

CAPITOLO 3

3.1 Sistemi di unità di misura.

Misurare una qualsiasi grandezza fisica significa confrontarla con un'altra, ad essa omogenea, convenzionalmente assunta unitaria. Pertanto, la misura di una grandezza è costituita da una unità di misura e da un numero che esprime quante volte detta unità è contenuta nella grandezza da misurare. Quindi, per eseguire la misura di una qualsivoglia grandezza fisica, è necessario associare ad essa un'opportuna unità di misura. A tal riguardo, si definisce sistema di unità di misura, un qualsiasi insieme di grandezze, assunte convenzionalmente di valore unitario, attraverso le quali è possibile rappresentare tutte le grandezze di interesse della fisica. La scelta di quali e quante unità includere in un sistema di unità di misura è, almeno in linea di principio, arbitraria. Infatti, si potrebbero definire tante unità di misura per quante sono le grandezze di interesse della fisiche.

Questo approccio era, appunto, quello seguito in alcuni sistemi metrici di vecchio tipo, dove, per esempio, le unità di lunghezza, area e volume erano scelte indipendentemente l'una dall'altra. All'estremo opposto, sarebbe possibile definire un'unica unità fondamentale, facendo derivare, da questa, tutte le altre. Per esempio, assumendo il *secondo* come unità fondamentale di intervallo di tempo:

- potremmo definire come unità di lunghezza, lo spazio che la luce percorre nel vuoto in un secondo (la velocità della luce nel vuoto è una costante universale);
- avendo definito spazio e tempo, si potrebbero definire di conseguenza velocità e accelerazione;
- come unità di massa, si potrebbe definire quella che imprime l'accelerazione unitaria a una massa uguale collocata alla distanza unitaria;

e così via. Con tale approccio, tutte le dimensioni si esprimerebbero in funzione del *secondo*.

Agli inizi del secolo XIX, si riteneva quasi dogmatico dover esprimere tutte le dimensioni in funzione di tre fondamentali, da scegliersi nel campo meccanico, e quindi dovere assumere tre unità meccaniche quali primitive e, da esse, far dipendere tutte le altre. Questo era d'accordo con l'idea *meccanicista* che tutti i fenomeni fisici si dovessero spiegare per via cinetica. Ma già verso la fine del XIX secolo, le teorie meccaniciste vennero abbandonate e si riconobbe la convenienza di introdurre, per la descrizione dei fenomeni fisici, altre unità di misura fondamentali come la temperatura, l'intensità luminosa, l'intensità di corrente elettrica, ecc.

3.2 Il Sistema Internazionale.

Il Sistema Internazionale adotta sette grandezze fondamentali e due supplementari con le relative unità (Tabella 3.1) e varie grandezze derivate dalle precedenti, con le relative unità.

Esso fu definito dalla XI CGPM (Conferenza Generale Pesi e Misure) nel 1960, ed è stato adottato da molti stati, tra cui l'Italia, allo scopo di superare gli inconvenienti propri dei molteplici sistemi di unità di misura che si erano diffusi nel corso dei secoli.

Grandezze fondamentali con le rispettive unità e simboli:		
Lunghezza	Metro	m
Massa	Kilogrammo	kg
Tempo	Secondo	s
Intensità di corrente elettrica	Ampere	A
Temperatura	Grado kelvin	°K
Quantità di sostanza	Mole	mol
Intensità luminosa	Candela	cd
Grandezze supplementari con le rispettive unità e simboli:		
Angolo piano	Radiante	rad
Angolo solido	Steradiane	sr

Tabella 3.1

Infatti, un sistema di unità di misura, per essere efficace, deve rispondere ad una serie di requisiti, tra i quali:

- *universalità*: deve essere accettato da tutti (diverse categorie di utenti, tutte le Nazioni, chiunque deve poter accedere ai campioni, ecc.);
- *precisione*: deve dare la possibilità di esprimere il valore di una grandezza con tutta la precisione che la specifica applicazione richiede;
- *praticità*: si deve prestare all'uso pratico senza creare eccessivi problemi di apprendimento e di uso;
- *uniformità*: deve dare la possibilità di ricavare l'ampiezza di un intervallo di valori tramite due letture lungo una scala (i cippi kilometrici lungo le strade sono un esempio di misurazione uniforme);
- *coerenza*: deve dare la possibilità di esprimere qualsiasi grandezza del sistema in funzione delle unità fondamentali, senza far ricorso a costanti o coefficienti. Una qualsiasi unità del SI deve, quindi, poter essere espressa mediante un monomio del tipo:

$$\text{unità SI} = m^{\alpha} * kg^{\beta} * s^{\gamma} * A^{\delta} * K^{\epsilon} * cd^{\eta} * mol^{\theta} * rad^{\lambda} * sr^{\mu} *$$

nel quale gli esponenti $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \mu$ possono avere il valore di un numero intero: positivo o negativo o nullo.

Definizione delle unità di misura fondamentali.

Lunghezza: Il metro (m) è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299.792.458 di secondo. Tale definizione vede l'unità di lunghezza come un'unità dipendente dal tempo. In Italia il metro è attuato mediante i campioni dell'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti del CNR, a Torino.

Massa: Il kilogrammo (kg) è la massa del prototipo internazionale, costituito da un cilindro di platino con altezza uguale al diametro, conservato al Pavillon de Breteuil (Sèvres). In Italia il campione del kilogrammo è conservato presso il Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato (Servizio Metrico), a Roma. Un altro campione è conservato presso l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti del CNR, a Torino.

Tempo: Il secondo (s) è l'intervallo di tempo che contiene 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133. In Italia il secondo è attuato mediante il campione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, a Torino.

Intensità di corrente elettrica: L'ampere (A) è l'intensità di corrente che, mantenuta costante in due conduttori paralleli rettilinei, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti alla

distanza di 1 m l'uno dall'altro nel vuoto, produrrebbe tra i due conduttori la forza di $2 \cdot 10^{-7}$ N su ogni metro di lunghezza. In Italia l'ampere è attuato mediante il campione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, a Torino.

Temperatura termodinamica: Il grado kelvin (K) è la frazione $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua. In Italia la scala termodinamica della temperatura è attuata mediante i campioni dell'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti del CNR, a Torino.

Quantità di sostanza: La mole (mol) è la quantità di sostanza di un sistema che contiene un numero di Avogadro di entità elementari (numero di atomi presenti in 0,012 kg di carbonio 12). Le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, ecc. ovvero gruppi specificati di tali particelle.

Intensità luminosa: La candela (cd) è l'intensità luminosa in una data direzione di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza $540 \cdot 10^{12}$ hertz e la cui intensità energetica in quella direzione è $1/683$ W/sr. Tale grandezza è, in genere, rappresentata da lampade campioni, alimentate da un valore prefissato di corrente continua. In Italia la candela è attuata mediante il campione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, a Torino.

Definizione delle unità di misura supplementari.

Angolo piano: Il radiante (rad) è l'angolo piano al centro di una circonferenza che intercetta su di essa un arco di lunghezza uguale a quella del raggio.

Angolo solido: Lo steradiano (sr) è l'angolo solido al centro di una sfera che intercetta su di essa una calotta di area uguale a quella del quadrato di lato uguale al raggio.

3.3 Campioni.

A ciascuna unità di misura del SI è associato un *campione*. I requisiti fondamentali richiesti ad un campione sono:

- *Stabilità nel tempo:* la grandezza realizzata dal campione deve mantenere il più possibile costante nel tempo il suo valore;
- *Riproducibilità:* il campione deve essere facilmente realizzabile in laboratorio;
- *Non influenzabilità:* il campione non deve essere perturbato dall'ambiente circostante;
- *Confrontabilità:* il campione deve essere facilmente comparabile con grandezze ad esso omogenee.

I campioni possono essere classificati in:

- *naturali*, se riferiti ad un fenomeno fisico;
- *artificiali*, se basati su prototipi che materializzano la relativa grandezza.

La definizione delle unità di misura del sistema SI, spetta alla Conferenza Generale dei Pesì e Misure (CGPM) il cui organo tecnico, il BIPM (Bureau International de Poids et Mesures) ha il compito di conservare i campioni materiali delle unità del sistema SI, detti *campioni primari*, e di curare il loro confronto con i campioni realizzati presso i vari laboratori metrologici nazionali, detti *campioni secondari*.

In Italia, le funzioni di istituti metrologici, sono svolte dall'Istituto Metrologico "G. Colonnetti" di Torino nel campo della meccanica e della termologia; dall'Istituto Elettrotecnico Nazionale "G. Ferraris", sempre di Torino, per le misure di tempo, frequenza, per le grandezze elettriche, ottiche ed acustiche. Infine l'ENEA si occupa delle misure nel campo delle radiazioni ionizzanti.

Questi istituti conservano i campioni nazionali delle varie grandezze e procedono, periodicamente, al loro confronto con quelle di altre nazioni e del BIPM. Inoltre essi sono di riferimento, in ambito nazionale, per tutto il settore scientifico ed industriale. Ad esempio, nel

settore della produzione industriale, è importantissimo e, spesso prescritto, il rispetto di Norme specifiche del bene che si intende produrre. Per garantire tale requisito, le varie fasi della lavorazione del prodotto devono prevedere apposite operazioni di misurazione a scopo di verifica e collaudo e, gli strumenti di misura devono essere, a loro volta, controllati periodicamente presso un istituto metrologico o in appositi centri autorizzati dagli istituti metrologici stessi.

In Italia, tale servizio è chiamato *Servizio Italiano di Taratura* (SIT) e i centri abilitati a svolgere tale servizio si chiamano *Centri SIT*. L'operazione di verifica degli strumenti di misura da parte dei centri SIT si chiama *taratura*. L'operazione di taratura intende valutare l'incertezza di misura intrinseca dello strumento in prova mediante confronto con le indicazioni fornite da uno *strumento campione* (di specifiche note e con incertezza di misura trascurabile rispetto a quella dello strumento da tarare) . A valle di tale operazione, il centro SIT redige un *certificato di calibrazione* in cui riporta, per più valori della grandezza di prova, gli scostamenti riscontrati tra le indicazioni dello strumento da tarare e quelle dello strumento campione. Il certificato di calibrazione consente di conoscere l'incertezza intrinseca dello strumento tarato e, qualora fossero stati evidenziati contributi sistematici di incertezza, consente di apportare le opportune correzioni alle letture dello strumento stesso.

I dati del certificato di taratura saranno tanto più attendibili quanto più recente è stata l'operazione di taratura e quanto più le condizioni ambientali (temperatura, umidità, ecc.) sono prossime a quelle di lavoro.

Massa

U.d.m. della massa: kilogrammo. Si è convenzionalmente stabilito che un certo blocco di platino iridio, chiamato "prototipo internazionale", conservato al BIPM di Sevres avesse massa unitaria. La sua massa è quindi la u.d.m. della massa.

Campione di massa: Il campione di massa è un campione materiale. Il campione primario di massa è costituito dal blocco di platino/iridio (una lega di platino al 10% di iridio) conservato al Pavillon de Breteuil di Sevres. Esso ha, per come è definita la u.d.m., incertezza nulla. Le copie del campione del BIPM costituiscono i campioni primari dei diversi Stati. Essi hanno incertezze non nulle ($1/10^9$) in quanto le loro masse non possono essere perfettamente uguali a quella del campione del BIPM.

Tempo

U.d.m. del tempo: secondo (Definizione del 1967). Il secondo è il tempo corrispondente a 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione iperfina da ($F=4$, $M_F=0$) a ($F=3$, $M_F=0$) dell'atomo di cesio 133 non perturbata da campi esterni.

Campione di tempo: Il campione di tempo è un campione naturale. La reale implementazione del campione richiede la costruzione di uno strumento entro il quale abbia luogo il fenomeno naturale usato. Agilent Technologies costruisce un orologio atomico a cesio 133, il 5071A primary frequency standard, con il quale è possibile ottenere un segnale la cui frequenza è quella citata nella definizione del secondo. Il processo naturale utilizzato per definire la u.d.m. permette di realizzare un campione con incertezza minore di $5/10^{13}$ ed una stabilità a lungo termine migliore di $1/10^{14}$.

Lunghezza

U.d.m. della lunghezza: metro (Definizione del 1983). Il metro è la distanza percorsa, nel vuoto, dalla luce in un intervallo di tempo pari a $1 / 299\,792\,458$ secondi. E' da notare che la u.d.m. della lunghezza non è definita in modo autonomo, ma sfrutta la u.d.m. del tempo e la velocità della luce nel vuoto.

Campione di lunghezza: Il campione di tempo è un campione naturale. La reale implementazione del campione richiede, in modo analogo a quanto riferito per il campione di tempo, la costruzione di

uno strumento entro il quale ha luogo il fenomeno naturale usato. Il BIPM costruisce questi strumenti con un processo che permette di realizzare un campione con incertezza di circa $1/10^9$

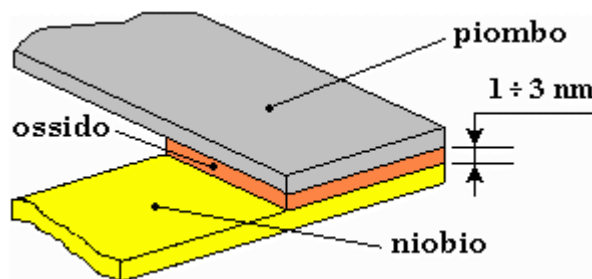
Intensità di corrente elettrica

U.d.m. della intensità di corrente elettrica: ampere. *L'ampere è l'intensità di una corrente elettrica costante che, in due conduttori paralleli, rettilinei, di lunghezza infinita, sezione circolare trascurabile e posti ad 1 metro di distanza, nel vuoto, produrrebbe fra questi conduttori una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ newton per metro di lunghezza.*

Campione di intensità di corrente: Bilancia elettrodinamica con conduttori di forma tale da permettere la determinazione matematica del legame "corrente - azione ponderomotrice". I campioni realizzabili con l'impiego della bilancia elettrodinamica presentano incertezza maggiore di quella che si può raggiungere facendo ricorso all'applicazione della legge di ohm con l'uso di campioni di f.e.m. (basato sull'effetto Josephson) e di resistenza (basato sull'effetto Hall quantistico).

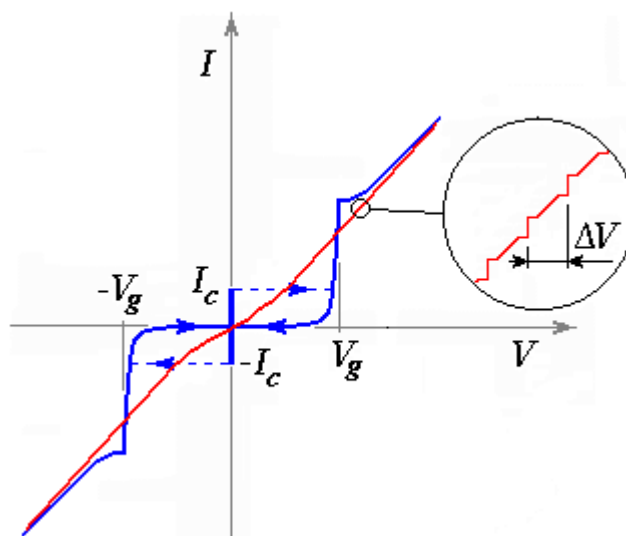
Campione di forza elettromotrice basato sull'effetto Josephson

Una giunzione fra due metalli (niobio e piombo) ottenuta mediante l'interposizione di un sottilissimo strato di ossido viene portata alla temperatura di pochi gradi kelvin (in ambiente raffreddato con elio liquido). Con l'ausilio di un generatore ausiliario, si inietta in tale giunzione una corrente continua.



In assenza di campi elettromagnetici esterni, la caratteristica "tensione/corrente" della giunzione è quella indicata in blu nel diagramma sotto riportato:

- se l'intensità di corrente è, in modulo, inferiore al valore di soglia I_c , non si rileva alcuna differenza di potenziale fra gli elettrodi di piombo e niobio,
- se l'intensità di corrente supera I_c , sulla giunzione si instaura una caduta di potenziale pari a V_g ,
- se si aumenta ulteriormente l'intensità di corrente, il dispositivo presenta un comportamento di tipo resistivo.



Se in tali condizioni si fa incidere sulla giunzione un'onda elettromagnetica, la caratteristica "tensione/corrente" si modifica ed assume l'andamento pressoché lineare disegnato in rosso. Se, però, si studia più dettaglio tale andamento, espandendo la scala, si nota che in tale andamento sono presenti dei tratti a tensione costante. La tensione ΔV che individua la distanza tali tratti è proporzionale alla frequenza dell'onda incidente sulla giunzione e la costante di proporzionalità è esprimibile attraverso costanti universali (la costante di Planck h e la carica dell'elettrone e). In particolare, la tensione di Josephson V_j corrispondente all' n -esimo tratto della caratteristica risulta espressa dalla seguente relazione:

$$V_j = n \frac{h}{2e} f$$

definendo la costante di Josephson K_j :

$$K_j = \frac{2e}{h}$$

si ottiene:

$$V_j = \frac{n}{K_j} f$$

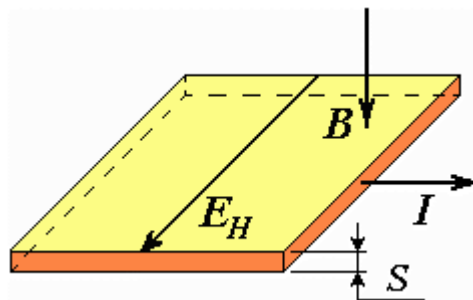
Dall'analisi dimensionale della precedente relazione si ricava che la costante di Josephson ha dimensioni [Hz/V]. Il valore di K_j , stimato nel 1990, è indicato con il simbolo K_{j90} :

$$K_{j90} = 483.597,9 \text{ GHz/V}$$

Dalla caratteristica tensione/corrente, contando i tratti a tensione costante, è possibile misurare la differenza di potenziale ai capi della giunzione per via indiretta, misurando la frequenza dell'onda incidente. Poiché le misure di frequenza sono basate sull'uso di campioni di tempo, notoriamente affetti da incertezze molto ridotte, la determinazione della f.e.m. è praticamente affetta dalla sola incertezza con cui si conosce il valore della costante di Josephson.

Campione di resistenza basato sull'effetto Hall quantistico

Una lamina di materiale semiconduttore, dello spessore S di pochi nm, è mantenuta alla temperatura termodinamica di circa 4 gradi kelvin.



Se si sottopone la superficie di tale semiconduttore ad un campo di induzione magnetica B (di valore superiore a 10 T) e si inietta tra due facce laterali una corrente di intensità I nota, si riscontra fra le rimanenti due facce la nascita di una tensione E_H (tensione di Hall) che assume valori definiti dalle costanti universali di Planck h e della carica dell'elettrone e tramite la formula:

$$E_H = \frac{h}{ne^2} I$$

Da tale espressione si deduce che la tensione di Hall è quantizzata nel senso che può assumere valori in corrispondenza dell'intero n . In particolare, ponendo:

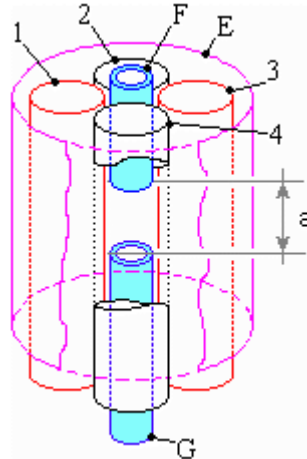
$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

si ricava che la tensione di Hall E_H per $n=1$:

$$E_H = R_K I$$

in cui R_K , valore della costante di proporzionalità in corrispondenza dello stato quantico $n=1$, è detta costante di Von Klitzing. Come si nota, la costante di Von Klitzing è dimensionalmente omogenea ad una resistenza in quanto coefficiente di proporzionalità fra una corrente ed una tensione elettrica. Nel 1990 il valore della costante di Von Klitzing è stato assunto pari a $R_{K90} = 25.812,807$ ohm

Campione di capacità basato sulla realizzazione del condensatore calcolabile



Nel 1956 due ricercatori australiani, Lampard e Thompson, hanno dimostrato un teorema che permette di costruire un dispositivo la cui capacità può essere calcolata mediante una sola misura dimensionale. Il teorema di Lampard-Thompson è relativo a condensatori "in croce" costituiti da un sistema di 4 conduttori cilindrici ad assi paralleli, sezione trasversale di forma qualsiasi e dimensione assiale indefinita, immersi in un dielettrico isotropo ed omogeneo (ad esempio il vuoto) ed accostati a distanza infinitesima in modo da formare un cilindro cavo completamente chiuso. Facciamo riferimento alla figura sopra riportata: uno schermo tubolare (E) racchiude quattro elettrodi cilindrici (il cui diametro non influisce sul valore di capacità che dovremo individuare) e due ulteriori elettrodi cilindrici (F) e (G) che risultano allineati sullo stesso asse e separati da una distanza pari ad a . Chiamiamo C_{13} la capacità che si crea, per unità di lunghezza degli elettrodi, fra gli elettrodi 1 e 3 quando gli elettrodi 2 e 4 sono collegati allo schermo E. Analogamente chiamiamo C_{24} quella che nasce, per unità di lunghezza degli elettrodi, fra gli elettrodi 2 e 4 quando gli elettrodi 1 e 3 sono collegati allo schermo E. Le capacità C_{13} e C_{24} sono dette "capacità incrociate specifiche" e per esse, nel vuoto, vale la relazione:

$$\frac{pC_{13}}{e \epsilon_0} + \frac{pC_{24}}{e \epsilon_0} = 1$$

Nel caso in cui le due capacità incrociate specifiche abbiano lo stesso valore questo risulta:

$$C = C_{13} = C_{24} = \frac{\ln 2}{\pi} \epsilon_0$$

che, nel vuoto, vale circa 2 pF/m (il valore esatto risulta di 1,95354904 pF/m). Il valore di capacità del condensatore calcolabile risulta infine dato dal prodotto di C per a . In realtà le inevitabili imperfezioni costruttive portano ad un lieve scostamento della capacità effettiva da quella calcolata.

I campioni di riferimento nazionali

Sfruttare i soli campioni delle u.d.m. fondamentali per ricavare quelli di tutte le u.d.m. derivate mediante le leggi di coordinamento richiede delle competenze ed uno sforzo tale che a questa soluzione, pur se rigorosa, viene usualmente preferita quella che vede l'uso di un numero ridotto, ma comunque ridondante, di campioni: in Italia si è scelto di realizzare 25 campioni. La tabella seguente riporta l'elenco di tali campioni nazionali, il nominativo dell'Istituto responsabile della sua conservazione, la incertezza relativa.

Grandezza	U.d.m.	Simbolo	Istituto responsabile	Incertezza relativa associata al valore o al campo di valori
-----------	--------	---------	-----------------------	--

Lunghezza	metro	m	IMGC	$\pm 3,4 \cdot 10^{-10}$ a 1 m
Massa	kilogrammo	kg	IMGC	$\pm 8 \cdot 10^{-9}$ a 1 kg
Tempo	secondo	s	IEN	$\pm 3 \cdot 10^{-15}$ per tempi maggiori di 10^5 s
Intensità di corrente elettrica	ampere	A	IEN	$\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$ da 100 μ A a 1 A
Temperatura termodinamica	kelvin	K	IMGC	da $\pm 0,1$ mK a $\pm 3,4$ K (assoluta) da 24,6 K a 2500 K
Intensità luminosa	candela	cd	IEN	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$ da 100 cd a 500 cd
Unità derivate				
Angolo piano	radiante	rad	IMGC	$\pm 0,24$ μ rad (assoluta)
Massa volumica (densità)	kilogrammo al metro cubo	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	IMGC	$\pm 7 \cdot 10^{-7}$ a 2330 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Portata in massa	Kilogrammo al secondo	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	IMGC	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$ da 0,2 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ a 5 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Forza	newton	N	IMGC	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}$ da 2 N a 100 kN
Pressione	pascal	Pa	IMGC	da $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ a $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ da 100 Pa a 1 GPa
Pressione sonora	pascal	Pa	IEN	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$ da 0,3 Pa a 1 Pa
Potenza elettrica	watt	W	IEN	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$ da 1 V a 10 V e da 100 μ A a 1 A
Tensione elettrica	volt	V	IEN	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$ da 1 V a 10 V
Intensità di campo elettrico	volt al metro	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	IEN	$\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$ da 10 V/m a 60 kV/m
Resistenza elettrica	ohm	\square	IEN	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$ da 1 \square a 10 k \square
Capacità elettrica	farad	F	IEN	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$ da 10 pF a 1 nF
Flusso di induzione magnetica	weber	Wb	IEN	$\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$ da 1 μ Wb a 10 mWb
Induzione magnetica	tesla	T	IEN	$\pm 3 \cdot 10^{-3}$ da 1 mT a 25 mT
Induttanza	henry	H	IEN	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$ da 1 mH a 1 H
Flusso luminoso	lumen	lm	IEN	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$ da 2000 lm a 3000 lm
Attività (dei radionuclidi)	becquerel	Bq	ENEA	da $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ a $\pm 3 \cdot 10^{-2}$ da 1 kBq a 20 kBq
Dose assorbita	gray	Gy	ENEA	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$ da 0,1 Gy a 30 Gy in grafite
Densità di flusso di neutroni	neutroni al secondo al metro quadrato	$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	ENEA	$\pm 3,7 \cdot 10^{-3}$ per neutroni veloci
Esposizione	gray al kilogrammo	$\text{Gy} \cdot \text{kg}^{-1}$	ENEA	da $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ a $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ da $3 \cdot 10^{-7}$ $\text{Gy} \cdot \text{kg}^{-1}$ a 0,4 $\text{Gy} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.4 Normalizzazione internazionale e nazionale.

Possiamo dedurre, da quanto visto, che esiste un certo numero di raccomandazioni e di Norme a cui bisogna attenersi scrupolosamente quando si opera nel settore delle misure. Tali Norme hanno per oggetto i campioni di misura, le apparecchiature di misura e i metodi di misura. A tale normalizzazione provvedono appositi organi nazionali ed internazionali. In campo elettrico, l'Ente preposto alla normalizzazione internazionale è la Commissione Elettrotecnica Internazionale (addetta alla pubblicazione delle Norme IEC) e, in sede nazionale, opera il Comitato Elettrotecnico Italiano (addetto alla pubblicazione delle Norme CEI).

Le Norme IEC costituiscono norme generali, in materia di definizioni, modalità di prova, criteri di collaudo, ecc, che formano la base delle norme nazionali. Alcune Norme CEI, di interesse produttivo, sono trasferite a leggi di Stato. La rispondenza degli strumenti alle norme nazionali è, in genere, indicata con un apposito contrassegno (marchio CEI).

E' utile ricordare che le unità di misura elettriche, i cui nomi derivano da quelli di grandi fisici del passato (e.g. Ampere, Joule, Volta, Henry, etc.), quando sono indicate per esteso, vanno usate con l'iniziale minuscola e sono indeclinabili (e.g. in inglese non prendono la s al plurale).

Appendice.

Multipli	Prefisso		Sottomultipli	Prefisso	
	Nome	Simbolo		Nome	Simbolo
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	etto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	deca	D	10^{-24}	yocto	y

Tabella 3.2 – Prefissi usati per multipli e sottomultipli delle unità di misura nel SI

GRANDEZZA	UNITA' DI MISURA	SIMBOLO
Resistenza	Ohm	Ω
Tensione	Volt	V
Potenza	Watt	W
Flusso	Weber	Wb
Induzione magnetica	Tesla	T
Induttanza	Henry	H
Quantità di carica	Coulomb	C
Capacità	Farad	F
Conduttanza	Siemens	S

Tabella 3.3 – Unità di misura elettriche derivate nel SI

COSTANTE FONDAMENTALE	SIMBOLO	VALORE	Unità SI
Velocità della luce nel vuoto	c	299792458	m s^{-1}
Permeabilità del vuoto	μ_0	$4 \pi 10^{-7}$	N A^{-2}
Permittività del vuoto	ϵ_0	$8.85418782 \times 10^{12}$	$\frac{\text{C}^2}{\text{N m}}$
Costante di Plank	h	6.626075×10^{-34}	J Hz^{-1}
Costante di Boltzmann	k	1.380658×10^{-23}	J K^{-1}
Carica dell'elettrone	e	$1.6021773 \times 10^{-19}$	C
Costante di Avogadro	N_A	6.0220943×10^{23}	mol^{-1}

Tabella 3.4 – Costanti fisiche fondamentali