

Misure e riferibilità

1 – Elementi fondamentali di una misura

Per la conoscenza del mondo fisico è necessario poterne quantificare le diverse grandezze.

L'informazione quantitativa su una grandezza fisica è ottenuta attraverso le *misurazioni*, impiegando adeguati *strumenti* secondo opportuni *metodi*.

Per esprimere in modo completo il risultato di una misurazione, cioè la *misura*, sono necessari almeno tre elementi: il valore della misura, l'unità di misura e l'incertezza.

Risultato della misurazione

E' il valore numerico assegnato alla grandezza misurata (*misurando*).

La misura di una grandezza si può ottenere per via diretta, ad esempio quando si utilizza un voltmetro per conoscere una tensione, oppure in modo indiretto, quando si misurano separatamente più grandezze per risalire, tramite un *modello* noto, ad un'altra grandezza che potremo chiamare dipendente dalle prime.

Unità di misura

Misurare una grandezza fisica significa attribuirle un numero che esprime, nella maggior parte dei casi, il rapporto fra l'entità di tale grandezza e una grandezza dello stesso tipo assunta come riferimento, l'*unità di misura*. Si deduce pertanto che eseguire una misurazione presuppone un confronto.

Un esempio intuitivo può essere quello di una bilancia con due piatti sui quali si pongono rispettivamente il peso incognito e dei pesi noti o campioni.

Incertezza di misura

Il numero che esprime la grandezza misurata potrà essere dichiarato solo con un certo margine di *incertezza*, in quanto numerosissimi fattori, più o meno influenti, si oppongono alla conoscenza esatta del mondo fisico.

2 - Le misure elettroniche

Conversione di grandezze fisiche in grandezze elettriche

Quasi tutte le grandezze fisiche possono essere misurate con metodi elettrici o elettronici. La pratica di lavorare con segnali elettrici si è affermata e consolidata soprattutto a causa della possibilità di trattare questi segnali con le tecniche dell'elettronica, sia analogica che numerica, in modo da consentire l'elaborazione e la trasmissione remota dell'informazione in modo potente, flessibile e affidabile.

Per conseguire tali vantaggi è necessario che alla generica grandezza fisica venga associato un

segnale elettrico tramite sensori e trasduttori.

Il termine sensore viene spesso utilizzato come sinonimo di trasduttore e, per la verità, non esiste una differenza netta e universalmente accettata. In molti casi si parla di sensore come del primo dispositivo, immediatamente a contatto o in prossimità della grandezza fisica da convertire, riservando al termine trasduttore il significato di comprendere anche l'insieme di tutte le altre parti accessorie che servono per la corretta conversione del segnale: l'alimentazione, i circuiti di condizionamento, di amplificazione e linearizzazione, la codifica, la trasmissione, ecc..

È disponibile sul mercato un numero veramente elevato di sensori e trasduttori basati su molteplici principi di funzionamento e in grado di convertire in segnali elettrici la maggior parte delle grandezze fisiche (spostamento, forza, coppia, pressione, portata, velocità, accelerazione, temperatura, umidità, concentrazione di sostanze, irraggiamento, radiazione, quantità elettromagnetiche, ecc).

I principi di funzionamento su cui si basano i sensori e i trasduttori più diffusamente impiegati sono: l'effetto piezoresistivo e piezoelettrico, l'effetto fotoelettrico e fotovoltaico, l'effetto Seebeck, l'effetto Hall, l'effetto Doppler, variazioni resistive, induttive e capacitive, fenomeni elettromagnetici ed elettrodinamici.

Una categoria di trasduttori in crescente espansione è basata sui sensori realizzati direttamente nel silicio, che spesso integrano nel medesimo *chip* sia le funzioni del sensore vero e proprio sia quelle di condizionamento (parziale o totale) dei segnali. Si giunge in tal modo a configurazioni dette sensori intelligenti (*smart sensors*), cui si affiancano sempre più spesso i microprocessori con compiti di elaborazione dedicata.

La trasduzione di una grandezza fisica può essere rappresentata come in Fig.2.1, dove compare anche il sistema utilizzatore della misura.

L'utilizzo della misura, qualora questa sia destinata ad un operatore, può avvenire secondo un'indicazione analogica su una scala graduata o tramite indicazione numerica su un *display* (tipicamente a *led* o a cristalli liquidi) oppure su monitor, per i sistemi basati su PC.

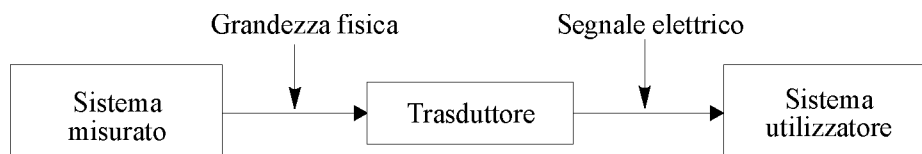


Fig.2.1 - *Trasduzione di una grandezza fisica.*

Un ambito in cui si effettuano diffusamente delle misure è quello dei sistemi di controllo (vedi Fig.2.2). In questi casi, la misura di una grandezza fisica costituisce il mezzo indispensabile per osservare il processo, al fine di prendere delle decisioni e adottare le appropriate strategie di controllo per ottenere i valori desiderati per le grandezze di interesse in uscita. Normalmente, nel caso delle misure in sistemi di controllo, si utilizza direttamente il segnale elettrico nei blocchi di gestione del processo, mentre non è sempre necessaria la visualizzazione del risultato.

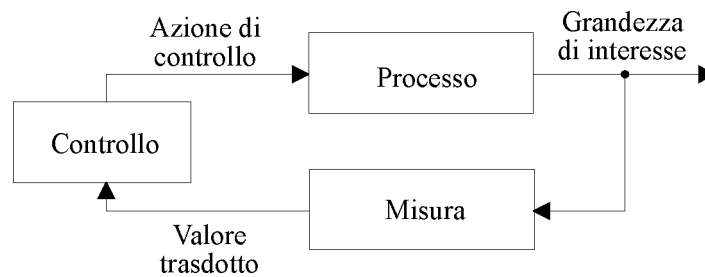


Fig.2.2 - La misura nei sistemi di controllo.

Grandezze di influenza

La misurazione di una quantità fisica è spesso resa difficile, o incerta, da fenomeni esterni che perturbano le condizioni ideali di lavoro. Tali cause, dette grandezze di influenza, vengono individuate dal costruttore o dal progettista del sistema, il quale ne dichiara gli effetti rispetto alle condizioni di riferimento nell'uso delle apparecchiature e dei sistemi di misura.

Come esempio, si consideri un sistema di misura generico (vedi Fig.2.3) contenente elementi tipici quali il trasduttore, lo strumento indicatore e l'eventuale sistema ausiliario (per esempio un alimentatore). Le linee punteggiate nella figura indicano altrettante possibili azioni delle grandezze di influenza.

Interpretazioni pratiche di tali azioni possono essere date con alcuni esempi specifici.

1) *L'interazione del sistema misurato sul trasduttore.*

Nel caso si consideri la misura di portata in un fluido caldo, la risposta del trasduttore di portata potrebbe essere modificata dalla temperatura del fluido.

2) *Il carico strumentale.*

Lo strumento elettrico che rileva l'uscita del trasduttore carica quest'ultimo con la propria impedenza di ingresso e pertanto si altera il valore della tensione a vuoto prodotta dal trasduttore.

3) *Stabilità del sistema ausiliario.*

Nel caso di sistemi dotati di alimentazione elettrica, il segnale prodotto può risentire dalla stabilità nel tempo della tensione di alimentazione.

4) *Le condizioni ambientali.*

Più in generale, tutte le condizioni ambientali (temperatura, umidità, altitudine; disturbi di natura elettromagnetica, ecc.) modificano le condizioni ideali di misura.

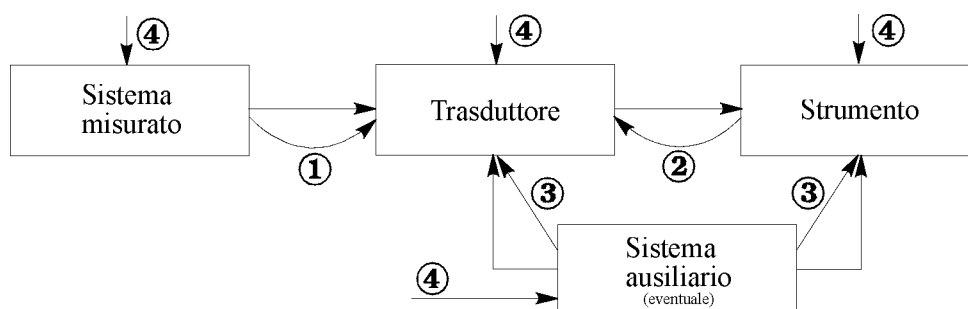


Fig.2.3 - Esempio per le grandezze di influenza.

Da quanto detto si deduce che ogni misura risulterà affetta in modo più o meno significativo da incertezze o errori che impediscono la conoscenza del vero valore della grandezza oggetto di misurazione.

3 - Errori di misura

Definizioni

Nel fare una misurazione, cioè nell'attribuire ad una grandezza fisica un valore numerico, rimane sempre un margine di dubbio, più o meno grande, sul risultato.

Se indichiamo con M il valore misurato di una grandezza e con V il valore vero o ideale di tale quantità, si può parlare di errore come della differenza:

$$E = M - V \quad (3.1)$$

Poiché dell'errore non sono noti né il segno né l'entità (in caso contrario sarebbe possibile utilizzare la relazione precedente per ricavare il valore vero partendo dalla conoscenza di quello misurato), si è soliti fornire una stima del valore vero V , attribuendo alla quantità misurata M una fascia di errore $\pm E_{max}$, scrivendo: $V = M \pm E_{max}$. Il valore vero V si presume quindi che cada, con probabilità elevata, entro l'intervallo $\pm E_{max}$ attorno al valore misurato M . Spesso, nel confronto fra metodi e strumenti diversi o nella semplice pratica, si rivela più utile l'errore relativo, definito come il rapporto fra l'errore assoluto E ed il valore vero V :

$$e = \frac{E}{V} = \frac{M - V}{V} \Rightarrow e\% = 100 \frac{E}{V} \quad (3.2)$$

L'errore relativo viene dato anche in percento (%), talvolta in permille (‰) o, quando è molto piccolo, in parti per milione (ppm).

Dal punto di vista pratico, al denominatore dell'espressione (3.2) il termine V , che è un valore ideale non noto, viene sostituito col valore misurato M , con differenze quasi sempre accettabili (se la differenza tra i due valori è piccola, come deve essere nelle misure ben fatte) sulla valutazione dell'errore relativo.

Una distinzione classica e ancora diffusa distingue gli errori in:

- *errori sistematici*: sono quelli che si presentano sempre con la stessa ampiezza e segno (per esempio lo spostamento dello zero in uno strumento a indice);
- *errori casuali*: sono quelli fortuiti, variabili in ampiezza e segno;

A queste categorie deve essere aggiunta quella degli *errori grossolani*, cioè dovuti a imperizia dell'operatore.

Osserviamo che, se si opera con cura, e quindi si evitano gli errori grossolani, e si riesce a correggere in qualche modo almeno una parte degli errori sistematici, allora l'errore E rappresenta il limite alla nostra possibilità di conoscenza. Il termine *errore* può pertanto apparire meno appropriato rispetto al termine *incertezza*, che associamo a cause imponderabili.

Osserviamo inoltre che la definizione (3.1) dell'errore non è a rigore operativamente utilizzabile, perché non è noto il valore vero della grandezza che cerchiamo di conoscere attraverso la sua misura. Ciononostante, il termine *errore* è ancora diffusamente impiegato, e ad esso si farà riferimento nel seguito di questo capitolo introduttivo per un primo approccio intuitivo al problema della propagazione degli errori nelle misure indirette.

Al concetto di incertezza, fondamentale nella scienza delle misure, e ai metodi impiegati per la sua valutazione quantitativa verrà dedicato un apposito capitolo.

Errori nelle misure indirette

In numerosi casi pratici ha interesse stabilire l'errore (o l'incertezza) di una grandezza ottenuta attraverso la misura di altre grandezze. Si consideri, pertanto, una grandezza fisica y

funzione di altre quantità secondo un legame noto:

$$y = f(x_a, x_b, x_c, \dots) \quad (3.3)$$

Supponiamo che ciascuna grandezza x_a, x_b, x_c, \dots venga sottoposta a misurazione e venga determinata con un errore assoluto E_a, E_b, E_c, \dots .

Tali errori assoluti devono essere piccoli, affinché la misura abbia un senso. Allora l'errore complessivo E_y nella valutazione indiretta della quantità y può essere calcolato assimilando gli errori E_a, E_b, E_c, \dots ai differenziali dx_a, dx_b, dx_c, \dots e utilizzando la notazione dell'Analisi Matematica per il differenziale df della funzione f .

Si potrà quindi scrivere:

$$E_y = \frac{\partial f}{\partial x_a} E_a + \frac{\partial f}{\partial x_b} E_b + \frac{\partial f}{\partial x_c} E_c + \dots \quad (3.4)$$

Ciascuna derivata parziale è calcolata in corrispondenza dei valori misurati per le variabili x . Poiché solitamente non è noto il segno dell'errore E , il caso peggiore porta a considerare la somma dei valori assoluti dei singoli contributi di errore.

$$E_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_a} E_a \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_b} E_b \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_c} E_c \right| + \dots \quad (3.5)$$

Per chiarire le idee, si considerino gli esempi seguenti, dove tutti i contributi di errore sono da intendersi in valore assoluto.

A) - *Somma di due grandezze:*

$$y = x_a + x_b \quad \Rightarrow \quad E_y = E_a + E_b \quad \Rightarrow \quad e_y = \frac{E_y}{y} = \frac{E_a + E_b}{x_a + x_b} \quad (3.6)$$

B) - *Differenza fra due grandezze:*

$$y = x_a - x_b \quad \Rightarrow \quad E_y = E_a + |-E_b| \quad \Rightarrow \quad e_y = \frac{E_y}{y} = \frac{E_a + E_b}{x_a - x_b} \quad (3.7)$$

Si assumano i seguenti valori numerici: $x_a = 10 \text{ V}$, $x_b = 9 \text{ V}$; $E_a = 0,1 \text{ V}$; $E_b = 0,09 \text{ V}$.

- L'errore relativo su ciascuna misura risulta: $e_a = e_b = 1\%$.
- L'errore relativo sulla somma delle tensioni è pari a: $e_y = 0,19/(10+9) = 0,01$ (cioè 1%).
- L'errore relativo sulla differenza delle tensioni è invece: $e_y = 0,19/(10-9) = 0,19$ (cioè 19%)!

L'esempio mostra con evidenza che le determinazioni ottenute per differenza fra due quantità risultano tanto più critiche, con riferimento all'errore relativo, quanto più sono prossimi fra loro i due termini in sottrazione.

Un'interpretazione grafica dei due esempi trattati è data in Fig.3.1.

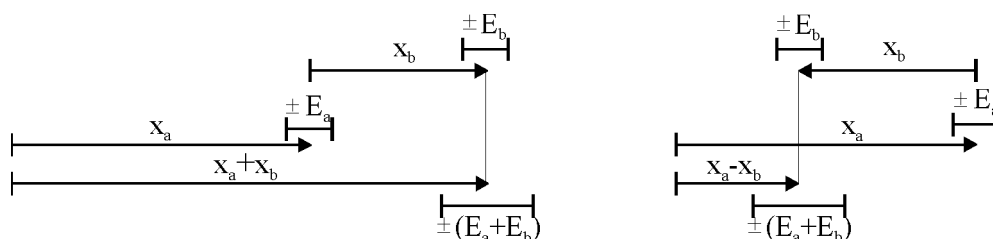


Fig.3.1 - Valutazione degli errori per la somma e la differenza di due quantità.

Una circostanza pratica in cui si presentano le difficoltà connesse alle misure per differenza si riscontra nella determinazione della potenza dissipata in un dispositivo di conversione dell'energia elettrica con un rendimento elevato.

In tal caso, indicando con P_1 e P_2 rispettivamente le potenze in ingresso e in uscita dal dispositivo, la potenza perduta nella conversione risulta $P_d = P_1 - P_2$.

Il rendimento della trasformazione risulta invece $\eta = P_2/P_1$.

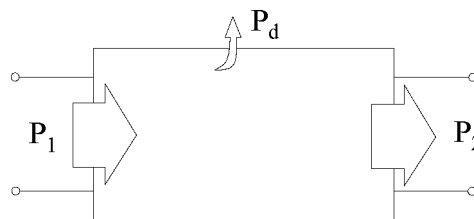


Fig.3.2 - Schema per un dispositivo di conversione della potenza.

Se il rendimento è elevato (prossimo a 1), le potenze P_1 e P_2 sono fra loro molto prossime. Si supponga, per semplicità della trattazione, che le misure delle due potenze, effettuate con due wattmetri, possano essere realizzate con lo stesso errore relativo e_p .

In tali condizioni l'errore relativo e_d nella valutazione della potenza perduta P_d risulta:

$$e_d = \frac{e_p P_1 + e_p P_2}{P_d} = e_p \frac{P_1 + P_2}{P_1 - P_2} = e_p \frac{1 + \eta}{1 - \eta} \quad (5.8)$$

Se supponiamo un rendimento η di conversione del 98%, l'incertezza che risulta sulla determinazione di P_d è 99 volte maggiore di e_p .

In pratica, la determinazione di P_d fatta con tale metodo risulta scarsamente significativa e bisogna ricorrere a metodi di misura diversi, da esaminare caso per caso.

Possiamo considerare altri due esempi di valutazione dell'errore nelle misure indirette:

C) - Prodotto di due grandezze:

$$y = x_a x_b \quad \Rightarrow \quad E_y = |x_b E_a| + |x_a E_b| \quad e_y = \frac{E_y}{y} = e_a + e_b \quad (3.9)$$

L'errore relativo sul prodotto di due grandezze è pari alla somma degli errori relativi presenti in ciascuna determinazione.

D) - Quoziente fra due grandezze:

$$y = \frac{x_a}{x_b} \quad \Rightarrow \quad E_y = \left| \frac{1}{x_b} E_a \right| + \left| -\frac{x_a}{x_b^2} E_b \right| \quad e_y = \frac{E_y}{y} = e_a + e_b \quad (3.10)$$

Anche nel caso del quoziente fra due quantità, non essendo noto a priori il segno dell'errore, dovremo comunque considerare la somma dei singoli contributi di errore in valore assoluto.

Pertanto, qualora si voglia considerare il caso più sfavorevole, l'errore relativo sul quoziente di due grandezze risulta dalla somma degli errori relativi delle singole determinazioni, come nel caso del prodotto.

4 - La riferibilità nelle misure

Riferibilità (*traceability*)

Secondo il Vocabolario Internazionale dei termini usati nella Metrologia (VIM), la riferibilità è la proprietà del risultato di una misurazione o del valore di un campione per la quale esso può essere messo in relazione a un riferimento stabilito, generalmente un campione nazionale o internazionale, attraverso una catena ininterrotta di confronti (*catena di riferibilità*) aventi tutti un'incertezza determinata.

Taratura (*calibration*)

Per la determinazione delle caratteristiche metrologiche di uno strumento si procede a operazioni di confronto delle indicazioni fornite dallo strumento con i valori di grandezze di riferimento ad esso applicate, ritenute note, e ottenute dai campioni.

Il VIM definisce la taratura come l'insieme delle operazioni che stabiliscono, sotto specificate condizioni, la relazione tra i valori di una quantità indicati da uno strumento o da un sistema di misura e i corrispondenti valori realizzati dai campioni.

Il significato e il valore di una operazione di taratura dipendono dalla credibilità dello standard di riferimento e dalle modalità con cui viene realizzato il confronto.

Una procedura di taratura garantisce la riferibilità delle misure quando viene effettuata da un organismo riconosciuto o accreditato a livello nazionale o internazionale.

5 - L'organizzazione metrologica

La metrologia

Le misure costituiscono un aspetto importante della società industriale. Quando un qualsiasi prodotto passa di mano deve essere misurato.

Ma l'importanza delle misure si estende, oltre che al commercio e all'industria, anche a numerosi altri campi della vita quotidiana abbastanza diversi e non meno importanti: si pensi, per esempio, ai settori della diagnostica medica o al monitoraggio dei parametri ambientali.

In tutti i casi, comunque, le misure devono essere comparabili e per questo è necessario un grado di accordo sui risultati ottenuti.

La strumentazione e le procedure utilizzate per le misure devono quindi essere verificate ed accreditate come rispondenti alle loro specifiche e riferibili a standard riconosciuti, nazionali o internazionali, di precisione più elevata.

La metrologia è la scienza delle misure e comprende tutti gli aspetti sia teorici che pratici connessi alle misure. Essa può essere suddivisa in tre categorie, con differenti livelli di complessità e accuratezza:

- *Metrologia scientifica*: si occupa dell'organizzazione e dello sviluppo dei campioni di misura e della loro conservazione (è il livello di accuratezza più elevato);
- *Metrologia industriale*: assicura l'adeguato funzionamento degli strumenti di misura usati nell'industria tanto nella produzione quanto nelle procedure di collaudo;
- *Metrologia legale*: riguarda l'accuratezza delle misure che hanno influenza sulla trasparenza delle transazioni economiche, sulla salute e sulla sicurezza.

In alcuni casi quindi norme di legge impongono precisi requisiti di riferibilità alle misure (per esempio nei settori attinenti alla sicurezza o alla salute pubblica). In altri casi, l'accettazione volontaria di impiegare strumentazione riferibile è condizione necessaria per ottenere la

certificazione di qualità sul prodotto o sull'azienda produttrice.

Metrologia internazionale

La metrologia moderna è nata alla fine del secolo scorso, con la firma della Convenzione del Metro. Scopo fondamentale del trattato, cui aderiscono i Paesi più industrializzati, è la definizione del Sistema Internazionale di Unità di Misura e la sua disseminazione nel mondo. Altro compito essenziale è quello di modificare e adeguare il Sistema SI, se necessario, in relazione ai progressi della Scienza e della Tecnologia.

La responsabilità di queste attività è assegnata al CGPM, (Conférence Générale des Poids et Mesures), formata da delegati degli Stati Membri. Le modifiche vengono proposte per l'adozione formale dall'organismo tecnico CIPM (Comité International des Poids et Mesures) che opera sotto l'autorità del CGPM.

L'attuale Sistema SI è stato approvato per la prima volta dalla 11^{ma} Conferenza Generale CGPM, nel 1960, e successivamente aggiornato e integrato.

Gli Istituti Primari

Gli Istituti Primari sono gli organismi nazionali di ciascuno Stato membro che provvedono alla realizzazione, al mantenimento e alla disseminazione delle Unità SI nel singolo Stato.

In Italia tale ruolo è svolto, a partire dal 1 Gennaio 2006, dall'INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica), che ha sede a Torino, nel quale sono state unificate le competenze degli "storici" istituti IENGF (Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferrarsi) e IMGC (Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti).

In Europa ricordiamo, fra gli altri, l'Istituto Primario della Germania PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) e quello inglese NPL (*National Physical Laboratory*). L'Istituto Primario degli Stati Uniti è il NIST (*National Institute of Standards and Technology*, già NBS *National Bureau of Standards*).

Gli Istituti Primari dei singoli Stati realizzano e conservano i campioni primari delle diverse grandezze fisiche, per consentire il confronto e la verifica dei campioni secondari da diffondere nel territorio nazionale.

Il coordinamento dell'attività degli Istituti Primari nazionali è operativamente realizzato dall'organismo sovranazionale BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) con sede a Parigi. Scopo del BIPM è quello di assicurare nel mondo l'unificazione delle misure fisiche: si può dire che rappresenti l'Istituto Primario Internazionale, ed opera sotto la supervisione esclusiva del CIPM. Fra le attività più importanti del BIPM sono da considerare i cicli internazionali di confronto periodico fra i campioni degli Istituti Primari dei diversi Stati.

La disseminazione della riferibilità

In Italia, fino agli anni '70 gli Istituti Primari hanno effettuato direttamente nei propri laboratori la taratura della strumentazione industriale. In breve risultò evidente che lo sviluppo del commercio internazionale e l'apertura dei mercati avrebbero richiesto un'attività sempre maggiore e decentrata, insostenibile con l'attività diretta degli Istituti Primari.

Vennero pertanto presi accordi a livello europeo per la creazione di organismi che potessero far fronte alla crescente mole di lavoro di taratura.

In tal modo, al fine di assicurare omogeneità nell'attività di taratura, vennero riconosciute da parte degli Istituti Primari nazionali competenze metrologiche ad altri laboratori accreditati.

Per l'Italia, in particolare, con la legge 11/08/1991 n. 273 è stato costituito il Servizio Nazionale di Taratura e ha preso corpo il SIT (Sistema Italiano Taratura).

Negli anni '90 quasi tutti i Paesi europei hanno organizzato i propri servizi nazionali di

taratura. Questi sono oggi coordinati dall'EA (*European cooperation for the Accreditation*), nato nel 1997 con l'obiettivo di armonizzare le procedure di accreditamento e favorire la fiducia reciproca al fine di produrre accordi di mutuo riconoscimento (MLA, *MultiLateral Agreement*). In tal modo ciascun servizio nazionale riconosce le procedure operative dei servizi di taratura operanti negli altri Paesi firmatari, accetta come equivalenti i certificati emessi dagli altri sistemi di taratura e ne promuove il riconoscimento nel proprio Paese.

6 - Sistema Internazionale di unità di misura

Grandezze fondamentali

Il Sistema Internazionale (sistema SI) definisce le unità fondamentali di misura che vengono universalmente adottate. Le unità fondamentali assunte nel sistema SI sono:

Grandezza	Nome unità	Simbolo unità	Dimensioni
1) lunghezza	metro	m	L
2) massa	kilogrammo	kg	M
3) tempo	secondo	s	T
4) temperatura	kelvin	K	Θ
5) corrente elettrica	ampere	A	I
6) intensità luminosa	candela	cd	
7) quantità di sostanza	mole	mol	

Definizioni delle unità fondamentali

- 1) - Il **metro** è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto durante un intervallo di tempo pari a $1/299\,792\,458$ di secondo.
- 2) - Il **kilogrammo** è la massa del prototipo internazionale conservato a Sevres.
- 3) - Il **secondo** è la durata di $9\,192\,631\,770$ periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di Cesio 133.
- 4) - L'**ampere** è quella corrente costante che mantenuta in due conduttori rettilinei e paralleli, di lunghezza infinita e sezione circolare trascurabile, posti a un metro di distanza nel vuoto, produce fra tali conduttori una forza di 2×10^{-7} N per metro di lunghezza.
- 5) - Il **kelvin** è la frazione di $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua.
- 6) - La **mole** è la quantità di sostanza di un sistema il quale contiene un numero di entità elementari pari a quelle contenute in $0,012$ kilogrammi di Carbonio 12.
(Quando si usa la mole, le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, o altre particelle specificate o gruppi di esse).
- 7) - La **candela** è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica alla frequenza di 540×10^{12} hertz e che ha una potenza luminosa, in quella direzione, di $1/683$ watt per steradiante.

Multipli e sottomultipli

Qualora le unità di misura appaiano troppo grandi o troppo piccole in relazione alla grandezza da misurare si adottano multipli o sottomultipli:

<i>multiplo</i>	10	100	1000	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}
<i>prefisso</i>	deca	etto	kilo	mega	giga	tera	peta	exa
<i>simbolo</i>	da	h	k	M	G	T	P	E
<i>sottomultiplo</i>	1/10	1/100	1/1000	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}
<i>prefisso</i>	deci	centi	milli	micro	nano	pico	femto	atto
<i>simbolo</i>	d	c	m	μ	n	p	f	a

Unità derivate

Nel seguito si riportano alcune classiche e ben note unità derivate:

Grandezza	Definizione	Nome	Simbolo	Dimensioni
velocità	$v=dl/dt$	---	m/s	$L T^{-1}$
accelerazione	$a=dv/dt$	---	m/s^2	$L T^{-2}$
forza	$F=ma$	newton	N (kg m/s ²)	$M L T^{-2}$
lavoro	$L=Fl$	joule	J (N m)	$M L^2 T^{-2}$
potenza	$P=L/t$	watt	W (J/s)	$M L^2 T^{-3}$
energia	$E=Pt$	joule	J (W s)	$M L^2 T^{-2}$
frequenza	$f=1/t$	hertz	Hz (1/s)	T^{-1}
tensione	$U=P/I$	volt	V (W/A)	$M L^2 T^{-3} I^{-1}$
resistenza	$R=U/I$	ohm	Ω (V/A)	$M L^2 T^{-3} I^{-2}$

Vengono inoltre definite le unità di misura angolari:

- angolo piano (radiante, rad): è l'angolo al centro sotteso da un arco di circonferenza di lunghezza pari al raggio (1 angolo giro = 2π radianti).
- angolo solido (steradiano, sr): in una sfera di raggio unitario, è l'angolo al centro sotteso da una calotta di superficie pari a 1 metro quadrato (1 angolo sferico = 4π steradiani).

Le unità pratiche

Benché sconsigliate, le unità di misura pratiche, soprattutto anglosassoni, continuano ad essere diffusamente impiegate in numerosi ambiti, soprattutto tecnologici.

Così appare opportuno richiamare alcune fra le equivalenze più diffuse:

1 pollice	equivale a	2,54	cm
1 piede	equivale a	30,48	cm
1 yarda	equivale a	91,44	cm
1 miglio nautico	equivale a	1,852	km
1 gallone (UK)	equivale a	4,5	litri
1 gallone (US)	equivale a	3,78	litri
1 kilogrammo forza	equivale a	9,81	N
1 kcaloria	equivale a	4.183	J
1 British Thermal Unit	equivale a	1,055	kJ
1 kcal/h	equivale a	860^{-1}	kW
1 grado	equivale a	0,0174	rad

Per le temperature sono diffuse le scale Celsius ($^{\circ}\text{C}$) e, nei paesi anglosassoni, Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Le relazioni che esprimono la corrispondenza tra queste due scale e le unità del sistema SI sono: $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,16$ e $T(^{\circ}\text{C}) = 5[T(^{\circ}\text{F}) - 32]/9$ (per es. 70°F corrisponde a $21,1^{\circ}\text{C}$).

Deduzione dell'unità elettrica

Come unità fondamentale di natura elettrica è stata assunta l'intensità di corrente.

Nella Fig.6.1 è riportato uno schema che richiama il principio fisico su cui si basa la sua definizione. Si osserva innanzitutto l'induzione magnetica B prodotta dalla corrente I che fluisce nel conduttore 1. Dall'interazione fra l'induzione B e la corrente I , che passa nel conduttore 2, nasce la forza F .

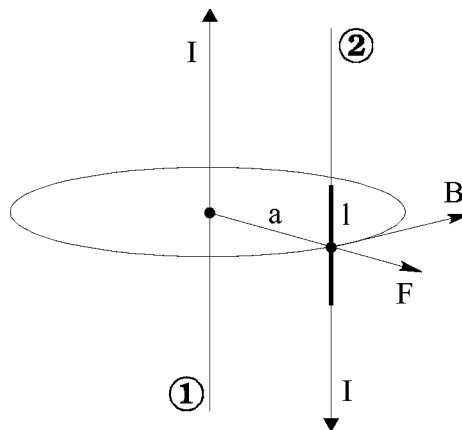


Fig.6.1 - Azioni meccaniche fra correnti.

L'espressione generale della forza agente fra i due conduttori risulta:

$$F = BIl = \mu_0 HIl = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi a} l \quad (4.1)$$

Se: $a=1\text{m}$; $l=1\text{m}$; $I=1\text{A}$ ed $F=2 \times 10^{-7}\text{N}$, consegue che la definizione di unità di corrente determina anche il valore della permeabilità μ_0 del vuoto:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{N}}{\text{A}^2} \right] \quad (4.2)$$

In pratica, l'unità di corrente risulta di difficile realizzazione e mantenimento; inoltre la sua definizione implica il ricorso a misure meccaniche di forza che possono essere determinate con incertezze relative dell'ordine di 10^{-5} .

D'altra parte nel confronto fra grandezze elettriche si arriva a incertezze molto più basse.

Pertanto si preferisce realizzare campioni primari materiali di grandezze elettriche che siano legate alla corrente tramite la legge di Ohm. Così si realizzano campioni primari di tensione e di resistenza. I campioni primari di tensione si basano sull'effetto Josephson. I campioni primari di resistenza si basano sull'effetto Hall quantistico. Tali realizzazioni sono molto complesse e particolarmente costose per cui sono adottate solo dagli Istituti Primari.

Nell'attività quotidiana dei centri di taratura, invece, si impiegano diffusamente i calibratori multifunzione. Questi sono apparecchi compatti e facili da usare, in grado di produrre tensioni, correnti e resistenze di riferimento con incertezza ben definita e particolarmente bassa, sufficiente per gran parte delle esigenze di taratura della strumentazione industriale.