Accelerometri a semiconduttore (MEMS)

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. Per questo tipo di componenti, realizzati sfruttando al contempo le proprietà elettriche e meccaniche di un circuito integrato, si parla comunemente di **Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS)**. Sono usati anche come rilevatori di vibrazioni.



6. Sensori di prossimità

Sono sensori che forniscono una informazione binaria sulla presenza o meno di un oggetto nel loro range di azione. ne esistono di diversi tipi, dal semplice interruttore azionato meccanicamente a sensori ad induzione, magnetici, fotoelettrici, capacitivi, che funzionano senza alcun contatto fisico e non sono soggetti ad usura. Sono molto usati nelle linee automatizzate come sensori di presenza o come fine corsa.

1) *I sensori induttivi*

Sono utilizzati per rilevare parti metalliche. Consistono in una bobina con un nucleo magnetico, un circuito oscillatore ed un interruttore. L'oscillatore crea un campo magnetico nella bobina, se è presente un oggetto metallico (di materiale ferromagnetico) nel suo campo di azione l'ampiezza dell'oscillazione diminuisce a causa delle perdite in un oggetto metallico presente nel campo di azione. Tale variazione è rilevata per azionare l'interruttore. Tra le caratteristiche peculiari di questo sensore c'è un campo di funzionamento piuttosto limitato (pochi centimetri) e una frequenza di operazioni molto elevata dell'ordine di migliaia di volte al secondo rendendoli adatti a rilevare oggetti in rapido movimento.

2) *I sensori capacitivi*

Sfruttano la variazione di capacità di un condensatore al variare del mezzo tra le due armature. Sono capaci di rilevare oggetti che hanno una costante dielettrica ϵ_r maggiore di 1.2 (aria = 1). Se la costante dielettrica è molto alta possono rilevare oggetti all'interno di contenitori metallici. Per questo sono usati per la rilevazione del passaggio di un fluido in una condotta.

3) *I sensori fotoelettrici*

Usano un fascio luminoso per rilevare la presenza di oggetti che lo bloccano o lo riflettono. Sono costituiti da un emettitore di luce (lampada ad incandescenza o un led ad infrarosso) e da un ricevitore. Normalmente viene usato un fascio di raggi infrarossi, in quanto questa radiazione difficilmente si confonde con i disturbi generati da fonti luminose ambientali. Il campo sensibile di questi sensori dipende sostanzialmente dalla natura della superficie dell'oggetto da rilevare: tipicamente da 10 a 100 cm.

4) *I sensori ad ultrasuoni*

Funzionano sul principio del sonar: emettono impulsi sonori ultrasonici, e rilevano un'eventuale eco di ritorno generata dalla presenza di un oggetto all'interno della portata nominale. Questi sensori sono costosi ma presentano dei significativi vantaggi: possono avere portate nominali molto elevate (fino a 10 m); sono immuni ai disturbi elettromagnetici; possono rilevare oggetti di qualsiasi materiale; possono rilevare oggetti senza che questi siano stati preventivamente preparati.

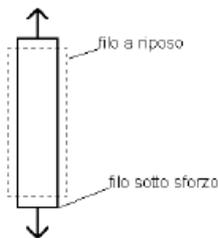
7. Sensori di Forza

La misura di una forza incidente su di un oggetto si ottiene in generale andando a misurare la deformazione o la variazione di geometria che l'oggetto in questione subisce. Un esempio molto classico è la bilancia pesa persone che è costituita da un piatto a cui è collegata una molla. La forza peso della persona sul piatto deforma la molla che a sua volta è collegata ad un ago indicatore. Lo spostamento dell'ago su di una scala graduata permette, infine, la misura della forza peso agente sul sistema.

Il più semplice sensore è il **dinamometro**, costituito da una molla con una scala graduata, la cui lunghezza varia con la forza applicata.

7.1 Estensimetro (Strain Gauge)

L'estensimetro, detto **strain gauge**, è un sensore che rileva deformazioni meccaniche trasformandole in variazioni di resistività. Considerando un corpo cilindrico di sezione A_0 e di lunghezza l_0



Quando una forza agisce il corpo si deforma di una quantità approssimativamente proporzionale alla forza incidente per unità di superficie secondo la legge di Hooke:

$$\Delta l = \frac{1}{E} \left(\frac{F}{A_0} \right) l_0 = \frac{1}{C} F$$

con E costante di proporzionalità detto modulo di Young, S sezione su cui incide la forza e l lunghezza, $C = A_0 E / l_0$ è detta costante elastica del materiale e dipende dalle caratteristiche geometriche e fisiche.

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

$$\frac{\Delta A_0}{A_0} = - \frac{2\mu \Delta l}{l_0}$$

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**) oppure un semiconduttore (**estensimetri a semiconduttore**) che sottoposto a deformazione modifica la sua resistività a causa della variazione della sua geometria. La resistenza di un conduttore metallico è proporzionale alla sua lunghezza e inversamente proporzionale alla sua sezione

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0}$$

Se il conduttore è sottoposto a una forza varia la sua lunghezza e la sua sezione ma il volume resta costante

$$V = A_0 l_0 = (A_0 - \Delta A)(l_0 + \Delta l) \rightarrow (A_0 - \Delta A) = (A_0 l_0) / (l_0 + \Delta l)$$

la nuova resistenza

$$R = \rho \frac{l_0 + \Delta l}{A_0 - \Delta A} = \rho \frac{l_0 + \Delta l}{A_0 l_0} (l_0 + \Delta l) = \rho \frac{l_0^2 + 2\Delta l l_0 + \Delta l^2}{A_0 l_0}$$

per piccole deformazioni Δl^2 è un infinitesimo di ordine superiore e può essere trascurato e quindi

$$R = \rho \frac{l_0}{A_0} \left(1 + \frac{2\Delta l}{l_0} \right) \rightarrow \Delta R = R - R_0 = 2R_0 \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta l}{l_0}$$

Il legame resistenza-lunghezza è espresso attraverso un fattore detto **gauge factor** (GF) o **gain factor** dato da:

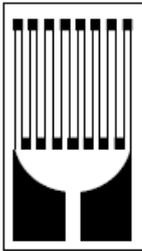
$$K = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l_0}$$

Come visto per i metalli conduttori il GF è intorno a 2. Per particolari leghe può raggiungere valori intorno a 10 (con leghe di Nichel). Il GF rappresenta una misura della sensibilità del sensore. Più è alto più è sensibile il sensore.

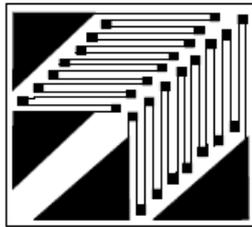
Dalle relazioni precedenti, misurando la resistenza R si risale facilmente al valore della forza

$$F = \frac{C}{K} \frac{\Delta R}{R_0} l_0 = \frac{A_0 E \Delta R}{K R_0}$$

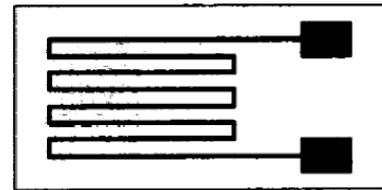
Costruttivamente gli estensimetri metallici sono ricavati su di un supporto isolante su cui viene depositata una traccia di lega metallica (tipicamente nichel, nichel-cromo, manganina, costantana, platino) avente una forma a zig-zag per aumentare la deformazione complessiva. La dimensione tipica di un estensimetro è di circa 1 cm quadrato. Possono misurare deformazioni, e quindi forze lungo una sola direzione, se si vuole un sensore per forze generiche è necessario prevedere particolari disposizioni delle resistenze (vedi figura).



(a) Estensimetro per misurare deformazioni lungo un solo asse (x)

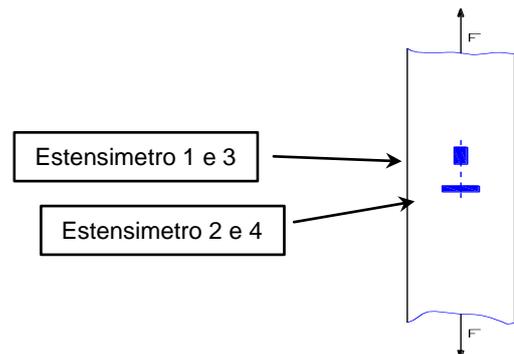
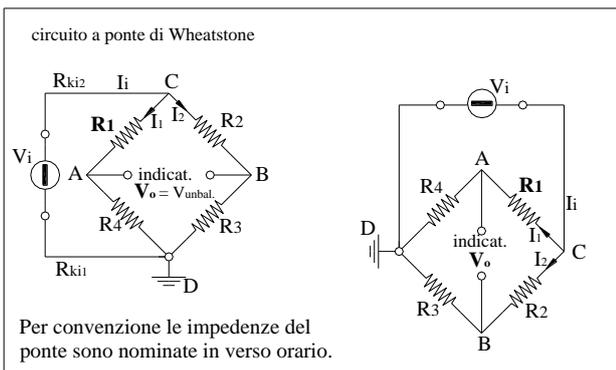


(b) Estensimetro per misurare deformazioni lungo due assi (x-y)



Esistono anche estensimetri a semiconduttore, in genere in silicio. La sensibilità di questi sensori è molto più elevata e quindi forniscono un segnale molto più forte a parità di superficie utile (per materiali semiconduttori GF è tra 50 e 200). Per questo motivo gli estensimetri a semiconduttore sono estremamente piccoli (valori tipici sono dell'ordine di 0.5 mm). Di contro sono molto sensibili alla variazione di temperatura ambientale, sono di difficile manipolazione a causa della loro piccola dimensione, sono meno resistenti a shock meccanici e termici e sono più costosi. Altro svantaggio è che hanno un legame non lineare tra resistenza e deformazione.

L'acquisizione del segnale generato dall'estensimetro non è semplice, in quanto la sua entità, soprattutto per estensimetri metallici, è molto modesta. Per la misura bisognerà ricorrere ad un ponte resistivo che preveda la compensazione delle variazioni di temperatura che possono produrre delle variazioni di resistenza dello stesso ordine della deformazione o addirittura maggiore. In particolare, dal momento che il ponte di Wheatstone fornisce risultati tanto migliori quanto più le resistenze usate sono simili, solitamente si usano due estensimetri su due lati contigui del ponte. Uno sarà soggetto a deformazione, mentre l'altro sarà disposto in modo tale da non essere soggetto a deformazione. In questo modo variazioni di resistenza tra i due estensimetri concorrono allo sbilanciamento del ponte, mentre variazioni uguali come quelle dovute alla temperatura non hanno effetto sull'uscita del ponte. Risultati ancora migliori si possono ottenere utilizzando 4 estensimetri, due soggetti a deformazione e due no.



Caratteristiche degli estensimetri:

- Resistenza a riposo $\sim 100\Omega$ (es. 120Ω)
- Allungamento consentito $0.2\div 5\%$ della lunghezza a riposo
- Dimensioni: spessore $5\mu\text{m}$, lunghezza $\sim 1\text{mm}$, larghezza $\sim 0.1\text{mm}$
- Leghe: rame-nichel, nichel-cromo
- Strato di materiale ceramico isolante ($\sim 25\mu\text{m}$) tra lamina e elemento deformabile
- Campi di impiego da qualche bar fino a 10.000 bar
- Amplificatori integrati per portare il segnale in uscita dal ponte ($\sim \text{mV}$) a valori dell'ordine dei volt o mA
- Dispositivi molto veloci se collegati direttamente alla superficie (elevata banda)
- Costi ridotti

7.2 Trasduttori piezoelettrici

Non sfruttano la deformazione conseguente all'applicazione di una forza, ma usano cristalli che se sottoposti a forza generano un accumulo di carica proporzionale alla forza stessa. In genere usano cristalli in silicio ed hanno prestazioni superiori ai precedenti, ma anche costi maggiori (anche dovuti a difficoltà di interfacciamento, necessitano di particolari circuiti amplificatori). Grazie alla loro banda elevata permettono di misurare variazioni veloci delle forze applicate.

8. Sensori di temperatura

8.1 Termometri

Sono sensori di temperatura molto diffusi in ambito non industriale, in quanto più adatti per il monitoraggio visuale piuttosto che per sistemi di controllo automatico. Sono formati da un recipiente completamente chiuso, riempito di liquido o di gas. Se la temperatura si alza aumenta la pressione, nel caso di gas, oppure il volume, nel caso di liquido. Hanno un tempo di risposta molto lento (secondi, decine di secondi) dovuti alle masse termiche da portare all'equilibrio. I range di misura non sono molto ampi (in genere poche decine di gradi) e all'aumentare dei range di misura aumenta l'ingombro dello strumento.

Per i termometri a liquido, il liquido più usato è il mercurio, in quanto è liquido in un range molto elevato di temperatura, da -39°C a circa 357°C , ed è dotato di un coefficiente di dilatazione termica elevato (circa $\alpha = 0,00018\text{K}^{-1}$). La dilatazione termica è data da $\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$.

La risposta dello strumento è il volume del liquido mentre la grandezza da misurare è la temperatura, quindi la sensibilità è data allora da

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \alpha V_0$$

Quindi più è elevato il coefficiente di dilatazione termica maggiore è la sensibilità dello strumento.

8.2 Sensori bimetallici

Il principio di funzionamento è basato sulla dilatazione termica dei materiali metallici. Una *barra* di metallo tende ad allungarsi secondo una legge approssimativamente lineare

$$l = l_0(1 + \gamma \Delta T)$$

con γ coefficiente di dilatazione termica.

Nei sensori bimetallici, due metalli, con diverso coefficiente di dilatazione termica, sono saldati insieme. Quando è sottoposto a variazioni di temperatura, il sensore si flette, generando uno spostamento dell'estremità che può essere rilevato attraverso un sensore di spostamento. Esistono sensori lineari e ad elica, questi ultimi sono migliori perché hanno una maggiore sensibilità. Tra i metalli usati ci sono rame ($\gamma=26 \cdot 10^{-6}$) e alluminio ($\gamma=16.6 \cdot 10^{-6}$)



Si tratta di sensori semplici, meccanicamente robusti, i range di misura non sono molto ampi, i tempi di risposta sono dell'ordine dei secondi. L'accuratezza è bassa (hanno errori nell'ordine di 0.5°C), scarsa linearità e presentano problemi di isteresi.

8.3 Termoresistenze

Le termoresistenze, dette anche RTD (Resistance temperature Detector) sono i più semplici sensori di temperatura usati per i sistemi di controllo. Sfruttano la dipendenza della resistenza elettrica dei metalli dalla temperatura. Sono costituite da sottili fili di materiale conduttore avvolti su supporti isolati, di forma cilindrica o piatta. Un altro metodo costruttivo consiste nel deposito di un film metallico su di un piccolo supporto piatto di ceramica. La resistenza di un conduttore filiforme è data da

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

ρ resistività, l è la lunghezza del conduttore e A è la sua sezione.

Al variare della temperatura si può considerare che, per determinati metalli, l'effetto maggiore si abbia sulla resistività trascurando le deformazioni. La relazione tra resistenza e temperatura può essere approssimata con un modello polinomiale

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2$$

Con T_0 e R_0 una temperatura di riferimento e la corrispondente resistenza.

L'elemento costituente la termoresistenza può essere di Platino, Nickel o Tungsteno, con diversi valori di resistenza nominale. In genere, il metallo utilizzato e la resistenza nominale vengono combinati per identificare la tipologia del componente nei cataloghi dei costruttori. A titolo di esempio, una delle termoresistenze più comunemente utilizzata è quella realizzata con filo di Platino e caratterizzata da resistenza nominale $R_0 = 100\Omega$, che viene pertanto denominata **PT100**.

Per il platino si hanno i parametri $\alpha = 4 \times 10^{-3}$ e $\beta = 5.9 \times 10^{-7}$. Dato che $\alpha \gg \beta$ in un certo range di temperature il legame tra R e T si può considerare praticamente lineare.

caratteristiche:

- eccellente accuratezza, errori nell'ordine di 10^{-2} °C;
- sensibilità data dal valore del parametro α (per la PT100 la sensibilità è data da $100 \times \alpha = 0.4 \Omega/^\circ\text{C}$. dati i bassi valori di sensibilità si deve far spesso ricorso ad accorgimenti particolari per la misura.
- range di utilizzo: da -100°C a 650°C per quelli in platino. Quelli in nichel (meno sensibili $\alpha=0.005$) hanno range da -180°C a 300°C . Questi sono valori di range in generale, ogni sensore ha poi un campo di utilizzo di un centinaio di gradi, al di fuori del quale la caratteristica non è più lineare.
- tempo di risposta da qualche decimo di secondo a qualche secondo, e dipende dal raggiungimento dell'equilibrio termico tra il sensore e l'oggetto della misura.

Per trasformare la resistenza in un segnale elettrico misurabile occorre far circolare corrente nel dispositivo. Ne consegue un autoriscaldamento dello stesso per effetto Joule, secondo il quale la potenza dissipata in calore è in relazione alla corrente e alla resistenza:

$$P = R I^2$$

Questo autoriscaldamento appare come un errore di misura, e quindi occorre prestare la massima attenzione al livello di corrente impresso nel componente per effettuare la misura.

E' importante allora usare per la misura della resistenza un ponte resistivo a compensazione, tipo il ponte di Wheatstone, che consiste di 4 resistenze (inclusa quella sotto misura) a formare un quadrilatero.

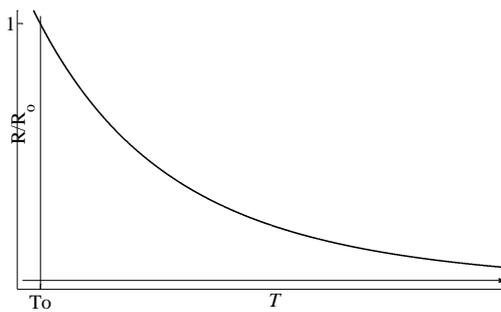
8.4 Termistori

Anche il termistore si basa sull'effetto termoresistivo per misurare la temperatura. In questo caso l'elemento sensibile è un materiale semiconduttore, caratterizzato dal fatto che la resistenza può variare al variare della temperatura in senso negativo (cioè la loro resistenza diminuisce con la temperatura **Negative Thermal Characteristics, NTC**) o positivo (**Positive Thermal Characteristics, PTC**). La maggior parte dei termistori sono caratterizzati da variazioni negative, ma si trovano talvolta anche termistori a caratteristica termica positiva. La relazione tra temperature a resistenza per un NTC è la seguente:

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

dove T è espressa in Kelvin e β è compreso tra 3000 e 5000 K.

Il parametro β , chiamato **temperatura caratteristica**, viene di solito misurato sperimentalmente tra due valori ritenuti estremi del campo di validità della caratteristica, ed è quindi in relazione alla sensibilità del dispositivo. La caratteristica dei termistori è fortemente non lineare:



La pendenza in R_0 è data da

$$\alpha = \left. \frac{d}{dT} \left(\frac{R}{R_0} \right) \right|_{T_0} = - \frac{\beta}{T_0^2}$$

Il maggior difetto dei termistori consiste nella spiccata non linearità della caratteristica che limita il range di utilizzo sia verso il basso (resistenze troppo alte) sia verso l'alto (la pendenza della curva va praticamente a zero: sensibilità nulla). Inoltre l'uscita non lineare richiede un opportuno condizionamento del segnale. Rispetto al RTD ha una dimensione molto minore ed una maggiore sensibilità.

Caratteristiche essenziali del sensore sono:

- Campo di misura: da -100°C a $+250^\circ\text{C}$ (ogni sensore ha un campo di misura di un centinaio di gradi)
- Bassa accuratezza: da 0.1°C
- Sensibilità: elevatissima. Il Termistore è spesso utilizzato in sistemi di protezione termica nei quali l'elevato guadagno e la notevole non linearità 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.
- Piccole dimensioni \rightarrow risposta più rapida rispetto a RTD.
- Meno costosi delle RTD.
- Problema dell'autoriscaldamento (necessità di compensazione).

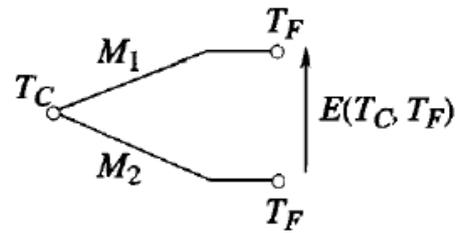
8.5 Termocoppie

Le termocoppie sono i più diffusi sensori di temperatura in campo industriale. Sono costituite da due fili di due metalli diversi uniti ad una estremità. Il principio di funzionamento della termocoppia si basa sull' *Effetto Seebeck* che dice che **su un tratto di filo metallico sottoposto a un gradiente termico nasce una forza elettromotrice che dipende dalla differenza di temperatura.**

$$V = \int_{T_1}^{T_2} \sigma(T) dT, \quad \text{con } \sigma(T) \text{ coefficiente di Seebeck}$$

Unendo le estremità di due fili metallici diversi, tra le altre due estremità si manifesta una differenza di potenziale funzione delle temperature T_C a cui si trova la giunzione e T_F a cui si trovano le altre estremità, in base ad una caratteristica che è, in generale, non lineare.

$$E(T_C, T_F) = \int_{T_F}^{T_C} (\sigma_2(T) - \sigma_1(T)) dT$$



La temperatura T_F è una temperatura di riferimento nota.

La termocoppia non necessita di una alimentazione esterna, in quanto l'effetto Seebeck, sul quale si basa il funzionamento della termocoppia, genera direttamente una tensione di uscita.

Il segnale di uscita deve poi essere opportunamente elaborato per estrarre la temperatura reale della giunzione calda, in quanto la relazione temperatura-tensione è non lineare, ed inoltre, i conduttori che collegano la termocoppia al circuito elettronico di acquisizione creano una giunzione parassita di cui si deve tenere conto per effettuare una misura corretta.

In laboratorio si pone $T_F = 0^\circ\text{C}$ immergendo il giunto freddo in un bagno di acqua e ghiaccio. In questo modo si misurano le tensioni $E(T, 0)$ al variare di T e si ottiene una tabella caratteristica per la termocoppia in questione, detta *caratteristica statica*. Nel normale impiego industriale raramente si può lavorare a 0°C , bisogna misurare la T_F e effettuare una compensazione (compensazione di giunto freddo).

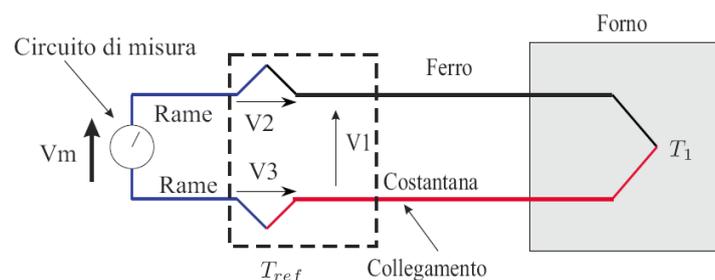
Misurando T_F e $E(T_C, T_F)$ si risale a $E(T_C, 0) = E(T_C, T_F) + E(T_F, 0)$.

Il secondo valore è noto dalla caratteristica della termocoppia e quindi si risale a $E(T_C, 0)$ e dalle tabelle a T_C .

Il procedimento illustrato può apparire, a prima vista, assai strano, in quanto per misurare una temperatura è necessario introdurre un'altra misura di temperatura (ambiente).

Tuttavia il secondo problema di misura è molto più semplice del primo e può essere risolto usando un sensore di basso livello.

E' infine delicata la fase di giunzione della termocoppia con lo strumento di misura (che determina $E(T_C, T_F)$)

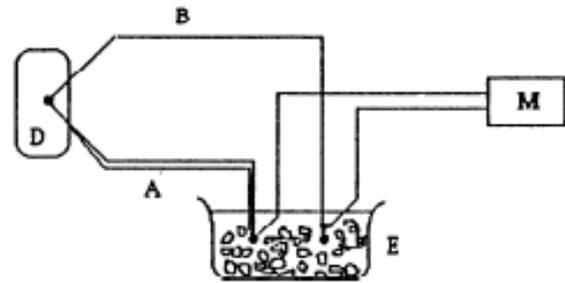


giunzione: $V_m = V_1 + V_3 - V_2$

in quanto ulteriori giunzioni potrebbero indurre altre f.e.m. di Seebeck. Si risolve il problema usando tre giunzioni di cui due in rame. Le giunzioni in rame sono tenute alla temperatura T_F . Nel circuito sono presenti 3 giunzioni: Rame-Ferro, Ferro-Costantana e Costantana-Rame. La tensione di uscita dipenderà quindi dalla tensione di

Ponendo le giunzioni in rame a temperatura T_F i termini V2 e V3 si annullano. I fili di rame non influenzano la misura → stesso salto di temperatura, quindi stessa d.d.p.

Sfruttando questo principio è possibile misurare a grande distanza. A volte è possibile inserire il giunto freddo sotto il livello del terreno in modo tale da mantenere la temperatura fredda costante. Poi con giunzioni in rame si può portare il sistema di misura distante quanto si vuole. La misura di giunto freddo viene eseguita raggruppando i cavi delle termocoppie omogenee nelle cosiddette cassette di compensazione, dove viene rilevata (o condizionata) la temperatura



Caratteristiche:

- range di misura molto elevati dipendenti dai metalli usati (dai -200°C ai 2750°C).
- bassa sensibilità: le tensioni in uscita sono comprese tra i -10 mV e 50 mV , con sensibilità che varia tra i 10 e i $50\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- poco costose, adatte ad ambienti industriali
- poco accurate (errore tra 0.1 e 4°C al variare della misura) a causa delle inevitabili disomogeneità dei materiali.
- possono effettuare misure a grandi distanze (aumentando la lunghezza dei fili)

Si classificano in base alla coppia di metalli e sono indicate con lettere maiuscole

Tipo	E	J	K	R	T
	Nikel-Cromo (+) Costantana (-)	Ferro (+) Costantana (-)	Nikel-Cromo (+) Nikel-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	$\pm 1.7^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.4^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$

Constantana = lega di Rame e Nikel; Chromel = lega Nikel-Cromo; Alumel = lega Nikel-Alluminio.

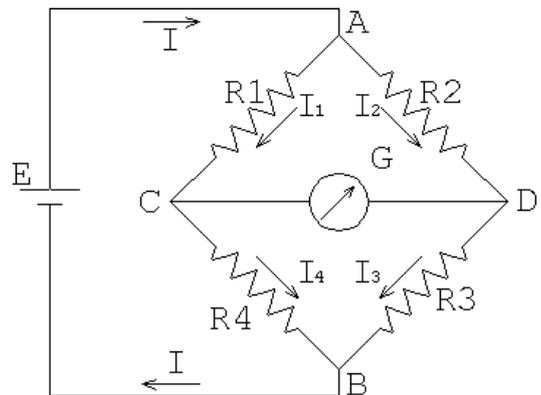
	Termocoppie	Termoresistenze	Termistori
Pro	<ul style="list-style-type: none"> • Autoeccitante, • Semplice, • Campo di misura elevato, • Economico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Molto stabile, • Molto accurato, • Molto lineare. 	<ul style="list-style-type: none"> • Molto sensibile, • Veloce, •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

9. Il ponte di Wheatstone

È uno strumento per la misurazione delle resistenze. Si compone di 4 resistenze connesse in modo da realizzare una maglia quadrata e da un Galvanometro.

Le resistenze sono alimentate ai nodi A e B dal generatore di f.e.m. Invece tra C e D c'è il galvanometro.

Nelle condizioni generali (ponte *squilibrato*) le 4 resistenze sono percorse da correnti diverse tra loro e quindi la corrente misurata dal galvanometro è diversa da zero.



Il ponte è invece in *equilibrio* quando la corrente nel galvanometro è nulla $I_G=0$.

In condizioni di equilibrio si possono scrivere le equazioni ai nodi C e D

$$\text{nodo C: } I_1 = I_4 \quad (1)$$

$$\text{nodo D: } I_2 = I_3 \quad (2)$$

e le equazioni alle maglie ACD e CBD:

$$\text{maglia ACD: } I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (3)$$

$$\text{maglia CBD: } I_3 R_3 = I_4 R_4 \quad (4)$$

Supponiamo che la resistenza da misurare sia $R_4=R_x$.

Si ricava facilmente:

$$R_x = \frac{I_3}{I_4} R_3 = \frac{I_2}{I_1} R_3 = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

La condizione di equilibrio consente allora di determinare la resistenza incognita come funzione delle altre tre resistenze. Per poter procedere alla misura è necessario che una delle tre resistenze note sia variabile, quindi si procede modificando il valore di questa resistenza fino a che il galvanometro non misura corrente nulla. In realtà è necessario che anche il generatore di tensione sia in grado di erogare una tensione variabile, infatti nella fase iniziale, quando il ponte è lontano dall'equilibrio, la tensione va mantenuta bassa per evitare che si generino correnti troppo elevate nel galvanometro che potrebbe rompersi. Si opera quindi sulla resistenza variabile fino ad ottenere un primo azzeramento. Si aumenta a questo punto la tensione di alimentazione e si ottiene un nuovo squilibrio del ponte, si ripete quindi la procedura fino ad avere l'azzeramento con la massima tensione disponibile. Il ponte è in grado di fornire misure di resistenza in un range tra 10 Ω e 100 k Ω .

L'affidabilità della misura dipende dalla precisione delle resistenze impiegate e dalla sicurezza con cui si ottiene l'azzeramento della corrente nel galvanometro. Per ridurre l'effetto della temperatura le resistenze del ponte dovrebbero essere tutte dello stesso materiale in modo da avere lo stesso valore di resistività e quindi la stessa dipendenza dalla temperatura.

10. Sensori per il fluido

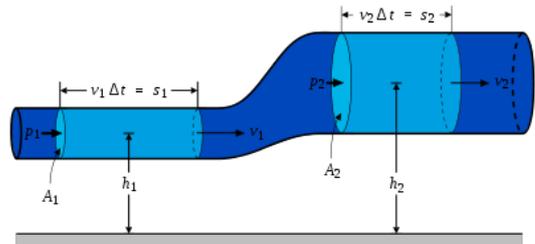
Sono sensori che misurano le proprietà di un fluido: pressione, portata e livello. Si distinguono in *sensori idraulici*, usati per fluidi in forma liquida e *sensori pneumatici*, usati per fluidi in forma gassosa.

Prima di vedere i sensori, è bene richiamare la equazione di Bernoulli, che è alla base di molti di questi strumenti.

10.1 Equazione di Bernoulli

Si consideri un fluido in moto in un condotto. L'equazione di Bernoulli è una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes, che vale sotto alcune ipotesi:

- moto del fluido stazionario (cioè la velocità del fluido in un punto dipende solo dalle coordinate del punto e non dal tempo, la configurazione delle linee di flusso non cambia col tempo).
- fluido incomprimibile (densità costante)
- assenza di attriti interni al fluido e tra fluido e pareti del condotto
- effetto della energia termica trascurabile.



Si considerino due sezioni S1 e S2 del condotto, e si vada a valutare l'energia associata a due elementi infinitesimi dx_1S_1 e dx_2S_2 .

$$dE_1 = S_1 dx_1 \rho \frac{v_1^2}{2} + S_1 dx_1 \rho z_1 g + p_1 S_1 dx_1$$

$$dE_2 = S_2 dx_2 \rho \frac{v_2^2}{2} + S_2 dx_2 \rho z_2 g + p_2 S_2 dx_2$$

L'energia è data dalla somma di tre termini:

- $S dx \rho \frac{v^2}{2}$: Energia Cinetica
- $S dx \rho z g$: Energia Potenziale
- $p S dx$: Lavoro delle forze di pressione.

Dal principio di conservazione dell'energia $dE_1 = dE_2$ e inoltre, dal principio di conservazione della massa $\rho S_1 dx_1 = \rho S_2 dx_2$, pertanto si ottiene:

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + \rho z_1 g + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho z_2 g + p_2$$

dividendo per ρg si ottiene:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = \text{cost}$$

Il termine $z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g}$ è detto *carico idrostatico*.

Per effetto degli attriti interni al fluido e tra fluido e parete del condotto, il carico idrostatico si riduce progressivamente lungo la tubazione e parte della energia meccanica si trasforma in energia termica provocando un leggero riscaldamento del fluido.

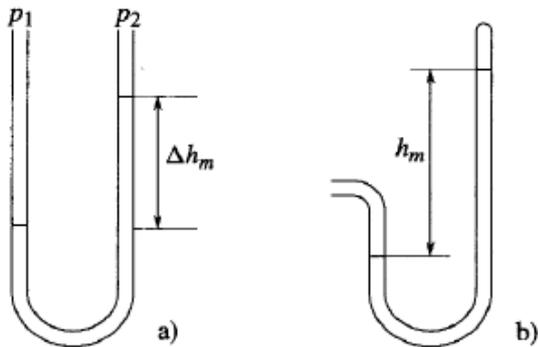
11. Sensori di pressione

I sensori di pressione di un fluido si distinguono in due tipologie:

- 1) sensori basati sulla misura dell'altezza di una colonna di liquido;
- 2) sensori basati sulla misura della deformazione di un elemento elastico.

11.1 Manometri a colonna (manometri ad U)

Manometri a colonna misurano la differenza tra due pressioni (manometri differenziali) attraverso la misura dell'altezza di una colonna di liquido di densità nota.



Nel manometro a tubo aperto (a) le due estremità sono sottoposte a pressione diversa, p_1 e p_2 .

In condizioni stazionarie (cioè $v_1=v_2=0$) dalla equazione di Bernoulli si ottiene

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

e quindi

$$p_1 - p_2 = \rho g (h_2 - h_1) = \rho g \Delta h_m$$

se la pressione p_2 è nota (in genere pressione atmosferica), misurando la differenza di quota Δh_m si risale facilmente alla pressione incognita p_1 . Sono sensori differenziali di pressione. Forniscono misure molto accurate, non necessitano di calibrazione ed hanno una risoluzione legata alla scala con cui si legge la differenza di quota.

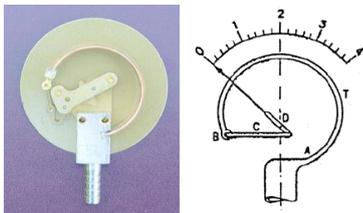
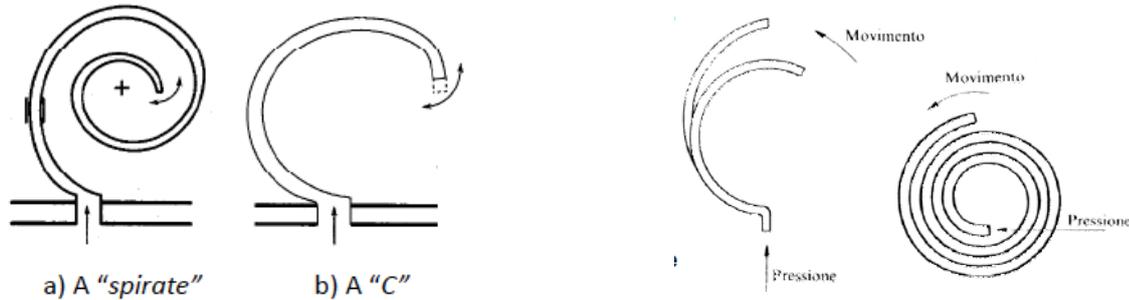
I liquidi utilizzati sono in genere Acqua o Mercurio. Quest'ultimo è preferibile a causa della elevata densità (circa 13500 kg/m^3) che è 13.5 maggiore di quella dell'acqua. Quindi a parità di range di misura si riesce a contenere l'ingombro dello strumento (è possibile misurare pressioni più elevate). Forniscono misure molto accurate (errori nell'ordine di 0.5 mm) su campi di misura piuttosto ristretti (10-1500 mmHg corrispondenti a circa 0.01-2 bar oppure 10-2500 mmH₂O che corrispondono a 0.001-0.25 bar).

Manometri a tubo chiuso (b) sono utilizzati per misurare il grado di vuoto oppure pressioni molto basse.

Se si utilizza un fluido conduttivo (come il mercurio) si può rilevare lo spostamento causato dalla differenza di pressione tramite una induttanza variabile. Se il fluido non è conduttivo si può usare un nucleo magnetico i cui spostamenti sono rilevati da un trasformatore differenziale.

11.2 Tubo di Bourdon

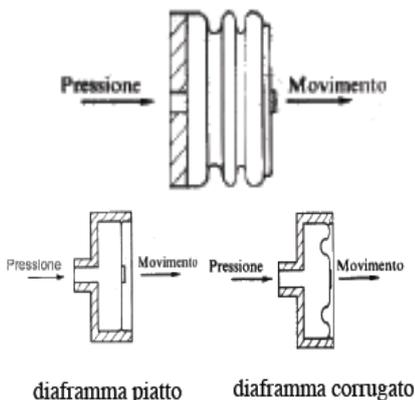
I tubi di Bourdon trasducono una differenza di pressione in uno spostamento meccanico dovuto alla deformazione di un elemento elastico. Sono costituiti da un tubo metallico di sezione non circolare, opportunamente curvato. A causa della forma del tubo, il fluido che entra genera forze diverse su sezioni differenti, deformando il tubo stesso. L'elasticità del materiale permette al tubo di ritornare alla sua forma originale quando la differenza di pressione si annulla. Ne esistono di diversi tipi, a seconda della forma:



Il range di applicazione può essere molto esteso e la sua sensibilità può essere aumentata con forme particolari. Il range va da 0.01 bar a 10000 bar a seconda del materiale e delle soluzioni costruttive.

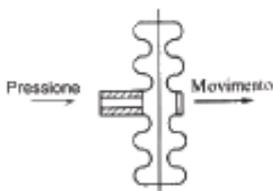
La deformazione è tradotta nello spostamento di un indicatore con un meccanismo a leva o in un segnale elettrico (es. mediante potenziometri).

Altri sensori, basati sullo stesso principio (deformazione di un elemento elastico) sono i *soffietti*, i *diaframmi* e le *capsule* che sottoposti alla forza generata dalla pressione si comportano come molle con uno spostamento proporzionale alla forza.



I soffietti sono elementi di forma cilindrica chiusi ad una delle due estremità che rispondono alla pressione applicata all'altra estremità con una deformazione lungo il proprio asse. Sono usati per basse pressioni. L'elongazione è contrastata dalle forze elastiche delle pareti del soffietto stesso ed anche, da molle esterne di contrasto, utilizzate per limitare la deformazione subita così da aumentare la vita del sensore e fornire una maggiore linearità. I materiali più usati sono ottone, bronzo, leghe di nickel e rame, acciaio.

Un diaframma consiste in una membrana elastica circolare, in genere di acciaio inossidabile, vincolata ai bordi ed in grado di flettersi sotto l'effetto di una pressione. Può essere del tipo piatto oppure corrugato. La deflessione di un diaframma, almeno entro i limiti di impiego, è direttamente proporzionale alla pressione ad esso applicata. Questo tipo di sensore non sopporta grandi spostamenti; di conseguenza l'impiego riguarda i sistemi in cui le pressioni in gioco comportano piccole deformazioni.



La capsula, detta anche aneroide e costituita da due diaframmi corrugati uniti lungo la loro periferia. L'uso di due diaframmi consente quasi di raddoppiare la deflessione ottenibile con uno solo.

12. Sensori di portata

I sensori di portata sono usati per misurare grandezze diverse:

- la portata volumetrica $Q = \text{Volume} / \text{tempo}$;
- la portata massica, massa per unità di tempo: $M = \rho Q$;
- la velocità del fluido $V = Q / \text{Area del condotto}$.

I sensori di portata (detto anche *flussimetri*) si dividono in:

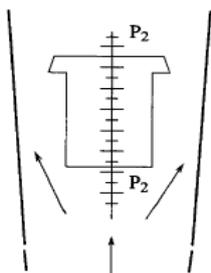
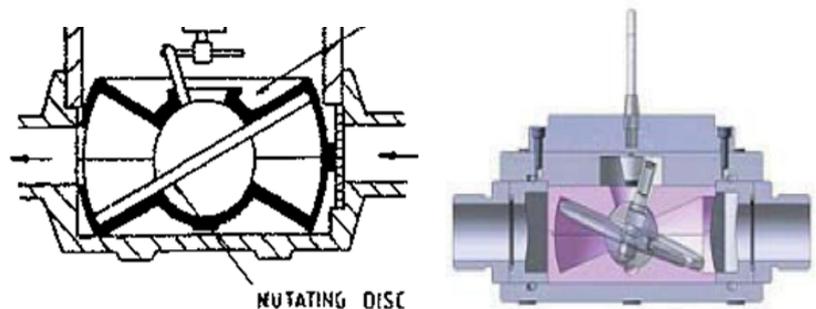
- Sensori a sezione variabile
- Sensori rotanti
- Sensori a strozzamento

12.1 Sensori a sezione variabile

Un sensore di portata volumetrico a sezione variabile è il cosiddetto *senso* *a disco nutante*. questi sensori sono usati anche per le misurazioni della fornitura idrica delle abitazioni.

E' composto da un disco oscillante che divide la camera in due semicamere. Il

fluido in entrata riempie la semicamera e causa una oscillazione del disco. Il processo quindi ricomincia nell'altra semicamera. Contando le oscillazioni del disco è possibile misurare la portata. E' un sensore molto affidabile, ma non può misurare grosse portate e il fluido non deve contenere residui che possono bloccare il disco. Per la manutenzione richiede di bloccare l'impianto.

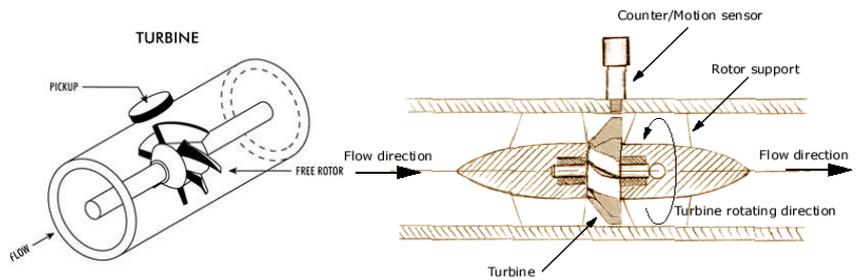


Altri sensori a sezione variabile sono i cosiddetti *rotametri* costituiti da un tubo trasparente leggermente conico e graduato e da un galleggiante sagomato (otturatore) disposto internamente al tubo. Trasducono la portata in spostamenti dell'otturatore all'interno del tubo e devono essere inseriti in tratti di tubazioni disposti verticalmente, in quanto sfruttano la forza peso del galleggiante. Vanno inseriti direttamente nella tubazione, compatibilmente con la pressione, altrimenti in un tratto di tubazione appositamente derivato. In condizioni stazionarie, la posizione del galleggiante dipende dall'equilibrio delle forze agenti sull'otturatore (peso, forze

delle pressioni sulle superfici superiore ed inferiore, eventuali forze dovute a molle di contrasto). Sono sensori molto economici, molto diffusi (industria chimica, farmaceutica e alimentare).

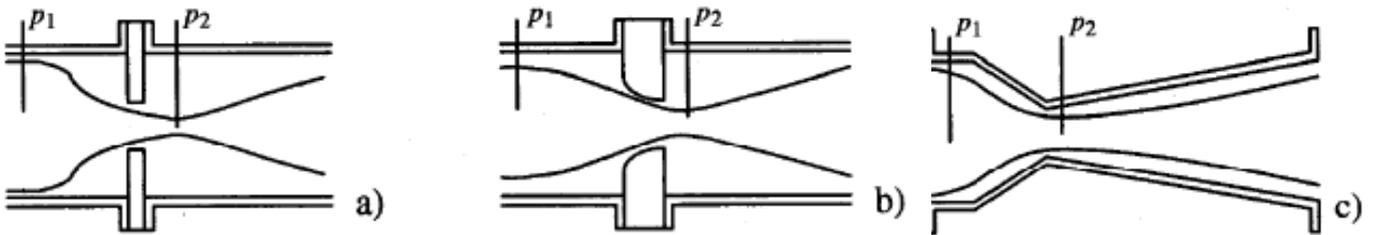
12.2 Sensori rotanti

Tra i sensori rotanti vedremo il *sensore a turbina* in cui la portata è rilevata attraverso il movimento di una turbina immersa nel fluido. Le lame sono magnetiche e quindi si può misurare la velocità a cui ruota la turbina conteggiando gli impulsi di tensione in uscita ad una bobina. Si deve impiegare un fluido privo di detriti perché questi possono bloccare la turbina. Hanno buona accuratezza, ma sono costosi e di difficile manutenzione. Possono, inoltre, presentare perdite di carico e zone morte alle basse velocità (alta soglia di sensibilità). Per ridurre il problema della turbolenza del fluido la turbina è generalmente preceduta e seguita da alette stabilizzanti.



12.3 Sensori a strozzamento

Questi sensori si basano sul fatto che una restrizione della sezione della condotta genera un aumento della velocità del fluido e quindi una diminuzione della pressione a valle dello strozzamento. Si sfrutta l'equazione di Bernoulli. Ne esistono diversi, che si differenziano in base al grado di complessità (e di costo) e alla forma della strozzatura. I più economici sono quelli a *disco forato* (a) o i *bocchagli* (b) mentre più costoso ma anche più accurato è il *tubi Venturi* o *venturimetro* (c).



Nell'ipotesi di condotto orizzontale ($z_1=z_2$), si ottiene:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

si misura la differenza di pressione tra le due sezioni, ad esempio attraverso un manometro ad U, e da questa misura si risale alla velocità v_1 (prima della strozzatura) e quindi alla portata.

$$\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho}$$

data la conservazione della portata massica

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \rightarrow v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad e \quad v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

Quindi

$$\frac{Q^2}{A_2^2} - \frac{Q^2}{A_1^2} = Q^2 \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2 A_2^2} = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}$$

da cui si ricava la portata Q

$$Q = \gamma A_2 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}}$$

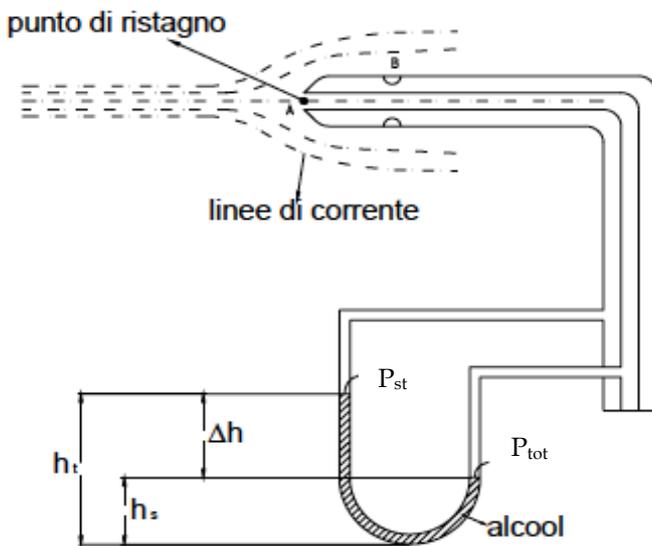
con il coefficiente γ dato da

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

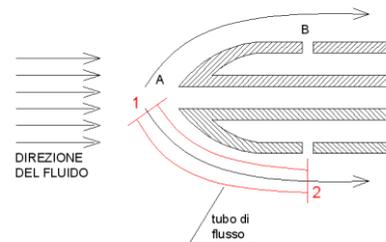
ci sono poi altri termini correttivi che tengono in conto le perdite di carico che si hanno a causa della presenza dello strozzamento. Tali perdite di carico sono molto consistenti nei dischi forati a causa dei vortici che si formano vicino all'imboccatura, meno evidenti nei bocchigli e soprattutto nei venturimetri, che però sono più costosi. Richiedono tarature frequenti a causa del deposito di materiale (incrostazioni) nelle vicinanze della strozzatura. Per la manutenzione richiedono di bloccare l'impianto. Altri difetti sono il range limitato e il rischio di ostruzione.

12.4 Tubo di Pitot

Un altro sensore basato sullo stesso principio è il tubo di Pitot. Questo sensore è molto usato per misurare la velocità di fluidi gassosi. Il tubo di Pitot è utilizzato su tutti gli aeroplani e in automobilismo come sensore per la determinazione della velocità rispetto all'aria e nelle gallerie del vento per la misurazione della velocità della corrente d'aria.



Il tubo di Pitot è costituito da un corpo cilindrico, la cui estremità anteriore è arrotondata e nel quale sono state praticate due aperture, una nella parte anteriore l'altra sulla superficie laterale. Queste aperture sono chiamate *prese di pressione* e sono collegate, tramite dei condotti interni, ad un trasduttore di pressione differenziale. Lo strumento va posizionato in modo che l'asse del tubo sia parallelo alla direzione della corrente fluida.



Il tubo è chiuso all'estremità opposta alla testa, in quanto vi è il manometro, il fluido entra all'inizio nel tubo, ma una volta riempiti gambo e testa, vede il tubo come chiuso frontalmente. La velocità del fluido si annulla in corrispondenza della presa di pressione anteriore. Pertanto abbiamo un punto di arresto della corrente, detto *punto di ristagno*, cui corrisponde un massimo di pressione (*pressione totale*). Ad una distanza dalla punta di circa 5-8 diametri, in corrispondenza dei fori laterali, il fluido ha riacquisito la velocità che aveva all'infinito, prima di arrivare alla testa, e in questo punto viene presa la pressione statica. Quindi in corrispondenza della presa di pressione laterale, il tubo di Pitot è costruito in modo tale che la pressione del

fluido all'esterno della presa è praticamente uguale a quella del fluido indisturbato, tale pressione viene detta *pressione statica*. In genere alle uscite dei due tubi viene collegato un manometro differenziale ad "U" riempito, in genere, di acqua o alcool o miscele di acqua e alcool. Supponiamo che il manometro ad "U" fornisca una differenza di quota tra i peli liberi di liquido pari a Δh . Questo valore è una quantità nota in quanto viene misurata direttamente. Tenendo conto che le due prese del manometro sono collegate rispettivamente alla P_s e alla P_t , è possibile determinare la velocità del fluido. Applicando la conservazione dell'energia tra i due peli liberi del liquido nel manometro, si ottiene:

$$P_t - P_s = \rho_l g \Delta h$$

dove ρ_l è la densità del liquido nel manometro. Applicando la equazione di Bernoulli tra una sezione a grande distanza dallo strumento e la sezione corrispondente al punto di ristagno,

$$P_t = P_\infty + \frac{\rho_f v^2}{2}$$

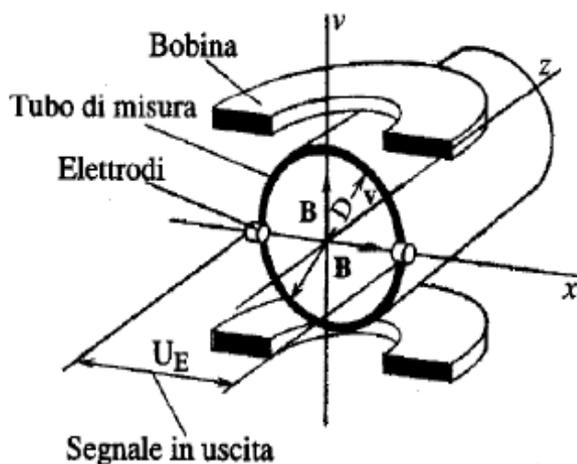
dove la densità ρ_f è quella del fluido non quella del liquido nel manometro, v e p_∞ sono la velocità e la pressione del fluido indisturbato presi a distanza dallo strumento ed alla stessa quota della presa anteriore. Dal momento che $P_s = P_\infty$ è facile ricavare la velocità come

$$v = \sqrt{2 \frac{p_t - p_s}{\rho_f}}$$

La portata è immediatamente nota conoscendo la sezione del condotto in cui si muove il fluido.

12.5 Sensore di portata elettromagnetici

Nel caso di fluidi conduttivi è possibile utilizzare sensori di portata elettromagnetici. Il funzionamento è basato sulla generazione di una differenza di potenziale creata dal conduttore fluido in movimento attraverso un campo magnetico. Il fluido conduttivo viene sottoposto ad un campo magnetico trasversale: si genera una forza elettromotrice ortogonale alla direzione del campo e del moto del fluido



$$f.e.m = v d B$$

v = velocità del fluido;
 d = diametro del condotto;
 B = induzione magnetica.

La tensione in uscita è quindi proporzionale alla velocità del fluido, ed è possibile risalire alla portata volumetrica conoscendo l'area del condotto.

Sono costosi ma hanno buone prestazioni (molto accurati, 0.5% della portata), non sono invasivi (nessuna perdita di carico), possono essere usati anche in presenza di detriti nel fluido. Sono robusti e

affidabili perché non hanno parti in movimento.

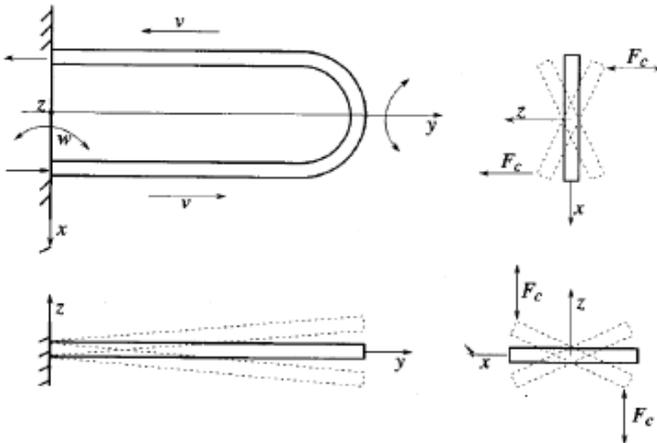
Sono molto usati nell'industria. Possono però essere usati solo per fluidi elettricamente conduttivi (acque reflue, acidi, alcali, succhi, ecc.).

12.6 Tubo di Coriolis

Sono sensori che restituiscono direttamente la portata massica, senza bisogno di passare per la portata volumetrica e la conoscenza della densità. Sfruttano l'accelerazione e la forza di Coriolis, su un corpo di massa m in moto con velocità v rispetto ad un sistema di riferimento in moto con velocità angolare ω si manifesta la forza di Coriolis

$$F_c = 2m\omega \times v$$

Esistono diverse realizzazioni basate su questo principio, la più diffusa prevede un condotto ad U, nei cui rami circola il fluido in direzioni opposte. Il tubo è sollecitato con degli elettromagneti in modo da metterlo in rotazione con velocità ω attorno all'asse x . Fluido in moto con velocità $v \rightarrow$ si generano due forze di Coriolis nei tratti rettilinei dirette lungo z ma in direzioni opposte \rightarrow tubo oscilla intorno all'asse y .



L'ampiezza delle oscillazioni è proporzionale al modulo delle forze di Coriolis, rilevabile con estensimetri. Tale modulo è a sua volta proporzionale alla portata massica mv .

Sono molto accurati: errore nell'ordine dello

0.25% della portata massica. Causano basse perdite di carico, ma hanno campi di misura ristretti e sono molto costosi.

12.7 Sensori di livello

.... to be continued.