

CAPITOLO I

ARCHITETTURE DI SISTEMI DI MISURA

1. INTRODUZIONE

L'evoluzione dell'elettronica, sia analogica sia numerica, ha reso disponibile sul mercato un numero sempre maggiore di dispositivi elettronici di misura a basso costo e di notevoli prestazioni. Tali strumenti trovano il loro impiego nelle più svariate applicazioni, contribuendo in maniera notevole sia alla semplificazione dei processi di misura sia all'incremento dell'affidabilità e della precisione del risultato di misura. In ambiente industriale, tale strumentazione trova larghissimo impiego nel controllo dei processi produttivi e nella certificazione della qualità del prodotto, semplificando notevolmente il lavoro dell'operatore umano.

2. ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN SISTEMA DI MISURA

Un sistema di misura è generalmente formato da una catena di elementi che ne caratterizzano sia la qualità sia il campo di impiego. Con riferimento alla Fig. 1, è possibile individuare i seguenti elementi:

- un **sensore**, che provvede a estrarre l'informazione d'interesse dalla grandezza



Fig. 1

fisica a cui è collegato ed a trasferirla, sotto forma di **segnale** (di definite caratteristiche), al sistema successivo;

- un **sistema di condizionamento**, che provvede a modificare ed ottimizzare le caratteristiche del segnale proveniente dal sensore nei confronti del sistema successivo;

- un **sistema di conversione**, che provvede a trasformare la natura dell'informazione da **analogica** a **numerica**, in modo che, sotto quest'ultima forma, venga trasferita al sistema successivo;
- un **sistema di controllo**, che provvede a memorizzare od elaborare l'informazione numerica ottenuta dal sistema precedente secondo una prefissata sequenza di operazioni registrata in un opportuno **programma**; tale sistema di controllo può essere, inoltre, a sua volta collegato con un **sistema di attuatori** (non riportato in figura) per eseguire eventuali operazioni funzionalmente connesse con il risultato della misura.

Il collegamento fra la grandezza fisica ed il sensore (collegamento A) è di tipo generalmente connesso alla **natura** della grandezza fisica d'interesse e di lunghezza praticamente nulla: la grandezza fisica agisce direttamente sul sensore.

I collegamenti B e C, invece, sono generalmente di natura **analogica**, ovvero l'informazione d'interesse è legata direttamente alle caratteristiche (ampiezza, frequenza, ecc.) del segnale che la trasporta. La lunghezza di tali collegamenti può variare in funzione delle soluzioni architettoniche adottate: generalmente si preferisce, a parità di altre condizioni, realizzare il collegamento B con lunghezza quanto più piccola possibile, in modo da minimizzare il pericolo di interferenze che possono alterare il contenuto informativo del segnale non ancora trattato dal sistema di condizionamento. La lunghezza del collegamento C, invece, generalmente non comporta problemi, in quanto è sempre possibile sviluppare una tecnica di trasmissione che minimizzi l'influenza delle interferenze in relazione al supporto fisico attraverso cui avviene il collegamento (**canale di trasmissione**).

Per il collegamento B, il canale di trasmissione è generalmente di natura elettrica e consiste, materialmente, in conduttori stesi fra il sensore ed il sistema di condizionamento. In casi particolari, quali sistemi di misura impiegati in ambienti con particolari requisiti di sicurezza o in ambienti con stringenti requisiti di immunità ai disturbi di natura elettromagnetica (EMC), il collegamento B può essere realizzato con canali di trasmissione di natura ottica (fibre ottiche) o pneumatica, con l'interposizione di opportuni dispositivi (**interfacce**) atti a trasformare il segnale proveniente dal sensore rispettivamente in un fascio di luce modulata o in una variazione di pressione di un gas, e viceversa.

Il collegamento C, invece, è generalmente di natura elettrica (cavi direttamente collegati fra il sistema di condizionamento ed il sistema di conversione) o di natura elettromagnetica (onde convogliate che sfruttano il supporto della rete di alimentazione elettrica, sistemi di trasmissione basati su linee telefoniche,

collegamenti realizzati mediante trasmissione di segnali radio). Nel secondo caso, ovviamente, è necessario interporre le necessarie interfacce per la trasformazione e la ritrasformazione del segnale di misura.

Il collegamento D, infine, è di tipo **numerico** o **digitale**, ovvero l'informazione è portata da una combinazione di codici associati generalmente a due livelli di tensione (**codice binario** con il simbolo 1 associato ad una tensione di 0V ed il simbolo 0 associato ad una tensione di 5V). In tal caso, il canale di trasmissione è sempre di natura elettrica e può essere di tipo **parallelo** o **seriale** a seconda del modo utilizzato per la trasmissione dei codici (sempre tramite opportune interfacce). La lunghezza di tale collegamento è variabile a seconda delle soluzioni architetture adottate (collegamento punto-punto, a bus, ecc.). Generalmente tale collegamento non crea problemi riguardo le interferenze, mentre possono nascere problemi riguardanti l'attenuazione dei segnali.

CAPITOLO II

CARATTERIZZAZIONE DEI SENSORI

1. DEFINIZIONI

Il sensore costituisce il primo elemento di una catena di misura rivolta alla definizione del valore di grandezze fisiche che evolvono in un determinato processo. In tale catena, il sensore svolge il compito di trasformare la grandezza fisica d'interesse (il **misurando**) in un'altra grandezza fisica, della stessa specie o di specie diversa, più adatta all'elaborazione che deve essere effettuata dagli elementi successivi della catena di misura.



Fig. 1

L'informazione connessa con la grandezza fisica d'interesse evolve attraverso il sensore sotto forma di **segnale**: alle variazioni di quest'ultimo è associata l'informazione d'interesse secondo una convenzione nota.

Con riferimento alla Fig. 1, si definisce **segnale d'ingresso** $x(t)$ al sensore il segnale che porta l'informazione connessa alla grandezza fisica d'interesse, generalmente nella forma originaria; si definisce **segnale d'uscita** $y(t)$ dal sensore il segnale, generalmente di natura diversa dalla grandezza fisica d'interesse, che il sensore fornisce ai successivi elementi della

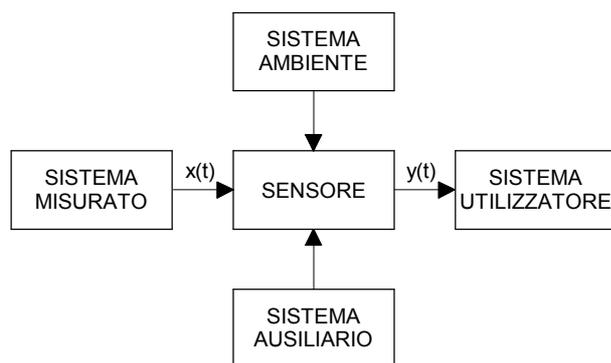


Fig. 2

catena di misura. Caratteristica fondamentale del sensore è quella di trasferire l'informazione d'interesse dal segnale d'ingresso al segnale d'uscita senza alcuna alterazione (nei limiti delle incertezze connesse alla bontà del sensore).

2. IL SENSORE NELLA CATENA DI MISURA

Nel suo funzionamento, il sensore interagisce con più sistemi fisici ad esso esterni. Con riferimento alla fig. 2, è possibile individuare:

- il **sistema misurato**, ovvero il sistema fisico dal quale proviene l'informazione d'interesse attraverso il segnale d'ingresso;
- il **sistema utilizzatore**, cioè il sistema al quale il sensore fornisce l'informazione attraverso il suo segnale d'uscita;
- il **sistema ausiliario**, ovvero il sistema che può essere utilizzato dal sensore per il suo funzionamento (ad esempio, il sistema d'alimentazione del sensore);
- il **sistema ambiente**, ovvero tutto ciò che, esterno alla catena di misura ed alla grandezza fisica d'interesse, può interagire con il sensore (ad esempio, sorgenti di interferenze non riconducibili ai sistemi precedentemente esaminati).

L'interconnessione del sensore con i sistemi che lo circondano comporta anche uno scambio di energia fra di essi. Escludendo le interazioni fra sensore e sistema ambiente (in quanto si tende a minimizzare lo scambio d'energia fra di essi in modo da limitare le interferenze) è possibile individuare le seguenti interazioni:

- **interazione sensore-sistema misurato**: per tale interazione, si parla di **consumo** del sensore se il flusso di energia è dal sistema misurato al sensore, mentre si parla di **stimolo** o **eccitazione** del sistema misurato se il flusso d'energia è dal sensore al sistema misurato; entrambi i tipi di interazioni possono provocare grossolani errori di misura nel caso che l'energia ad essi connessa non sia trascurabile rispetto all'energia globale del sistema misurato (**modificazione del misurando**);
- **interazione sensore-sistema utilizzatore**: tale interazione, di tipo biunivoco, può essere vista dal lato del sensore e da quello del sistema utilizzatore; dal punto di

vista del sensore, il sistema utilizzatore costituisce un **carico** e, in quanto tale, non deve alterare in modo inaccettabile il funzionamento del sensore stesso; dal punto di vista del sistema utilizzatore, il sensore costituisce la **sorgente di eccitazione** e, in quanto tale, non deve indurre perturbazioni al di fuori dei limiti entro i quali è garantito il normale funzionamento del sistema stesso.

- **interazione sistema ausiliario-sensore-sistema misurato**: tale interazione, in effetti, può avvenire alternativamente fra sistema ausiliario e sensore o fra sistema misurato e sensore e riguarda essenzialmente l'energia di cui il sensore ha bisogno per il suo funzionamento; nel caso di interazione sistema ausiliario-sensore, il sensore riceve tale energia dal sistema ausiliario, mentre il sistema misurato fornisce solo il segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, il sensore è detto **passivo**; nel caso di interazione sistema misurato-sensore, l'energia per il funzionamento del sensore è trasferita dal sistema misurato insieme al segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, si ricade nel caso relativo al consumo del sensore e lo stesso è detto **attivo**.

3. ELEMENTI DI CARATTERIZZAZIONE DEL SENSORE

3.1. La funzione di trasferimento

Nel funzionamento, il sensore è caratterizzato dalla sua **funzione di trasferimento**, ovvero dal legame che unisce il segnale d'ingresso $x(t)$ con il segnale d'uscita $y(t)$:

$$y(t) = f (x(t)) \quad (1)$$

3.2. Le grandezze d'influenza

Come visto in precedenza, il sensore è connesso, oltre che al sistema misurato ed al sistema utilizzatore, anche ad altri sistemi che possono interagire con esso. Inoltre, altre grandezze fisiche non d'interesse appartenenti sia al sistema misurato sia al sistema utilizzatore possono influenzare il funzionamento del sensore. Tali interazioni possono essere riassunte introducendo le cosiddette **grandezze d'influenza**, ovvero tutte le grandezze fisiche attinenti al sistema misurato (ad esclusione del misurando) ed agli altri sistemi interconnessi con il sensore che ne

influenzano significativamente il funzionamento. Di conseguenza, la funzione di trasferimento del sensore (1), dal punto di vista più generale, va scritta come segue:

$$y(t) = f (x(t) + g_1(t) + g_2(t) + \dots + g_n(t)) \quad (2)$$

dove le funzioni $g_i(t)$ rappresentano i segnali corrispondenti alle i grandezze d'influenza.

Tale relazione, in generale, è di difficile definizione, data la variabilità e l'aleatorietà delle grandezze d'influenza. Si operano quindi le seguenti semplificazioni:

- viene trascurata la dipendenza dal tempo delle grandezze d'influenza, ovvero si suppongono costanti durante il tempo in cui il sensore opera la trasformazione del segnale d'ingresso nel segnale d'uscita;
- si separa la dipendenza funzionale del segnale d'uscita dal segnale d'ingresso e dall'insieme delle grandezze d'influenza;
- si suppone trascurabile la dipendenza delle grandezze d'influenza dal misurando (in modo da non includere, fra le grandezze d'influenza, il misurando stesso);
- si suppone che le grandezze d'influenza siano tra loro indipendenti nei confronti del funzionamento del sensore.

In tal modo, la relazione (2) diviene:

$$y(t) = f (x(t)) + h_1 (g_1) + h_2 (g_2) + \dots + h_n (g_n) \quad (3)$$

essendo h_j la funzione che lega l'uscita del sensore alla singola grandezza d'influenza g_j ritenuta costante ed indipendente dalle altre. Tali funzioni h_j vengono dette **funzioni d'influenza**.

Una grandezza d'influenza particolare è il tempo di funzionamento, inteso come invecchiamento o alterazione dei componenti che costituiscono il sensore. Tale grandezza di influenza solitamente viene trattata separatamente dalle altre, in quanto relativa a fenomeni con dinamica enormemente più lenta rispetto a quella delle altre grandezze d'influenza (temperatura, vibrazioni, campi elettromagnetici, ecc.).

3.3. Le tipologie dei segnali

In generale, il segnale d'ingresso al sensore coincide con il misurando e l'informazione d'interesse è il valore che quest'ultimo assume, in una certa unità di

misura. Il segnale d'uscita, invece, è generalmente di natura diversa e trasferisce l'informazione d'interesse in funzione della sua tipologia. In generale, si parla di:

- **segnali analogici** quando l'informazione d'interesse è associata direttamente ai valori assunti dalla grandezza che costituisce il segnale; in tal caso, l'informazione può coincidere con il valore stesso della grandezza (valore istantaneo) o essere associato ad una particolare funzione definita in un certo intervallo di tempo (ad esempio, valore medio, valore efficace, frequenza, ecc.);
- **segnali digitali** quando l'informazione è associata ad un insieme (**parola**) costituito da una combinazione (**codice**) di grandezze elementari (**simboli**); in tal caso, la parola digitale è di tipo parallelo se, nella trasmissione dell'informazione, ad ogni simbolo è associato un canale di trasmissione, mentre è di tipo seriale se tutti i simboli costituenti la parola sono trasmessi mediante un unico canale.

3.4. I campi di variabilità dei segnali

Il funzionamento di un sensore dipende innanzi tutto dai valori assunti dal segnale d'ingresso, in termini sia quantitativi sia qualitativi. Dal punto di vista quantitativo, la relazione (1) che fissa la funzione di trasferimento del sensore, è sufficiente a caratterizzarne il funzionamento. Tuttavia, dal punto di vista qualitativo, il funzionale f che determina la funzione di trasferimento del sensore può dipendere dalla dinamica del segnale d'ingresso, per cui la funzione di trasferimento può essere formulata in maniera differente a seconda dell'ampiezza del segnale d'ingresso (ad esempio, nel caso delle termoresistenze, per piccole variazioni di temperatura può essere sufficiente una funzione di trasferimento di tipo lineare, mentre per variazioni più ampie è necessario adoperare funzioni di trasferimento di tipo quadratico o di ordine maggiore). Viene quindi introdotto il **campo di misura**, che definisce i limiti entro i quali può variare la grandezza d'ingresso affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fissate; viene, inoltre, definito il **campo di sicurezza**, solitamente più ampio del campo di misura, che definisce i limiti di variazione del segnale d'ingresso entro i quali il sensore non viene danneggiato.

Riguardo al segnale d'uscita, è possibile definire il **campo di normale funzionamento** del sensore come il campo dei valori del segnale d'uscita in corrispondenza dei valori del segnale d'ingresso all'interno del campo di misura; inoltre, si individuano i **valori estremi** del segnale d'uscita come i valori più elevati assunti da quest'ultimo quando il segnale d'ingresso varia all'interno del campo di sicurezza.

Ovviamente, il funzionamento del sensore secondo la funzione di trasferimento è garantito solo all'interno del campo di misura per il segnale d'ingresso e, corrispondentemente, all'interno del campo di normale funzionamento per il segnale d'uscita. Al di fuori di tali limiti, ma all'interno del campo di sicurezza, la funzione di trasferimento può risultare alterata, mentre al di fuori del campo di sicurezza si produce la rottura del sensore.

3.5. Le incertezze nel funzionamento del sensore

Il funzionamento del sensore in una catena di misura va ovviamente caratterizzato anche nei confronti delle incertezze conseguenti al suo impiego. Infatti, il sensore trasferisce un'informazione relativa ad una grandezza fisica che, nella maggior parte dei casi, è costituita dalla misura stessa della grandezza in esame.

In tal caso, va senz'altro tenuta presente l'**incertezza intrinseca del segnale d'ingresso**, che dipende sia dalla **definizione del misurando** sia dallo **stato del sistema misurato**. Vanno inoltre portate in conto le **grandezze d'influenza** che agiscono sul sensore e che possono indurre incertezze sulla misura della grandezza fisica d'interesse. Ancora, vanno tenute presenti le incertezze legate alla definizione del **modello** del sensore e dei sistemi che interagiscono con esso, ovvero alla definizione della funzione di trasferimento del sensore che, come visto in precedenza, è fatta assumendo alcune semplificazioni riguardo le grandezze d'influenza. Infine, va tenuta presente l'**incertezza intrinseca del segnale d'uscita**.

4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL SENSORE

Sono riportate nel seguito l'insieme dei termini, con le rispettive definizioni, che vengono usualmente impiegati per specificare le principali caratteristiche di un sensore dal punto di vista dell'utente. Il numero di definizioni correntemente impiegato è, al momento, abbastanza ampio; è evidente che un determinato sensore avrà in generale bisogno di un numero di indicazioni notevolmente più limitato, in funzione della sua natura e del suo prevalente campo di applicazione.

Generalmente, il funzionamento del sensore può essere riferito a due modalità differenti, legate all'influenza della dinamica del segnale d'ingresso sulla funzione di trasferimento del sensore. Si parla, infatti, di:

- funzionamento in **regime stazionario**, se la funzione di trasferimento del sensore non risulta modificata dalle variazioni del segnale d'ingresso nel tempo (dinamica), ovvero se rimane identica a quella ottenuta con segnale d'ingresso costante nel tempo;
- funzionamento in **regime dinamico**, se la funzione di trasferimento del sensore viene modificata dalla dinamica del segnale d'ingresso.

In base a ciò, è possibile tentare una classificazione delle grandezze caratteristiche del sensore raggruppandole in:

- caratteristiche di tipo generale;
- caratteristiche riferite al funzionamento in regime stazionario;
- caratteristiche riferite al funzionamento in regime dinamico.

Poiche' la terminologia non è normalizzata, ne' in campo italiano né in campo internazionale, nel seguito vengono riportati anche i termini alternativi, con eventuali precisazioni, specialmente quando esistono ambiguità di significato. Infine, tenendo conto della grande diffusione dei sensori con caratteristiche fornite in lingua inglese, per ciascuno dei termini più importanti è stato riportato in parentesi, quando possibile, il corrispondente termine inglese.

4.1. Caratteristiche generali

Principio di funzionamento: è il principio fisico mediante la quale il sensore trasforma il segnale d'ingresso nel corrispondente segnale d'uscita; è opportuno che tale principio di funzionamento sia noto, in modo da utilizzare correttamente il sensore.

Misurando (measurand): è, come detto, la grandezza d'interesse; oltre alle grandezze già introdotte in precedenza (campo di misura, campo di sicurezza), è possibile definirne la **specie**, ovvero la natura della grandezza fisica d'interesse;

Uscita (output): anche in questo caso, oltre alle grandezze già introdotte in precedenza (campo di normale funzionamento, valori estremi), è possibile definire la **specie**, ovvero la natura della grandezza che costituisce il segnale d'uscita, la **potenza erogabile (output power)**, ovvero il valore limite della potenza che il sensore può fornire al sistema utilizzatore entro il quale il sensore può funzionare secondo le specifiche fornite (a volte, in modo equivalente, si parla di corrente

massima erogabile, se il segnale di uscita è una tensione, o di tensione massima in uscita, o di valore **massimo dell'impedenza di carico (load impedance)** se il segnale di uscita è una corrente), **l'impedenza di uscita (output impedance)**, ovvero il valore dell'impedenza equivalente presentata dal sensore ai morsetti d'uscita.

Alimentazione ausiliaria (auxiliary supply): è il valore della tensione o dell'intensità di corrente che dev'essere fornita da una sorgente esterna per consentire il corretto funzionamento del sensore (in questo caso, di tipo passivo).

Condizioni operative (operating conditions): con questo termine si definisce l'insieme delle condizioni a cui risulta soggetto il sensore; tali condizioni possono essere oggetto di particolari prescrizioni che riguardano la taratura, il funzionamento normale e in condizioni di sovraccarico, la conservazione in magazzino; esse generalmente comprendono i campi di valore in cui devono essere mantenute le grandezze d'influenza: di conseguenza, è possibile definire, analogamente a quanto fatto per il misurando, un **campo di sicurezza di una grandezza d'influenza** (campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza di influenza durante l'uso del sensore affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche) ed un **campo di magazzino di una grandezza d'influenza (storage conditions)** (campo nel quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza quando il sensore è a riposo, in condizioni di immagazzinamento, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche).

Vita (life): è la durata minima garantita di funzionamento del sensore in condizioni di piena validità delle sue caratteristiche metrologiche; essa può essere specificata in modi diversi, secondo il tipo di sensore e, per lo stesso sensore, secondo l'informazione che si vuole dare; solitamente è possibile fare riferimento al **numero di cicli (cycling life)** (numero di escursioni del misurando da un estremo all'altro del campo di misura o fra due limiti diversamente specificati), al **tempo di funzionamento (operating life)** (intervallo di tempo nel quale il sensore è in funzione; di regola si specifica se si intende **funzionamento continuo (continuous rating)** oppure **intermittente (intermittent rating)**), il **tempo di magazzino (storage life)** (intervallo di tempo che il sensore trascorre in magazzino, senza funzionare, a determinate **condizioni di magazzino (storage conditions)**).

Caratteristiche fisiche (physical characteristics): con questo termine si intende l'insieme delle caratteristiche connesse con le **dimensioni (dimensions)** (dimensioni fisiche esterne del sensore), il **peso (weight)** (peso del sensore e dei suoi eventuali accessori), il **montaggio (mounting)** (modalità con cui il sensore viene collegato al sistema misurato (viti, flange, collanti, ecc.) e al sistema utilizzatore (spine, connettori, ecc.)), i **materiali di costruzione (materials of construction)** (materiali usati in prevalenza nella costruzione delle varie parti del sensore (acciaio inossidabile, plastica, ecc.)), gli **accessori (accessories)** (apparecchiature ausiliarie che sono opportune, o necessarie, per il corretto funzionamento del sensore).

4.2. Caratteristiche in regime stazionario (static metrological characteristics)

4.2.1. Premesse

Sono l'insieme delle indicazioni necessarie a legare l'uscita del sensore al misurando, quando il sensore funziona in regime stazionario. Si noti che nelle seguenti definizioni ci riferiamo, come si fa di solito, alla funzione che consente di risalire dall'uscita al misurando; è evidente che si potrebbero dare le corrispondenti definizioni con riferimento al legame visto in senso inverso.

4.2.2. Funzione di conversione

4.2.2.1. Funzione di taratura

L'impiego del sensore richiede ovviamente che se ne conosca la "**funzione di conversione**", cioè la relazione che lega il segnale di ingresso a quello di uscita o, quando è possibile, la sua inversa. In realtà, a causa delle inevitabili incertezze, per nessuno dei due segnali si può parlare di "valore", ma bisogna introdurre il concetto di "**fascia di valore**", cioè

l'insieme di valori che rappresenta, nella sua globalità, la grandezza in questione, senza che nessuno di essi abbia più peso degli altri.

Si preferisce dunque parlare di "**funzione di taratura**", definita come (facendo riferimento alla relazione inversa)

la relazione che permette di ricavare da ogni valore della grandezza di uscita la corrispondente fascia di valore del misurando.

L'informazione completa viene di solito fornita specificando separatamente (in forma grafica, tabulare, o analitica) dove si colloca la fascia di valore, mediante un punto situato in posizione intermedia nella fascia, e l'ampiezza della fascia stessa.

Si distinguono dunque i due seguenti tipi di informazione: a) **Curva di taratura (calibration curve)**: è la relazione biunivoca (o almeno univoca) tra ogni valore della grandezza di uscita e il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando. Quando la curva di taratura è rettilinea, cioè esiste una relazione di proporzionalità fra uscita e misurando, essa viene espressa di regola con un coefficiente chiamato **costante di taratura (calibration factor)**; b) **Incertezza di taratura (calibration uncertainty)**: è la larghezza della fascia di valore; può essere specificata: in valore **assoluto**, con la stessa unità di misura del misurando, in valore **relativo**, rapportandola al valore del punto intermedio della fascia a cui è associata, in valore **ridotto**, rapportandola a un determinato valore del campo di misura, di solito il limite superiore.

In modo più o meno equivalente si parla molto spesso di **errore (error. uncertainty)**, o di **fascia (o banda) di errore (error band)**, sempre con riferimento a un determinato valore dell'uscita.

A volte ancora si introduce il concetto di **precisione (accuracy)**, espresso quasi sempre in termini di incertezza relativa.

Nei prossimi paragrafi accenneremo a un certo numero di parametri che spesso sono forniti individualmente, perché danno informazioni su comportamenti particolari del trasduttore non tutti ben evidenziati nella funzione di taratura; si può però affermare che in generale, specialmente quando non sono dichiarati esplicitamente, essi sono conglobati in quest'ultima nella misura in cui influiscono sulla fascia di valore del risultato.

4.2.2.2. Sensibilità (**sensitivity**)

Dalla funzione di taratura possono essere ricavati alcuni parametri, spesso forniti separatamente; uno di essi è la **sensibilità**, che può essere definita con riferimento a un punto qualsiasi della curva di taratura e coincide con l'inverso della pendenza della curva stessa.

Nel caso particolare in cui la curva di taratura è rettilinea, è l'inverso della costante di taratura. Essa è dunque espressa, come unità di misura, con riferimento alle unità di misura del misurando e della grandezza d'uscita; ad esempio, in un sensore di forza con uscita in tensione, in volt/newton.

E' importante sottolineare che spesso, specialmente in campo prettamente metrologico, il termine sensibilità è impiegato per indicare una grandezza completamente diversa, che qui è stata chiamata "risoluzione" (vedi oltre).

4.2.2.3. Linearità (**linearity**)

E' un'indicazione di quanto la curva di taratura si discosta dall'andamento rettilineo. E' specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Si definiscono dunque tanti tipi di linearità quanti sono i modi di scegliere la retta di riferimento. In particolare, le definizioni più interessanti, illustrate per mezzo dei diagrammi della Fig. 3, sono le seguenti:

- **linearità riferita allo zero (Zero based linearity)**: la retta di riferimento passa per l'estremo inferiore della curva di taratura, corrispondente all'estremo inferiore del campo di misura, ed è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti (Fig. 3a);
- **linearità riferita agli estremi (End point linearity)**: la retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura (Fig. 3b);
- **linearità secondo i minimi quadrati (Least squares linearity)**: la retta di riferimento è quella che corrisponde al valor minimo della somma dei quadrati degli scostamenti (Fig. 3d);
- **linearità indipendente (independent linearity)**: la retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti (Fig. 3c).

Quale che sia la retta a cui si fa riferimento, la linearità, cioè il massimo scostamento, viene espressa di regola o in valore relativo o, più spesso, in valore ridotto.

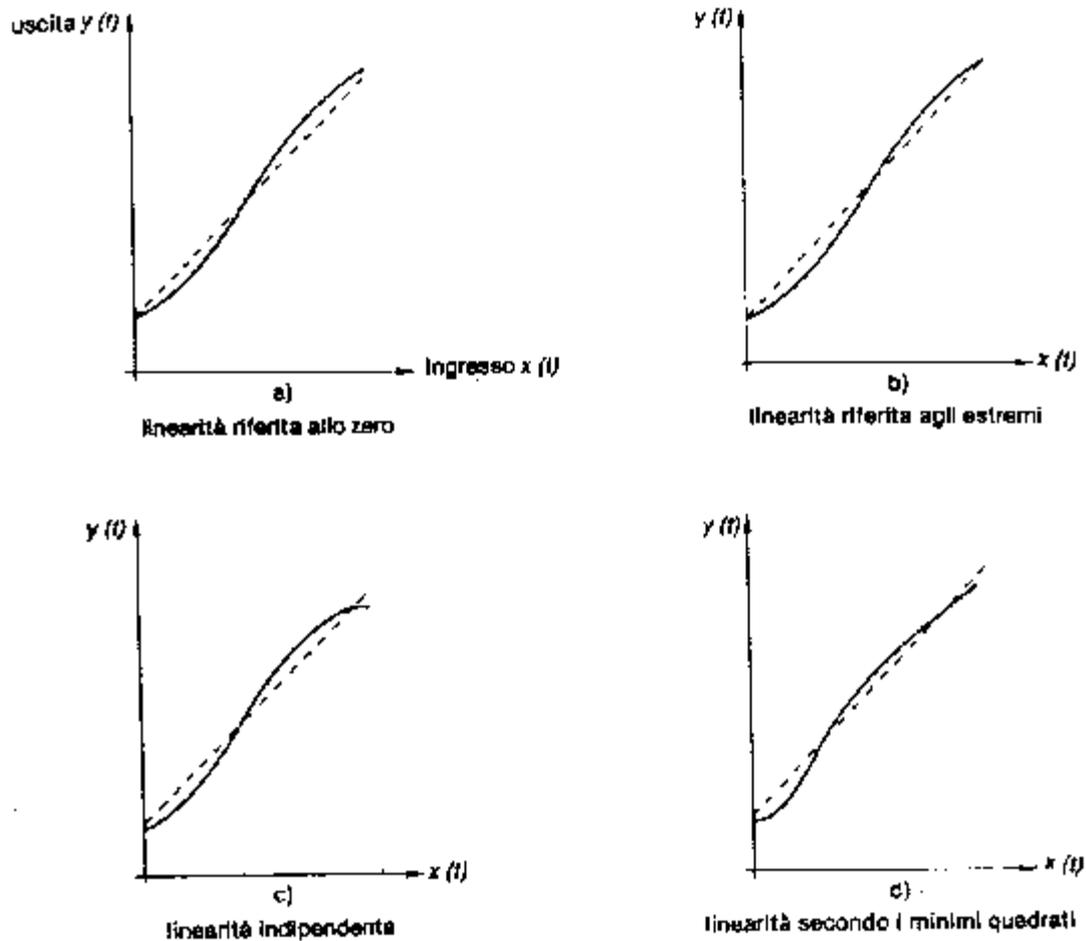


Fig.3. I quattro modi principali per definire la linearità di un sensore. Quando la curva di taratura (a linea piena nelle quattro figure) è press'a poco rettilinea, la linearità indica il suo scostamento da una retta di riferimento (a tratti, nelle figure), assunta convenzionalmente. La figura mostra i quattro modi principali in cui può essere definita questa retta di riferimento.

4.2.2.4. Risoluzione (**resolution**)

E' la variazione del valore del misurando che provoca una variazione nel valore della grandezza di uscita pari all'incertezza dell'uscita e può essere espressa in valore assoluto, in valore relativo o in valore ridotto.

Come è già stato detto poc'anzi, spesso alla grandezza che qui abbiamo chiamato risoluzione viene dato il nome di sensibilità; altre volte essa viene chiamata **banda morta (dead band)**.

Far riferimento all'incertezza dell'uscita corrisponde in pratica a considerare la minima variazione apprezzabile; la risoluzione rappresenta dunque la capacità del sensore a funzionare come rivelatore differenziale nell'intorno di un determinato valore del misurando.

E' il caso di ricordare che quando il sensore funziona intorno allo zero, al termine risoluzione si preferisce spesso il termine **soglia (threshold)**, intendendo così il valore minimo del misurando che fornisce un'uscita apprezzabilmente diversa da zero (si suppone che a misurando nullo corrisponda uscita nulla). A volte si definisce anche **l'uscita con misurando nullo (zero-measurand output, oppure offset)**, termine che non ha bisogno di precisazioni.

4.2.2.5. Ripetibilità (**repeatability**)

Questo parametro specifica l'attitudine del sensore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando è applicato all'ingresso lo stesso misurando più volte consecutivamente, nelle stesse condizioni operative. La ripetibilità è di regola espressa con le medesime modalità dell'incertezza di taratura.

4.2.2.6. Isteresi (**hysteresis**)

E' la massima differenza fra i valori della grandezza d'uscita corrispondenti al medesimo misurando, quando si considerano tutti i possibili valori entro il campo di misura, ed ogni valore viene raggiunto, prima partendo dall'estremo inferiore e poi partendo dall'estremo superiore.

Così definita, l'isteresi congloba anche l'incertezza dovuta alla risoluzione. A volte i due fenomeni vengono divisi e al termine isteresi si attribuisce il significato di differenza fra l'isteresi nel senso da noi definito e la risoluzione.

Viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative, entro un determinato intervallo di tempo. Può anche essere espressa in unità di misura del misurando, considerandola legata alla stabilità riferita all'uscita tramite la curva di taratura per passare dalla differenza fra i valori dell'uscita alla corrispondente differenza fra i valori del misurando.

4.2.2.7. Stabilità (**stability**)

E' la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo. Secondo i casi, si suole parlare di mesi o di anni. In ogni modo, si vuole mettere in evidenza la variabile d'influenza **tempo**, mentre con la ripetibilità si vuole tenere in conto gli effetti delle altre grandezze d'influenza, nella loro variabilità a breve termine.

Viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative entro un determinato intervallo di tempo. Può anche essere espressa in unità di misura del misurando, considerandola legata alla stabilità riferita all'uscita tramite la curva di taratura.

A volte è usato il termine **deriva (offset o shift)**, con significato più o meno equivalente. Viene anche usato, con riferimento **all'uscita con misurando nullo**, il termine **deriva dello zero (zero shift** oppure **offset drift**).

4.2.3. Condizioni di riferimento e campo di riferimento delle grandezze d'influenza

Tutte le caratteristiche metrologiche fin qui menzionate sono garantite quando ogni grandezza d'influenza è contenuta entro una determinata fascia di valori. Si definiscono dunque le **"condizioni di riferimento" (reference operating conditions)** come

l'insieme delle fasce di valore delle grandezza d'influenza in corrispondenza delle quali sono valide le specificazioni metrologiche riassumibili nella funzione di taratura.

In inglese spesso si usa anche il termine **"environmental conditions"**, con significato più o meno equivalente.

In molti tipi di norme, nazionali e internazionali, anziché parlare di "funzione di taratura", in modo praticamente equivalente si parla di **"funzione di conversione nominale"** e di **"errore intrinseco (intrinsic error)"**. introducendo anche le "condizioni di riferimento", sostanzialmente con lo stesso significato da noi attribuito. Come conseguenza della definizione precedente, per ogni grandezza d'influenza si definisce il relativo **campo di riferimento**, di evidente significato.

4.2.4. Funzioni di influenza (**operating influence**) e condizioni di normale funzionamento (**normal operating conditions**)

Molto spesso è interessante conoscere il comportamento del sensore al di fuori delle sue definite condizioni di riferimento; si definisce dunque ancora, per ogni grandezza d'influenza, la relativa **funzione d'influenza**, cioè l'informazione su come agisce una determinata grandezza d'influenza su una delle caratteristiche metrologiche.

Questa funzione può essere fornita con una curva, o con uno o più valori numerici, ciascuno dei quali, in un determinato campo di valori, esprime la **sensibilità (sensitivity)** della caratteristica metrologica considerata rispetto alle variazioni della grandezza d'influenza. Tipica è la sensibilità termica (thermal sensitivity).

Per esempio, si può esprimere l'effetto della tensione della sorgente di alimentazione ausiliaria sulla costante di taratura mediante un coefficiente del tipo $-0,1\%/V$, volendo significare che l'aumento di un volt nella tensione provoca una diminuzione della costante di taratura pari a $0,1\%$.

Per ogni grandezza d'influenza, associato al concetto di funzione d'influenza c'è ovviamente quello del suo campo di validità, che va sotto il nome di **campo di normale funzionamento (normal operating range)**. Infine, all'insieme di questi campi si dà il nome di **"condizioni di normale funzionamento"**

4.3. **Caratteristiche metrologiche in regime dinamico (dynamic characteristics)**

4.3.1. Premessa

Sono l'insieme di quelle indicazioni che consentono di legare l'uscita del sensore al misurando, quando questo varia in modo tale che non si può più assumere che il sistema funzioni in regime stazionario.

Spesso sono tra le indicazioni più difficili da interpretare; spesso sono del tutto mancanti, perché il costruttore presume che il sensore venga usato in regime stazionario.

Presenteremo tali caratteristiche suddividendole secondo il modello che presuppongono. Si noti che in ogni caso è ipotizzato il comportamento **lineare** del sensore.

4.3.2. Nel dominio della frequenza

Un tipo di informazione molto ricca è la **risposta in frequenza (frequency response)**, in quanto dà indicazioni sulle variazioni della sinusoide di uscita quando

il misurando, sinusoidale e di ampiezza costante, varia entro un determinato campo di frequenze.

In pratica si forniscono curve in cui si riportano, in funzione della frequenza, il rapporto fra l'ampiezza dell'uscita e l'ampiezza del misurando (curva del modulo) e lo sfasamento fra la sinusoide di uscita e quella che costituisce il misurando (curva di fase). Di solito, per ampliare il campo riportato in diagramma, e non perdere troppo in capacità di lettura nella zona dei bassi valori, si usano scale logaritmiche, specialmente per l'asse delle frequenze. Molto spesso ci si limita a fornire una sintesi delle informazioni contenute nelle curve della risposta in frequenza. In particolare si definiscono le seguenti grandezze:

- **Campo di frequenze di non distorsione (Frequency range):** è il campo di frequenze nel quale la curva di risposta in modulo non esce da una fascia di tolleranza prefissata, la cui ampiezza dipende dal grado di distorsione ammesso. Di solito, con una dizione abbreviata, si parla semplicemente di campo di frequenze del sensore. Il campo di frequenza è delimitato dalla frequenza di taglio inferiore e dalla frequenza di taglio superiore.

- **Frequenza di risonanza (Resonant frequency):** è la frequenza alla quale la curva di risposta in modulo presenta un massimo. Quando il sensore è rappresentato da un sistema di grado superiore al terzo, potrebbe presentare più di una frequenza di risonanza; in tal caso si suole fornire l'indicazione della più bassa.

4.3.3. Nel dominio del tempo

Di solito sono dati i seguenti tipi di informazioni.

A) **Riposta al gradino (step response):** è la risposta del sensore ad una variazione a gradino del misurando. Costituisce un'informazione sul comportamento dinamico del sensore molto ricca di indicazioni. Anche in questo caso, però, come nel caso della risposta in frequenza, si è soliti fornire indicazioni sintetiche, costituite da un numero limitato di valori numerici.

- **Sovraelongazione (overshoot):** è definita solamente quando l'uscita, durante il transitorio, va al di là del valore di regime. E' data dalla differenza fra il valore massimo e quello di regime dell'uscita, riferita, di regola, al valore di regime;

- **tempo morto (dead time):** è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera un determinato valore di soglia al di sotto del quale viene considerata trascurabile;

- **tempo di salita (rise time)**: fissate due frazioni del valore di regime dell'uscita, una relativamente piccola (ad esempio, 5%, 10%), l'altra relativamente elevata (ad esempio 90%, 95%), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui l'uscita supera il primo valore e l'istante in cui supera per la prima volta il secondo;
- **tempo di risposta (response time)**: è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera per la prima volta una determinata frazione, relativamente elevata (ad esempio, 90%, 95%), del valore di regime. Spesso viene chiamato **costante di tempo (time constant)** il tempo di risposta corrispondente a una frazione del valore di regime pari al 63%;
- **tempo di assestamento (settling time)**: fissata una fascia di valore intorno al valore di regime dell'uscita (ad esempio 5%), e' l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita entra, per non uscirne più, nella suddetta fascia di valore;
- **frequenza delle oscillazioni di assestamento (ringing frequency)**: è la frequenza delle oscillazioni smorzate che si verificano quando il sistema è sottosmorzato;
- **fattore di smorzamento (damping factor)**: viene definito, nel caso di sistema oscillante, cioè sottosmorzato, come il rapporto fra la minore e la maggiore di due sovraelongazioni successive, nell'ipotesi che tale rapporto sia indipendente dalla coppia di sovraelongazioni considerate. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del sensore mediante un sistema del second'ordine; in tal caso questo fattore di smorzamento coincide con l'omonimo coefficiente.

B) Risposta libera (natural response): è il modo in cui l'uscita del sensore evolve nel tempo, partende da un valore iniziale non nullo, in assenza di misurando. Essa coincide dunque con l'evoluzione libera $y_1(t)$. Questa particolare risposta è interessante perché pone in luce i modi del sistema.

Di solito non si riporta la risposta libera sotto forma di diagramma in funzione del tempo, perché l'informazione sarebbe inutilmente ridondante, ma ci si limita a fornire, nel caso in cui il sistema presenti un modo pseudoperiodico, cioè delle oscillazioni smorzate, la cosiddetta **frequenza libera, o frequenza naturale (natural frequency)**, che non è altro che la frequenza del termine sinusoidale.

Il numero dei modi dipende dall'ordine del sistema. Si possono quindi avere più di una frequenza naturale. In pratica, però, interessa sempre la frequenza naturale di valore più basso; d'altronde è abbastanza raro che un sensore debba essere rappresentato con un sistema di ordine superiore al secondo.

A volte si definisce anche la **frequenza naturale a smorzamento nullo (natural undamped frequency)**, che non ha riscontro con una condizione di funzionamento reale, ma è il valore teorico che assumerebbe la frequenza naturale, se il sistema non fosse per nulla smorzato. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del sensore mediante un sistema del second'ordine; in tal caso questo fattore di smorzamento coincide con l'omonimo coefficiente.

C) **Limite di velocità (velocity limit)**: è il valore limite della velocità di variazione del misurando, al di là del quale l'uscita non è in grado di variare con la stessa velocità con cui varia il corrispondente misurando.

D) **Tempo di recupero (recovery time)**: è l'intervallo di tempo richiesto, dopo un evento specificato (per esempio, un sovraccarico, una variazione a gradino nell'alimentazione ausiliaria, un corto circuito sull'uscita), affinché il sensore riprenda a funzionare secondo le caratteristiche specificate.

4.3.4. Rumore (**noise**)

E' una variazione del segnale non correlata ad alcuna informazione. E' di solito fornito in valore efficace, precisando la banda di frequenze entro la quale viene preso in considerazione.

Si può parlare di rumore sul misurando e di rumore sull'uscita, ma, mentre il rumore sul misurando riguarda esclusivamente lo stato del misurando stesso, cioè la sua capacità di convogliare un'informazione, quando si vuole caratterizzare un sensore si fa l'ipotesi che il rumore sia presente solo sull'uscita; la sua entità costituisce evidentemente un'importante indicazione sulla capacità del sensore di non inquinare l'informazione che proviene dal misurando.

L'entità del rumore è una grandezza fornita frequentemente, soprattutto quando si prevede che il misurando possa variare velocemente nel tempo (cioè corrisponda a una banda di frequenze abbastanza ampia); in ogni caso, però, la risoluzione è un'informazione sintetica che dovrebbe conglobarne l'effetto.

4.4. **Condizioni operative (operating conditions)**

Con questo termine si definisce l'insieme delle condizioni a cui risulta soggetto il sensore.

Le condizioni operative sono oggetto di particolari prescrizioni che riguardano la taratura, il funzionamento normale e in condizioni di sovraccarico, la conservazione in magazzino.

Esse comprendono essenzialmente i campi di valore in cui devono essere mantenute le grandezze d'influenza, ma si riferiscono anche ad altre condizioni. Come si è già detto, con questo termine si intendono tutte quelle grandezze, diverse dal misurando, le cui variazioni alterano in modo significativo le caratteristiche metrologiche del sensore.

E' evidente che caso per caso si possono individuare grandezze d'influenza diverse; con riferimento alla suddivisione che è già stata fatta nel paragrafo 2, ne riportiamo alcune, a mo' di esempio:

- **Sistema misurato**: temperatura, pressione, umidità.
- **Sensore**: l'orientamento nello spazio (attitude), l'altezza sul livello del mare (altitude), l'accelerazione (acceleration) in una direzione specificata, rispetto a un determinato sistema di riferimento.
- **Sistema utilizzatore**: impedenza d'ingresso.
- **Sistema ausiliario** eventuale: tensione, frequenza, impedenza equivalente.
- **Ambiente**: temperatura, pressione, umidità, vibrazioni, campi elettrici o magnetici.

Si noti infine che per ogni grandezza d'influenza, oltre ai campi già introdotti nei paragrafi 4.2.3 e 4.2.4 (campo di riferimento e campo di normale funzionamento), si danno le seguenti definizioni:

- **campo di sicurezza di una grandezza d'influenza**: campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza di influenza durante l'uso del sensore, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche. Spesso si parla anche di **limiti di sicurezza (operative limits)** intendendo i valori estremi del campo di sicurezza.
- **campo di magazzino di una grandezza d'influenza (storage conditions)**: è il campo nel quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza quando il sensore è a riposo, in condizioni di immagazzinamento, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue caratteristiche metrologiche.

4.5 Vita (life)

E' la durata minima garantita di funzionamento del sensore in condizioni di piena validità delle sue caratteristiche metrologiche. Essa può essere specificata in modi

diversi, secondo il tipo di sensore e, per lo stesso sensore, secondo l'informazione che si vuole dare.

A) **Numero di cicli (cycling life)**: è il numero di escursioni del misurando da un estremo all'altro del campo di misura, o fra due limiti diversamente specificati.

B) **Tempo di funzionamento (operating life)**: è l'intervallo di tempo nel quale il sensore è in funzione. Di regola si specifica se si intende **funzionamento continuo (continuous rating)** oppure **intermittente (intermittent rating)**.

C) **tempo di magazzino (storage life)**: è l'intervallo di tempo che il sensore trascorre in magazzino, senza funzionare, a determinate **condizioni di magazzino (storage conditions)**.

4.6. Caratteristiche fisiche (physical characteristics)

Con questo termine si intende l'insieme delle seguenti caratteristiche:

A) **dimensioni (dimensions)**: le dimensioni fisiche esterne del sensore.

B) **peso (weight)**: il peso del sensore e dei suoi eventuali accessori.

C) **montaggio (mounting)**: le modalità con cui il sensore viene collegato al sistema misurato (viti, flange, collanti, ecc.) e al sistema utilizzatore (spine, connettori, ecc.).

D) **materiali di costruzione (materials of construction)**: i materiali usati in prevalenza nella costruzione delle varie parti del sensore (acciaio inossidabile, plastica, ecc.).

E) **accessori (accessories)**: le apparecchiature ausiliarie che sono opportune, o necessarie, per il corretto funzionamento del sensore.

F) **regolazioni (adjustments)**: le modalità con cui si effettuano, quando è possibile, le regolazioni dello **zero (zero)**, cioè dell'uscita con misurando nullo, e della **sensibilità (sensitivity)**.