

## I sensori e i trasduttori

Sensore e trasduttore sono due termini concettualmente diversi: il primo identifica un dispositivo che converte una determinata grandezza in ingresso in grandezza elettrica; il secondo trasforma una forma di energia in un'altra. Purtroppo nell'accezione comune non viene fatta una netta distinzione tra i due dispositivi e spesso i termini vengono usati come sinonimi. Il trasduttore, generalmente costituito da uno o più sensori e da due blocchi di interfacciamento, è il primo elemento che compone il sistema di acquisizione dati e provvede alla conversione di un tipo di energia in ingresso in un altro tipo di energia in uscita. L'interfaccia ingresso-sensore realizza una prima conversione del misurando in grandezza adatta al sensore, il quale rilevando le variazioni della grandezza al suo ingresso produce una variazione del segnale elettrico in uscita. L'interfaccia sensore-uscita realizza una connessione fisica tra il sensore e l'apparecchio successivo del sistema DAQ.

Un elenco dei più comuni trasduttori è riportato nella seguente tabella:

Fenomeno da misurare	Trasduttori impiegati
Temperatura	Termocoppie Termistori (PTC, NTC) Rivelatori resistivi di temperatura Trasduttori basati su circuiti integrati
Luce	Fotocellule, fotodiodi e fototransistori CCD
Suono	Microfoni
Forza e pressione	Estensimetri Trasduttori piezoelettrici Trasduttori piezoresistivi
Posizione, spostamento e rotazione	Potenziometri Trasduttori induttivi di spostamento Encoder ottici Giroscopi ottici
Presenza o prossimità di un oggetto	Trasduttori induttivi e capacitivi Trasduttori magnetici Trasduttori ad ultrasuoni (Sonar)
Flusso di fluidi	Misuratori diretti di portata Misuratori di velocità di un fluido
Livello pH	Sonde pH

Trasduttori usati per misurare varie categorie di fenomeni fisici.

E' possibile classificare i sensori sulla base della tecnologia e del principio fisico utilizzato (ottico, piezoresistivo, piezoelettrico e altri), della funzione svolta e della grandezza da misurare oppure in base al particolare settore cui sono destinati. La classificazione più comune che si fa di tali dispositivi è in base al loro comportamento energetico: avremo trasduttori attivi se essi convertono direttamente l'energia di ingresso in energia in uscita, senza l'ausilio di sorgenti esterne e trasduttori passivi in caso contrario.

Come ogni dispositivo, anche i trasduttori vengono caratterizzati da un insieme di parametri che ne specificano in modo quantitativo e qualitativo le caratteristiche. A causa della diversa natura della grandezza fisica trasdotta, i vari tipi di trasduttori risultano contraddistinti, nel loro funzionamento e nelle loro prestazioni, da insiemi di diversi parametri. Tali specifiche sono elencate nei relativi fogli tecnici. Esaminiamo le principali **caratteristiche metrologiche** che

caratterizzano non solo tutti i trasduttori ma anche tutti gli strumenti di misura e più in generale qualsiasi sistema di acquisizione:

1. Campo di misura e di normale funzionamento
2. Caratteristica di trasferimento o modello
3. Linearità
4. Risoluzione
5. Sensibilità
6. Accuratezza
7. Offset di uscita
8. Taratura (ciclo di calibrazione)
9. Isteresi
10. Ripetibilità e Riproducibilità
11. Stabilità
12. *Risposta al gradino*
13. *Risposta in frequenza*

Le prime undici si riferiscono ai sensori che operano in **regime stazionario**, cioè quando le variazioni nel tempo del segnale di ingresso sono tali che la funzione di conversione non risulta alterata in modo significativo rispetto a quella che si ha con misurando costante nel tempo; quando ciò non avviene ci riferiamo alle ultime due caratteristiche, scritte in corsivo, con sensori che operano in **regime dinamico**.

1. Il **campo di misura** (*operating range*) è l'intervallo di valori che può assumere la grandezza che deve essere trasdotta, esso specifica entro quale gamma di valori il costruttore garantisce il corretto funzionamento del trasduttore. Facendo funzionare il trasduttore fuori specifica oltre a perdere la sicurezza del corretto funzionamento si rischia di danneggiare il componente. Il suo limite superiore è  $I_{fs}$ . Il **campo di normale funzionamento** si riferisce ai valori assunti dall'uscita corrispondentemente al campo di misura del misurando. Il suo limite superiore è  $U_{fs}$ , detta anche portata.

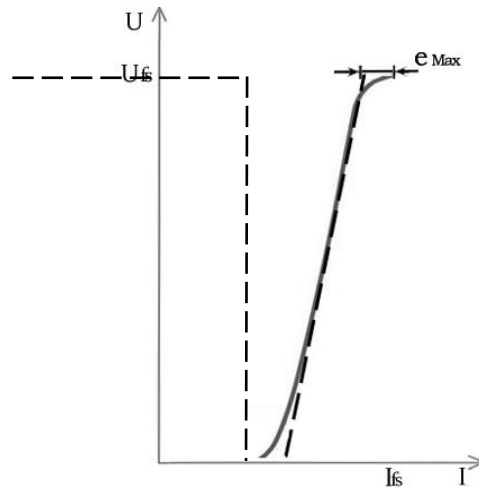
2. La **caratteristica di trasferimento** o modello definisce la relazione che intercorre tra il segnale di uscita  $U$  e la grandezza di ingresso  $I$ . Spesso non si trovano i grafici che rappresentano tale caratteristica, ma il costruttore indica soltanto il campo dei possibili valori in ingresso al trasduttore ed il campo dei valori di uscita, senza dare indicazioni esatte sulla legge che lega tali valori. Nel caso in cui tale parametro sia riportato in forma grafica, esso definisce in modo univoco il comportamento del trasduttore, permettendo di risalire al valore numerico dell'uscita corrispondente a un dato valore assunto dalla grandezza in ingresso<sup>1</sup>.

3. La **linearità**, o meglio la non linearità, espressa solitamente in errore percentuale sul fondo scala, indica di quanto la curva rappresentante il modello del sensore, cioè il legame tra ingresso ed uscita, si discosta dalla retta ideale:

$$\text{Non linearità \%} = \frac{e_{Max}}{I_{fs}}$$

---

<sup>1</sup> Alcuni costruttori forniscono la "costante strumentale" o guadagno, ovvero il coefficiente angolare della retta ideale che caratterizza il loro dispositivo.



Rappresentazione grafica della non linearità: la linea continua rappresenta la caratteristica reale del dispositivo; la linea tratteggiata è la retta ideale.

dove  $e_{Max}$  è la massima escursione tra ascissa della retta ideale e quella della caratteristica del trasduttore e  $I_{fs}$  il valore di fondo scala della grandezza all'ingresso.

4. Si intende generalmente il più piccolo cambiamento in valore apprezzabile dallo strumento. Considerando la più piccola variazione del misurando che provoca una variazione della grandezza di uscita del trasduttore, la **risoluzione adimensionale** è espressa come la minima variazione della grandezza in uscita  $\Delta U_{min}$  rispetto al fondo scala della grandezza di uscita  $U_{fs}$ :

$$R \% = \frac{\Delta U_{min}}{U_{fs}} \%$$

Mentre la **risoluzione dimensionale**, (vedi nota 3 par. 1.7) dichiarata più frequentemente nei fogli tecnici, indica il più piccolo valore della grandezza di ingresso che il trasduttore riesce a discriminare, pertanto ha la stessa dimensione del fenomeno fisico analizzato. A tal proposito si veda l'equazione (3.14.1) dove viene definita come *count* per gli strumenti numerici.

5. La **sensibilità** è la minima grandezza fisica in ingresso in grado di produrre un effetto, analiticamente è definita come la derivata dell'uscita  $U$  rispetto all'ingresso  $I$ , cioè la tangente alla caratteristica di trasferimento. Ovviamente le sue dimensioni corrispondono al rapporto tra la dimensione della grandezza di uscita e quella della grandezza di ingresso:

$$S = \frac{dU}{dI}$$

6. Con l'**accuratezza** (vedi ancora nota 3 par. 1.7) il costruttore indica il massimo scostamento fra l'uscita del trasduttore e il valore della misura ideale<sup>2</sup>. Tale parametro fornisce un indice di quanto il dispositivo dia un'indicazione fedele al valore reale della variabile che si vuole misurare, denota quindi l'abilità dello strumento a misurare un valore ideale, solitamente viene indicata come percentuale del fondo scala:

<sup>2</sup> Il valore ideale  $U_{ideale}$  è il valore dell'uscita del trasduttore che si avrebbe in condizioni ideali e in assenza di quelli che in passato erano chiamati errori sistematici, che come abbiamo visto sono adesso classificate come incertezze di categoria "B".

$$\text{Accuratezza } \% = \frac{|U_{\text{misurato}} - U_{\text{ideale}}|_{\text{Max}}}{U_{\text{ideale}}} \%$$

Supponiamo, per fare un esempio, che uno strumento presenti un'accuratezza dell'1% sulla tensione misurata e una risoluzione adimensionale di 3 cifre decimali. Se la tensione misurata era di 10 V, lo strumento può mostrare un qualsiasi valore tra 9.99 V e 10.01 V (risoluzione dimensionale di 1 *count* = 10 mV). Se lo strumento avesse avuto una risoluzione di quattro cifre decimali, con la stessa accuratezza la lettura poteva essere compresa tra 9.990 V e 10.010 V (risoluzione dimensionale di 1 *count* = 1 mV). Se assumiamo adesso che entrambi gli strumenti leggano esattamente 10 V, un cambiamento in 10.001 V sarà registrato solo dallo strumento con quattro cifre decimali che non ha migliore accuratezza ma solo migliore risoluzione. Eppure nessuno dei due strumenti può garantire che 10.001 V sia misurato con accuratezza inferiore all'1%, generando un assurdo. Ed è per questo motivo che di solito uno strumento è realizzato in modo che la risoluzione sia sempre peggiore (maggiore) dell'accuratezza, per garantire il fatto che non ci siano limiti di visualizzazione nell'accuratezza ottenibile, come nell'esempio proposto. Quanto sostenuto non vale solo per gli strumenti numerici e lo stesso concetto può essere applicato a quelli ad indicazione analogica, dove però la risoluzione adimensionale non sarà legata al numero di cifre decimali ma fisicamente associata alle variazioni di un indice materiale su di una scala graduata.

7. Viene denominato **offset di uscita** il valore della grandezza in uscita al trasduttore in corrispondenza del valore nullo della grandezza in ingresso, graficamente rappresenta lo scostamento dall'asse delle ordinate della caratteristica del trasduttore.

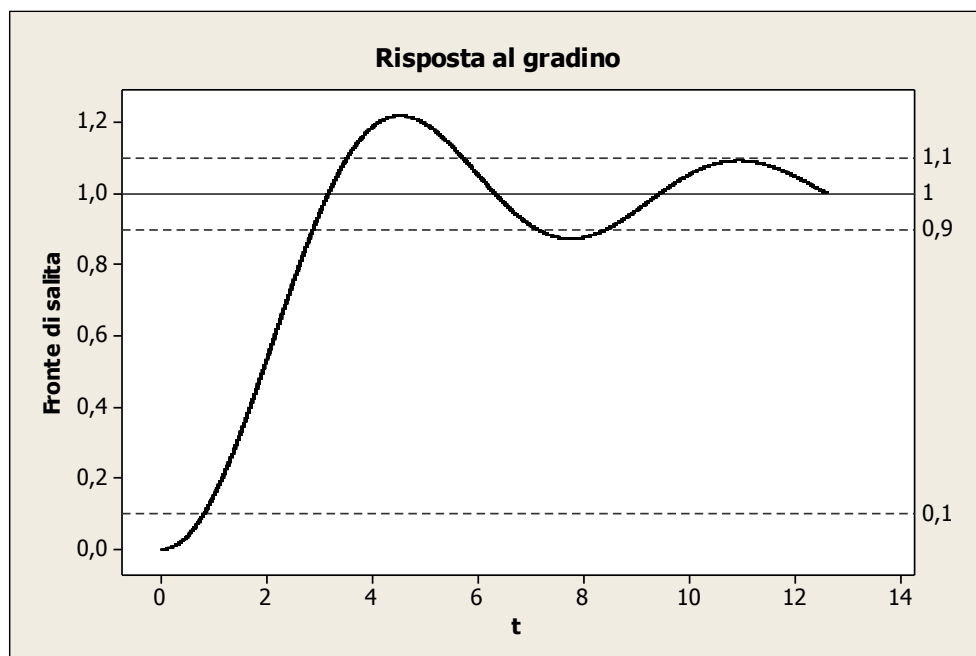
8. L'operazione di **taratura** di un trasduttore corrisponde con la misurazione della grandezza di uscita per valori noti della grandezza di ingresso. Per **ciclo di taratura** o di **calibrazione** si intende una prova che copra tutto il campo di misura del trasduttore; la prova viene suddivisa in due parti, una per valori crescenti della grandezza di ingresso e l'altra per valori decrescenti. Per ciclo di taratura di uno strumento si intende dunque la serie di confronti con uno strumento di riferimento o con una serie di campioni di misura.

9. L'**isteresi** corrisponde con la massima differenza tra i due cammini di andata e ritorno dell'uscita di un trasduttore durante il ciclo di calibrazione. Di solito si esprime in percentuale del fondo scala (% f.s.).

10. La **ripetibilità** è l'attitudine del trasduttore o dello strumento o del sistema di acquisizione a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti tra loro, a parità del segnale di ingresso, nelle stesse condizioni di lavoro, quali ad esempio il metodo o l'operatore di misura, lo strumento, il luogo e la condizione di utilizzo, sempre nel breve periodo. Una piccola deviazione standard di una serie di misure è un buon indicatore di ripetibilità. La **riproducibilità** si definisce invece come l'attitudine del trasduttore o dello strumento o del sistema di acquisizione a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti tra loro, a parità del segnale di ingresso, cambiando invece le condizioni di lavoro viste precedentemente, in periodi che possono essere anche considerevolmente lunghi. Questa caratteristica metrologica è molto legata alla caratteristica che vedremo al punto successivo, la stabilità. Il concetto di riproducibilità risulta chiaro nella valutazione di una **condizione al contorno** che supponiamo abbia influenza su di un trasduttore o su di un processo di misura. Variando tale condizione in modo controllato è possibile, valutando proprio ripetibilità e riproducibilità di una serie di misure ottenute, stimare l'influenza di tale condizione. Tecniche di **Gage R&R (Repeatability and Reproducibility)** e di **Analisi della varianza (ANOVA Analysis Of Variance)** possono essere oltremodo potenti in valutazioni di questo tipo. MINITAB offre importanti soluzioni in questo senso.

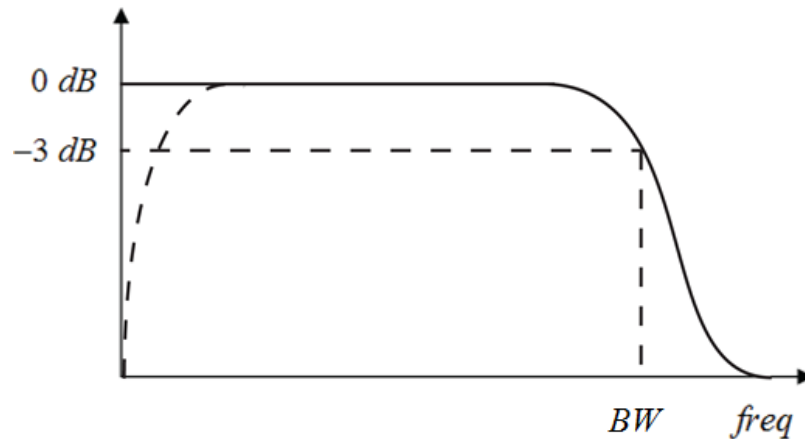
11. Per **stabilità** si intende la capacità che il trasduttore ha nel conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un certo intervallo di tempo. Si parla di stabilità a **breve** (minuti, secondi), **medio** (ore, giorni) e **lungo termine** (mesi, anni). Per un trasduttore, vedi ad esempio il paragrafo che riguarda quelli di tipo piezoelettrico, si può anche parlare di stabilità relativa ad altre grandezze come la **temperatura** o la **frequenza**.

12. Altro parametro interessante è la **risposta al gradino**, intesa come il tempo che il trasduttore, lo strumento o il sistema di acquisizione impiegano per raggiungere il valore di regime in uscita, corrispondente al valore d'ingresso. Trasduttori che presentano "piccoli" tempi di risposta sono particolarmente adatti a misurare fenomeni che variano velocemente, al contrario trasduttori con tempi di risposta elevati sono da impiegarsi nella misura di fenomeni che variano lentamente nel tempo. Nella figura sottostante la risposta al gradino, troncata per comodità, ottenuta ancora molto facilmente con MINITAB, dove è possibile misurare il tempo di salita  $t_s$  (*rise time*), e cioè quello impiegato per passare, ad esempio, dal 10% al 90% del valore di regime e quello di assestamento  $t_a$  (*settle time*), e cioè quello impiegato dal transitorio per rientrare in una fascia di, ad esempio,  $\pm 10\%$  del valore di regime:



13. La **risposta in frequenza** caratterizza il comportamento del sensore, dello strumento o del nostro sistema di acquisizione, quando la grandezza di ingresso è sottoposta a sollecitazioni variabili nel tempo. Il concetto di base è sostanzialmente quello che abbiamo esposto alla fine del paragrafo 4.2 a proposito delle forme d'onda non sinusoidali. Va infatti notato che nella visualizzazione di qualsiasi segnale periodico subentra sempre un'alterazione introdotta dallo strumento: per tale motivo il costruttore dichiara la banda di frequenza a -3 decibel (-3 dB) del proprio dispositivo, oppure riporta direttamente il grafico della risposta in frequenza. Con tali informazioni si può valutare quali contributi frequenziali saranno rivelati correttamente e quali verranno attenuati. Il grafico sottostante rappresenta la risposta in frequenza per un generico sensore, strumento di misura o sistema di acquisizione dove sulle ordinate è rappresentato il rapporto tra segnale di ingresso allo strumento e quello trasmesso, visualizzato o acquisito, in dB.

Con  $BW$  è indicata invece l'ampiezza di banda a -3 dB, in Hz.; la curva tratteggiata indica invece la risposta in frequenza di dispositivi solo AC (che cioè non visualizzano cioè componenti continue).



In generale dunque per avere misure accurate il sensore, lo strumento di misura o il sistema di acquisizione devono avere un'ampiezza di banda superiore al contenuto spettrale della forma d'onda in ingresso. Ad esempio per un'onda sinusoidale l'ampiezza di banda deve coprire almeno la frequenza della sinusoide in esame. Per forme d'onda non sinusoidali andrà invece considerato, come abbiamo visto al paragrafo 4.2, un contenuto armonico maggiore. Se questo eccede la banda passante dello strumento, il loro effetto sulla forma d'onda non verrà acquisito anche se a volte questo fatto può tornare quando si presentano armoniche oltre una certa frequenza che devono volutamente essere ignorate. Forme d'onda con un contenuto armonico infinito, quali ad esempio treni di impulsi con *duty cycle* ridotto al minimo, devono idealmente essere acquisite con sistemi di acquisizione a banda passante infinita anche se, in molti casi pratici, le armoniche di ordine più elevato hanno un contenuto energetico così povero da poter essere ignorate.

Idealmente, sempre in riferimento al paragrafo 4.2, forme d'onda quali un'onda quadra o un treno di impulsi cambiano il livello di tensione istantaneamente. In realtà per fare questo occorre un certo lasso di tempo che dipende dalla ampiezza di banda del sistema e da altri parametri. Il tempo necessario perché queste forme d'onda passino da un livello di tensione all'altro è caratterizzato come abbiamo appena visto dal tempo di salita. L'ampiezza di banda di uno strumento di misura o di un sistema di acquisizione limita la misura del tempo di salita di un impulso o di un'onda quadra. Per un generico strumento la relazione tra tempo di salita e ampiezza di banda, può essere espresso come:

$$t_s = \frac{0,35}{BW}$$

La validità di questa relazione dipende dalla risposta in frequenza del sistema di misura ma resta comunque una buona approssimazione. Il punto cruciale è che l'ampiezza di banda, concetto appartenente al dominio della frequenza, limiterà la misura del tempo di salita, concetto appartenente evidentemente al dominio del tempo e queste due caratteristiche possono essere empiricamente legate dalla formula scritta sopra. Per concludere questo tema potremo dire che ogni sistema di misura si comporta in definitiva come un filtro passa basso: se l'ampiezza di banda di questo filtro è sufficientemente ampia la forma d'onda non verrà distorta nell'acquisizione e nella sua eventuale rappresentazione; se invece questo non accade alcune armoniche spariranno e nella sua rappresentazione saranno presenti distorsioni, o addirittura importanti deformazioni, che porteranno ad un aumento considerevole e spesso intollerabile dell'incertezza di misura.

Nel seguito analizzeremo alcuni tipi di trasduttori tra quelli maggiormente utilizzati per la misura delle grandezze più comuni.