STRUMENTAZIONE INDUSTRIALE CHIMICA

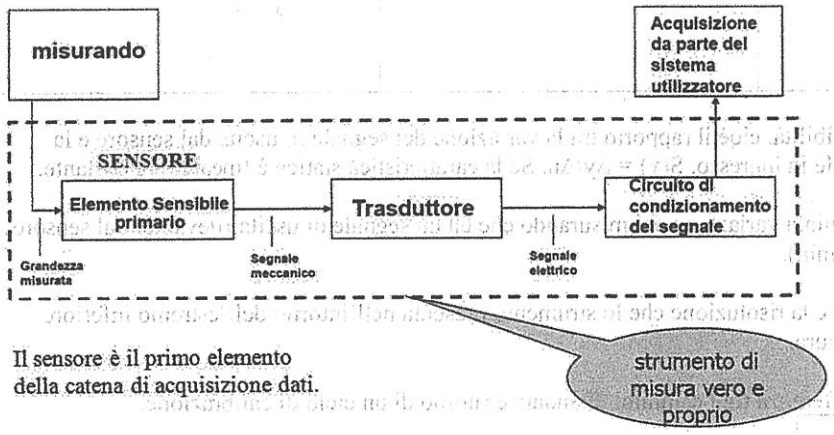
CAPITOLO 1: SENSORI E TRASDUTTORI

Le esigenze di controllo sono:

1. Sicurezza in:
   - Funzionamento normale dell'impianto
   - Prevenzione di incidenti
   - Gestione di incidenti
2. Specifiche di produzione (bisogna controllare che siano rispettate).

Misura

Uno strumento di misura prende in analisi un misurando (grandezza fisica o variabile di processo che si vuole misurare) e produce una misura (che è un dato).



Si definisce **campo di misura** di uno strumento l'insieme dei valori rilevabili di un misurando, che varia da un Xmax (fondo scala) e un Xmin. Si definisce **intervallo di misura** o **span** la differenza (Xmax-Xmin).

Sensore

È uno strumento o parte di un sistema che rileva il valore di una grandezza fisica, producendo un'uscita dipendente da essa secondo una legge fissata.

Proprietà dei sensori:

1. Accuratezza: è il massimo scostamento tra la misura fornita dal sensore e il valore reale del misurando. È un errore sistematico. Ce ne sono di 3 tipi:
   - Accuratezza sul fondo scala: (Xm-Xv)/Xfs
   - Accuratezza della misura: (Xm-Xv)/Xv
   - Accuratezza assoluta: |Xm-Xv|

   Xm: valore misurato
   Xv: valore reale del misurando
   Xfs: valore di fondo scala

2. Precisione: è la ripetibilità, cioè la riproducibilità di una misura, la capacità di uno strumento di fornire valori in uscita che siano simili tra di loro. Viene calcolata come deviazione standard ed è dovuta ad errori casuali.

n misure infinito: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu)^2}{N}}$ $\quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$ (x medio)

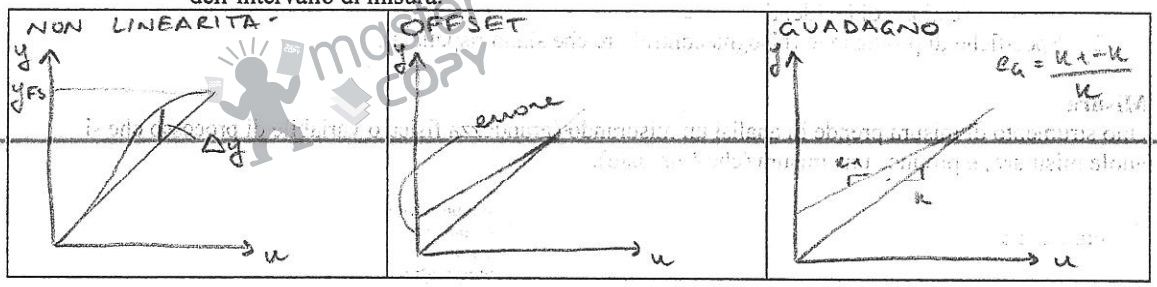
n finito $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})}{N-1}}$

3. Escursione: è il rapporto tra il fondo scala e l'estremo inferiore del campo di misura al quale si applicano valori di accuratezza e precisione costanti. In campo commerciale: Xmax/Xmin.

4. Caratteristica statica: è la caratteristica di funzionamento, quindi la legge fisica secondo la quale il segnale di uscita dipende dal segnale in ingresso. y = f(u). (u: misurando; y: segnale in uscita). Il funzionamento di un sensore è ottimale se la caratteristica statica è lineare.

Prima di usare un sensore è necessario fare un'operazione di taratura o calibrazione, cioè misurare il valore in uscita per valori noti della grandezza in ingresso.
Sulla caratteristica statica ci possono essere degli errori:

- Errore di non linearità: è lo scostamento massimo dalla retta ideale, Δymax/yfs.
- Errore di offset: è l'errore di fuori zero e corrisponde al valore che si ha in uscita in corrispondenza di un valore nullo della grandezza in ingresso.
- Errore di guadagno: è la differenza tra i punti di guadagno nominali e reali sulla caratteristica statica se si compensa l'errore di offset. Il punto di guadagno è il punto centrale dell'intervallo di misura.

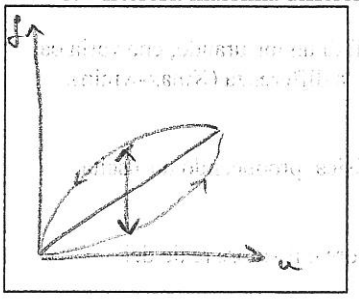


5. Sensitività: è la sensibilità, cioè il rapporto tra la variazione del segnale in uscita dal sensore e la variazione del segnale in ingresso. S(y) = Δy/Δu. Se la caratteristica statica è lineare, S è costante.

6. Risoluzione: è la minima variazione del misurando che dà un segnale di uscita rilevabile dal sensore. R = Δumin/(umax-umin).

7. Soglia di sensibilità: è la risoluzione che lo strumento presenta nell'intorno dell'estremo inferiore dell'intervallo di misura.

8. Isteresi: massima differenza tra i cammini di andata e ritorno di un ciclo di calibrazione.



9. Prontezza: descrive la velocità con cui, ad una variazione del segnale in ingresso, il segnale in uscita varia fino a raggiungere il valore di uscita. È misurata tramite il tempo di risposta.

10. Stabilità: capacità del sensore di mantenere inalterate le proprie caratteristiche di funzionamento in un certo intervallo di tempo.

11. Affidabilità: attitudine del sensore a fornire determinate prestazioni in determinate condizioni di lavoro per un certo periodo. È espressa in termini statistici tramite l'MTBF, cioè il tempo medio che procede il guasto del dispositivo.

12. Costo, dimensioni e peso.

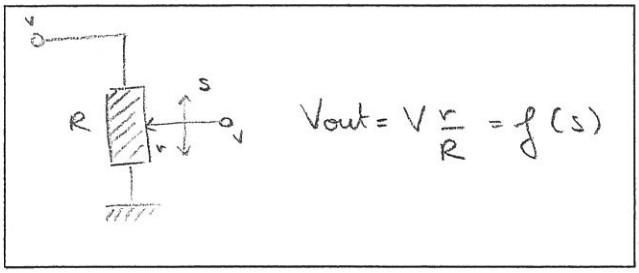
13. Fattori ambientali: per scegliere un sensore è necessario tener conto di fattori ambientali che potrebbero alterarne il funzionamento.

Trasduttore
È uno strumento che trasduce le variazioni di una grandezza fisica non elettrica in variazioni di una grandezza fisica elettrica. È necessario solo se la grandezza in uscita dal sensore è non elettrica. Questa operazione si fa perché un segnale elettrico è più facilmente filtrabile, amplificabile e linearizzabile tramite circuiti elettrici. Inoltre può facilmente essere convertito in digitale e quindi acquisito da sistemi di elaborazione dati e trasportato.
Un trasduttore può essere classificato in base a:

1. Principio fisico utilizzato
2. Segnale di uscita:
   - Analogico: è un tipo di trasduttore che ha come segnale di uscita una grandezza elettrica che varia con continuità mantenendo una corrispondenza biunivoca col valore di ingresso.
   - Digitale: è un tipo di trasduttore che produce in uscita segnali digitali che possono assumere solo due possibili livelli di tensione (identificati con 0 e 1) che corrispondono a due stati (aperto-chiuso, acceso-spento).
3. Grandezza misurata
4. Comportamento energetico:
   - Attivo: converte l'energia in ingresso in energia in uscita senza bisogno di apporti esterni (es: cella fotovoltaica).
   - Passivo: è necessaria energia dall'esterno per la conversione.

Ci sono vari tipo di trasduttori:

1. Resistivi: convertono una grandezza fisica in tensione o corrente sfruttando una variazione di resistenza. Ne esistono di più tipi:
   - Potenziometro: trasforma macrospostamenti in variazioni di resistenza. È costituito da un cilindro isolante su cui è fittamente avvolto un filo metallico con resistività opportuna; le due estremità sono connesse a due morsetti. Longitudinalmente al cilindro e da un'estremità all'altra, scorre un cursore recante un contatto strisciante sul filo, a sua volta collegato ad un morsetto. Questo permette di "prelevare" una porzione di resistenza (il circuito si chiude prima), che varia a seconda della grandezza in ingresso.
     La legge che ne determina il funzionamento è Vout = Valimentato x (r/R)
     r: resistenza prelevata dal cursore.
     R: resistenza totale



   - Estensimetro: traduce microspostamenti in variazioni di resistenza.

$R = \rho \frac{\ell}{S}$ passo $\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\ell}{\ell} - \frac{dS}{S}$; a T = cost $\frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} + 2\mu \frac{d\ell}{\ell} =$

$= (1+2\mu)\frac{d\ell}{\ell} = \kappa \frac{d\ell}{\ell}$ $\mu \rightarrow$ coefficiente di Poisson $\kappa \rightarrow$ costante di taratura



- Termoresistore: trasduce variazioni di temperatura in variazioni di resistenza.
  $R = R0 \times (1+\alpha(T-T0))$

$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$

2. Capacitivi: data la definizione di capacità V, ne esistono di vari tipi:
   - A variazione di permettività (si varia cioè ε_r).
   - A variazione di area affacciata.
   - A variazione di distanza.

$L = \mu_r \mu_0 \frac{A}{l} m^2$

3. Induttivi: data la definizione di induttanza V, ne esistono di vari tipi:
   - A variazione di permeabilità (si varia cioè μ_r).
   - A variazione di numero di spire (tramite un cursore con contatto strisciante che preleva una porzione di induttore).
   - A variazione di lunghezza.
   - A variazione di induttanza.
   - A trasformazione differenziale (usando un trasformatore).

4. Magnetici.

5. Piezoresistivi: sono fatti di materiali semiconduttori drogati e trasducono una deformazione meccanica in variazioni di resistenza.

6. Piezoelettrici: sono fatti di materiali piezoelettrici (quarzo, solfato di litio ecc) e con dipoli elettrici trasducono deformazioni meccaniche in variazioni di potenziale.

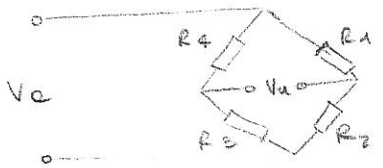
7. Piroelettrici: trasducono variazioni di T in variazioni di carica elettrica.

8. Termoelettrici: trasducono variazioni di T in forze elettromotrici.

9. Chemielettrici: trasducono grandezze chimiche in grandezze elettriche.

10. Fotoelettrici: trasducono radiazioni elettromagnetiche in segnali elettrici.

Per misurare le variazioni di R, C ed L dei primi tre tipi di trasduttori si una solitamente un **ponte di Wheatstone**. È fatto da un generatore di tensione Va che alimenta un circuito con due rami resistivi (o induttivi o capacitivi) in parallelo. Se il ponte è bilanciato (R1 x R3 = R2 x R4), Vu = 0.



$i_3 = \frac{Va}{(R_3+R_4)}$

$i_2 = \frac{Va}{(R_2+R_1)}$

$Vu = i_3 R_3 - i_2 R_2 = Va\left(\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_2}{R_1+R_2}\right)$

Se $\Delta R_1 = \Delta R_4$ o $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $Vu = 0$. Se $\Delta R_1 = \Delta R_2$ il segnale in uscita raddoppia, quindi raddoppio la sensibilità.

I ponti resistivi

① A 4 rami attivi
$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$
$Vu = Va \cdot \frac{\Delta R}{R}$

② A 2 rami attivi
$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$
$Vu = Va \cdot \frac{\Delta R}{2R}$

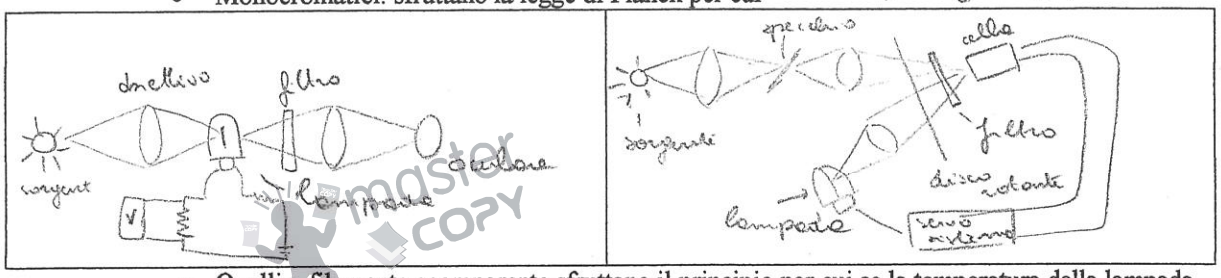
③ A 1 ramo attivo
$\Delta R_1 = \Delta R$
$Vu = Va \frac{\Delta R}{4R}$

I ponti capacitivi e 2 rami attivi
$\Delta C_1 = -\Delta C_2 = \Delta C$ $\quad Vu = Va \cdot \frac{\Delta C}{2C}$

I ponti induttivi e 2 rami attivi
$\Delta L_1 = -\Delta L_2 = \Delta L$ $\quad Vu = Va \cdot \frac{\Delta L}{2L}$

4. Pirometri ottici: sfruttano il fatto che tutti i corpi emettono radiazione elettromagnetica per il solo fatto di trovarsi a T > 0K. Soprattutto per T molto elevate, questo è un buon metodo di misura.
Esistono 3 tipi di pirometri:

- Monocromatici: sfruttano la legge di Planck per cui $L_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$ c_1 e c_2 costanti



Quelli a filamento scomparente sfruttano il principio per cui se la temperatura della lampada è superiore a quella del corpo, il filamento appare in rilievo, e viceversa. Se le due T sono uguali il filamento non si distingue dalla sorgente, quindi si regola la T del filamento finché ciò non si verifica. Per poter misurare T più basse si utilizza un filtro rosso tra lampada e oculare.

Quelli a filamento scomparente hanno lo stesso principio di funzionamento ma le radiazioni di sorgente e lampada vengono inviate alternativamente a una cella fotoelettrica tramite un disco rotante provvisto di finestre. Un servositema regola l'alimentazione della lampada finché esse non coincidono. È più accurato.

- Bicromatici: si basano sulla legge di Planck per cui il rapporto tra due potenze specifiche alla stessa T emesse a due lunghezze d'onda diverse risulta:
$$\frac{L_{\lambda 1}(T)}{L_{\lambda 2}(T)} = \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}} (\lambda_2/\lambda_1)^5 \cdot \exp\left(\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right)$$
Quindi non è necessaria la lampada di riferimento, ma basta utilizzare un disco rotante che ha due finestre con filtri di colori diversi. Di solito se ci sono impedimenti meccanici o di vapori, questi pirometri sono preferibili purché i fumi non varino la lunghezza d'onda assorbendo la luce.

- A radiazione totale: sfruttano la legge di Stefan-Boltzmann per cui $L = \sigma T^4/\pi$
Si hanno un corpo assorbitore ricoperto di nerofumo in cui è inserita la giunzione di una termocoppia, un sistema di specchi orientabili ed un cannocchiale. Regolando l'oculare, si mette a fuoco una regione del corpo in esame (sorgente) e contemporaneamente si orientano gli specchi in maniera che la radiazione proveniente dalla sorgente incida sull'assorbitore. La temperatura a cui si porta l'assorbitore (termicamente isolato dall'involucro dello strumento) è determinata dall'equilibrio tra la potenza termica da esso assorbita e proveniente dalla sorgente (WS) e dalle pareti dello strumento (We) e la potenza da esso irraggiata (Wa).
La potenza WS proveniente dalla sorgente è data da $Ws = k S_0 \sigma T_x^4 (\Delta\Omega/4\pi)$
essendo Tx la temperatura assoluta della sorgente, σ la costante di Stefan-Boltzmann, (ΔΩ/4π) la frazione di angolo solido sotto la quale la sorgente è vista dal pirometro, S0 l'area della sorgente e k un coefficiente che tiene conto della emissività della sorgente e delle eventuali perdite nel tragitto tra la sorgente e l'assorbitore.
La potenza We incidente sull'assorbitore e proveniente dalle pareti dello strumento è data da
$We = \varepsilon_1(T_1) S \sigma T_1^4$
essendo ε1(*T1*) il coefficiente d'emissività delle pareti dello strumento alla temperatura *T1* (coincidente di norma con la temperatura ambiente), *S* la superficie dell'assorbitore.
All'equilibrio l'assorbitore si trova alla temperatura T2 ed irraggia una potenza
$We = \varepsilon_2(T_2) S \sigma T_2^4$
essendo ε2(*T2*) il coefficiente di emissività della superficie dell'assorbitore.
All'equilibrio si avrà: $We = Ws + We$
da cui si ricava: $Tx = (aT_2^4 - bT_1^4)^{\frac{1}{4}}$

$a = (\varepsilon_2(T_2)/k) \cdot (S/S_0)(4\pi/\Delta\Omega)$
$b = (\varepsilon_1(T_1)/k) \cdot (S/S_0)(4\pi/\Delta\Omega)$

Quindi dopo una taratura si può risalire a Tx sapendo T1 e T2