

Misurare per conoscere il modo fisico

“You Only Know What You Measure”

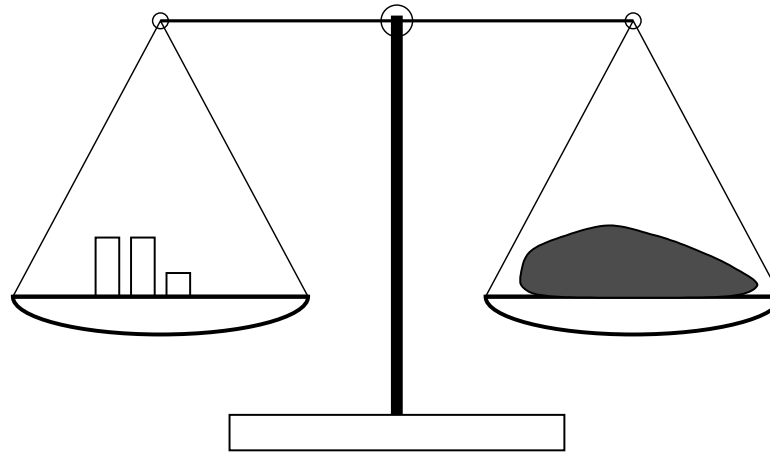
Quando puoi misurare ciò di cui stai parlando, ed esprimerlo in numeri, tu conosci qualcosa su di esso; ma quando non puoi misurarlo, quando non puoi esprimerlo in numeri, la tua conoscenza è scarsa e insoddisfacente. Può essere l'inizio della conoscenza, ma nei tuoi pensieri, sei avanzato poco sulla via della scienza.”

William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907)

Misurare

Il processo di Misura:

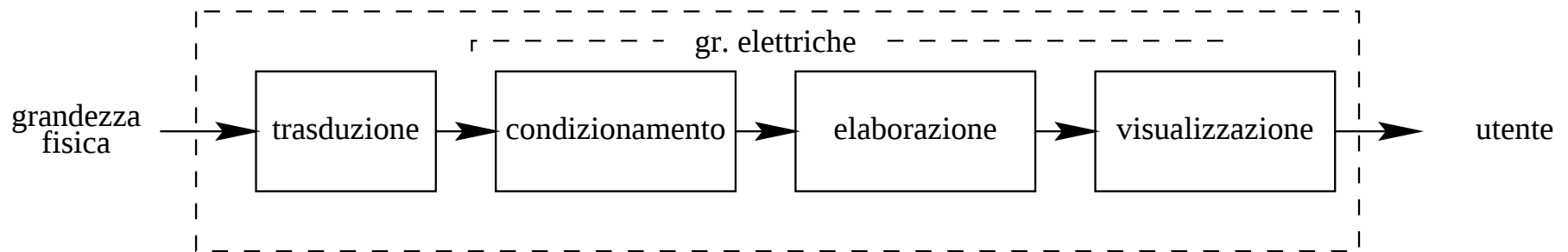
Confrontare una quantità incognita con una (assunta) nota.



- l'**Unità di Misura**: permette di esprimere numericamente il risultato della misura.
- il confronto avviene con uno **Standard**, noto con “precisione”

Misure Elettriche ed Elettroniche

Misura di grandezze fisiche diverse (temperatura, pressione, forza, frequenza di vibrazione di un'asta ...), mediante conversione in grandezze elettriche.

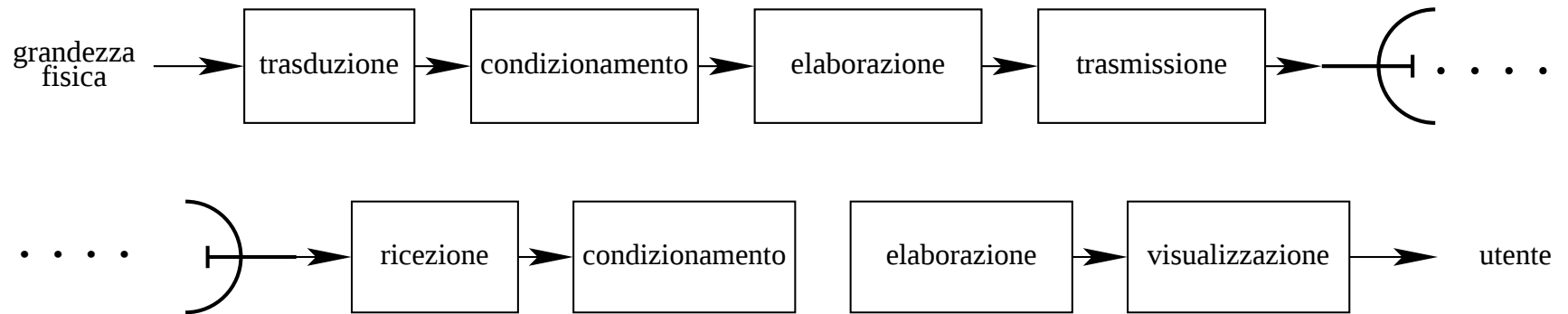


Perché grandezze elettriche? Perché l'elettronica?

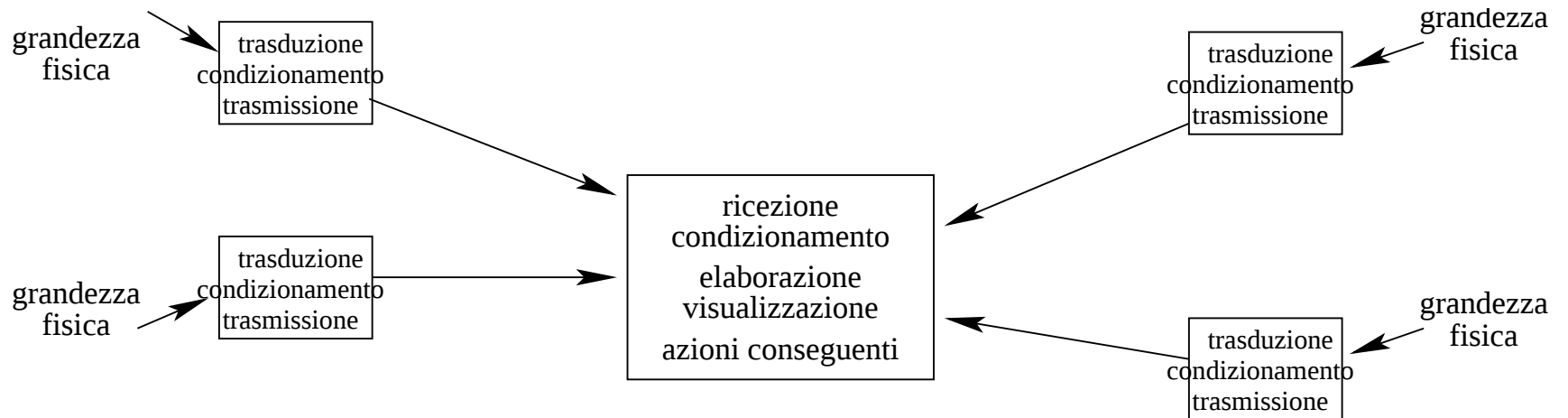
- Elevata velocità, elevata affidabilità;
- Possibilità di trasmettere, memorizzare, elaborare **per via elettronica** i risultati delle misure.
- Possibilità di **automatizzare** le misure.
- ...

Sistema di misura

Sistemi di misura “distribuiti”



reti di sensori ...



Strumenti di misura

Classificazione degli Strumenti di Misura:

- **S. Passivi:** sottraggono al sistema sotto misura l'energia necessaria per la misura;
 - ☹ Non richiedono alimentazione
 - ☹ Possono perturbare il sistema!
- **S. Attivi:** forniscono essi stessi l'energia necessaria per la misura;
 - ☹ Non “caricano” il sistema
 - ☹ Richiedono alimentazione!



- **S. stimolatori:** forniscono al sistema stimoli necessari per effettuare misure.
- **S. composti:** forniscono stimoli e rilevano effetti.
- **S. a bilanciamento:** verificano assenza di scambio di energia

Errori

Ogni misura è affetta da un certo errore!

- **Errori sistematici:**

- dipendono dal sistema (strumento, collegamenti, indicatore ...)
- generalmente costanti (o poco variabili)
- es.: scala, *offset*, carico, ecc.

- **Errori occasionali (o casuali):** dovuti a cause accidentali

- rumore: fluttuazioni delle grandezze (elettriche) in gioco;
- interferenze: campi elettrici e magnetici, vibrazioni meccaniche, fluttuazioni termiche, umidità ...

- **(Errori grossolani:) ... da evitare**

⚠ Determinati errori possono essere previsti
e i relativi effetti possono essere conosciuti (o almeno stimati)

⇒ contromisure e possibilità di correggere gli errori (almeno parzialmente)

Misure ed Errori

Errore: differenza tra il valore rilevato dall'operatore e il valore vero.

$$\epsilon = v_{mis} - v_{vero}$$

Errore relativo: $\epsilon_r = \frac{v_{mis} - v_{vero}}{v_{vero}}$ (anche $|\cdot|$)

Errore percentuale: $\epsilon_{\%} = 100 \frac{v_{mis} - v_{vero}}{v_{vero}}$ (anche $|\cdot|$)

Accuratezza: errore (max) che è lecito aspettarsi
(con un certo strumento, un certo metodo, ecc.)

$$|\epsilon| \leq \text{Acc}$$

Definizioni (1)

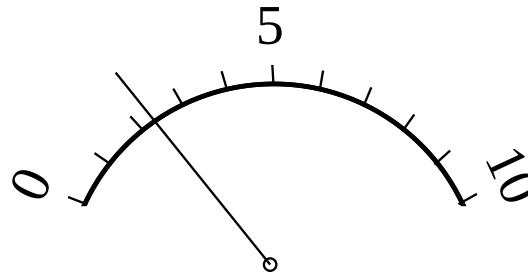
Accuratezza di uno strumento (o sistema):

è una misura dell'errore che si commette usando lo strumento

– generalmente espressa in percentuale del fondo scala.

acc. = 5 % (classe 5)

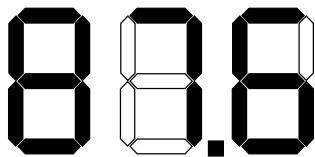
errore di 0.5 V



$$v_{mis} = 2.3 \text{ V}$$

$$v_{vero} \in (1.8, 2.8 \text{ V})$$

– o in funzione della lettura: $(\% \text{ lettura}) + \text{offset}$



$$876 \text{ mV} + 40 \text{ mV} = 916 \text{ mV}$$

$$\text{acc.} = 1\% \text{ lett.} + 40 \text{ mV}$$

$$V_v = 87.6 \text{ V} \pm 916 \text{ mV}$$

– o in funzione del fondo scala: $(\% \text{ f.s.}) + \text{offset}$

– o come: $(\% \text{ f.s.}) + n \times \text{cifra meno significativa (LSD)}$

– o in parti per milione (ppm) $(1 \text{ ppm} = 10^{-6}x)$.

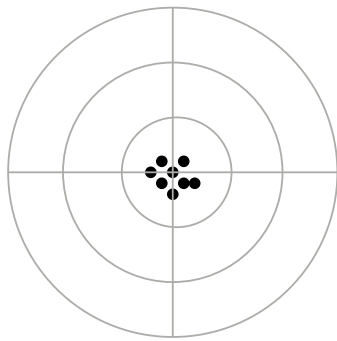
Definizioni (2)

Precisione:

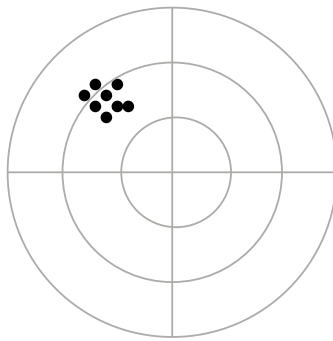
È un indicatore della ripetibilità della misura.

Un sistema di misura *preciso* fornirebbe sempre lo stesso valore per la stessa grandezza.

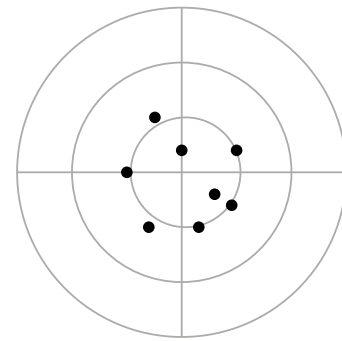
Misure ripetute della stessa grandezza forniscono invece valori più o meno dispersi.



accurato e preciso



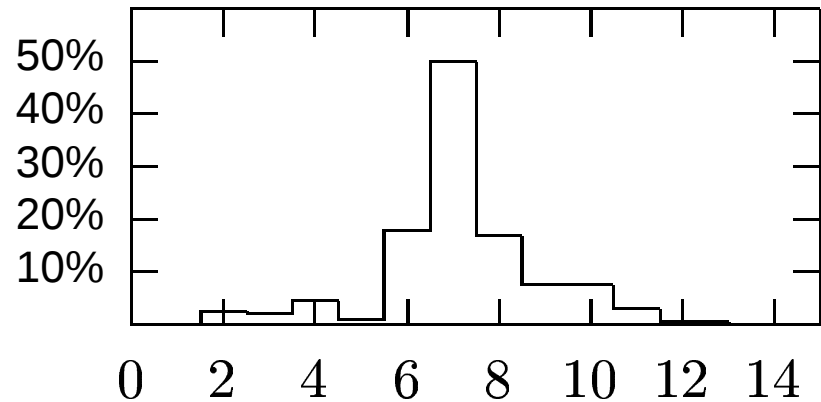
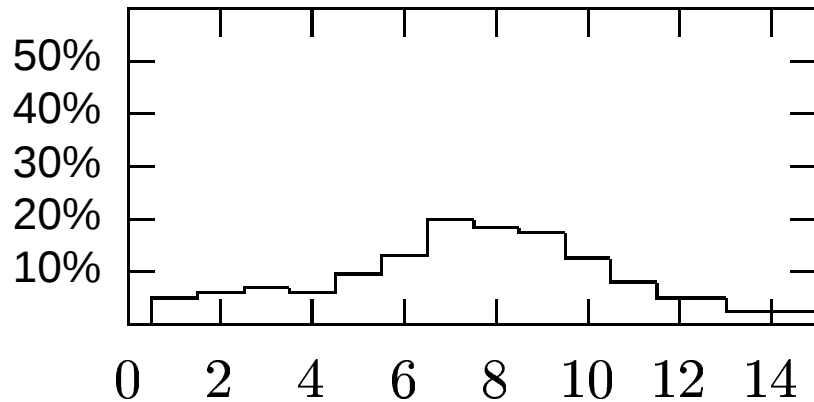
preciso, ma non accurato



accurato, ma non preciso

Definizioni (3)

Misure ripetute, diagramma della frequenza di presentazione dei risultati:



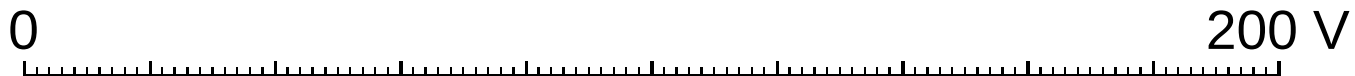
$$P(x_i) = 1 - \frac{|x_i - \bar{X}|}{|\bar{X}|}, \quad (i - \text{esima di } n \text{ prove})$$

$P(x) \leq 1$ se i risultati non sono troppo dispersi.

Definizioni (4)

Risoluzione

minima variazione della quantità da misurare che produce una variazione *percettibile* della lettura



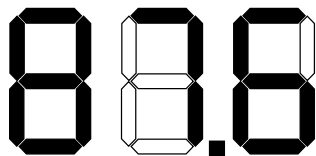
$$100 \text{ div} \Leftrightarrow 200 \text{ V}$$

$$10 \text{ div} \Leftrightarrow 20 \text{ V}$$

$$1 \text{ div} \Leftrightarrow 2 \text{ V}$$

$$0.1 \text{ div} \Leftrightarrow 0.2 \text{ V} \quad ???$$

⚠ Dipende dalle caratteristiche dello strumento (prima che dal *display*).



max. lettura: 99.9 (100) V

risoluzione: 100 mV

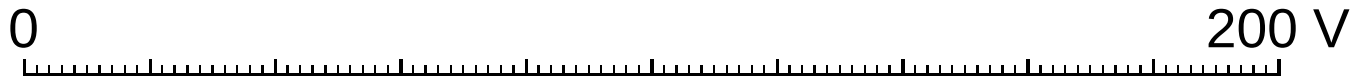
(o 1 parte su 100)

Definizioni (5)

Sensitività (sensibilità):

Esprime il più piccolo segnale che lo strumento è in grado di rilevare.
È normalmente riferita alla portata più bassa.

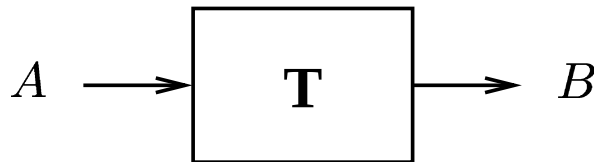
- Esprime anche il rapporto tra l'indicazione e la sollecitazione



$$\frac{100 \text{ div}}{200 \text{ V}} = \frac{1 \text{ div}}{2 \text{ V}}$$

Nell'oscilloscopio: sensibilità verticale = 20 V/div.

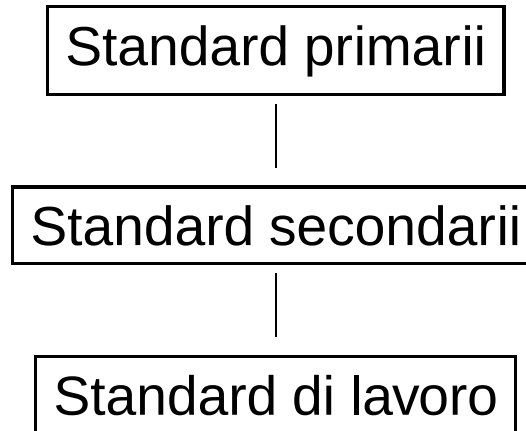
- Nei trasduttori:



$$S = \frac{dB}{dA}$$

Standard

Campioni di grandezze fisiche, assunti come riferimento



Organismi per la definizione degli standard:

- **BIPM**: Bureau International des Poids et Mesures (Sèvres, Parigi)
- **NIST**(1901): National Institute of Standards and Technology (USA)
- **I.N.RI.M.**(2006): Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (I)
- **National Physical Laboratory** (UK)

Unità di misura - Sistema Internazionale

Unità principali		
lunghezza	metro	m
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
corrente elettrica	ampère	A
temperatura	kelvin	K
intensità luminosa	candela	cd
quantità di sostanza	mole	mol
Unità supplementari		
angolo piano	radiante	rad
angolo solido	steradiano	sr

Unità di misura (2)

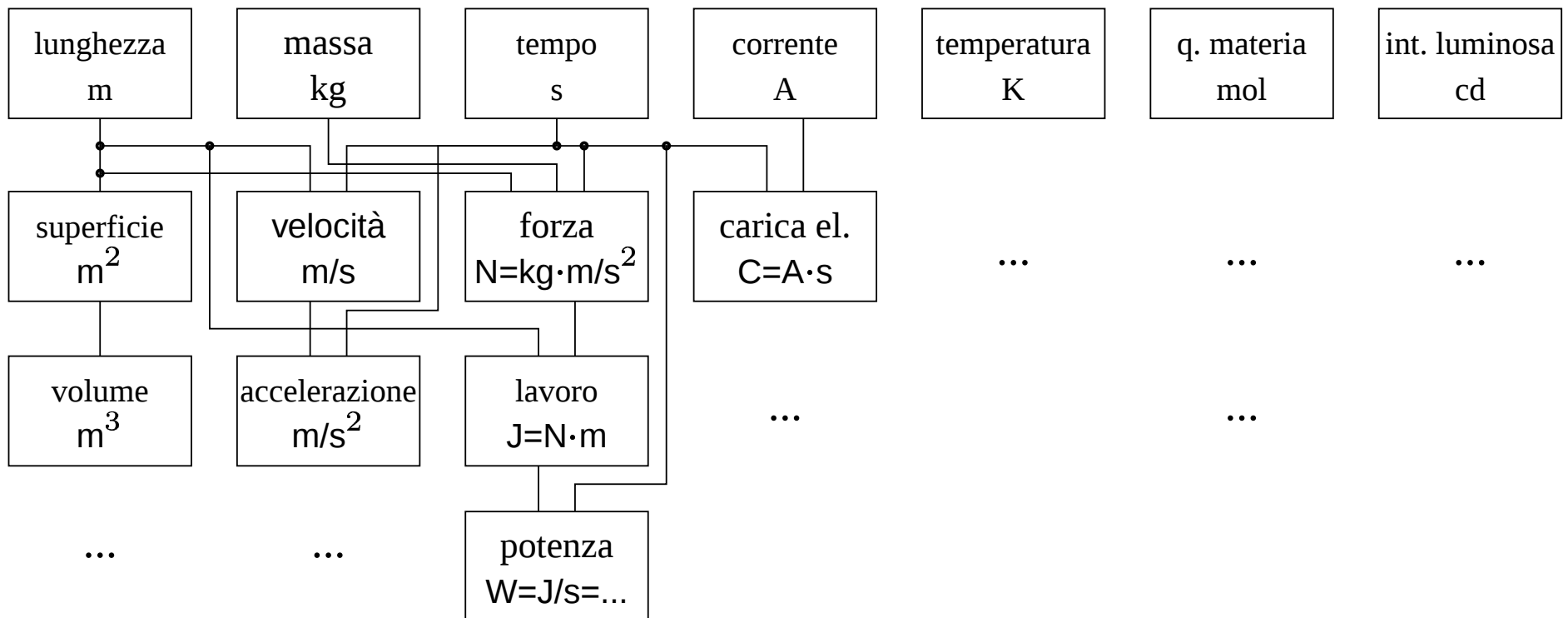
Unità derivate			
superficie	metro quadrato	m^2	$\text{m} \times \text{m}$
forza	newton	N	$\text{kg} \times \text{m} \times \text{s}^{-2}$
energia (lavoro)	joule	J	$\text{N} \times \text{m}$
potenza	watt	W	J / s
carica elettrica	coulomb	C	$\text{A} \times \text{s}$
tensione	volt	V	W / A
capacità	farad	F	$\text{A} \times \text{s} / \text{V}$
...	...	...	...

Nella pratica si usano multipli e sottomultipli

Gli organismi di standardizzazione prescrivono l'uso di multipli secondo potenze del 10 di ordine $3n$ (es.: $10^3, 10^6, 10^9, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9} \dots$)

Unità di misura - 3

- unità principali
- unità derivate



Unità di misura - 4

Prefissi:

prefisso	simbolo	multiplo	prefisso	simbolo	multiplo
yocto	y	10^{-24}	deca (*)	da	10^1
zepto	z	10^{-21}	etto (*)	h	10^2
atto	a	10^{-18}	kilo	k	10^3
femto	f	10^{-15}	mega	M	10^6
pico	p	10^{-12}	giga	G	10^9
nano	n	10^{-9}	tera	T	10^{12}
micro	μ	10^{-6}	peta	P	10^{15}
milli	m	10^{-3}	exa	E	10^{18}
centi (*)	c	10^{-2}	zetta	Z	10^{21}
deci (*)	d	10^{-1}	iotta	Y	10^{24}

(*) sconsigliato dagli organismi di unificazione.

Standard - 1

- standard prototipo (kg massa)
- standard assoluti o intrinseci: ricavabili dalla loro definizione

metro: 1.650.763,73 lunghezze d'onda della radiazione nel vuoto corrispondente alla transizione tra i livelli 2_{p10} e 5_{d5} di Kr_{86} , eccitato a 63.15 K.

kilogrammo^[*]: prototipo.

secondo: 9.192.631.770 periodi della radiazione emessa dal Cs_{133} nella transizione ...

ampère^[*]: corrente costante che, mantenuta in due conduttori rettilinei di lunghezza infinita e sezione trascurabile, posti alla distanza di un metro nel vuoto, produce una forza, tra i due, pari a 2×10^{-7} N per metro di lunghezza.

Standard - 2

kelvin^[*]: frazione $1/273.16$ della temperatura del punto triplo dell'acqua.

candela: intensità luminosa, in direzione perpendicolare, di una superficie di $1/600.000 \text{ m}^2$ del corpo nero ...

radiante: angolo piano sotteso da un arco di circonferenza di lunghezza pari al raggio.

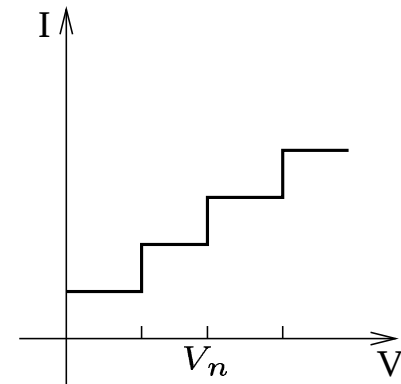
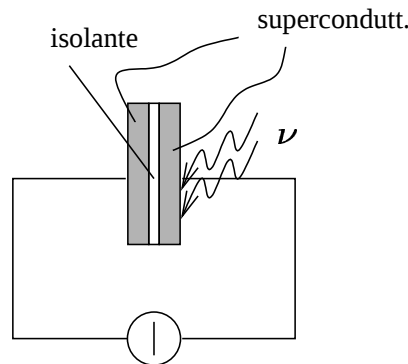
steradiane: angolo solido sotteso dalla superficie sferica di area pari al quadrato del raggio.

* una nuova definizione è prevista per l'anno 2011.

Standard per grandezze elettriche

tensione (Volt):

- cella di Weston (C: pasta di Hg_2SO_4 su Hg, A: amalgama Cd/Hg, sol. CdSO_4)
 - fornisce 1.01830 V a 20 °C *a vuoto*
 - difficoltà di trasporto
 - controllo della temperatura
 - attualmente è uno standard secondario
- riferimenti a stato solido
 - Effetto Josephson: (1962)

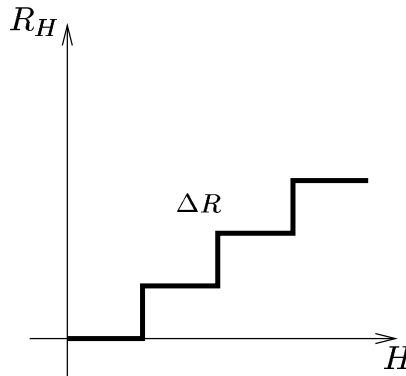
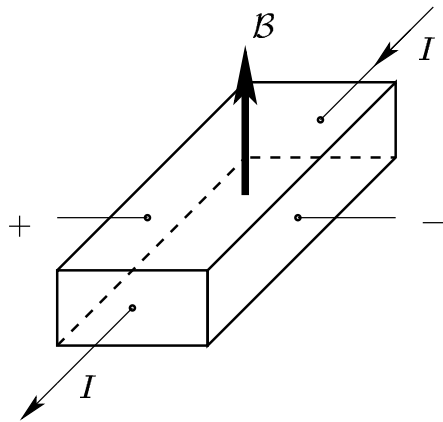


$$V_n = n\nu \frac{h}{2e} \quad \text{es. : } \nu = 96 \text{ GHz}, n = 250, V_n = 49.6 \text{ mV} \quad (\rightarrow \text{giunzioni in serie})$$

Standard per grandezze elettriche - 2

resistenza (Ohm):

- Effetto Hall quantistico (1879, 1980):



$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{h}{e^2}n$$

- Standard di lavoro:
 - resistori a filo avvolto, con basso coefficiente termico, mantenuti al riparo dall'umidità;
 - resistori a decadi.

Standard per grandezze elettriche - 3

capacità (farad):

- condensatori campione
condensatori a facce piane e parallele:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

- Condensatori campione fissi (10 pF $\rightarrow$ 1 μ F)
- Condensatori a decadi

induttanza (henry):

- non esiste standard vero e proprio
- è consigliata misura mediante ponte e confronto con capacità e resistenza standard.
- esistono standard di lavoro (100 μ H $\rightarrow$ 10 H)

Calibrazione

Confronto tra lo strumento di misura
e un campione (o altro strumento) di accuratezza nota.

Scopo: far sì che lo strumento sia in accordo con un certo riferimento.
(cioè *funzioni “correttamente”*).

Dopo la calibrazione, l'accuratezza dello strumento dipende da:

- tempo dall'ultima calibrazione;
- differenza tra temperatura di calibrazione e temperatura di lavoro;
- accuratezza del campione impiegato.