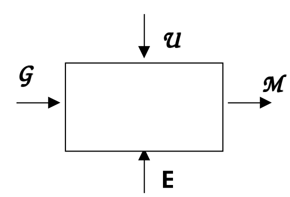
Capitolo 3

Strumenti di misura

Le operazioni di misurazione delle grandezze fisiche vengono effettuate per mezzo degli *strumenti di misura* (in inglese *measuring instruments*). Nella pratica quotidiana della ricerca scientifica o delle applicazioni tecnologiche si utilizzano molti strumenti di diverso tipo, in genere prodotti in serie, ma talora anche realizzati *ad hoc* per esigenze particolari. In questo Capitolo verranno introdotti alcuni criteri generali per la classificazione degli strumenti e per la valutazione delle loro prestazioni.

3.1 – Elementi funzionali

In linea di principio, il funzionamento di uno strumento di misura può essere schematizzato nel modo seguente: la grandezza $\mathcal{G}$ da misurare viene confrontata con il campione di unità di misura $\mathcal{U}$; il risultato della misurazione, cioè il valore X della misura, viene presentato in uscita dallo strumento, in genere trasformato nel valore Z di una nuova grandezza $\mathcal{M}$ di facile lettura (ad es. lo spostamento di un indice su una scala graduata). Nella figura, la quarta freccia (E) rappresenta l'energia che in molti casi deve essere fornita dall'esterno allo strumento.



Alcuni pochi strumenti presentano una struttura logica semplice, in cui la grandezza $\mathcal{G}$ viene confrontata direttamente con il campione $\mathcal{U}$.

Esempio: Un'*asta millimetrata* per misure di lunghezza. La grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso è la lunghezza che si vuole misurare. Il campione $\mathcal{U}$ (in questo caso il millimetro) ed i suoi multipli sono incisi sull'asta. Anche la misura $X(\mathcal{G})$ è leggibile direttamente sull'asta.

Nella maggior parte dei casi la struttura logica dello strumento è più complessa: il confronto con il campione avviene tramite l'operazione di *taratura* (in inglese *calibration*), eseguita generalmente dal costruttore dello strumento. La grandezza $\mathcal{G}$ può subire più manipolazioni e trasformazioni in altre grandezze.

Esempio: Il *termometro a mercurio*. La grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso è la temperatura del fluido a contatto con il bulbo del termometro. La grandezza $\mathcal{M}$ in uscita è l'altezza della colonnina di mercurio nel cannello. Lo strumento è tarato in modo da poter leggere direttamente sulla scala graduata i valori $X(\mathcal{G})$ della grandezza in ingresso.

Per studiare la struttura logica di uno strumento, conviene considerarlo costituito da più *elementi funzionali*, ciascuno in grado di svolgere un ben determinato compito.

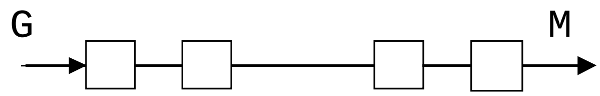
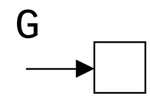


Fig. 3.1 – Rappresentazione schematica di uno strumento come sequenza di elementi funzionali (catena di misura).

Quando si vuole porre in evidenza la struttura logica interna di uno strumento come sequenza di elementi funzionali (Fig. 3.1) si usa spesso il termine *catena di misura* (ingl. *measuring chain*).

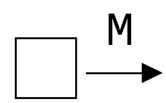
A) Elemento sensibile (sensore)



Il *sensore* (ingl. *sensor*) è il primo anello della catena, cioè l'elemento d'ingresso dello strumento, che viene direttamente influenzato dalla grandezza $\mathcal{G}$ da misurare.

Esempi: Il bulbo del termometro a mercurio. La giunzione bimetallica di un termometro a termocoppia. La coppia di puntali di uno strumento per misure di corrente elettrica o differenza di potenziale elettrico.

B) Elemento di uscita della misura



È l'ultimo anello della catena di misura. Trasmette all'esterno dello strumento il valore $Z(\mathcal{M})$ della grandezza in uscita, che fornisce l'informazione sul valore $X(\mathcal{G})$ della grandezza in ingresso.

L'elemento di uscita è spesso un visualizzatore (in inglese *display*), leggibile direttamente dall'operatore.

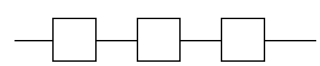
Esempi: Un ago mobile (ingl. *index*) su un quadrante graduato (ingl. *dial*). Un visualizzatore digitale. Il pennino di un registratore. Una stampante.

L'elemento di uscita non comunica necessariamente con l'uomo: esso può anche fornire segnali, tipicamente elettrici, adatti a costituire l'ingresso di un altro dispositivo meccanico o elettrico (ad es. un attuatore o un calcolatore elettronico).

Esempio: I termostati ambientali misurano la temperatura di una stanza e la confrontano con un valore pre-impostato. L'esito della misura non viene generalmente visualizzato, bensì inviato, sotto forma di segnale elettrico, ad un attuatore (pompa di circolazione o valvola) o ad un elaboratore elettronico di controllo.

C) Elementi intermedi: trasduttori, amplificatori, manipolatori

All'interno della catena di misura, la grandezza da misurare può subire una o più trasformazioni in altre grandezze, più comode da manipolare, trasmettere o visualizzare. Nella pratica è molto frequente il caso di grandezze meccaniche o termiche trasformate in grandezze elettriche.



L'elemento che esegue la trasformazione è detto *trasduttore* (ingl. *transducer*).

Spesso, all'interno della catena di misura, il valore di una grandezza è soggetto a delle variazioni: ad esempio, può venire amplificato, o subire operazioni di addizione o sottrazione. L'elevata flessibilità dei segnali elettrici in relazione a questo tipo di manipolazioni è uno dei motivi che giustificano la conversione di grandezze meccaniche o termiche in grandezze elettriche.

Esempio 1: In un termometro a resistenza elettrica il sensore è costituito da un resistore attraversato da una corrente elettrica costante. Una variazione di temperatura si traduce in una variazione della resistenza elettrica, che a sua volta produce una variazione della differenza di potenziale ai capi del resistore. Le deboli variazioni di differenza di potenziale vengono poi amplificate in modo da pilotare lo spostamento di un indice su una scala graduata opportunamente tarata.

Esempio 2: In una *bilancia elettronica* la grandezza $\mathcal{G}$ da misurare è la massa m. La bilancia trasforma la forza peso mg in una grandezza elettrica: una differenza di potenziale o un'intensità di corrente. Le variazioni della grandezza elettrica vengono amplificate in modo da pilotare il visualizzatore, opportunamente tarato, dell'elemento di presentazione dei dati.

È bene notare che la suddivisione di uno strumento o di una catena di misura in elementi funzionali, se è in genere sempre possibile dal punto di vista logico, non necessariamente corrisponde ad una reale suddivisione fisica. È infatti frequente il caso che un solo componente fisico di uno strumento svolga contemporaneamente le funzioni logiche di due o più elementi funzionali.

3.2 – Classificazioni degli strumenti

ln relazione al loro modo di funzionamento, gli strumenti possono venire variamente classificati.

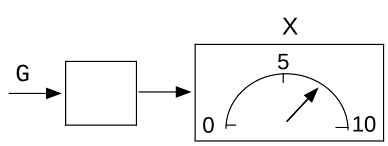
A) Strumenti con uscita a deviazione o a zero

Negli strumenti con **uscita a deviazione** la variazione del valore X della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso viene trasformata in una corrispondente variazione Z della grandezza $\mathcal{M}$ in uscita (ad es., la deviazione di un indice su una scala graduata). La catena di misura è aperta (Fig. 3.2, a sinistra).

Esempi: Il dinamometro, il termometro a mercurio, la bilancia pesa-persone.

Negli strumenti con **uscita a zero** il valore incognito X della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso viene posto a confronto con un valore noto Y della stessa grandezza. In genere, il confronto tra X e Y avviene per sottrazione: il valore noto Y viene variato finché la differenza $X - Y$ non risulta zero. L'elemento di presentazione dei dati è un *rivelatore di zero*. (Questo metodo di misurazione viene anche detto *ad azzeramento* o *per opposizione*). La catena di misura è chiusa, cioè presenta un ramo di ritorno (*retroazione*, in inglese *feedback*) che contiene un attuatore, manuale o automatico, in grado di far variare il valore noto Y (Fig. 3.2, a destra). Elemento fondamentale della catena chiusa è il manipolatore che esegue la sottrazione $X - Y$.
Gli strumenti con uscita a zero sono generalmente più accurati di quelli a deviazione, ma meno adatti a seguire grandezze variabili velocemente nel tempo.

Esempio: La bilancia a due piatti. La misurazione di una massa incognita m posta su un piatto richiede di variare manualmente il numero di masse campione poste sull'altro piatto fino a raggiungere l'equilibrio meccanico.



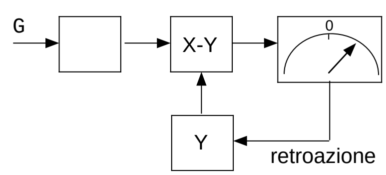


Fig. 3.2 – Confronto schematico tra uno strumento con uscita a deviazione (a sinistra) e uno strumento con uscita a zero (a destra). Nel primo caso la catena di misura è aperta, nel secondo caso è chiusa.

B) Strumenti analogici o digitali

Negli **strumenti analogici** (in inglese *analogue instruments*) il valore X della grandezza da misurare si trasforma, al termine della catena di misura, in un segnale di tipo analogico, cioè un segnale che può variare con continuità (deviazione di un indice, valore di una tensione elettrica, etc.)

Negli **strumenti digitali** (in inglese *digital instruments*), al termine della catena di misura il valore X viene trasformato in un numero, leggibile direttamente su di un visualizzatore oppure codificato sotto forma di segnali elettrici (ad esempio in codice binario) adatti ad essere accettati da un elaboratore elettronico.
La trasformazione del segnale analogico d'ingresso in un segnale digitale in uscita può essere ottenuta mediante congegni meccanici, ma generalmente è oggi realizzata per mezzo di dispositivi elettronici detti *convertitori analogico-digitali* (ADC = Analog to Digital Converter).

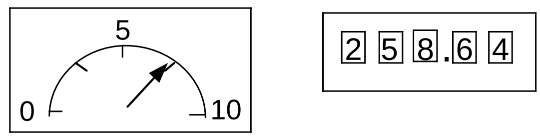


Fig. 3.3 – Visualizzatore di uno strumento analogico (a sinistra) e di uno strumento digitale (a destra).

Esempio: Una generica grandezza $\mathcal{G}$ viene preventivamente trasformata, per mezzo di uno o più trasduttori, in una differenza di potenziale elettrico V_i. Un modo relativamente semplice per realizzare la conversione analogico-digitale della differenza di potenziale V_i si basa sul *convertitore a singola rampa*. In questo dispositivo elettronico, una differenza di potenziale di riferimento V_r variabile linearmente nel tempo ($V_r = at$) viene prodotta ogni ΔT secondi. Durante la crescita della rampa $V_r = at$, si contano in sequenza gli impulsi prodotti da un generatore a frequenza costante, e si confronta il valore crescente V_r con il valore d'ingresso V_i utilizzando un componente elettronico detto *comparatore*. Quando $V_r = V_i$ il comparatore invia un segnale di stop al contatore di impulsi, che viene così fermato: il numero n_i di impulsi contati è proporzionale al valore d'ingresso V_i, e può venire direttamente visualizzato oppure inviato ad un elaboratore. Ogni singola conversione analogico-digitale richiede un intervallo di tempo ΔT (tempo di campionamento, in inglese *sampling time*).

C) Strumenti indicatori o registratori

Negli **strumenti indicatori** (in inglese *displaying instruments*) il valore della misura viene presentato all'operatore, sotto forma analogica o digitale, per la sola durata dell'operazione di misura.

Esempi: La bilancia a due piatti, il termometro a mercurio.

Negli **strumenti registratori** (in inglese *recording instruments*) il valore della misura viene immagazzinato, in forma analogica o digitale, su opportuni supporti: carta da grafico, nastro o disco magnetico, memorie a semiconduttore, etc.

Esempi: Un termometro registratore, un barometro registratore.

D) Strumenti attivi o passivi

Gli **strumenti passivi** prelevano l'energia necessaria al loro funzionamento dal sistema su cui viene effettuata la misurazione.

Gli **strumenti attivi** sono invece forniti di una sorgente di energia estranea al sistema in misura (alimentazione dalla rete elettrica, batterie, etc.).

Esempio: Un termometro a mercurio è uno strumento passivo. Un termometro a resistenza elettrica è uno strumento attivo.

3.3 – Caratteristiche statiche degli strumenti

Le caratteristiche di rendimento di uno strumento individuano la qualità delle misure che lo strumento è in grado di eseguire. In questo paragrafo 3.3 e nel successivo 3.4 considereremo le principali caratteristiche *statiche*, relative cioè a misurazioni di *grandezze costanti nel tempo*. Nel paragrafo 3.5 accenneremo alle caratteristiche dinamiche, relative cioè alla misurazione di grandezze variabili nel tempo.

A) Campo di misura

Il *campo di misura* (in inglese *range of indication*) è l'intervallo di valori X della grandezza $\mathcal{G}$ in cui lo strumento esegue misure entro un prefissato grado di accuratezza.
Il campo di misura è limitato inferiormente dalla *portata minima* (in inglese *lower limit*) e superiormente dalla *portata massima*, detta anche *fondo scala* (in inglese *upper limit*). La *portata massima di sicurezza* (in genere maggiore del fondo scala) è il massimo valore di X applicabile senza danneggiare lo strumento.
In alcuni strumenti (detti strumenti *a più portate*) è possibile variare il campo di misura per mezzo di opportuni selettori (ad esempio ruotando la manopola di un commutatore).

Esempio: In un metro a nastro la portata minima è zero, la portata massima corrisponde alla lunghezza della scala graduata. Non c'è necessità di definire una portata massima di sicurezza.

Esempio: Nel termometro a mercurio il campo di misura è definito dai valori minimo e massimo incisi sulla scala graduata (ad es. -10°C e +100°C). Il valore massimo rappresenta generalmente anche la portata massima di sicurezza: esporre il termometro a temperature superiori può provocarne la rottura.

B) Linearità

Uno strumento è detto *lineare* quando la curva di risposta, cioè la relazione che collega i valori Z della grandezza $\mathcal{M}$ in uscita ai valori X della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso, è lineare.

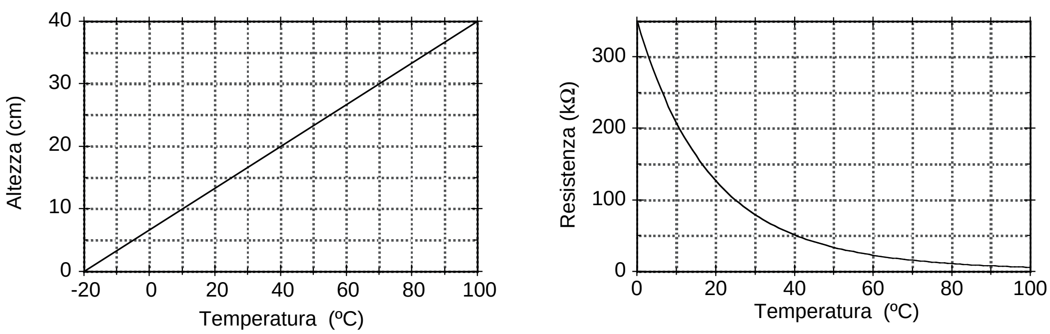


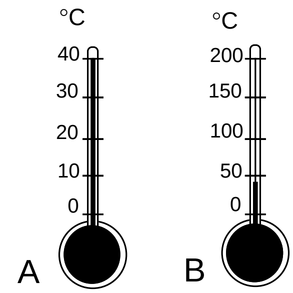
Fig. 3.4 – Nel termometro a mercurio (a sinistra) la relazione tra temperatura e altezza della colonnina è lineare. In un termometro con sonda a semiconduttore (a destra) la relazione tra temperatura e resistenza elettrica non è lineare.

Esempio 1: Il termometro a mercurio è con ottima approssimazione uno strumento lineare. Nel campo tipico di utilizzo, il coefficiente di espansione termica del mercurio è costante, e l'altezza della colonnina di mercurio cresce linearmente con la temperatura (Fig. 3.4, a sinistra).

Esempio 2: Un termometro con sonda a semiconduttore (termistore) è un buon esempio di strumento *non* lineare. La grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso è la temperatura, la grandezza $\mathcal{M}$ in uscita è la resistenza elettrica del termistore. Al crescere della temperatura la resistenza elettrica del termistore si riduce in modo non lineare (Fig. 3.4, a destra).

C) Sensibilità

La *sensibilità* (in inglese *sensitivity*) è il rapporto $\Delta Z/\Delta X$ tra variazione del valore della grandezza $\mathcal{M}$ in uscita dallo strumento (ad es. la deviazione di un indice) e corrispondente variazione del valore della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso (grandezza da misurare).



Esempio 1: In un termometro a mercurio la grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso è la temperatura, la grandezza $\mathcal{M}$ in uscita è l'altezza della colonnina di mercurio. Facendo riferimento alla figura, il termometro A ha una sensibilità 5 volte maggiore del termometro B, in quanto la stessa variazione di temperatura provoca una variazione 5 volte maggiore dell'altezza della colonnina di mercurio.

Negli *strumenti lineari* la sensibilità $\Delta Z/\Delta X$ è costante in tutto il campo di misura, e corrisponde alla pendenza della retta nel grafico di Z in funzione di X.

Esempio 2: Nel caso del termometro a mercurio della Fig. 3.4 (a sinistra) la sensibilità $\Delta h/\Delta\theta$ ha il valore costante di 0.33 cm/°C.

Negli *strumenti non lineari* la sensibilità non è costante nel campo di misura; la pendenza della curva $Z(X)$ non è infatti costante. La sensibilità va pertanto definita come la derivata dZ/dX.

Esempio 3: Nel termometro con sonda a semiconduttore della Fig. 3.4 (a destra) il valore assoluto $|dR/d\theta|$ della sensibilità varia da 18.4 k$\Omega/°C$ (a 0 °C) a 0.18 k$\Omega/°C$ (a 100 °C).

Negli *strumenti analogici* il visualizzatore è spesso costituito da una scala graduata. Si usa talora esprimere la sensibilità $\Delta Z/\Delta X$ considerando come valore ΔZ il numero di divisioni sulla scala graduata. La sensibilità è allora l'inverso della risoluzione (vedi più sotto).

Esempio 4: Un regolo millimetrato ha la sensibilità $1/\Delta X$ di 1 divisione per millimetro.

Negli *strumenti digitali* la sensibilità va valutata considerando la grandezza (analogica) $\mathcal{M}$ a monte del convertitore analogico/digitale di uscita.

Si chiama *soglia di sensibilità* il più piccolo valore della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso capace di provocare una variazione della grandezza $\mathcal{M}$ in uscita.

D) Risoluzione di lettura

La risoluzione di lettura (in inglese *display resolution*) è la più piccola variazione misurabile ΔX del valore X della grandezza $\mathcal{G}$ in ingresso, corrispondente alla minima variazione percepibile ΔZ del valore Z della grandezza $\mathcal{M}$ in uscita.

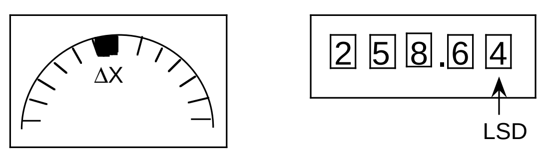


Fig. 3.5 – Risoluzione di lettura di uno strumento analogico (a sinistra) e di uno strumento digitale (a destra).

Negli **strumenti analogici** la risoluzione di lettura corrisponde generalmente alla distanza minima tra due incisioni della scala graduata (Fig. 3.5, a sinistra).

Negli **strumenti digitali** la risoluzione di lettura corrisponde al valore unitario della cifra meno significativa (*LSD* = Least Significant Digit) (Fig. 3.5, a destra)

Esempi: Le aste millimetrate (righe da disegno) hanno generalmente risoluzione di lettura $\Delta X = 1$ mm. I calibri a vite micrometrica hanno generalmente risoluzione di lettura $\Delta X = 0.01$ mm.

Nota: Sensibilità e risoluzione sono tra di loro strettamente correlate. Per ridurre la risoluzione di uno strumento è in genere necessario aumentare la sua sensibilità. Come abbiamo visto più sopra, per gli strumenti analogici talora la sensibilità viene espressa come l'inverso $1/\Delta X$ della risoluzione.

Nota: Non esiste tuttora un diffuso accordo sulla nomenclatura utilizzata in questo paragrafo. Talora si usa il termine *potere risolvente* per indicare l'inverso della risoluzione, $1/\Delta X$, oppure il rapporto tra l'estensione del campo di misura e la risoluzione. È pure frequente, seppure evidentemente sbagliato, l'uso del termine *risoluzione* per indicare il *potere risolvente*. Il significato reale dei vari termini risulta in genere chiarito dal contesto.

E) Discrezione

Uno strumento di misura provoca generalmente una perturbazione al sistema su cui viene eseguita la misurazione. Il valore X della grandezza $\mathcal{G}$ viene pertanto alterato dalla presenza dello strumento di misura. Si parla di maggiore o minore *discrezione* (in inglese *transparency*) di uno strumento in relazione all'entità di questa alterazione.

Esempio 1: La misurazione di una massa con una bilancia non altera il valore della massa stessa; la bilancia è uno strumento discreto.

Esempio 2: La misurazione della temperatura di un corpo richiede uno scambio di calore tra il corpo e il termometro, e quindi altera lo stato termico del corpo stesso.

Esempio 3: L'applicazione di un voltmetro ad un circuito elettrico per misurare una differenza di potenziale altera le caratteristiche elettriche del circuito stesso.

Nel §3.2 abbiamo introdotto la distinzione tra strumenti attivi e passivi. Evidentemente uno strumento passivo perturba il sistema soggetto a misurazione, in quanto ne preleva l'energia necessaria per il suo funzionamento (si parla in questo caso anche di *consumo* di uno strumento).
Va tuttavia tenuto presente che anche per gli strumenti attivi la perturbazione, se può spesso venire ridotta al di sotto dei livelli ritenuti accettabili per misure macroscopiche, non può mai venire completamente eliminata. In particolare, a livello di sistemi atomici o subatomici la perturbazione indotta sul sistema dalla misurazione non è mai trascurabile.

F) Limiti d'impiego

Il funzionamento di uno strumento risente delle condizioni ambientali. Oltre alla grandezza $\mathcal{G}$ che si vuole misurare, altre grandezze (dette *grandezze d'influenza*, in inglese *influence quantities*) possono influire sul valore della misura: temperatura, pressione, umidità, intensità delle vibrazioni meccaniche, accelerazione, tensione di alimentazione, campi elettromagnetici, etc.

Le *condizioni d'impiego* (in inglese *operating conditions*) di uno strumento definiscono gli intervalli dei valori delle grandezze d'influenza nel cui ambito lo strumento esegue misurazioni entro un prefissato grado di accuratezza.

Esempio: Dalle caratteristiche tecniche di una bilancia elettronica:

temperatura di operazione	$0 \div 40$ C
livello sopra/sotto il mare	-3400 m ... + 6000 m
umidità relativa dell'aria	15 % $\div$ 85 %
vibrazioni	0.3 m/s^2

Eseguire una misurazione al di fuori dei limiti d'impiego dello strumento comporta l'introduzione di errori nella misura, e talora anche il danneggiamento dello strumento stesso.

3.4 – Accuratezza di uno strumento

Come abbiamo già accennato al § 1.3, il risultato della misurazione di una grandezza fisica, qualsiasi sia lo strumento utilizzato, non è mai un valore numerico X univocamente definito.

Come minimo, ogni strumento è infatti caratterizzato da una **risoluzione di lettura** finita ΔX, per cui non è in grado di fornire informazioni su variazioni della grandezza inferiori a ΔX. Per effetto della risoluzione finita, il risultato di una singola misurazione è pertanto un intervallo continuo di valori, di ampiezza pari a ΔX.
Per convenzione, la misura di una grandezza fisica viene generalmente espressa nella forma

$$X = X_0 \pm \delta X, \qquad (3.4.1)$$

dove X_0 è un valore centrale che individua la posizione dell'intervallo di valori sull'asse X e δX è l'incertezza dovuta alla risoluzione di lettura.
Per il momento opereremo la scelta, del tutto ragionevole, di esprimere l'incertezza dovuta alla risoluzione come $\delta X = \Delta X/2$. Nel Cap. 4 riprenderemo in considerazione l'argomento in modo più approfondito e vedremo che in molti casi può essere più conveniente esprimere l'incertezza dovuta alla risoluzione in modo diverso (§4.5).

Negli *strumenti digitali* (Fig. 3.5, a destra) il valore centrale X_0 è dato direttamente dal valore che compare sul visualizzatore. La risoluzione ΔX e l'incertezza δX sono date rispettivamente dal valore unitario della cifra meno significativa (LSD) e dalla sua metà.

Esempio: Si misura un intervallo di tempo τ con un cronometro digitale. Sul visualizzatore si legge `34.27` s. Il valore unitario della LSD è 0.01 s, cioè un centesimo di secondo. La misura andrà espressa come $\tau = (34.27 \pm 0.005)$ s.

Negli *strumenti analogici* la valutazione del valore centrale X_0 può essere diversa a seconda che l'estremo dell'oggetto da misurare (ovvero l'indice mobile su un visualizzatore) sia in prossimità di una incisione sulla scala graduata oppure cada all'incirca a metà tra due incisioni. Le due situazioni sono esemplificate nella Fig. 3.6. Nel primo caso il valore X_0 verrà letto direttamente sulla scala graduata; nel secondo caso si potrà attribuire a X_0 un valore intermedio rispetto ai valori delle due incisioni contigue.
Non è comunque prudente considerare una risoluzione ΔX inferiore alla distanza tra due tacche contigue, anche se quest'operazione potrebbe talora sembrare plausibile. In genere infatti la risoluzione di lettura di uno strumento è già ridotta dal costruttore al valore minimo compatibile con l'accuratezza globale.

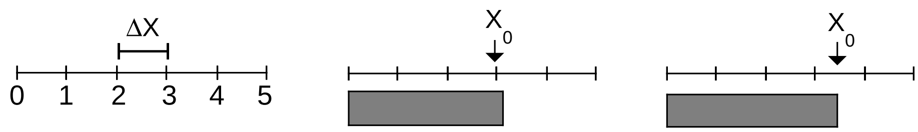


Fig. 3.6 – Misurazione con uno strumento analogico. A sinistra: rappresentazione schematica di una scala graduata, con $\Delta X = 1$ (le unità di misura dipendono ovviamente dal tipo di grandezza misurata e dalle caratteristiche dello strumento). Nella situazione rappresentata al centro, X=3±0.5. Nella situazione rappresentata a destra, X=3.5±0.5.

Esempio: Si misura l'altezza di un foglio di quaderno con una riga millimetrata. L'estremità del foglio appare equidistante dalle due tacche contigue corrispondenti a 296 e 297 mm. È plausibile considerare come valore centrale $X_0 = 296.5$ mm, ma può essere imprudente assumere una risoluzione inferiore alla distanza tra incisioni contigue (ΔX=1 mm).

Oltre alla risoluzione finita dello strumento, altri fattori possono influenzare il risultato e la qualità di una misurazione. Si tratta di fattori dipendenti dalla struttura dello strumento, dall'accuratezza della sua costruzione, dallo stato di manutenzione, dall'influenza di fattori ambientali, etc. Ne elenchiamo alcuni a titolo di esempio:

- difetti nella taratura (scarsa accuratezza del campione di riferimento, inaccurata procedura di taratura, etc.);
- difetti di calibrazione dello zero (ad es., negli strumenti elettronici lo zero subisce spesso una *deriva* nel tempo);

- attriti o giochi meccanici;
- effetti di grandezze d'influenza diverse dalla grandezza che si vuole misurare, ad es. temperatura, umidità, vibrazioni meccaniche, campi elettrici o magnetici, variazioni della tensione di alimentazione.

In genere, gli effetti di questi diversi fattori sulle prestazioni di uno strumento vengono divisi in due categorie:

a) Si parla di **errori sistematici** per gli effetti che si riproducono sempre nello stesso modo ogniqualvolta viene ripetuta una misurazione della stessa grandezza fisica.

b) Si parla di **errori casuali** (o *accidentali*) per gli effetti che si manifestano in modo diverso ed imprevedibile quando la misura di una grandezza fisica viene ripetuta.

Talora è necessario anche considerare la **stabilità**, cioè l'attitudine di uno strumento a fornire risultati poco dispersi in misurazioni ripetute sulla stessa grandezza ad intervalli di tempo lunghi rispetto alla durata di una singola misurazione (ad esempio giorni o settimane).

Con il termine **accuratezza** (in inglese *accuracy*) si fa riferimento alla qualità globale di uno strumento. L'accuratezza di uno strumento dipende dalla risoluzione di lettura, dall'influenza degli errori sistematici e casuali, dalla stabilità a lungo periodo.

L'accuratezza di uno strumento viene generalmente quotata nel manuale d'uso come un valore numerico di *incertezza* della misura, ossia nella forma $\pm\delta X$.
Se l'accuratezza non viene esplicitamente indicata sullo strumento o nel manuale d'uso, si sottintende che gli effetti degli errori sistematici e casuali e dell'instabilità a lungo periodo sono trascurabili rispetto alla risoluzione ΔX. In tal caso, come abbiamo già visto, si pone generalmente $\delta X = \Delta X/2$.

Esempio: Nei metri a nastro di uso corrente, con risoluzione di lettura $\Delta X = 1$ mm, non viene generalmente indicata l'accuratezza. Ciò significa che il costruttore garantisce che gli errori dovuti allo strumento non sono comunque superiori ad 1 mm.

Esempio: Nel manuale d'uso di un termometro digitale con risoluzione di lettura $\Delta T = 0.1°$C, l'accuratezza è quotata come $\delta T = \pm 0.4°$C tra -25 e +75°C. Evidentemente in questo caso l'incertezza globale δT è maggiore della risoluzione.

In questo paragrafo abbiamo introdotto, in modo piuttosto veloce, alcuni concetti molto importanti per la valutazione dell'accuratezza degli strumenti (effetti di risoluzione, errori casuali, errori sistematici). Come vedremo nel Capitolo 4, l'incertezza di una misura non dipende solo dalle caratteristiche intrinseche degli strumenti utilizzati ma anche da molti altri fattori esterni agli strumenti stessi. Nel Capitolo 4 affronteremo pertanto il problema dell'accuratezza delle misurazioni da un punto di vista più generale, e cercheremo di approfondire in modo sistematico le problematiche introdotte in questo paragrafo.

3.5 – Comportamento dinamico degli strumenti

Le *caratteristiche statiche* analizzate nel §3.3 riassumono le prestazioni degli strumenti per misurazioni di grandezze costanti nel tempo.
In questo paragrafo ci occuperemo, a livello puramente introduttivo, del *comportamento dinamico* degli strumenti, cioè della loro efficienza nella misurazione di grandezze variabili nel tempo.

A) Grandezze variabili nel tempo

La dipendenza dal tempo di una grandezza fisica può essere di varia natura.

Esempio 1: Consideriamo le oscillazioni di un pendolo. L'ampiezza Φ_0 delle oscillazioni non è costante nel tempo, a causa dello smorzamento dovuto agli attriti; per piccole oscillazioni la sua variazione è comunque lenta e generalmente Φ_0 può essere considerata costante per la durata di più periodi di oscillazione (Fig. 3.7, a sinistra).

Esempio 2: Un termometro a mercurio, mantenuto inizialmente in aria alla temperatura $T = 20°\mathrm{C}$, all'istante $t = t_0$ viene immerso in un recipiente contenente acqua alla temperatura $T = 80°\mathrm{C}$. La temperatura T dell'ambiente circostante il termometro varia nel tempo secondo una legge a gradino (Fig. 3.7, al centro):

$$T(t) \;=\; \begin{cases} 20°\mathrm{C} & \text{per } t < t_0 \\ 80°\mathrm{C} & \text{per } t \geq t_0 \end{cases}$$

Esempio 3: La differenza di potenziale elettrico delle reti di distribuzione europee varia nel tempo in modo sinusoidale secondo la legge $V(t) = V_0 \sin(\omega t + \phi)$, dove $\omega = 2\pi\nu$ corrisponde ad una frequenza $\nu = 50$ Hz (Fig. 3.7, a destra).

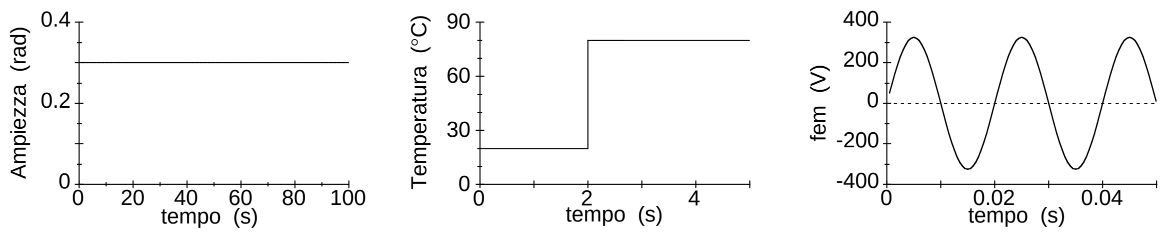


Fig. 3.7 – Dipendenza dal tempo del valore $X(t)$ di una grandezza fisica. Tre andamenti particolarmente importanti: costante (a sinistra), a gradino (al centro), sinusoidale (a destra).

Quando il valore $X(t)$ della grandezza che si vuole misurare non è costante, è necessario che lo strumento utilizzato sia in grado di seguirne con sufficiente velocità le variazioni nel tempo.
Conoscere il comportamento dinamico di uno strumento significa conoscere come varia nel tempo la grandezza in uscita $Z(t)$ al variare della grandezza in ingresso $X(t)$. Quanto più veloci sono le variazioni di $X(t)$, tanto più difficile è ottenere che $Z(t)$ riesca a seguirle con fedeltà.

Gli esempi considerati sopra (andamento costante, a gradino, sinusoidale) sono relativamente semplici. Nella realtà si possono incontrare dipendenze dal tempo anche molto più complicate. Esistono tuttavia tecniche matematiche che consentono di ricondurre qualsiasi funzione periodica o non periodica rispettivamente a una serie (la serie di Fourier) o a un integrale (l'integrale di Fourier) di funzioni sinusoidali di diverse frequenze. Conoscere la relazione tra $X(t)$ e $Z(t)$ per segnali sinusoidali di qualsiasi frequenza significa conoscere la *funzione di risposta* di uno strumento. Lo studio della funzione di risposta di uno strumento consente quindi in linea di principio di conoscerne il comportamento dinamico per qualsiasi tipo di dipendenza dal tempo della grandezza $X(t)$.

B) Modelli matematici per gli strumenti

Per studiare la relazione tra il valore $X(t)$ in ingresso ad uno strumento e il valore $Z(t)$ in uscita si cerca in genere di costruire un *modello matematico*.

Gli strumenti più semplici sono gli **strumenti di ordine 0**, nei quali la relazione tra $X(t)$ e $Z(t)$ è di diretta proporzionalità

$$a_0 Z \;=\; b_0 X \qquad \text{cioe}' \qquad Z \;=\; \frac{b_0}{a_0} X. \tag{3.5.1}$$

La costante di proporzionalità $k = b_0/a_0$ non è altro che la sensibilità statica introdotta al §3.3.
L'eq. (3.5.1) presuppone una risposta istantanea dei valori $Z(t)$ alle variazioni, comunque veloci, dei valori d'ingresso $X(t)$. Lo strumento di ordine zero è evidentemente un modello ideale; può costituire comunque una buona approssimazione per strumenti molto veloci rispetto alle variazioni di $X(t)$.

Negli **strumenti di ordine 1** la relazione tra il valore $X(t)$ della grandezza in ingresso e il valore $Z(t)$ della grandezza in uscita obbedisce ad un'equazione differenziale del primo ordine:

$$a_1 \frac{dZ}{dt} + a_0 Z = b_0 X. \tag{3.5.2}$$

La presenza del termine $a_1 (dZ/dt)$ nell'eq. (3.5.2) implica che le variazioni dei valori in ingresso X non possono venire seguite istantaneamente dai valori in uscita Z. Le variazioni di X si riflettono inizialmente nel termine $a_1 (dZ/dt)$; quanto più piccolo è il coefficiente a_1, tanto più grande è la derivata (dZ/dt) e tanto più velocemente il valore Z si adeguerà alle variazioni di X.

Negli **strumenti di ordine 2** la relazione tra $X(t)$ e $Z(t)$ è data da un'equazione differenziale del secondo ordine

$$a_2 \frac{d^2 Z}{dt^2} + a_1 \frac{dZ}{dt} + a_0 Z = b_0 X. \tag{3.5.3}$$

L'eq. (3.5.3) è l'equazione del moto di un oscillatore armonico smorzato e forzato.

Generalizzando, si può dire che in molti casi di interesse pratico il modello di uno strumento è descrivibile mediante un'**equazione differenziale lineare a coefficienti costanti**; a primo membro dell'equazione compaiono le derivate rispetto al tempo del valore in uscita $Z(t)$, a secondo membro compare il valore in ingresso $X(t)$:

$$a_n \frac{d^n Z}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Z}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{dZ}{dt} + a_0 Z = b_0 X. \tag{3.5.4}$$

L'ordine dell'equazione differenziale (3.5.4) individua l'*ordine dello strumento.*

Esempio 1: Il **termometro a mercurio** è descrivibile con un *modello matematico di ordine 1.* Indichiamo con T la temperatura letta sul termometro (grandezza in uscita), con T_{in} la temperatura del fluido in cui il termometro è immerso (grandezza in ingresso). La differenza tra la temperatura T del bulbo del termometro e la temperatura T_{in} del fluido provoca un flusso di calore Q dal fluido al bulbo secondo la legge

$$\frac{đQ}{dt} = -k \frac{S}{d} (T - T_{in}) \tag{3.5.5}$$

dove: t è il tempo, k è la conducibilità termica del vetro del termometro, S è l'area della superficie del bulbo, d è lo spessore del vetro. L'assorbimento o cessione di calore da parte del bulbo del termometro provoca una variazione di temperatura secondo la legge

$$đQ = C\, dT \tag{3.5.6}$$

dove C è la capacità termica del mercurio nel bulbo.
Eliminando la quantità di calore Q dalle eq. (3.5.5) e (3.5.6) si ottiene l'equazione differenziale del 1° ordine che lega la grandezza in ingresso T_{in} alla grandezza in uscita T:

$$C \frac{dT}{dt} + k \frac{S}{d} T = k \frac{S}{d} T_{in}. \tag{3.5.7}$$

Esempio 2: Il **dinamometro a molla** per la misurazione delle forze è descrivibile con un *modello matematico di ordine 2.* La grandezza in ingresso è la forza $\mathcal{F}$ che si vuole misurare, la grandezza in uscita è lo spostamento Z dell'estremità della molla cui viene applicata la forza. Il modello dello strumento è basato sull'equazione del moto $\sum f_i = m\,(d^2 Z/dt^2)$. Le forze agenti sono, oltre a $\mathcal{F}$, la forza elastica della molla $F_e = -kZ$ e la forza di attrito viscoso $F_a = -\eta(dZ/dt)$. L'equazione differenziale che collega la grandezza in ingresso $\mathcal{F}$ alla grandezza in uscita Z è del 2° ordine:

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + \eta \frac{dZ}{dt} + k Z = \mathcal{F}. \tag{3.5.8}$$

Esempio 3: Lo **strumento a bobina mobile** per la misurazione delle correnti elettriche è descrivibile con un *modello matematico di ordine 2*. La grandezza in ingresso è la corrente elettrica J, la grandezza in uscita è l'angolo ϕ di deviazione dell'indice. Schematicamente lo strumento è costituito da una bobina che può ruotare intorno al suo asse di simmetria, con momento d'inerzia $\mathcal{I}$. La bobina è immersa in un campo d'induzione magnetica radiale B generato dai due poli di un magnete permanente. Quando la bobina è percorsa da una corrente J, risente di un momento di forza proporzionale al prodotto della corrente per il campo d'induzione magnetica, $\tau_e = cBJ$, cui si oppone un momento di forza elastica proporzionale all'angolo di rotazione, $\tau_e = -k\phi$. Se si tiene conto anche di un momento di forza di smorzamento viscoso, $\tau_v = -\eta(d\phi/dt)$, si ottiene infine l'equazione differenziale del 2° ordine che collega la corrente in ingresso J all'angolo di rotazione in uscita ϕ:

$$\mathcal{I}\,\frac{d^2\phi}{dt^2} \;+\; \eta\,\frac{d\phi}{dt} \;+\; k\,\phi \;=\; (cB)\,J. \tag{3.5.9}$$

C) Strumenti di 1° e 2° ordine

Una volta nota la dipendenza dal tempo della grandezza in ingresso $X(t)$, l'andamento $Z(t)$ della grandezza in uscita può essere calcolato risolvendo l'equazione differenziale che descrive lo strumento.
Alcune nozioni di base sulla soluzione (o *integrazione*) delle equazioni differenziali lineari a coefficienti costanti di 1° e 2° ordine, del tipo (3.5.2) e (3.5.3), sono riportati in Appendice C.1. Richiamiamo qui di seguito alcuni concetti fondamentali.
Le eq. (3.5.2) e (3.5.3) sono dette *equazioni non omogenee*, in quanto la funzione $X(t)$ a secondo membro è diversa da zero. Uguagliando a zero il secondo membro nelle eq. (3.5.2) e (3.5.3) si ottengono le corrispondenti *equazioni omogenee*.

In generale la soluzione $Z(t)$ di un'equazione differenziale lineare a coefficienti costanti è la somma di due funzioni:

$$Z(t) \;=\; Z_{\rm tr}(t) \;+\; Z_{\rm st}(t), \tag{3.5.10}$$

dove $Z_{\rm tr}(t)$ è la soluzione generale dell'equazione omogenea;
$Z_{\rm st}(t)$ è una soluzione particolare dell'equazione non omogenea.
(Gli indici "tr" e "st" stanno, rispettivamente, per "transitorio" e "stazionario".)

Le funzioni $Z_{\rm tr}(t)$, soluzioni delle **equazioni omogenee**, dipendono solo dalla natura dello strumento e non dalla grandezza in ingresso $X(t)$.

Per l'equazione **omogenea del primo ordine**:

$$\frac{dZ}{dt} \;+\; \gamma\,Z \;=\; 0; \qquad\qquad (\gamma = a_0/a_1) \tag{3.5.11}$$

è facile verificare che

$$Z_{\rm tr}(t) \;=\; Z_0\,e^{-\gamma t}. \tag{3.5.12}$$

L'equazione **omogenea del secondo ordine** può essere scritta nella forma

$$\frac{d^2Z}{dt^2} \;+\; 2\gamma\,\frac{dZ}{dt} \;+\; \omega_0^2 \;=\; 0; \qquad\qquad (2\gamma \;=\; a_1/a_2; \quad \omega_0^2 = a_0/a_2). \tag{3.5.13}$$

Si tratta dell'equazione del moto dell'oscillatore armonico non forzato: ω_0 è la frequenza angolare propria, γ è il fattore di smorzamento.
Si hanno tre soluzioni, a seconda che γ è minore, uguale o maggiore di ω_0:

$$\text{se } \gamma < \omega_0, \quad Z_{\rm tr}(t) \;=\; Z_0\,e^{-\gamma t}\,\sin(\omega_s t \,+\, \phi) \qquad\qquad (\omega_s^2 \;=\; \omega_0^2 - \gamma^2) \tag{3.5.14}$$

$$\text{se } \gamma = \omega_0, \quad Z_{\rm tr}(t) \;=\; (Z_1 \,+\, Z_2 t)\,e^{-\gamma t} \tag{3.5.15}$$

$$\text{se } \gamma > \omega_0, \quad Z_{\rm tr}(t) \;=\; Z_1\, e^{-(\gamma-\delta)t} \,+\, Z_2\, e^{-(\gamma+\delta)t} \quad (\delta \;=\; \sqrt{\gamma^2-\omega_0^2}) \tag{3.5.16}$$

I parametri γ e ω_0 dipendono dalle caratteristiche dello strumento. I parametri Z_0, Z_1, Z_2 dipendono dalle condizioni iniziali.
Le soluzioni $Z_{\rm tr}(t)$ contengono sempre un fattore esponenziale negativo di smorzamento, del tipo $\exp(-\gamma t)$. Per $t \to \infty$ le funzioni $Z_{\rm tr}(t) \to 0$, e $Z(t) \to Z_{\rm st}(t)$: le soluzioni delle equazioni omogenee hanno perciò un carattere *transitorio.*
Il parametro γ misura la *prontezza* dello strumento, cioè la velocità con cui la soluzione transitoria si spegne e lo strumento si adegua alle variazioni della grandezza in ingresso. L'inverso di γ, cioè $\tau = 1/\gamma$, ha le dimensioni di un tempo ed è chiamato *costante di tempo* dello strumento. Il fattore di smorzamento esponenziale viene spesso espresso nella forma: $\exp(-t/\tau)$.

Le soluzioni particolari $Z_{\rm st}$ delle **equazioni non omogenee** (3.5.3) e (3.5.4) dipendono dalla forma della funzione $X(t)$ in ingresso. Le soluzioni $Z_{\rm st}$ descrivono l'andamento *stazionario*, asintotico per $t \to \infty$.

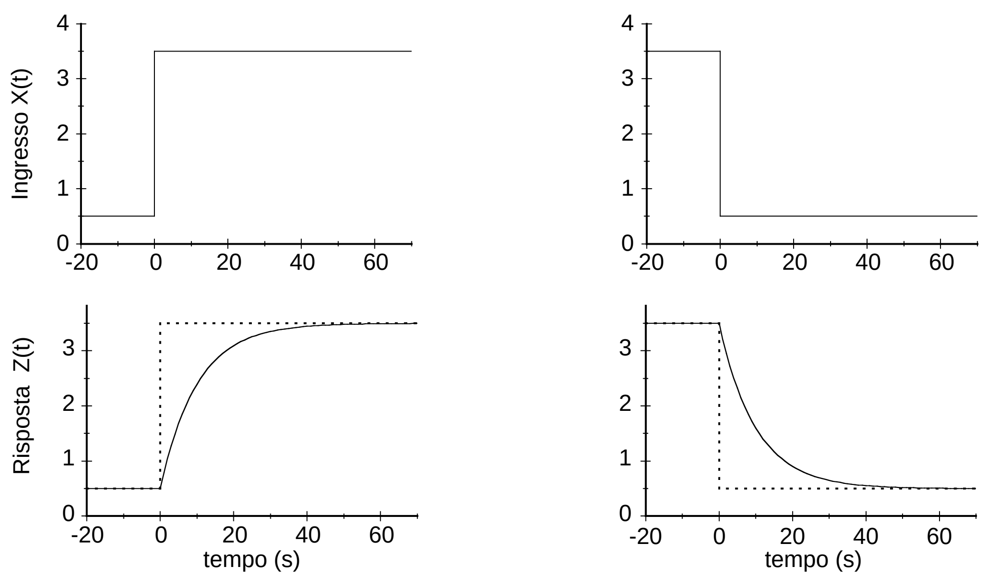


Fig. 3.8 – Risposta di uno strumento del 1° ordine ad un ingresso a gradino. In alto due possibili ingressi. In basso le corrispondenti risposte (linea continua).

D) Risposta ad un ingresso a gradino

Consideriamo a titolo di esempio il caso in cui la grandezza da misurare ha una dipendenza dal tempo descritta da una funzione a gradino (Fig. 3.5, al centro):

$$X(t) \;=\; \begin{cases} X_0 & \text{per } t < 0 \\ X_1 & \text{per } t > 0 \end{cases} \tag{3.5.17}$$

e supponiamo che per $t < 0$ lo strumento abbia avuto il tempo di stabilizzarsi alla risposta stazionaria $Z \;=\; (b_0/a_0)\, X_0$.

Esempio 1: Un termometro a mercurio, inizialmente in equilibrio in un ambiente alla temperatura T_0, all'istante $t = 0$ viene immerso in un fluido alla temperatura T_1.

Esempio 2: Ad un dinamometro disposto in verticale, inizialmente scarico, viene appesa all'istante $t = 0$ una massa m.

Esempio 3: All'istante $t = 0$ i morsetti d'ingresso di un voltmetro a bobina mobile vengono collegati ad una sorgente di forza elettromotrice costante.

Studiamo cosa succede per $t > 0$. Se lasciamo passare un tempo sufficientemente lungo, al limite per $t \to \infty$, la soluzione transitoria $Z_{\rm tr}(t)$ si spegne e rimane la soluzione stazionaria

$$Z_{\rm st} \;=\; \frac{b_0}{a_0}\, X_1 \tag{3.5.18}$$

uguale per gli strumenti del 1° e del 2° ordine.

Sommiamo ora le due soluzioni transitoria e stazionaria.

Per gli **strumenti del 1° ordine** la soluzione transitoria $Z_{\rm tr}(t)$ (eq. 3.5.12) contiene la costante Z_0 dipendente dalle condizioni iniziali. La costante Z_0 può essere determinata studiando il comportamento di $Z(t)$ in corrispondenza del gradino in ingresso per $t = 0$ (vedi Appendice C.1):

$$Z(t) \;=\; \frac{b_0}{a_0}\,(X_0 - X_1)\, e^{-t/\tau} \;+\; \frac{b_0}{a_0}\, X_1. \tag{3.5.19}$$

Il valore in uscita $Z(t)$ si avvicina con andamento esponenziale al valore stazionario (Fig. 3.8).

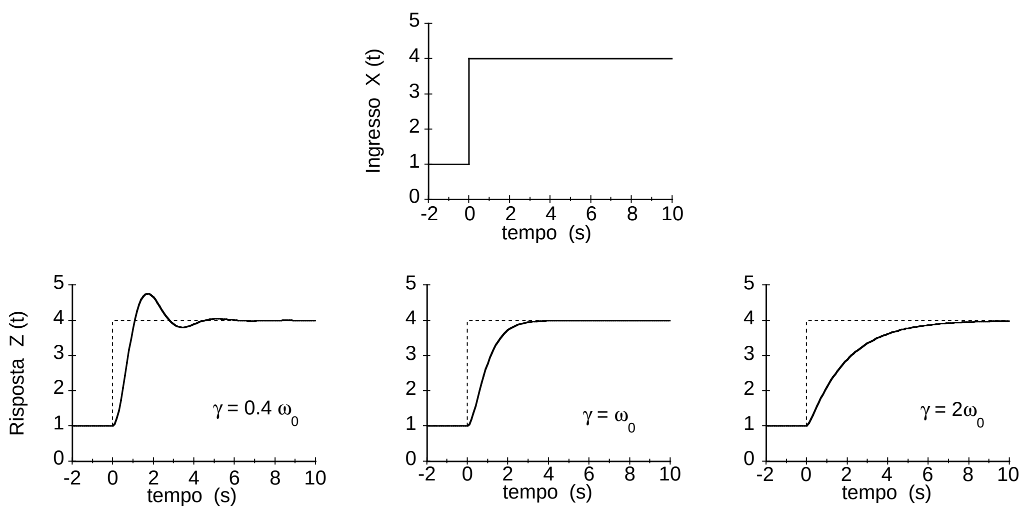


Fig. 3.9 – Risposta di uno strumento del 2° ordine ad un ingresso a gradino. In alto l'ingresso $X(t)$. Per semplicità si è posta la sensibilità statica $(b_0/a_0) = 1$. In basso le risposte $Z(t)$ per $\gamma = 0.4\,\omega_0$ (a sinistra), $\gamma = \omega_0$ (al centro:), $\gamma = 2\,\omega_0$ (a destra). Se $\gamma = \omega_0$ si parla di smorzamento critico.

Per gli **strumenti del 2° ordine** le soluzioni transitorie $Z_{\rm tr}(t)$ (eq. 3.5.13,14,15) contengono due costanti (Z_0 e ϕ oppure Z_1 e Z_2), che possono venire determinate studiando il comportamento sia di $Z(t)$ che della sua derivata prima dZ/dt in corrispondenza del gradino in ingresso per $t = 0$ (vedi Appendice C.1). Si hanno tre tipi di comportamento, a seconda che $\gamma < \omega_0$, $\gamma = \omega_0$ oppure $\gamma > \omega_0$ (Fig. 3.9).
Per $\gamma < \omega_0$ la risposta $Z(t)$ oscilla intorno al valore asintotico $Z_{\rm st}(t)$; le oscillazioni si smorzano tanto più velocemente quanto più γ è vicino a ω_0.
Per $\gamma > \omega_0$ la risposta $Z(t)$ si avvicina esponenzialmente al valore asintotico $Z_{\rm st}(t)$ senza mai oltrepassarlo; l'avvicinamento è tanto più veloce quanto più γ è vicino a ω_0.
Per $\gamma = \omega_0$ si ha la condizione ideale, detta di *smorzamento critico*: la risposta $Z(t)$ si avvicina al valore asintotico $Z_{st}(t)$ nel modo più veloce, senza però oltrepassarlo.

3.6 – Dispositivi di conteggio

Nei paragrafi precedenti di questo Capitolo ci siamo occupati degli strumenti per la misurazione diretta di grandezze fisiche (lunghezze, intervalli di tempo, masse, differenze di potenziale elettrico, etc.) A questo tipo di strumenti si fa ricorso anche per grandezze non misurabili direttamente, come la temperatura, sfruttando relazioni analitiche che le legano a grandezze misurabili direttamente.

Gli strumenti di cui ci siamo finora occupati non esauriscono però le esigenze dei laboratori di Fisica. Come abbiamo già osservato al § 1.5, esistono fenomeni fisici che si manifestano come eventi distribuiti casualmente nello spazio e/o nel tempo (si riveda la Fig. 1.3, a destra). Esempi tipici sono i decadimenti di isotopi radioattivi o le collisioni tra particelle elementari.

Sempre al § 1.5 abbiamo anche osservato che, a dispetto dell'assoluta casualità di questi fenomeni (o forse, come vedremo più avanti, sarebbe meglio dire proprio in ragione dell'assoluta casualità), se si osserva un numero sufficientemente elevato di eventi, è comunque possibile estrarre delle proprietà medie regolari e significative. Queste proprietà medie rappresentano delle grandezze fisiche, di fondamentale importanza in molti campi della Fisica moderna. Un esempio tipico di tali grandezze è la costante di disintegrazione di un particolare tipo di isotopo radioattivo.

È naturale quindi che si siano sviluppati strumenti specificamente destinati alla misura delle grandezze fisiche legate agli eventi casuali. Tali strumenti si basano evidentemente sul conteggio degli eventi casuali, e presentano principi di funzionamento e specifiche di prestazione peculiari.

Esempio: Un tipico esempio è rappresentato dal *contatore Geiger*, utilizzato per il conteggio di particelle di alta energia (ad esempio raggi cosmici o prodotti di decadimenti radioattivi). Il dispositivo è costituito (Fig. 3.10) da un recipiente metallico riempito di gas e contenente un filamento di tungsteno. Recipiente e filamento vengono mantenuti a potenziale elettrico diverso. Una particella di alta energia può colpire e ionizzare una o più molecole del gas, provocando una reazione a valanga di ionizzazioni secondarie. Gli elettroni così prodotti vengono raccolti dal filamento (anodo) e danno luogo ad un segnale impulsivo, sotto forma di una differenza di potenziale ai capi del resistore R.

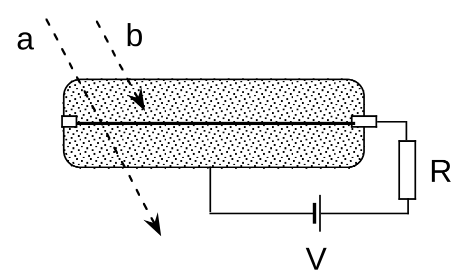


Fig. 3.10 – Rappresentazione schematica di un contatore Geiger. Recipiente e filamento centrale sono mantenuti ad una differenza di potenziale V. Le tracce a e b rappresentano le traiettorie di due particelle di alta energia.

Uno strumento di conteggio (come il contatore Geiger dell'esempio precedente) trasforma ogni evento casuale in un segnale elettrico impulsivo. Il numero di segnali elettrici viene poi contato, mediante opportuni circuiti elettronici, per un prefissato intervallo di tempo.

È dal numero di conteggi per unità di tempo che si possono ricavare i valori delle grandezze fisiche rilevanti per il fenomeno che si sta studiando. Allo scopo, avendo a che fare con fenomeni di natura casuale, sono necessarie peculiari metodologie di tipo probabilistico, che verranno introdotte più avanti; in particolare, i fenomeni di conteggio verranno trattati in dettaglio al § 6.4, in connessione con lo studio della distribuzione di Poisson. Anche le grandezze fisiche estratte dal conteggio di fenomeni casuali sono affette da incertezza. L'incertezza di natura puramente statistica, dovuta all'aleatorietà dei fenomeni, verrà pure studiata al § 6.4.

Qui ci limitiamo ad osservare che anche i dispositivi di conteggio possono introdurre distorsioni, e quindi incertezze. Senza entrare in troppi dettagli tecnici, ricordiamo che non tutti gli eventi casuali vengono trasformati in segnali impulsivi in uscita dallo strumento.

a) Alcuni eventi possono sfuggire del tutto alla rivelazione (nel caso del contatore Geiger, una particella può casualmente attraversare indisturbata il dispositivo, e quindi non venire rilevata).
b) Due o più eventi si possono presentare contemporaneamente al dispositivo, ed essere conteggiati come un unico evento.

c) Dopo la rilevazione di un evento casuale, il dispositivo richiede un intervallo di tempo (detto *tempo morto*) prima di essere in grado di rilevare un nuovo evento. Eventi separati da un intervallo di tempo inferiore al tempo morto non vengono distinti.

Si definisce come *efficienza di rivelazione* il rapporto tra il numero medio di eventi rilevati dal dispositivo di conteggio e il numero medio di eventi che si sono comunque verificati:

$$\text{efficienza di rivelazione} \;=\; \frac{\text{eventi contati}}{\text{eventi avvenuti}}.$$