

CARATTERISTICHE METROLOGICHE DELLA STRUMENTAZIONE DI MISURA

1. Sistema di misura

Un sistema di misura è un insieme di dispositivi che fornisce ad un utilizzatore finale un valore di un dato ingresso (misurando). Se questo è un osservatore umano, la lettura consisterà nella posizione di un indice su una scala graduata (formato di uscita analogico) oppure in un numero presente su un display (formato di uscita numerale o numerico); se l'utilizzatore è invece un dispositivo elettronico oppure un personal computer, l'indicazione di uscita sarà un segnale elettrico.

E' possibile identificare un sistema di misura con quattro blocchi funzionali fondamentali; in alcuni sistemi di misura ciascun elemento ricorre più di una volta, mentre in altri può essere addirittura assente.

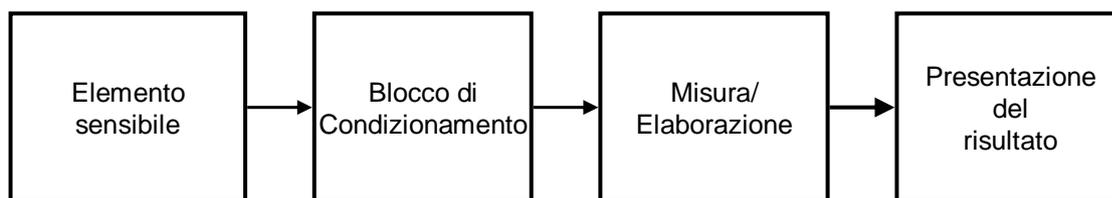


Figura 1: Schematizzazione di un sistema di misura

I blocchi funzionali sono:

1. Elemento sensibile: ha in ingresso il misurando ed è in grado di fornire in uscita una grandezza fisica avente l'andamento nel tempo del misurando. A volte sono presenti più elementi sensibili in serie; in tal caso il primo della serie degli elementi sensibili prende il nome di "elemento sensibile primario".
2. Blocco di condizionamento (del segnale): trasforma la grandezza in ingresso in modo da renderla adatta ai blocchi successivi. Di solito attenua o amplifica il segnale in uscita dall'elemento sensibile, oppure lo "condiziona" in modo opportuno per eliminare effetti indesiderati, come il rumore, le distorsioni, gli accoppiamenti con altri circuiti, ecc.. Ad

esempio, per misurare l'ampiezza di un segnale continuo di 100V utilizzando uno strumento con fondo scala di 10V occorre attenuare il segnale almeno 10 volte.

3. Unità di elaborazione: ha la funzione di estrarre dal segnale in tensione ricevuto dal blocco di condizionamento il parametro di interesse per la misura (es.: valore efficace, valore di picco, frequenza, etc.). Queste elaborazioni possono avvenire per via analogica o digitale.
4. Unità di visualizzazione: presenta l'uscita del blocco di elaborazione in una forma riconoscibile dall'utente.

Un dispositivo destinato ad eseguire la misurazione di una o più grandezze fisiche deve essere corredato di tutte le informazioni che ne indicano le corrette modalità d'impiego e che permettono all'utilizzatore di valutarne le prestazioni nelle possibili condizioni d'uso, anche per guidare la scelta del sistema di misura più adatto all'applicazione. Tale informazioni sono raggruppate nelle caratteristiche statiche e dinamiche della strumentazione.

2. Caratteristiche statiche degli strumenti di misura

Le caratteristiche statiche descrivono il comportamento del sistema di misura quando in ingresso vi è una grandezza costante o che varia lentamente nel tempo rispetto alla dinamica del sistema di misura. Tale comportamento viene descritto mediante dei parametri sintetici di seguito riportati.

2.1 Specifiche legate alle caratteristiche del misurando

- a) Specie del misurando: Natura della grandezza fisica che costituisce il misurando (ad esempio: valore efficace della tensione, valore medio della corrente, frequenza, etc.).
- b) Campo di misura (*input range*): Insieme dei valori che può assumere il misurando, entro il quale, se sono rispettate le condizioni operative, lo strumento funziona secondo le specifiche fornite. Spesso si parla di **portata**, o di valore di **fondo scala (*full scale*)**, riferendosi al limite superiore del campo di misura, oppure di **range**, intendendo l'intervallo dei valori del misurando entro cui lo strumento dà un'indicazione. (Es uno strumento con portata 10 V può avere come fondo scala 10.000 V e range [-10.000 V ; 10.000 V])

Alcuni strumenti hanno diverse portate selezionabili con comandi esterni in modo da poter misurare in un ampio range di misura sempre con la migliore risoluzione (Es. Multimetro digitale range per misure di tensione in continua: 100mV, 1 V, 10V, 100V). Negli strumenti analogici alla stessa scala graduata possono essere associate più portate al variare della portata varia la **costante strumentale** cioè il fattore di conversione deviazioni/misurando. Ad esempio in Figura 2 è riportata la scala graduata di un amperometro a quattro portate: 6 A, 3°A, 1.2 A, 0.6 A, a seconda della portata la posizione dell'ago indicherà un valore diverso. Si consideri ad esempio la posizione dell'ago rosso in figura, per le diverse portate, ma a parità del numero di deviazioni dall'indice, le letture saranno rispettivamente: 4 A, 6 A, 0.8 A, 0.4 A; poiché al variare della portata varia anche la costante strumentale.

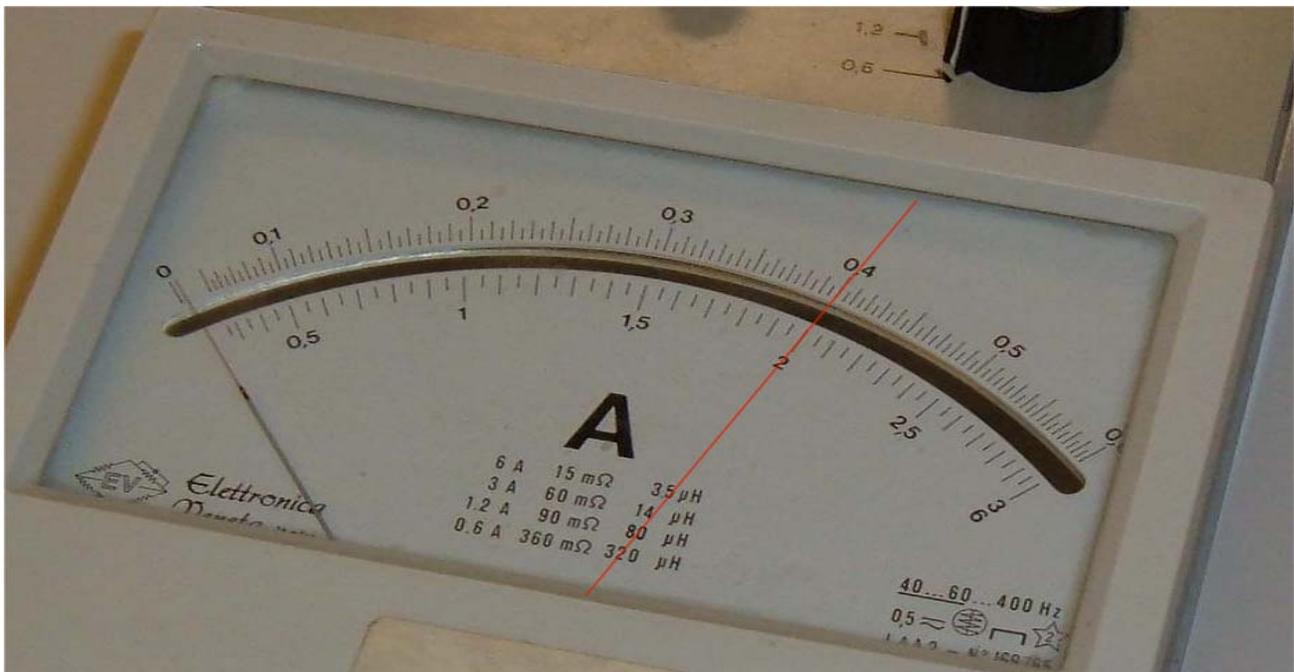


Figura 2. Unità di visualizzazione di un amperometro a più portate

- c) Campo di sicurezza del misurando: Insieme dei valori che può assumere il misurando senza che il funzionamento dello strumento resti permanentemente alterato rispetto alle specifiche fornite. I valori estremi del campo di sicurezza vengono chiamati valori di **sovraccarico** (*overload*, *overrange*) del misurando. In alternativa, si parla anche semplicemente di sovraccarico, intendendo con questo termine il limite superiore del campo di sicurezza e sottintendendo che il limite inferiore coincida con il limite inferiore del campo di misura.

2.2 Specifiche legate al segnale di uscita

- a) Tipo d'uscita: Natura della grandezza fisica che costituisce il segnale d'uscita. Molto spesso si tratta di un segnale di tipo elettrico (tensione, corrente, frequenza, etc.) al quale l'informazione è associata in modo analogico o in modo digitale. Se l'uscita è destinata ad un utente umano l'informazione è espressa mediante la posizione di indice su una scala graduata (formato di uscita analogico) oppure in un numero visualizzato su un display (formato di uscita numerale o numerico). Se l'utilizzatore è invece un dispositivo elettronico oppure un personal computer, l'indicazione di uscita sarà un segnale elettrico che potrà anch'esso avere forma analogica o digitale. Nel caso in cui un dispositivo per la misurazione fornisca la lettura sotto forma di un segnale elettrico, deve essere indicato il campo di valori che il segnale d'uscita assume in corrispondenza del campo di misura (**campo di normale funzionamento dell'uscita**); inoltre, devono essere indicate le condizioni sull'uso dell'uscita espresse generalmente in termini di **impedenza di uscita** ed di **massima potenza erogabile** dallo strumento. Se il formato del segnale di uscita è digitale, è inoltre indispensabile conoscere le regole di codifica, che possono essere specificate anche come conformità ad un particolare protocollo di comunicazione (per esempio IEEE-488.2).
- b) Campo di normale funzionamento dell'uscita (*output range*): Insieme dei valori che assume il segnale d'uscita quando il misurando varia entro il campo di misura.
- c) Valori di sovraccarico dell'uscita: I valori più elevati assunti dal segnale d'uscita quando il misurando varia entro il campo di sicurezza. Non sempre vengono fornite indicazioni su questi valori. In ogni caso è importante valutarne almeno l'ordine di grandezza, per essere in grado di proteggere, se necessario, il sistema utilizzatore collegato.
- d) Potenza erogabile (*output power*): Il valore limite della potenza che il sistema di misura può fornire al sistema utilizzatore entro il quale il sistema di misura può funzionare secondo le specifiche fornite. A volte, in modo equivalente, si parla di corrente massima erogabile, o di tensione massima in uscita, o di valore massimo *dell'impedenza di carico*.
- e) Impedenza di uscita (*output impedance*): Valore dell'impedenza equivalente tra i due morsetti di uscita del sistema di misura (quando la parte reattiva è trascurabile, si parla di resistenza di uscita).

2.3 Specifiche legate alla precisione

a) Sensibilità (*sensitivity*): La sensibilità è definita analiticamente come la derivata dell'uscita rispetto l'ingresso, e si può misurare come il rapporto tra la variazione dell'uscita sulla variazione dell'ingresso. Dalla definizione appare chiaro come essa possa essere variabile al variare del punto di funzionamento del sistema, ed è costante solo per strumenti con caratteristica lineare. Nel caso di strumenti analogici con visualizzatore ad indice, la minima variazione apprezzabile dell'uscita è normalmente pari a $1/20$ della tacca $1/100$ di una divisione, mentre in quelli digitali coincide con l'ultima cifra significativa.

Nel caso di strumenti a più portate, poiché la variazione dell'uscita è fissata, la sensibilità varia con la portata, cioè diminuisce al crescere di questa.

b) Risoluzione (*resolution*): È la più piccola variazione del valore del misurando che provoca una variazione misurabile nel valore della grandezza di uscita, ha, quindi, generalmente la stessa unità di misura del misurando. Una piccola risoluzione (risoluzione spinta) indica la possibilità di discriminare valori degli ingressi che si discostano di poco tra loro. Essa è espressa in valore assoluto o, più raramente, in percentuale della portata e può assumere valori diversi in corrispondenza delle diverse portate di uno strumento. Negli strumenti digitali la risoluzione coincide con la minima variabilità dell'ultima cifra visualizzata (generalmente la minima variabilità è di una unità ma può essere anche più grande es. 2 o 5 unità). Per esempio, un voltmetro che può visualizzare al massimo 49999 conteggi e con portata di 500mV, la massima indicazione possibile è di 499.99 mV. La minima quantità che può essere visualizzata è di $0.01\text{mV}=10\mu\text{V}$ e coincide con la minima variabilità, di conseguenza, la risoluzione sulla portata di 500mV. In termini relativi, lo strumento consente di apprezzare una parte su 50000, cioè una risoluzione relativa del $2 \cdot 10^{-5}$.

Oss. La sensibilità è un parametro che fornisce informazioni relative all'ingresso mentre la risoluzione è un'indicazione sull'uscita.

Quando lo strumento 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).

c) Accuratezza: La maggior parte dei manuali degli strumenti di misura presenta come indicazione della bontà della misura il massimo errore che lo strumento può commettere, E_{\max} , denominato comunemente *accuracy*.

Negli strumenti analogici viene espressa in termine di *classe*:

$$classe = \frac{E_{\max}}{f.s.} \cdot 100,$$

cioè come il rapporto percentuale dell'errore massimo e il fondo scala dello strumento, f.s..

Normalmente le classi impiegate per gli strumenti sono: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 5.

Negli strumenti digitali essa è espressa con due contributi uno proporzionale alla misura e l'altro costante, eventualmente, dipendente dal range impiegato. (Es. Accuracy = $K_1\%$ reading + $K_2\%$ range, oppure Accuracy = $K_1\%$ reading + K_2 -digit dove con il digit si intende l'ultima cifra del risultato numerico visualizzato).

d) Ripetibilità (*repeatability*): Questo parametro specifica l'attitudine dello strumento 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. In assenza di effetti sistematici la ripetibilità coincide con l'incertezza della misura, altrimenti fornisce un'indicazione solo sulla variabilità dei valori letti.

e) Stabilità (*stability*): E' la capacità di un dispositivo di misurazione 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. 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.

La stabilità è solitamente espressa in termini quantitativi mediante il concetto di deriva, che è la variazione, solitamente lenta e continua, dell'indicazione di un dispositivo di misura che non è causata da variazioni della grandezza in misura o delle grandezze di influenza. Viene anche usato, con riferimento all'*uscita con misurando nullo*, il termine *deriva dello zero*.

Per tener conto dell'influenza del *tempo* sul comportamento dello strumento; a volte sono fornite le caratteristiche dello strumento al variare del tempo trascorso dall'ultima taratura.

f) Isteresi: Indica la tendenza di uno strumento di esibire valori di lettura diversi in corrispondenza dello stesso misurando, quando questo è fatto variare per valori crescenti o decrescenti. L'isteresi

é valutata come 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, 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 valutata come prima e la risoluzione.

L'isteresi viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto o in percentuale della portata, a parità di misurando e di condizioni operative, entro un determinato intervallo di tempo.

g) Funzione di taratura: E' la relazione che permette di ricavare da ogni valore della grandezza di uscita (valore misurato) la corrispondente fascia di valori ragionevolmente attribuibili al misurando (l'ingresso dello strumento). 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. Un esempio di diagramma di taratura è mostrato in Fig. 3, dove è anche evidenziata la curva di taratura, che stabilisce una relazione univoca tra letture e misure (curva centrale).

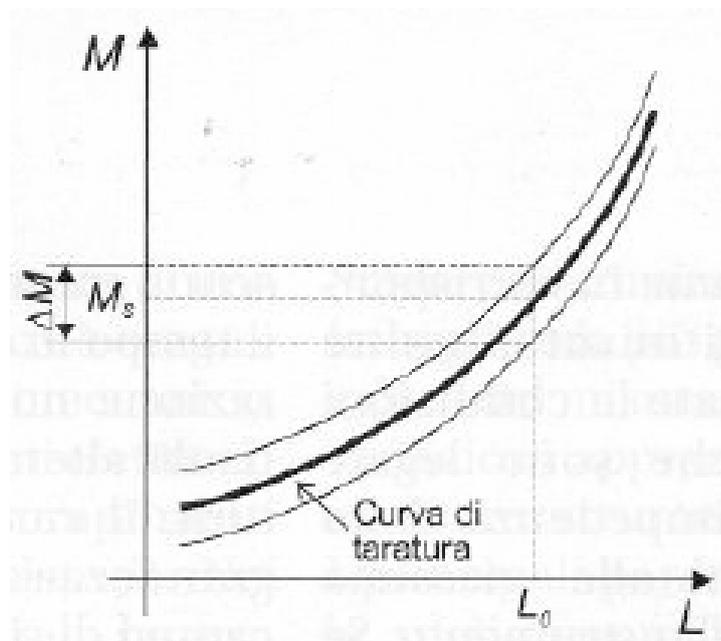


Figura 3: Esempio di funzione di taratura

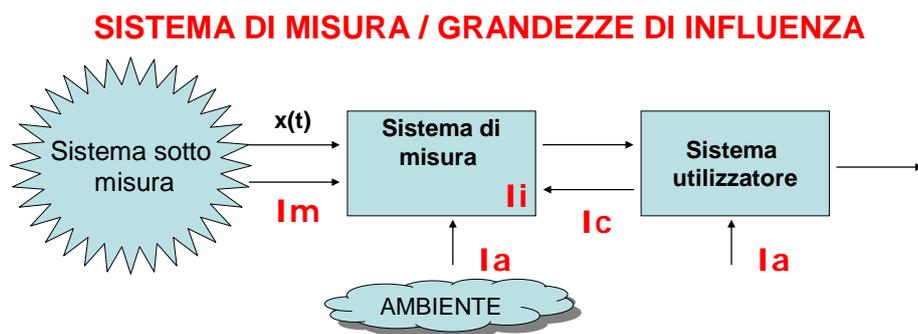
L'inverso della pendenza della curva di taratura prende il nome di sensibilità (sensitivity) e può assumere valori diversi in diversi punti della curva, come nel caso della curva riportata nella Figura. Quando la curva di taratura è una retta, cioè esiste una relazione di proporzionalità fra

uscita e misurando, essa viene espressa di regola con un coefficiente chiamato *costante di taratura*.

OSS. La curva di taratura se correttamente riportata è in grado di sintetizzare nella sua forma la maggiorparte delle caratteristiche statiche dello strumento quali (es. il campo di misura, il fondoscala, sensibilità, risoluzione, l'incertezza della misura, l'accuracy).

La funzione (diagramma o tabella) di taratura di un dispositivo per misurazione dipende da un certo numero di grandezze di influenza:

- Sistema misurato: valore di tensione, frequenza, ecc.
- Sistema utilizzatore: impedenza d'ingresso.
- Sistema ausiliario: tensione, frequenza, impedenza equivalente.
- Ambiente: temperatura, pressione, umidità, vibrazioni, campi elettrici o magnetici.



- I_m = caratteristiche del misurando (es. Frequenza del segnale)
- I_c = caratteristiche del sistema utilizzatore (quindi del segnale di uscita)
- I_i = caratteristiche del sistema di misura
- I_a = grandezze dell'ambiente (es. temperatura, pressione, umidità)

Figura 4: Schematizzazione dell'interazione del sistema di misura e i parametri di influenza

h) Linearità: 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 utilizzate sono le seguenti:

- *Linearità riferita allo zero*: 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.

- *Linearità riferita agli estremi*: La retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura.
 - *Linearità indipendente*: La retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti.
 - *Linearità secondo i minimi quadrati*: La retta di riferimento è quella che corrisponde al valor minimo della somma dei quadrati degli scostamenti.
- Quale che sia la retta a cui si fa riferimento, la linearità, cioè il massimo scostamento, viene espressa di regola o in valore relativo.

2.4 Specifiche legate all'interazione con l'ambiente

a) Errore di inserzione/Impedenza d'ingresso. Per eseguire una misura lo strumento deve essere posto "in contatto" con la grandezza che si vuole rilevare. Da un punto di vista concettuale possiamo fare una distinzione tra "il sistema" senza lo strumento di misura e "il sistema " in presenza dello strumento di misura. L'inserzione dello strumento nel "sistema " comporta sempre una sua alterazione cui in generale corrisponde una variazione della grandezza che si vuole misurare. Tale alterazione viene denominata errore di inserzione. Un esempio pratico di questo effetto può essere evidenziato dall'utilizzo di un termometro nella la misura della temperatura di un corpo avente massa comparabile con quella del termometro stesso. Risulta evidente che nel momento in cui il termometro verrà posto in contatto con il corpo si avrà un flusso di calore tra i due e l'indicazione che si otterrà al raggiungimento dell'equilibrio risulterà intermedia tra la temperatura "vera" del corpo e da quella iniziale del termometro. L'entità dell'errore di inserzione risulta dipendere dal trasferimento di energia tra "il sistema" e lo strumento di misura, se idealmente il flusso fosse nullo si avrebbe anche un effetto di inserzione nullo. Al fine di analizzare il flusso di energia e quindi determinare gli errori di inserzione si può ricorrere agli schemi che utilizzano una rappresentazione a parametri concentrati dei sistemi fisici, la cui applicazione nel campo elettrico è particolarmente comune. Normalmente uno strumento di misura viene schematizzato mediante la sua impedenza di ingresso. Si può agevolmente dimostrare che nel caso di misura di una tensione l'errore di inserzione dal rapporto tra l'impedenza equivalente "vista " dai punti di inserzione del voltmetro e l'impedenza del voltmetro stesso. In particolare l'errore tende a zero quando l'impedenza del voltmetro è molto più elevata di quella equivalente del sistema. Nel caso di misura di una corrente la condizione per ottenere un ridotto errore di inserzione risulta invece quella opposta, ovvero, l'impedenza del misuratore deve essere molto più piccola di quella del sistema. Schemi analoghi a quelli elettrici

si possono definire per le grandezze meccaniche, termiche, idrauliche, ecc. e su questi valutare gli effetti di inserzione con gli stessi formalismi.

- b) Tutte le caratteristiche metrologiche sono garantite se ogni grandezza d'influenza (es. temperatura, umidità, vibrazioni, campi elettrici e magnetici etc.) è contenuta entro determinati intervalli detti campi di impiego per le grandezze di influenza. Molto spesso è interessante conoscere il comportamento dello strumento al di fuori delle sue condizioni di riferimento; occorre quindi una funzione d'influenza per ogni grandezza di influenza, che dia informazioni su come agisce la grandezza sulle caratteristiche dello strumento. Ovviamente anche queste funzioni avranno un loro campo di validità.
- c) Caratteristiche fisiche. Caratteristiche quali le dimensioni, il peso, materiali di costruzione vanno dichiarati in quanto possono influire sulla scelta dello strumento più adatto ad una specifica applicazione.
- d) Modalità di alimentazione. Solitamente sono specificate le caratteristiche che deve avere l'alimentazione ausiliaria in termini di frequenza, ampiezza e forma d'onda.
- e) Un'ulteriore variabile da tenere in considerazione è il *campo di magazzino per le grandezze di influenza*, che racchiude le condizioni in cui deve essere immagazzinato un dispositivo per misurazione, ossia l'intervallo di valori entro cui deve essere compresa ciascuna grandezza di influenza per tutto il tempo in cui il dispositivo per misurazione non è in uso affinché non risulti alterata la sua funzione di taratura. Il campo di magazzino per le grandezze di influenza contiene il campo di sicurezza, che contiene tutti i campi di impiego.
- f) Infine sono importantissime le modalità d'impiego di un dispositivo per misurazione che comprendono le istruzioni d'uso, sempre più complesse nei moderni strumenti multifunzione e multiportata, e tutte le prescrizioni per un corretto utilizzo dello strumento. Un'importante prescrizione riguarda, ad esempio, le regole per l'azzeramento iniziale, che permettono di imporre una lettura nulla in corrispondenza di un valore di riferimento (solitamente zero) del misurando applicato all'ingresso dello strumento. L'azzeramento di uno strumento elettromeccanico è eseguito agendo su un organo meccanico, mentre nel caso di strumenti elettronici analogici si agisce su componenti variabili (tipicamente resistori). Nei moderni strumenti numerici, la procedura di azzeramento, così come quella di messa a punto, è solitamente eseguita in modo automatico e consiste nella modifica di costanti di taratura contenute nella memoria interna dello strumento, quindi non richiede alcun intervento manuale sullo strumento.

g) Altre prescrizioni riguardano il tempo richiesto per il preriscaldamento (*warm-up*) dello strumento, che può variare da una decina di minuti ad alcune ore in dipendenza dell'incertezza garantita dallo strumento, ed il corretto posizionamento del dispositivo (orizzontale, verticale, ...); e il tempo di recupero che rappresenta il tempo necessario al sistema per tornare al normale funzionamento dopo un evento insoluto (guasto, black-out,...).

3. Caratteristiche dinamiche degli strumenti di misura

Le caratteristiche dinamiche di un dispositivo per misurazione descrivono il comportamento del sistema di misura quando in ingresso vi è una grandezza che varia nel tempo. Esse vengono fornite sia per i dispositivi destinati ad operare con grandezze variabili nel tempo sia per i dispositivi di misura di grandezze costanti. Nel primo caso è infatti importante stabilire i limiti di funzionamento, per esempio in termini di massima componente in frequenza ammessa per il misurando per garantire la validità della funzione di taratura dello strumento; nel secondo caso interessa invece il comportamento in regime transitorio, che permette di prevedere come l'uscita del dispositivo raggiunge il valore di regime in seguito ad una variazione del misurando.

Le caratteristiche dinamiche sono espresse mediante parametri sintetici che si riferiscono al comportamento del sistema nel dominio del tempo o nel dominio della frequenza.

3.1. Dominio della frequenza

Nello studio del comportamento dinamico di un dispositivo per misurazione si ricorre generalmente ad un modello semplificato, che non tiene conto delle grandezze di influenza e che descrive un sistema lineare a parametri concentrati e invarianti nel tempo con un ingresso (il misurando) ed un'uscita (la lettura). Un sistema con queste caratteristiche può essere convenientemente caratterizzato dal punto di vista dinamico mediante la sua funzione di trasferimento (FdT) $H(f)$:

$$H(f) = \frac{U(f)}{I(f)}$$

dove:

$U(f)$ è la trasformata di Fourier del segnale d'uscita;
 $I(f)$ è la trasformata di Fourier del segnale d'ingresso;
 f è la frequenza, espressa in Hertz.

L'antitrasformata di Fourier di $H(f)$, solitamente indicata con $h(t)$, è la risposta all'impulso del sistema.

Il comportamento in frequenza di un sistema è generalmente rappresentato mediante una coppia di diagrammi detti di *Bode*, in cui sono riportati, al variare della frequenza, gli andamenti del modulo e della fase della FdT. In questi diagrammi la frequenza è espressa in scala logaritmica, mentre il modulo della FdT è espresso in decibel, ossia come:

$$|H(f)|_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{U(f)}{I(f)} \right| \right)$$

Si osservi che questa espressione può essere applicata solo nel caso in cui il modulo della FdT è una grandezza adimensionale, cioè se $|U(f)|$ e $|I(f)|$ sono espressi nella stessa unità di misura (caso tipico degli amplificatori di tensione). In caso contrario, è necessario definire un valore di riferimento H_0 espresso nella stessa unità di misura di $|H(f)|$ ed esprimere il modulo della FdT in decibel rispetto a questo valore di riferimento, ossia come:

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|H(f)|}{H_0} \right)$$

In Fig. 5 è riportata, ad esempio, la risposta in frequenza di un dispositivo che ha il comportamento di un sistema passa-basso.

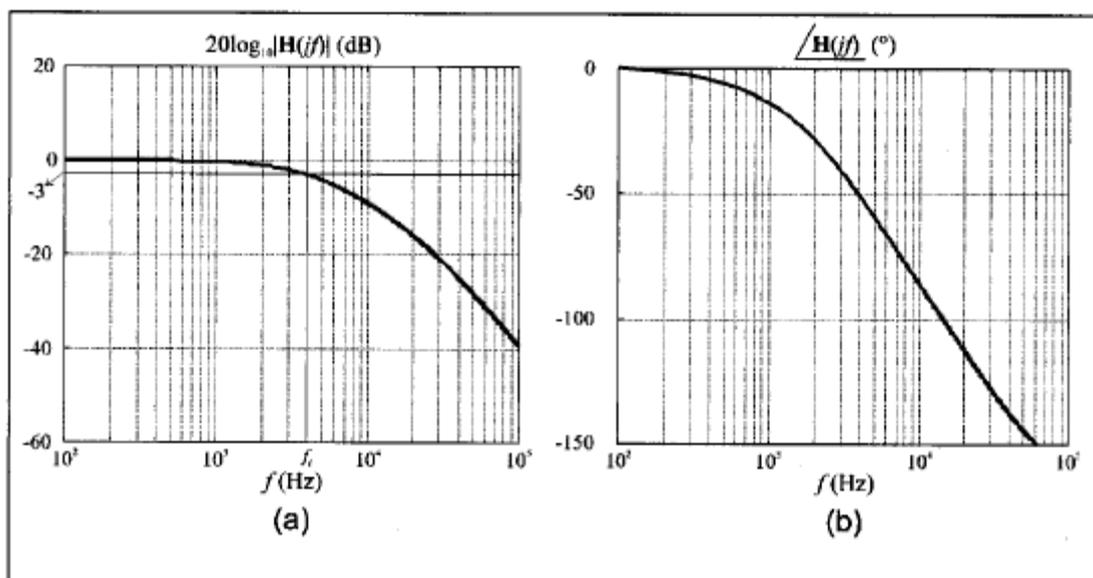


Figura 5: Risposta in frequenza di un sistema passa-basso

I sistemi di tipo passa-basso presentano alcune caratteristiche:

- da un certo valore di frequenza in poi l'ampiezza dell'uscita è attenuata o addirittura azzerata rispetto all'ingresso, cioè l'uscita è sempre nulla, qualunque sia l'ampiezza dell'ingresso (fig. 3.1 (a));
- la fase della FdT è sempre negativa, cioè l'uscita è sempre in ritardo rispetto all'ingresso (fig. 3.1 (b)).

Per sistemi con queste caratteristiche, in alternativa ai diagrammi di Bode, è spesso fornita la frequenza di taglio f_t , definita come la frequenza in corrispondenza della quale il modulo della FdT si riduce di 3 dB rispetto al valore in banda passante.

Se il dispositivo di misurazione è passa-banda, sono fornite le frequenze di taglio inferiore e superiore, che permettono di individuare il campo di frequenza entro il quale il modulo della FdT è costante a meno di 3 dB. Si osservi tuttavia che una variazione di 3 dB corrisponde ad una variazione di ampiezza di circa il 30%, che generalmente è molto più elevata dell'incertezza strumentale. Da un punto di vista metrologico è quindi conveniente fornire il comportamento dinamico di un dispositivo per misurazione nella forma di intervallo di frequenza in cui il modulo della FdT è compreso in una fascia di tolleranza assegnata (fig. 6 (a)); nel caso in cui è importante conoscere la relazione temporale tra ingresso ed uscita, è inoltre indicato l'intervallo di frequenza entro il quale la fase della FdT è minore di un certo valore (fig. 6 (b)).

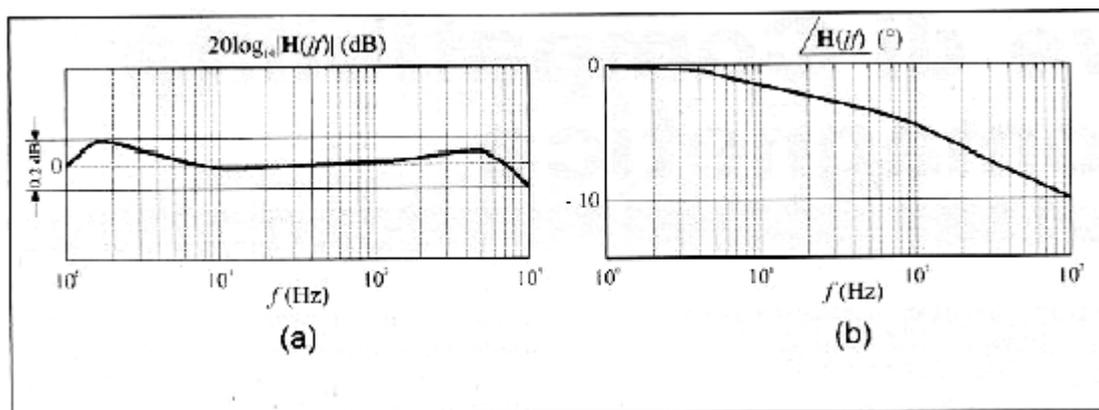


Figura 6: Risposta in frequenza di un sistema passa-banda

Infine, per completezza, si riporta di seguito il diagramma di Bode del modulo di un sistema passa-alto che ha la proprietà di attenuare o addirittura annullare l'ampiezza dell'uscita se la sua frequenza è inferiore alla frequenza di taglio.

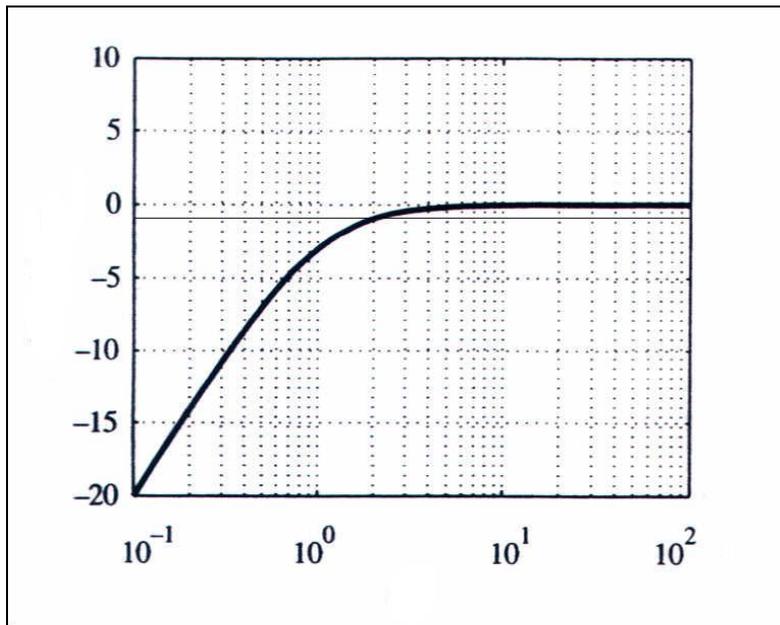


Figura 7: Modulo della risposta in frequenza di un sistema passa-alto

3.2 Dominio del tempo

La caratteristica più utilizzata per descrivere nel dominio del tempo il comportamento in regime dinamico di un sistema di misura è la sua risposta al gradino (cioè la risposta del sistema a un ingresso che è nullo per $t < 0$ e assume un valore finito e costante per $t > 0$), che permette di prevedere il comportamento dello strumento in seguito all'applicazione del misurando, o ad una sua rapida variazione. Il comportamento dei sistemi è solitamente ben rappresentato mediante modelli di sistemi di ordine zero, del primo o del secondo ordine, che sono di seguito discussi.

- Sistemi di ordine zero

Si definiscono sistemi di ordine zero quei sistemi che si possono sempre considerare funzionanti in regime stazionario. In Fig. 8 è riportata la risposta di un sistema di ordine zero ad un gradino unitario applicato all'istante $t=0$; come si vede l'uscita è ancora un gradino, ma presenta un ritardo, τ_0 , nella risposta che viene definito tempo morto.

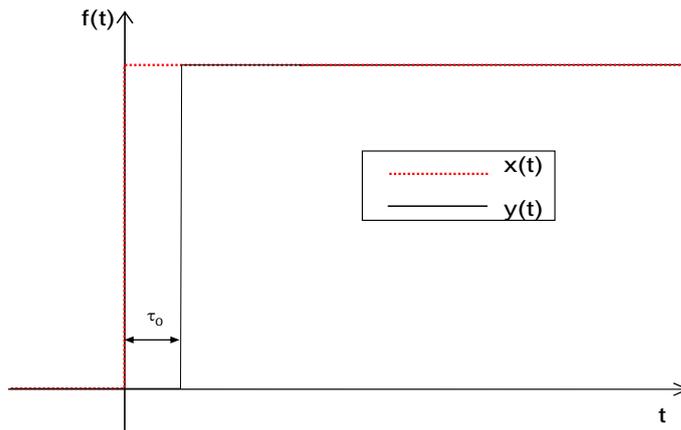


Figura 8: Risposta di un sistema del ordine zero ad un gradino

- **Sistemi del primo ordine**

In Fig. 9 é riportata la risposta di un sistema del primo ordine ad un gradino unitario applicato al tempo $t = 0$, il sistema dopo un intervallo di tempo l'uscita inizia ad aumentare per raggiungere un valore di regime. Tale risposta può essere descritta con dei parametri sintetici:

tempo morto: è il tempo che intercorre dall'applicazione dell'ingresso al momento in cui il sistema raggiunge il 5% del valore di regime; in questo intervallo il sistema non risponde e quindi tale tempo deve essere più piccolo possibile;

tempo di salita: è il tempo che il sistema impiega per passare dal 10% al 90% del valore di regime;

tempo di risposta: è il tempo che il sistema impiega dall'istante 0 al 90% del valore di regime.

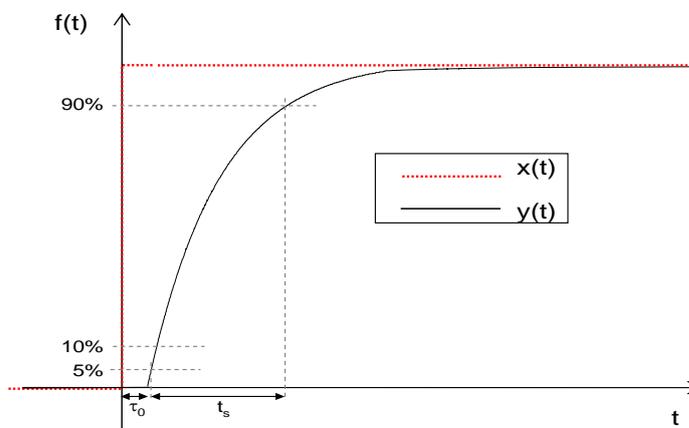


Figura 9: Risposta di un sistema del primo ordine ad un gradino

- Sistemi del secondo ordine

La risposta al gradino unitario di un sistema del secondo ordine è riportata nella figura 10. Per questi sistemi dopo un certo intervallo di tempo l'uscita supera il valore di regime (cioè presenta una sovralongazione) e poi presenta oscillazioni intorno al valore di regime (si ha una sovralongazione tanto più accentuata quanto minore è lo smorzamento).

I parametri comunemente impiegati per caratterizzare la risposta al gradino di un sistema del secondo ordine sono:

tempo di assestamento: (t_{ass}) è il tempo dopo il quale l'uscita resta confinata in un intervallo attorno al valore di regime;

tempo morto: è il tempo che il sistema impiega a passare dallo 0 al 5% del valore di regime;

tempo di salita: è il tempo che il sistema impiega per passare dal 10% al 90% del valore di regime;

sovralongazione: (A_1) rappresenta l'ampiezza del picco massimo del segnale rispetto al valore di regime $y(\infty)$;

fattore di smorzamento: è un indice di quanto diminuisce l'ampiezza delle oscillazioni, ed è il rapporto tra il secondo picco e il primo picco del segnale considerato (A_2/A_1).

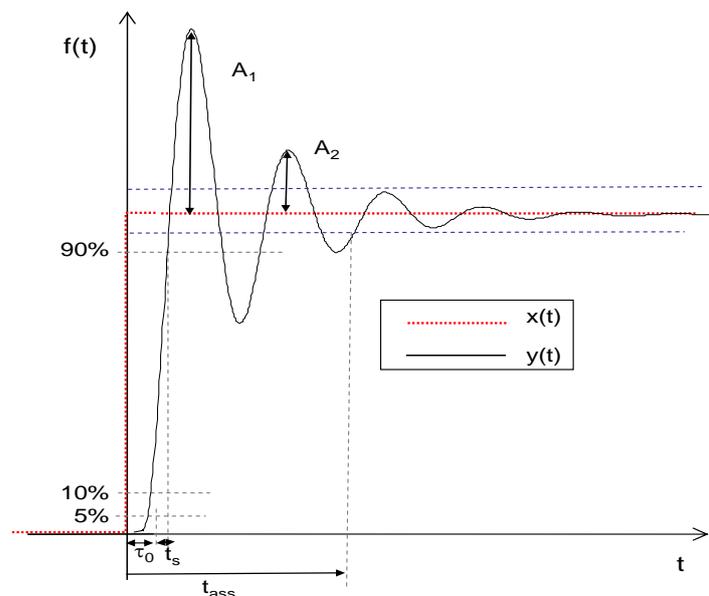


Figura 10: Risposta di un sistema del secondo ordine ad un gradino

Tra i dispositivi per misurazione, gli strumenti elettromeccanici a indice sono un esempio di sistemi il cui comportamento è ben descritto da un modello del secondo ordine. Questi strumenti sono infatti progettati in modo che l'indice raggiunga il valore di regime con moto oscillatorio (smorzamento inferiore all'unità) caratterizzato da una sovraelongazione inferiore al 30% del valore di regime ed un tempo di assestamento di circa 4 s entro una fascia di ampiezza pari allo 0,75% del valore di regime. Questo tipo di comportamento permette all'operatore di verificare che l'equipaggio mobile dello strumento sia in grado di muoversi liberamente e non presenti quindi problemi di natura meccanica.

Se il sistema non è rappresentabile con un modello lineare, il suo comportamento dinamico può essere di difficile interpretazione, specialmente se si vogliono definire parametri che ne rappresentino adeguatamente il funzionamento per un ampio campo di variabilità dell'ingresso.

Di solito ci si limita a fornire la funzione di conversione (cioè la relazione che lega il segnale di ingresso a quello di uscita) in condizioni di funzionamento stazionarie, precisando in qualche modo il campo di variabilità dell'ingresso entro il quale si può presumere che tali variazioni siano inapprezzabili.

Ad esempio, si indica la velocità di variazione massima raggiungibile dall'ingresso (**limite di velocità**), cioè il valore massimo della derivata prima del segnale di ingresso. Altre volte, si fornisce un **limite in frequenza** (una sorta di frequenza di taglio) per il segnale di ingresso, per la validità della funzione di conversione.

Si può concludere che di volta in volta, secondo il tipo di non linearità presente e secondo il tipo di ingresso che si prevede verrà applicato al sistema, si forniscono indicazioni che consentono di sapere entro quali limiti si può impiegare il suddetto sistema per far in modo che il suo comportamento coincida con quello in regime stazionario.

Altri parametri da tenere in considerazione sono:

tempo di recupero: è il tempo necessario al sistema per tornare al normale funzionamento dopo un evento insoluto (guasto, black-out,...);

tempo di warm-up: è il tempo di "riscaldamento", prima del quale l'uscita non è affidabile perché non rispetta le caratteristiche dello strumento.