

Meccanica Sperimentale

(A. A. 2019/2020)

Ing. Antonio Virga

Ing. Sara Matteoli

Sperimentazione / Misura

- **Fenomeno** (oggetto della osservazione) & **modello** (del fenomeno) & **scopo** (della osservazione)
- **Sperimentazione**: interazione fra il sistema oggetto (mondo fisico) e l'osservatore per prelevare informazioni (**misure**)

Differenza fra **sperimentazione** e **misura**

- **Misura** \Rightarrow processo del prelievo delle informazioni e di attribuzione di “numeri” a caratteristiche del reale (grandezze fisiche) in modo da descriverle

Misura di una grandezza fisica

Quando si può definire **qualitativamente** e **quantitativamente un fenomeno o aspetti di un fenomeno**, si parla di grandezza fisica (es. la temperatura di un ambiente, la velocità di un corpo, la massa di un solido). Ogni grandezza fisica è definita mediante tre caratteristiche:

- la **specie** (definisce la qualità della grandezza)
 - la **misura**
 - l'**unità di misura**
- } (definiscono la grandezza quantitativamente)

Misura di una grandezza fisica

- Eseguire una misura comporta avere a disposizione un **dispositivo** ed una **procedura**, atti a produrre il valore attribuibile in istanti noti alle **grandezze** osservabili in un assegnato processo

Definizioni

- Tradizionale: confronto fra la grandezza fisica in esame ed un'altra della stessa specie scelta come unità.
- Esaustiva: ogni processo che porta ad assegnare dei numeri ad aspetti di oggetti o eventi in accordo a certe regole (qualsiasi purché non casuali).

- confronto diretto (misure per confronto)
- confronto differito (strumenti a deviazione)

- contatori
- strumenti a soglia
- analizzatori di segnali
- etc.

Fenomeno

- Identificare gli elementi (grandezze) che lo determinano
- Conoscere le loro caratteristiche e mutue relazioni

permette di

disporre di un “**modello**”, qualitativo o quantitativo, del fenomeno.

Disporre di tale modello è essenziale, sia per la **sperimentazione** che per la **misura**

Misura



Una **misura** comprende una serie di operazioni con la quale si attribuisce un valore numerico alla grandezza fisica che si intende misurare. In generale tali operazioni comprendono i passi seguenti:

- la grandezza è "sentita" dal sensore (dominio *chimico-fisico*)
- l'informazione uscente dal sensore è trasdotta in una grandezza che spesso è elettrica ma può essere anche di altro tipo. Si passa cioè al *dominio di servizio*
- il risultato può quindi essere visualizzato su un quadrante o memorizzato oppure usato in un sistema di diagnosi o controllo; il passaggio dal *dominio di servizio* al *dominio dell'informazione* costituisce lo *stadio di condizionamento*.

Grandezza

- Grandezza = ente (fisico) suscettibile di definizione quantitativa (misura)
- Definizione quantitativa = applicare il concetto di “somma” e di “confronto”

es.: lunghezza, massa, ecc.

Grandezze

- Nominali – colore, labeling, ecc.
- Ordinali - grandezze tecnologiche (durezza, resilienza Charpy, ecc.)

- Estensive – lunghezza, tempo, temperatura, ecc.
- Intensive – temperatura, pressione, ecc.
- Vettoriali – forze, velocità, ecc.

- Misure di riconoscimento – dispositivi rivelatori, ecc.
- Indici di prestazione – quoziente intellettuale, ecc.

- ecc.

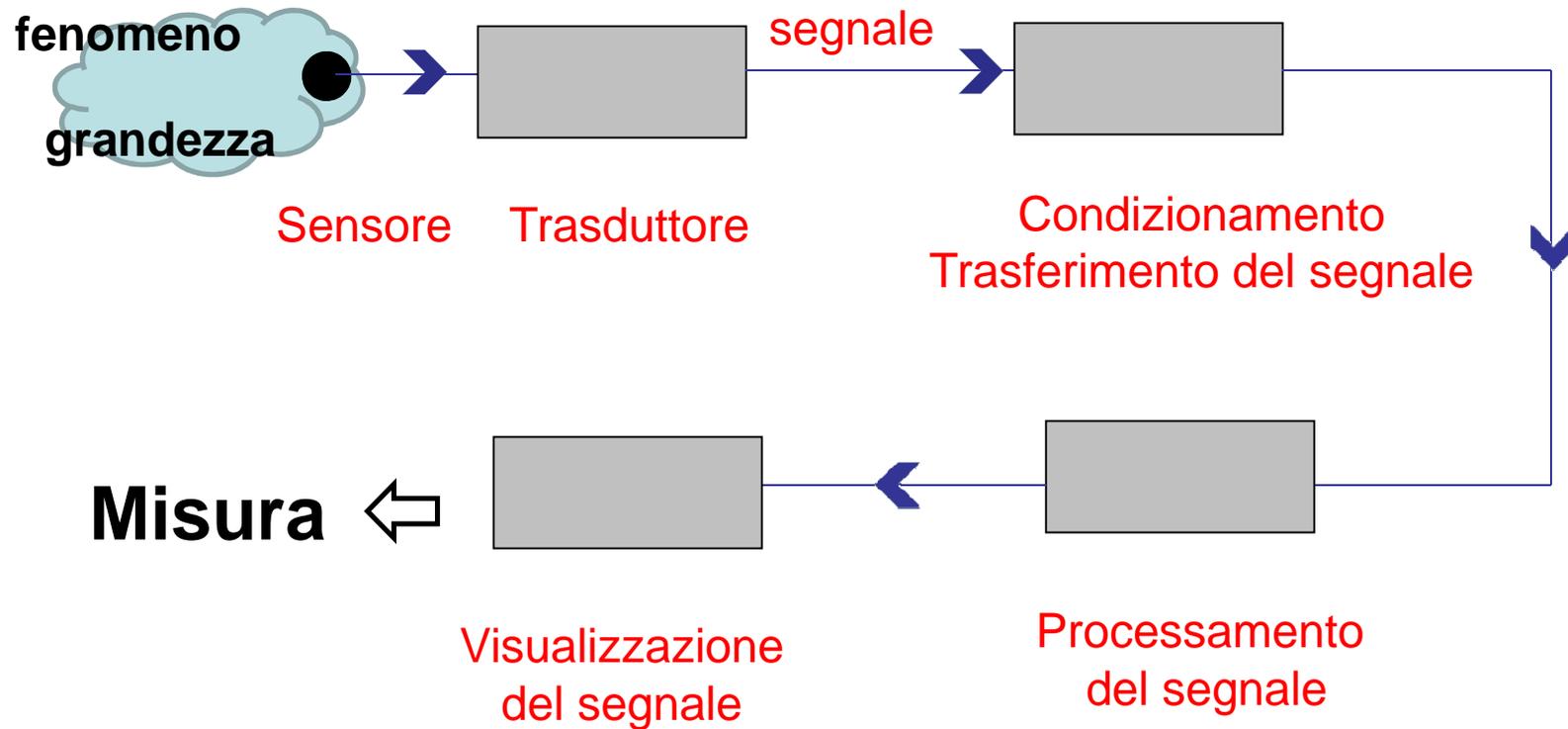
Grandezze

Sono **estensive** le proprietà fisiche di un materiale o di una sostanza che dipendono dalla dimensione del campione: la massa, il peso, la lunghezza, il volume, l'energia.

Sono **intensive** le proprietà fisiche di un materiale che non dipendono dalla dimensione del campione.

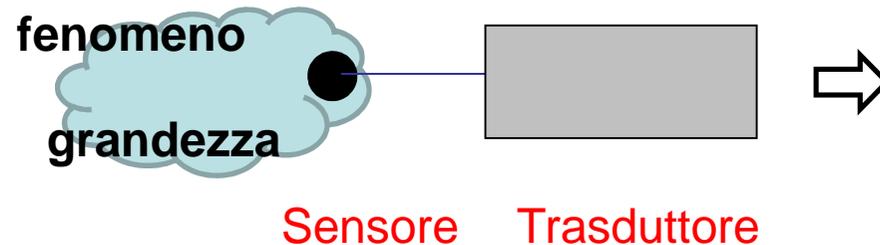
	Proprietà intensive	Proprietà estensive
Definizione	non dipendono dalla dimensione del campione	dipendono dalla dimensione del campione
Esempi	peso specifico	massa
	densità	volume
	temperatura, pressione, entalpia, ecc.	lunghezza, energia, forza, ecc.

Catena di misura



La catena di misura è attraversata da un qualche tipo di segnale: è una forma di energia.

Catena di misura

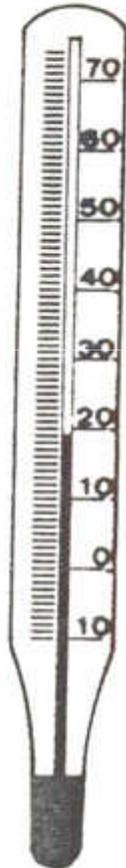


Sensore = (elemento sensibile) – un fenomeno induce nel sensore una variazione del suo stato – fornisce una uscita che dipende dalla variazione della grandezza di interesse

Trasduttore = trasferisce il segnale da un supporto fisico ad un altro (elemento modificatore: modifica la natura del segnale)

Si possono avere elementi modificatori non voluti (parassiti)

Esempio: termometro a bulbo

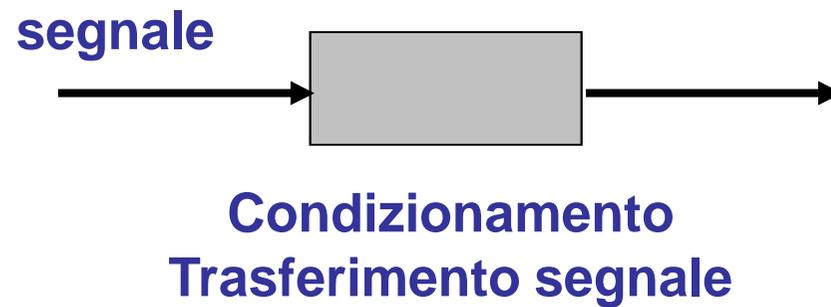


- Elemento sensibile?
- Elemento modificatore?
- Elemento rivelatore?



Principio fisico: $V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T)$

Catena di misura



Condizionatore = converte il segnale per renderlo più adatto a successive elaborazioni
es.: amplificatore

Trasferimento del segnale

Catena di misura



Processore = tratta il segnale per renderlo più adatto a successive elaborazioni

es.: filtro passa alto, filtro passa basso, convertitore A/D, FFT, media, ecc.

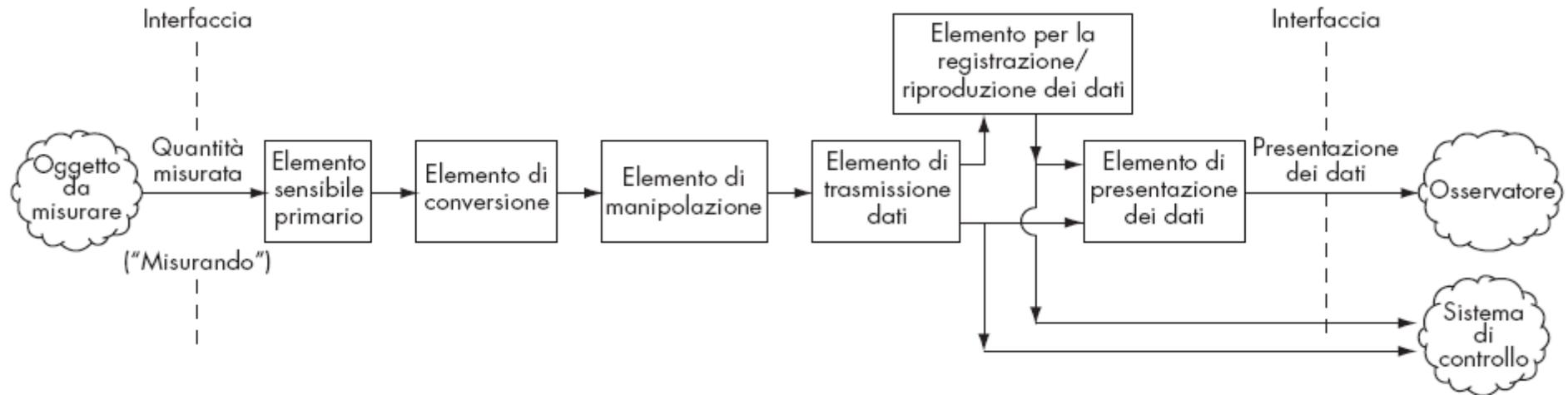
Catena di misura



- **Visualizzazione** = rende leggibile il segnale (elemento rivelatore)
- **Registrazione** = memorizza il segnale (documentazione)

Catena di misura

Si possono avere vari schemi, come il seguente. Nel caso più si identificano diversi **elementi funzionali**:



Tipologie di strumenti

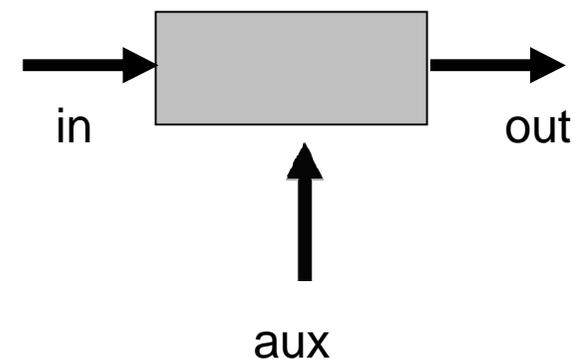
Strumenti attivi e passivi

- L'energia assorbita dal processo di misurazione è usata per ottenere un segnale di misura: **trasduttori attivi**
- Una energia (diversa dalla precedente) è necessario prelevare da una fonte esterna per ottenere un segnale di misura: **trasduttori passivi**

Trasduttori attivi



Trasduttori passivi



! In alcuni testi tale classificazione è opposta **!**

Tipologie di strumenti

Strumenti analogici e digitali

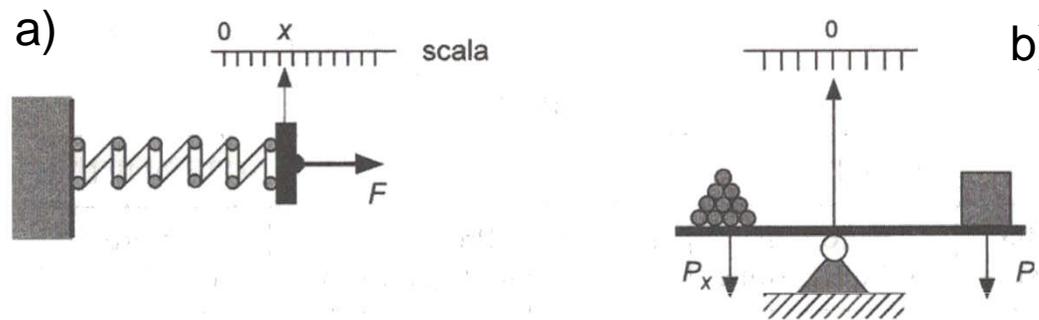
- Lo **strumento analogico** fornisce un segnale continuo (es. lo spostamento di un indicatore); tale indicatore si muove in analogia alla grandezza da misurare (da cui il nome di strumento analogico).
- Nello **strumento digitale** il valore elettrico della grandezza fisica viene convertito in un numero (*digit*) mediante un processo detto *campionamento*.

Strumenti lineari e non lineari (riguarda il legame fra ingresso e uscita)

- Nello **strumento lineare** il legame fra ingresso e uscita è dato da una retta (funzione lineare).
- Nello **strumento non lineare** il legame è più complesso (ad esempio una parabola, una funzione esponenziale o logaritmica, ecc.)

Tipologie di strumenti

Strumenti a deflessione e per azzeramento



- Nello **strumento a deflessione** (a) la grandezza da misurare genera una contro-reazione nello strumento (la forza prodotta dalla molla è in equilibrio con quella da misurare)
- Nello **strumento per azzeramento** (o **a bilanciamento nullo**) l'indicatore è riportato nella posizione di zero da una contro-reazione (*grandezza di contrasto*) tornando alla condizione di bilanciamento nullo.

Tipologie di strumenti

Strumenti assoluti e tarati

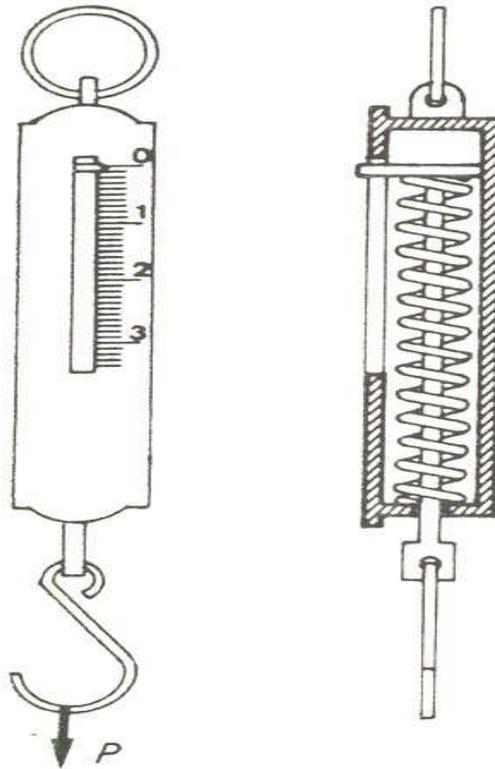
- Uno strumento è detto **assoluto** quando la sua scala è determinata usando leggi fisiche, geometriche, ecc.
- Nello strumento **tarato** (o **calibrato**) la scala è determinata mediante confronto con uno strumento assoluto o con uno strumento campione.

Misure dirette e indirette

- La **misura diretta** consiste nel confronto diretto della grandezza in esame con la sua unità di misura.
- La **misura indiretta** si ottiene attraverso la misura diretta di altre grandezze.

Esempio: dinamometro a molla

- Elemento sensibile?
- Elemento modificatore?
- Elemento rivelatore?



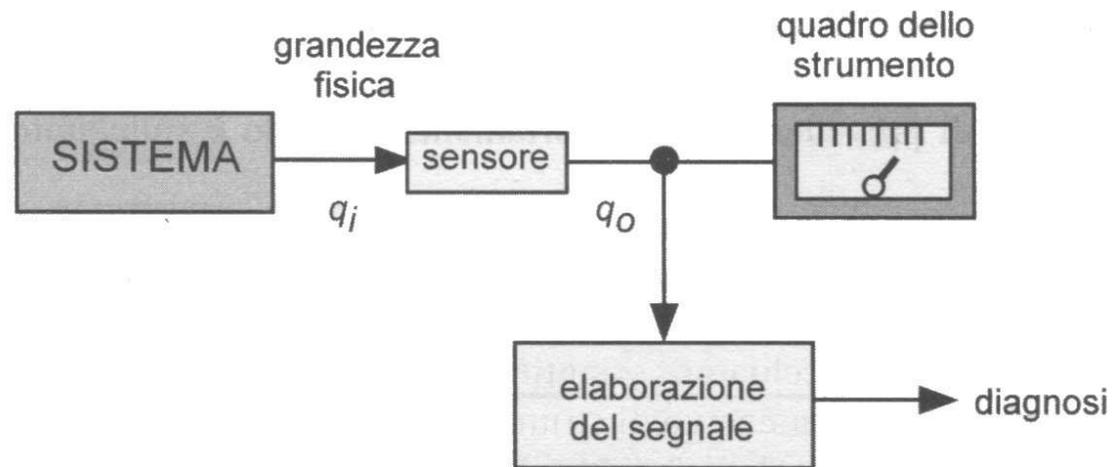
Principio fisico:
 $F = K \cdot \Delta x$
(legge di Hooke)

Campi di applicazione dello strumento di misura

- **Misura** di laboratorio per progettazione, ricerca o sviluppo
- **Controllo** di operazioni e processi - Sistema di controllo in retroazione (feedback)
- **Monitoraggio**. Il sistema di misura viene utilizzato per tenere sotto controllo operazioni e processi tramite qualche grandezza
- **Diagnostica**, di un impianto o macchinario, per individuare eventuali anomalie e identificarne le cause
- **Identificazione di modelli** fisico-matematici

Uso delle misure

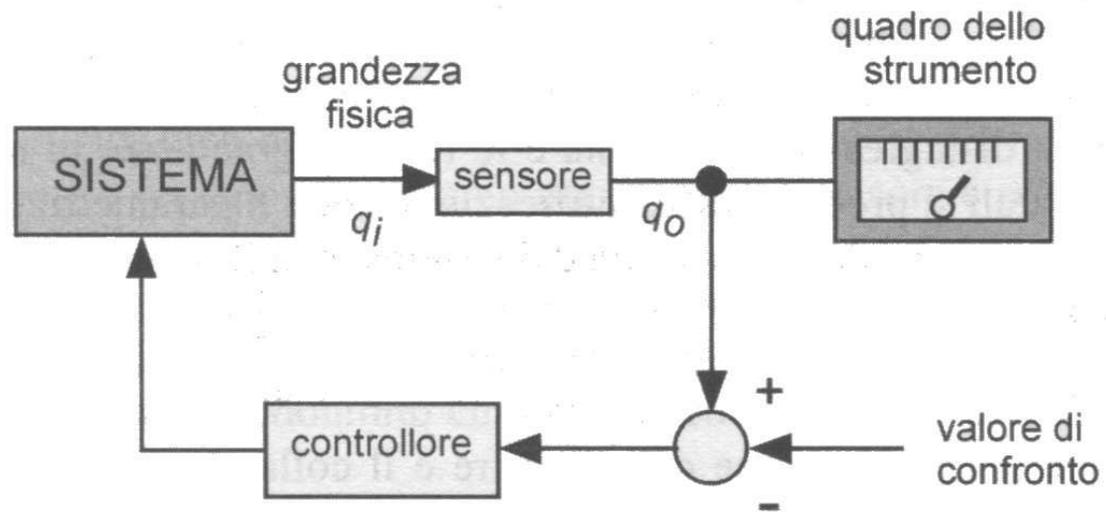
a) Diagnostica di processi e di operazioni



Schema di sistema diagnostico.

Uso delle misure

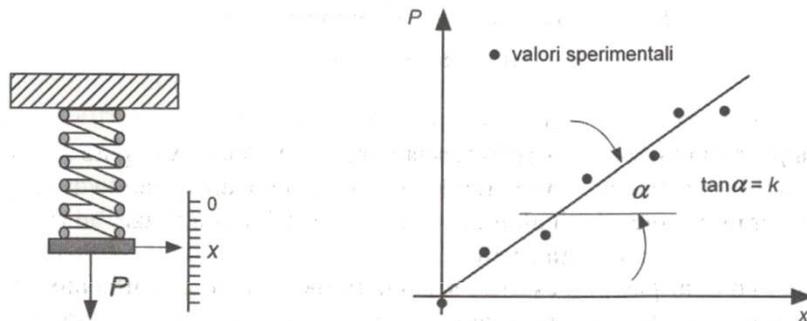
b) Controllo di processi e di operazioni



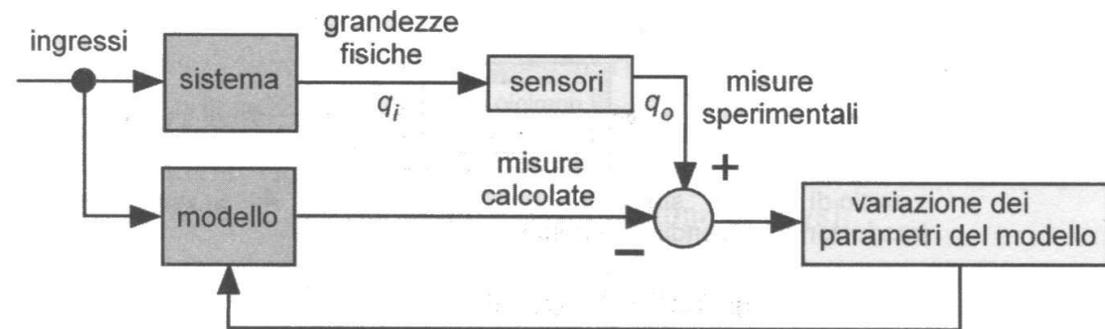
Schema di sistema di controllo ad anello chiuso.

Uso delle misure

c) Identificazione di modelli fisico-matematici



Es.: non conoscendo la legge di Hooke, come trovare la relazione fra carico e spostamento dell'indice?



Schema concettuale dell'identificazione di un modello matematico.

d) Collaudo (è la verifica sperimentale del rispetto delle specifiche di progetto)

Classificazione in base ai principi fisici

- Leggi spostamento-deformazione / trasduzione meccanica (legge di Hooke, di Newton, etc.), per trasduttori di spostamento, deformazione, forza, coppia, velocità, accelerazione, etc.

- Effetto meccanico-capacitivo $C \propto \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$

{	ε costante dielettrica
	A area delle armature
	d distanza fra le armature

- Effetto meccanico-resistivo $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$

{	ρ resistività
	l lunghezza del conduttore
	S sezione del conduttore

Classificazione in base ai principi fisici

- Effetto induttivo

$$L = n \cdot \mu \cdot G$$

L Induttanza
 μ permeabilità magnetica
 n numero di spire
 G fattore di forma

- Effetto piezoelettrico

$$E = g \cdot t \cdot p$$

g sensibilità
 t spessore
 p pressione

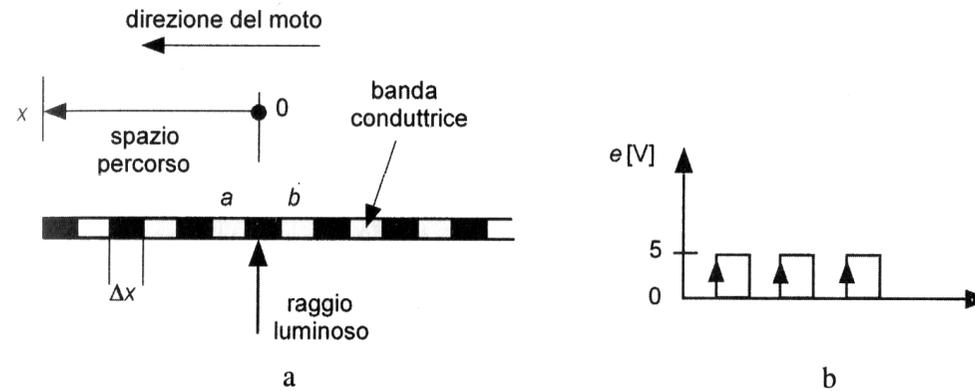
- Trasduzione a riluttanza
(linear variable differential transformer - LVDT)

$$R = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

μ permeabilità magnetica
 S area tubo di flusso magnetico
 l lunghezza

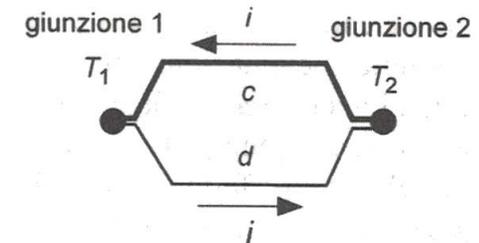
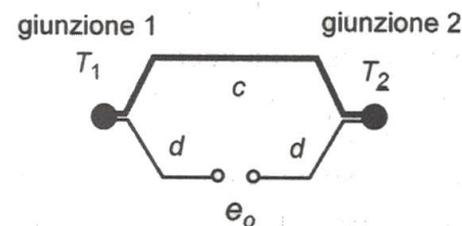
Classificazione in base ai principi fisici

- Trasduzione ottica (es. encoder)



- Metodi sonori - ultrasonori
- Effetto Seebek (termocoppie)

$$e_0 = f(T_1 - T_2)$$

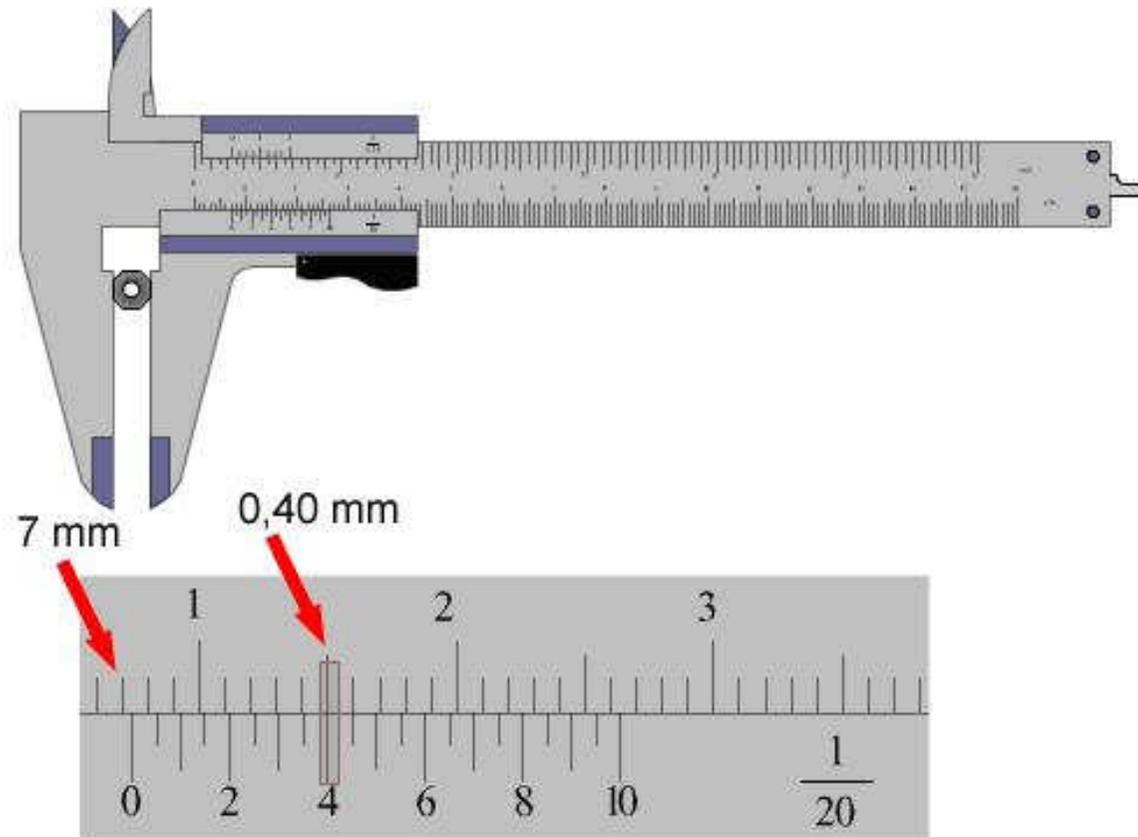


Altre classificazioni

- Misure statiche / dinamiche
(grandezze tempo invarianti / tempo varianti)
- Una grandezza **tempo invariante** fornisce un segnale costante nel tempo (a parte le variazioni dovute agli errori).
- Una grandezza **tempo variante** varia nel tempo, spesso in maniera molto rapida.

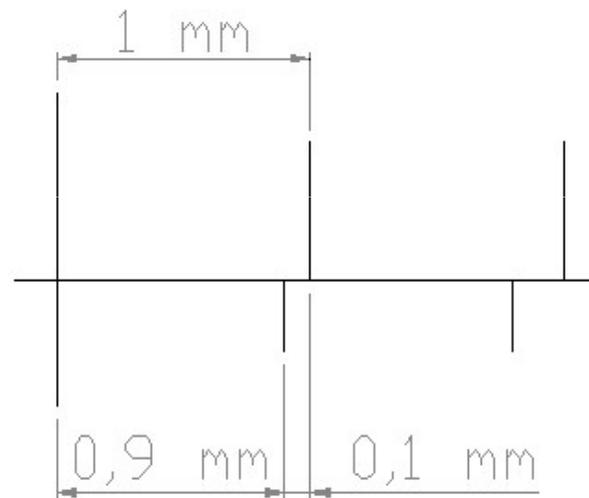
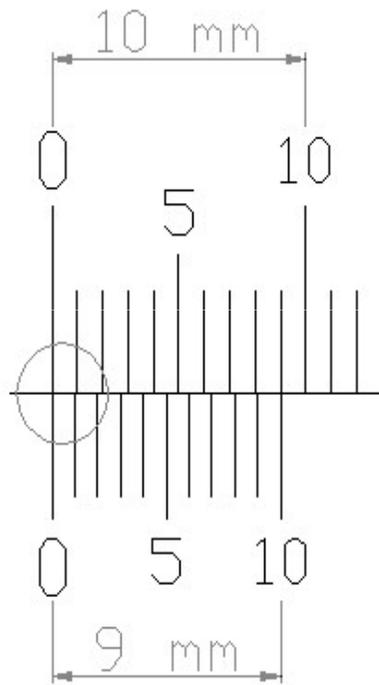
Misure di lunghezza

Esempio: calibro



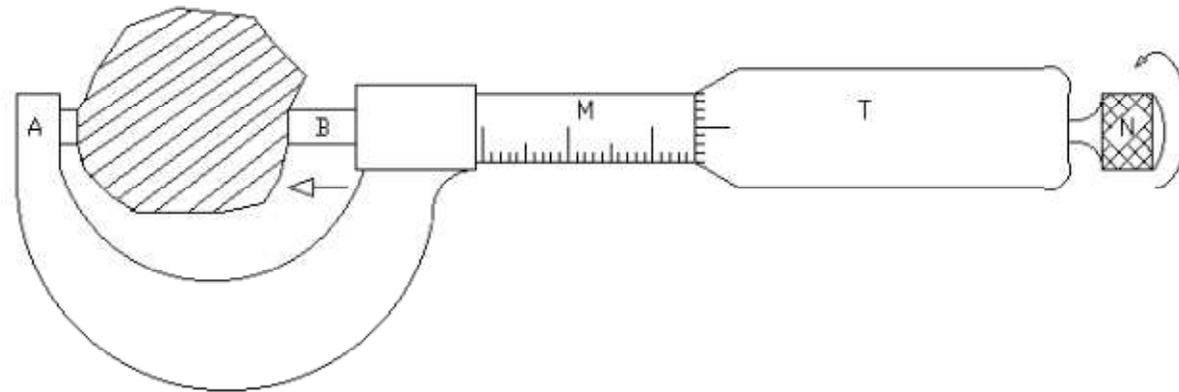
(concetto di risoluzione)

Calibro decimale



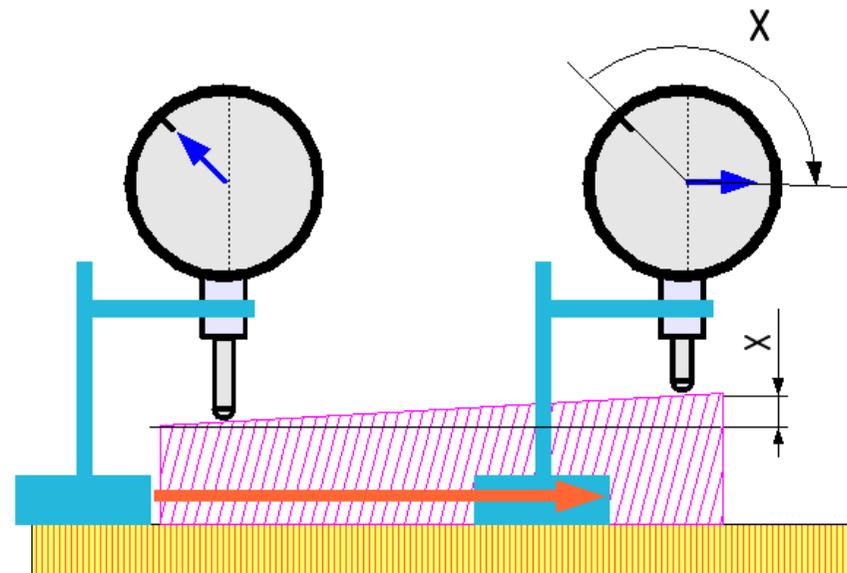
Misure di lunghezza

Esempio: micrometro



Misure di spostamento

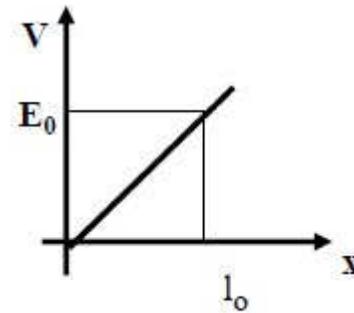
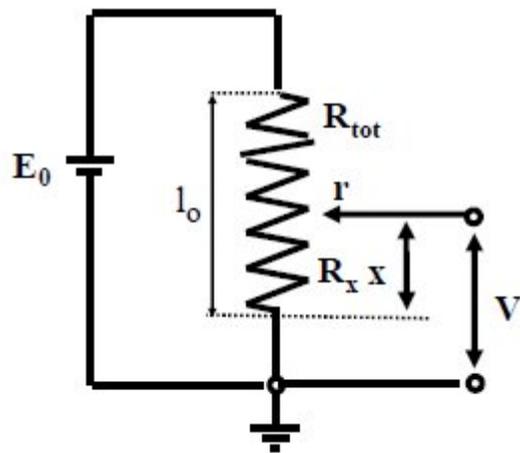
Esempio: comparatore



Misure di spostamento

Esempio: trasduttore resistivo

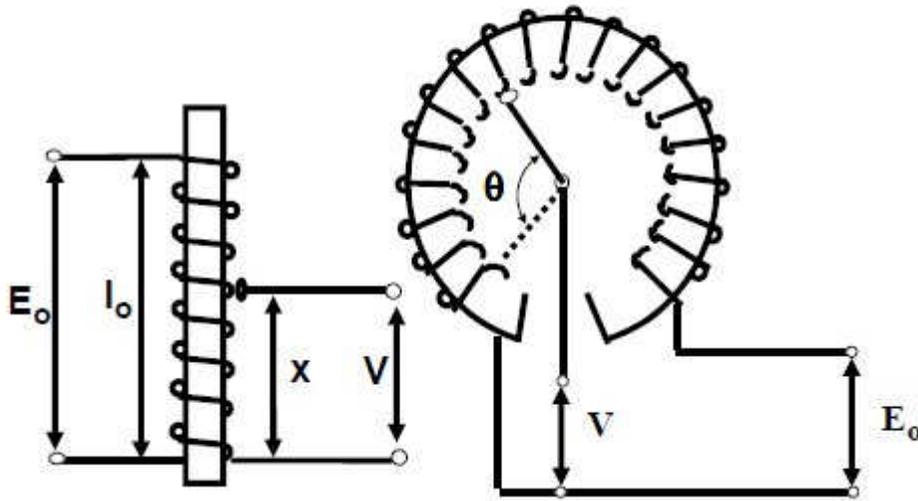
(potenziometri)



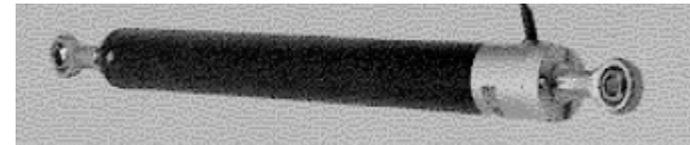
Legge teorica (lineare)

Misure di spostamento

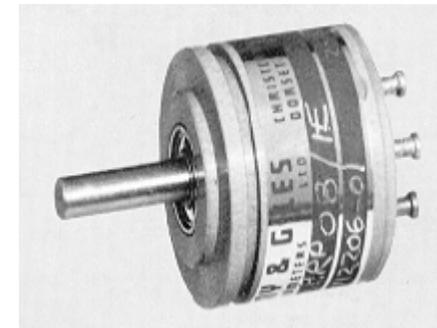
Esempio: trasduttore resistivo



Esistono sia di tipo lineare...



... che rotanti



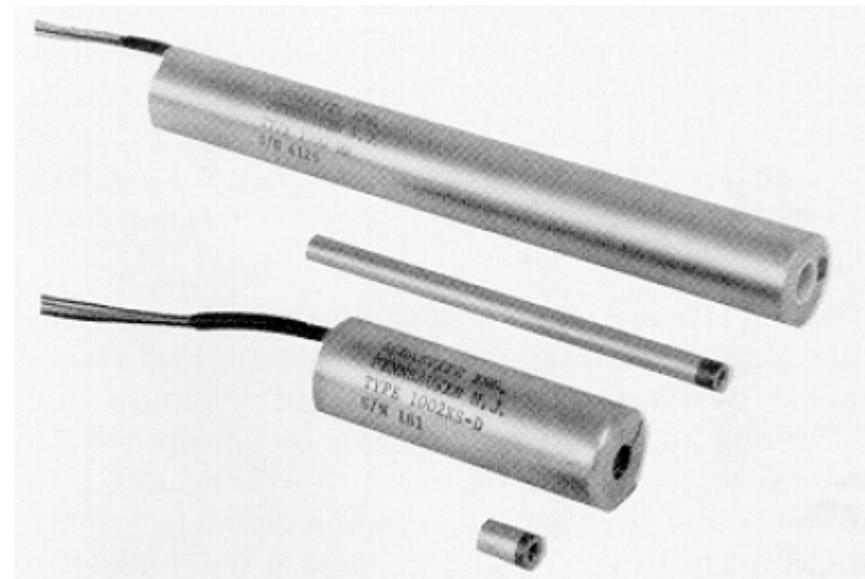
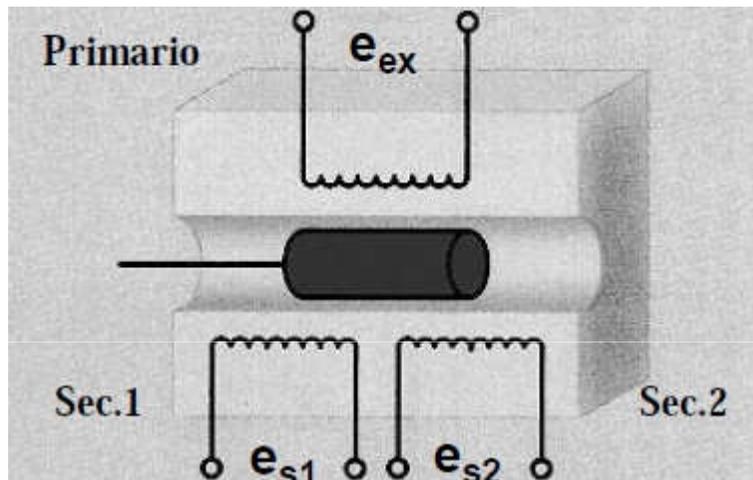
Se è di tipo a spire ha una caratteristica a "gradini"

(risoluzione teorica = $\frac{l_0}{N}$)

Nel caso di potenziometri a 'strato' la risoluzione teorica è infinita

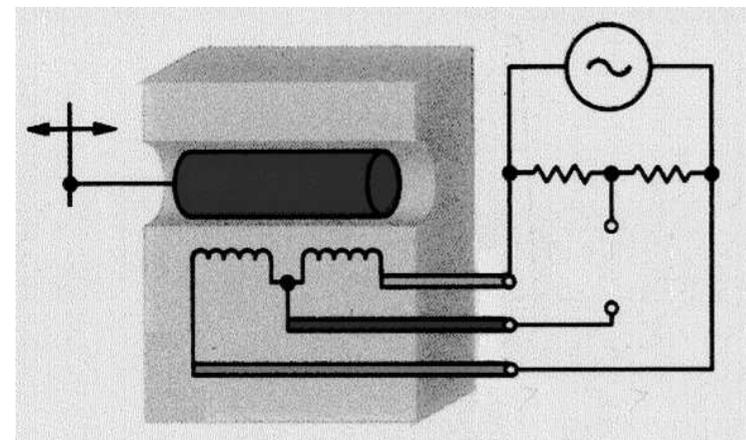
Misure di spostamento

Esempio: comparatore di spostamento a trasformatore differenziale (LVDT)



Misure di spostamento

Esempio: comparatore induttivo



Misure di forza

Esempio: cella di carico



- **Estensimetriche**
- **Piezoelettriche**
- **Piezoresistive,**
- **etc.**

Strumenti di misura

Schema di osservazione / strumentazione

Rigido

hardware

Programmabile

software

Adattabile

I.A. (intelligenza artificiale)

Strumento

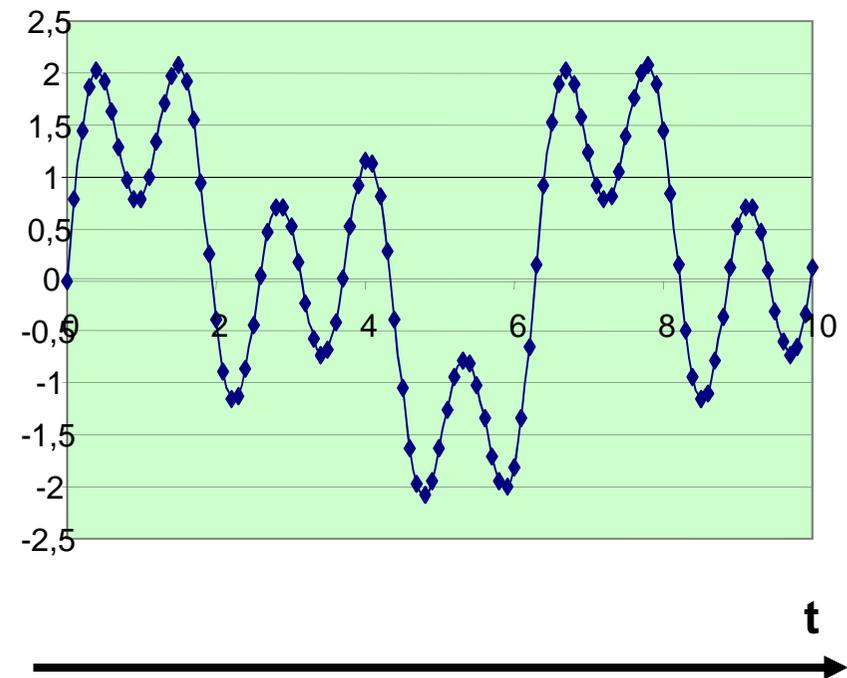
Indipendentemente dai principi fisici e dagli elementi funzionali presenti, spesso si può usare uno schema semplificato:



- **Dispositivo** = un apparecchio che svolge una determinata funzione
- **Segnale** = una modulazione di una grandezza fisica tale da veicolare una informazione

Segnale

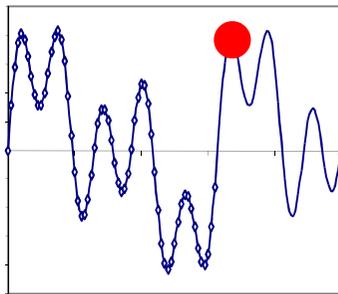
- Entità della grandezza = Ampiezza segnale
- Variazioni della grandezza = forma del segnale (dominio del tempo e/o della frequenza)



Segnale

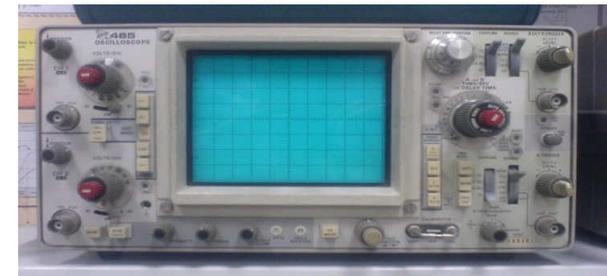
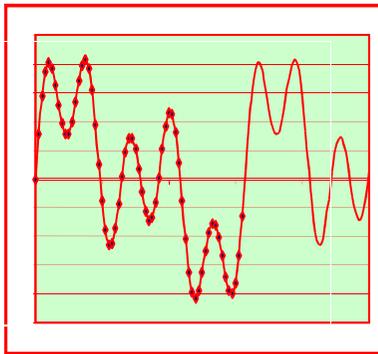
Misura (grandezza del segnale in un determinato istante)

Es.: voltmetro

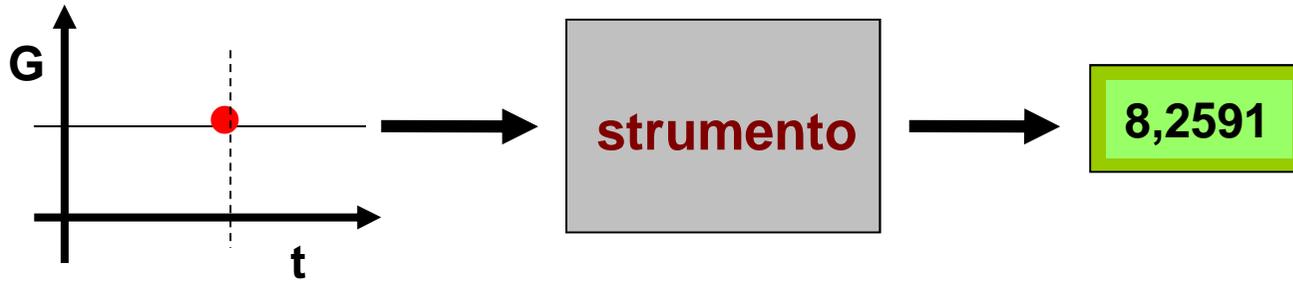


Acquisizione (dell'intero segnale o di una sua porzione)

Es.: oscilloscopio



Grandezza tempo invariante



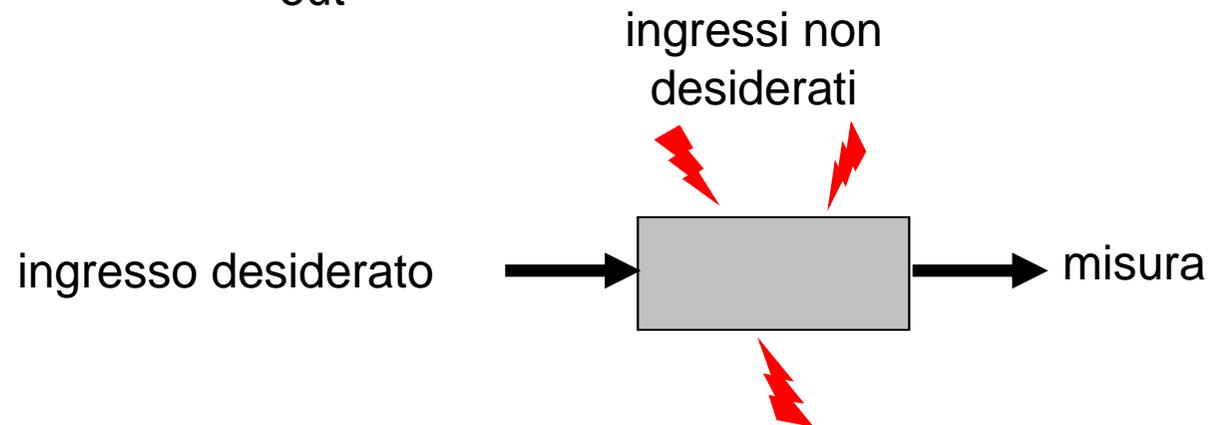
Strumenti di misura

Lo strumento dovrebbe essere:

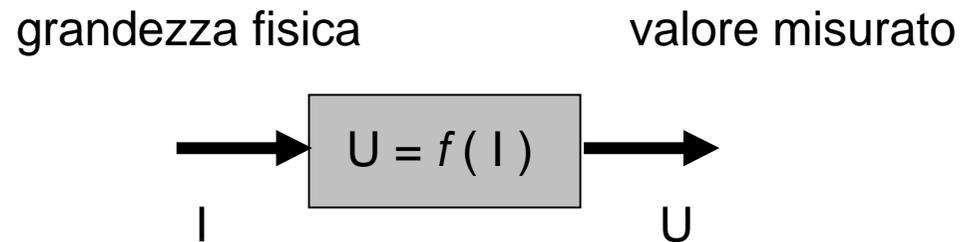
- “Sensibile” alla grandezza da misurare
- “Insensibile” ad ogni altra entità (disturbo)
- “Trasparente” per il fenomeno in osservazione

grandezza fisica

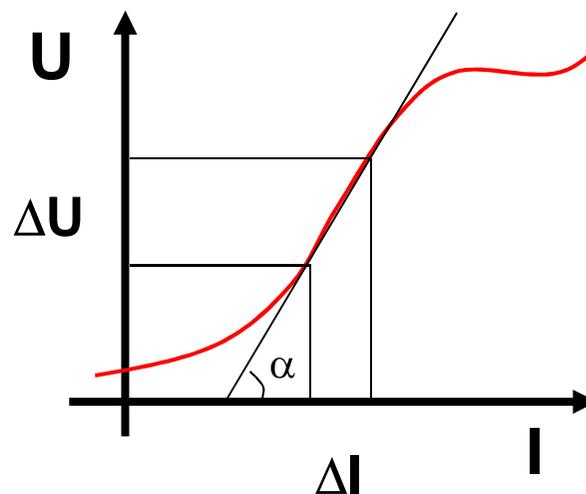
valore misurato



Strumenti di misura: definizioni



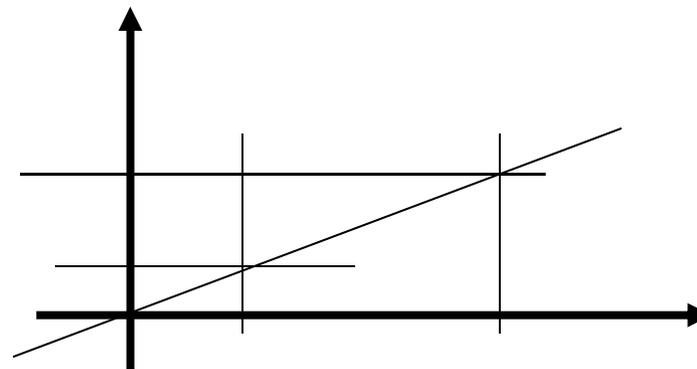
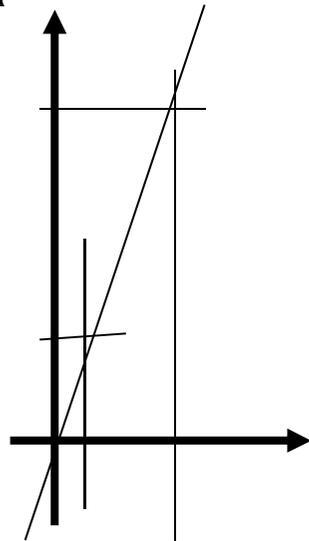
f = funzione di trasferimento \rightarrow curva caratteristica (grafico della funzione di trasf.)



Sensibilità = $\Delta U / \Delta I$
 (unità di misura)
 E' la pendenza della curva

Sensibilità

- **Sensibilità** $\Delta U / \Delta I$ – derivata della curva –
es.: amplificatore (guadagno)
- Alta sensibilità = piccole variazioni in ingresso \Rightarrow alte variazioni in uscita
- Bassa sensibilità = grandi variazioni in ingresso \Rightarrow piccole variazioni in uscita



Strumenti di misura: definizioni

Sensibilità assoluta

es. dinamometro a molla:

$$F = K \cdot \Delta x$$

$$\text{Sensibilità} = \Delta U / \Delta I = 1/K \text{ [m/N]}$$

Sensibilità relativa

es. rispetto al fondo scala / rispetto all'alimentazione (trasduttori passivi)

$$\text{Sensibilità} = 2 \text{ mV/V uscita a fondo scala} \\ (2 \text{ mV/V/F.S.})$$

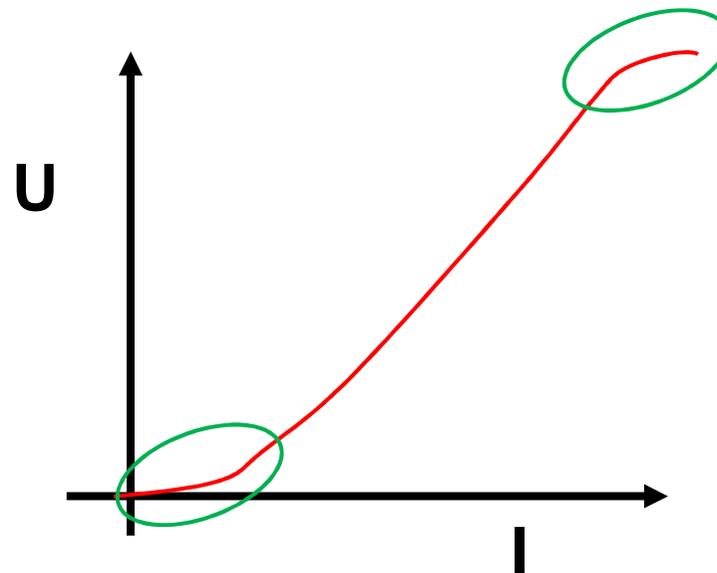
Strumenti di misura: definizioni

Risoluzione

Si può definire in vari modi, ad esempio come minima variazione del misurando che si può rilevare con lo strumento. Oppure si può collegare all'errore assoluto globale (ma non sempre viene fatto: in tal caso la risoluzione non è collegata alla precisione dello strumento, ovvero alla sua "qualità").

Soglia e saturazione

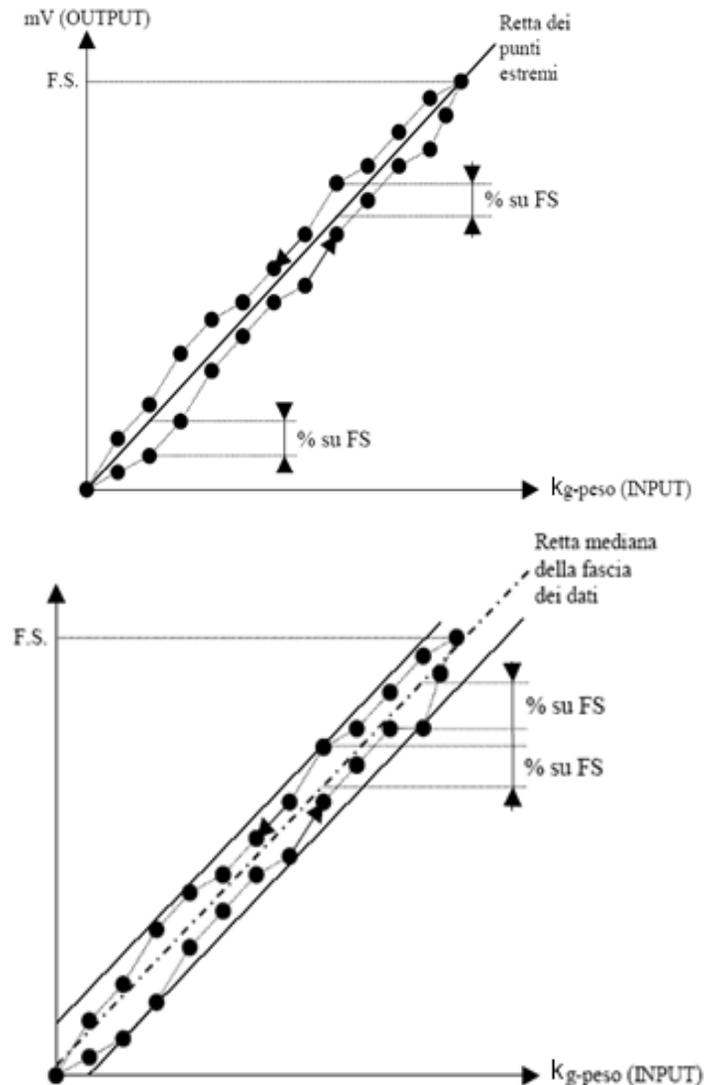
- **Soglia:** valore minimo che si riesce a misurare
- **Saturazione:** variazione della sensibilità per alti ingressi
- **Range - Fondo scala**



Linearità

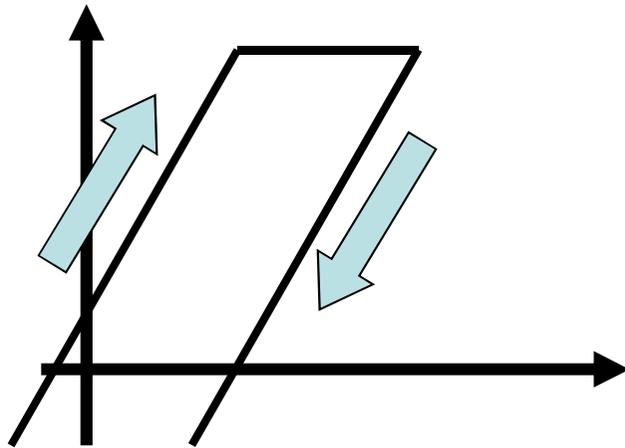
La **linearità** può essere espressa nelle tre forme seguenti:

- 1) **Linearità dei punti estremi:**
 È costituita da due valori calcolati rispettivamente sulla successione di ingresso crescente e decrescente, ciascuno dei quali rappresenta la max deviazione percentuale (sul F.S.) dell'uscita rispetto alla retta passante per i punti "origine" e "F.S."
- 2) **Linearità media**
 È costituita da due valori calcolati rispettivamente sulla successione di ingresso crescente e decrescente, come max deviazione percentuale rispetto alla retta mediana che costituisce l'asse della fascia rettilinea che include l'andamento grafico isteretico.
- 3) **Linearità ai minimi quadrati**
 È costituita da due valori calcolati rispettivamente sulla successione di ingresso crescente e decrescente, come max deviazione percentuale rispetto alla retta che minimizza la sommatoria dei quadrati degli scostamenti fra essa stessa e i punti rappresentativi delle misure.

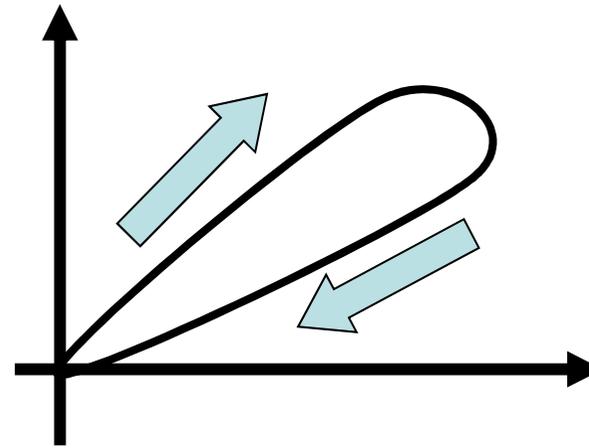


Isteresi

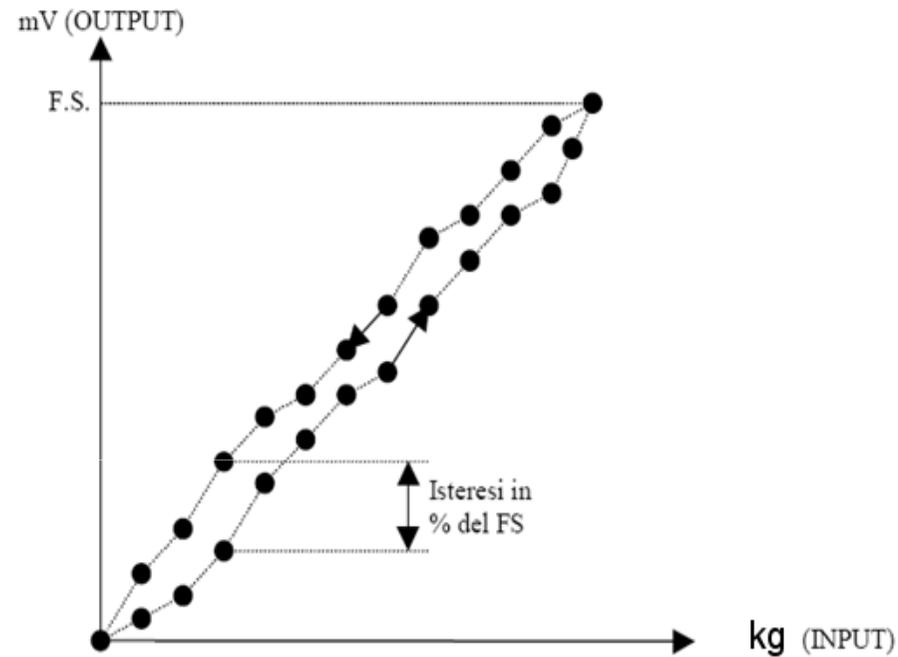
- **Isteresi** = differenza di risposta con ingressi crescenti e con ingressi decrescenti



(errore di inversione)



Isteresi

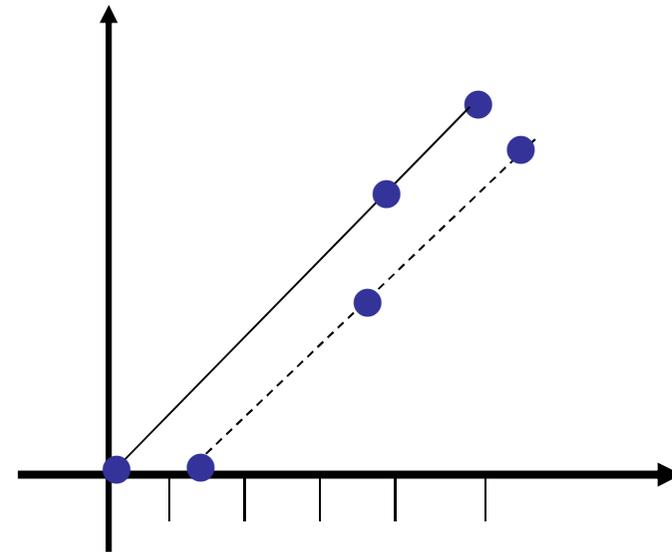


Fornisce una indicazione dell'attitudine di un trasduttore a produrre la stessa uscita sia nel caso che l'ingresso di riferimento sia raggiunto da valori inferiori sia che venga raggiunto da valori superiori.

L'isteresi è quantificata come valore max della differenza tra l'uscita assunta nella fase crescente e l'uscita assunta nella fase decrescente in corrispondenza della stessa grandezza in ingresso.

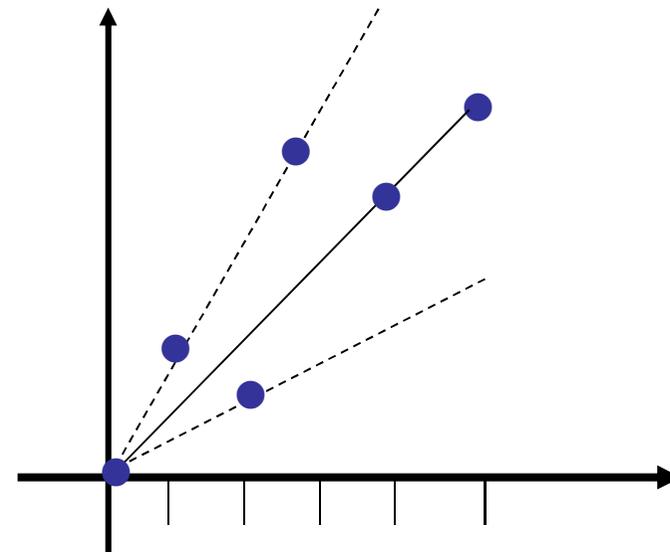
Deriva

- Deriva di zero



- Deriva di sensibilità

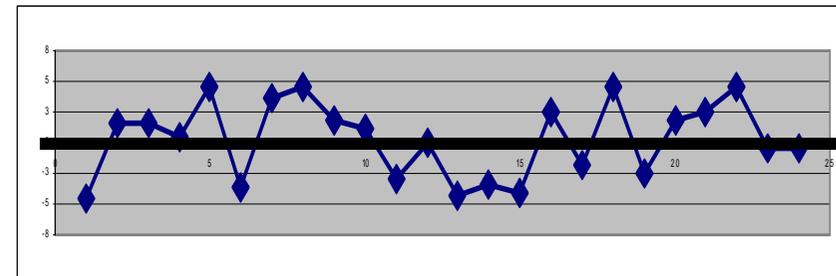
La deriva è funzione del tempo



Ripetibilità

- **Ripetibilità** = capacità di fornire stesse uscite a parità di ingresso
- **Stabilità** = ripetibilità nel tempo

Input = 0



2 esempi di definizione:

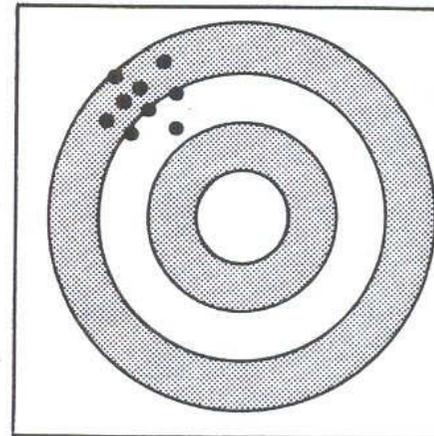
$$Rip_1 = \frac{misura_Max - misura_Min}{F.S.} \%$$

$$Rip_2 = \frac{Max_deviaz. - Val_medio}{F.S.} \%$$

Ripetibilità

- Una misura è tanto più *ripetibile* (o *fedele*) quanto più i singoli valori misurati si concentrano intorno alla media della serie di misure effettuate. Indica che gli errori casuali sono relativamente piccoli.

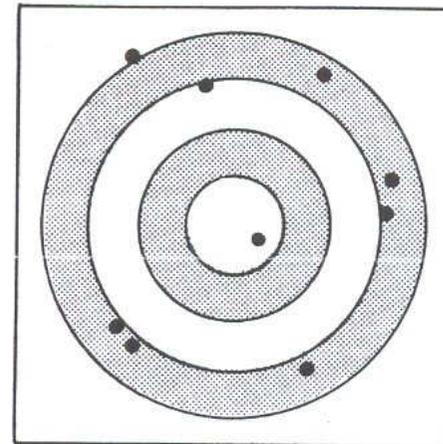
Esempio: fucile
ripetibile ma non
accurato



Accuratezza

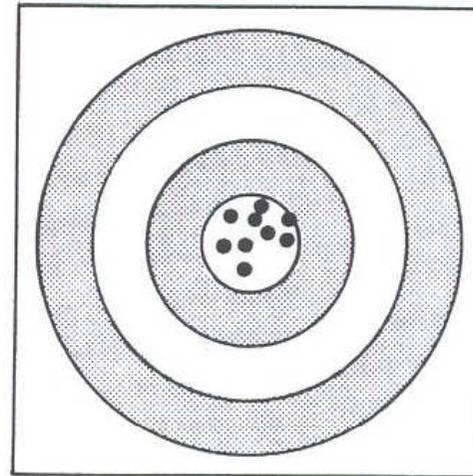
- L'*accuratezza* esprime l'assenza di errori sistematici nella misura: una misura è tanto più accurata quanto più la media delle misure si approssima al valore vero della grandezza.

Esempio: fucile
accurato ma non
ripetibile



Ripetibilità & Accuratezza = **Precisione**

Esempio: fucile accurato e ripetibile: preciso



- Precisione dello strumento = precisione ottenibile nelle misure effettuate con lo strumento
- Precisione dello strumento = indicata dal rapporto (%) fra l'errore (massimo) introdotto dallo strumento e la "misura" (massima / fondo scala)

$\pm ** \% \text{ f. s.}$

! Attenzione !

	qualità metrologica di una misurazione in relazione a:		
	errori accidentali	errori sistematici	errore globale
inglese	precision	(un) bias	accuracy
francese	fidélité	justesse	précision
italiano	fedeltà o ripetibilità (UNI 4546)	accuratezza (UNI 5968-67)	precisione (progetto ISA)

- Le definizioni in altre lingue possono essere diverse
- Come conseguenza libri tradotti da altre lingue possono riportare definizioni diverse

Taratura

Taratura \Leftrightarrow calibrazione: $U = f(I)$

Serve a determinare la funzione di trasferimento “effettiva”
(a meno degli errori)

- Strumento / catena di misura
- Procedura
- Serie di ingressi “campione”

Ingresso \Rightarrow Uscita

X	Y
0	0
1,5	3,1
3	-0,3
4,5	4,5
6	4,7
----	----
33	18,1
34,5	23,3
36	20,8

Taratura

Campioni di riferimento

Campione	Precisione ($10^{-\alpha}$) (classe di precisione)
Internazionale (Parigi)	8
Nazionale primario (Torino)	7
Nazionale secondario/trasferibile (Torino)	6
Locale (ufficio pesi e misure / laboratorio qualificato – Fi)	5
Laboratorio (dipartimento)	4 / 3
Strumento	3 / 2

Grandezze

Sistema SI - m kg s

- **metro** = lunghezza del tratto percorso dalla luce nel vuoto in $1/299792458$ s.
- **chilogrammo** = massa del campione primario - cilindro di altezza e diametro pari a 0,039 m di una lega di platino-iridio - depositato presso "Ufficio Internazionale dei Pesi e Misure" Sèvres (Francia).
- **secondo** = l'intervallo di tempo che contiene 9192631770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.

Proprietà di uno strumento / scelta di uno strumento

- Prestazioni
- Compatibilità con la strumentazione in dotazione
- Facilità di uso (manuali, chiarezza delle informazioni sui display, etc.)
- Maneggevolezza (es. peso)
- Utilizzabilità in esterno (protezione contro gli urti e l'ambiente, alimentazione da batterie)
- Assistenza / costo

Proprietà di uno strumento / scelta di uno strumento

- **Prestazioni**

Si definiscono attraverso i concetti seguenti:

- accuratezza
- ripetibilità
- precisione
- soglia
- potere risolutivo (o risoluzione)
- campo di misura (fondo scala)

Proprietà di uno strumento / scelta di uno strumento

• Prestazioni

Classificazione degli strumenti

Classe	Errore a fondo scala	Applicazioni
5	±5.0%	strumenti normali da quadro
2.5	±2.5%	strumenti normali da quadro
1.5	±1.5%	strumenti da quadro e portatili di precisione
1.0	±1.0%	strumenti portatili di precisione per collaudi e verifiche
0.5	±0.5%	strumenti portatili di precisione per misure in laboratorio
0.3	±0.3%	strumenti portatili di precisione per misure in laboratorio
0.2	±0.2%	strumenti portatili di grande precisione per misure in laboratorio
0.1	±0.1%	strumenti campione
0.05	±0.05%	strumenti campione

(es.: errore % a fondo scala = $\frac{2\sigma}{FS} \cdot 100$)

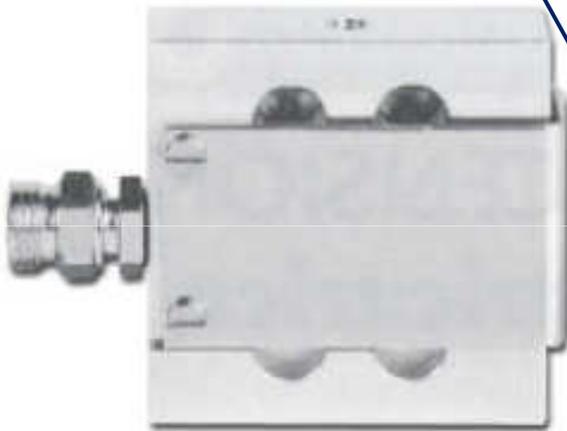
Strumenti di misura

Esempio: cella di carico

Effetto del tempo

Sensibilità relativa

* errori



Portata [Kg]
2
5
10
20
50

CARATTERISTICHE TECNICHE	
Uscita a fondo scala	2 mV/V
Tolleranza sulla taratura del f.s.	$\leq \pm 0,1\%$
Alimentazione massima	15 Vcc
Bilanciamento di zero	$\leq \pm 1\%$ f.s.
Resistenza ingresso	400 ± 25 ohm
Resistenza uscita	350 ± 2 ohm
Resistenza isolamento	≥ 2000 Mohm
Errore combinato	$\leq \pm 0,04\%$ f.s.
Isteresi	$\leq \pm 0,02\%$ f.s.
Creep 30'	$\leq \pm 0,05\%$ f.s.
Deriva dello zero con la temperatura	$\leq \pm 0,005\%$ f.s./ $^{\circ}\text{C}$
Deriva del F.S. con la temperatura	$\leq \pm 0,004\%$ f.s./ $^{\circ}\text{C}$
Campo di temperatura compensato	$-10 \div +40$ $^{\circ}\text{C}$
Campo di temperatura massimo	$-25 \div +70$ $^{\circ}\text{C}$
Massimo carico ammissibile	150% f.s.
Carico di rottura	$> 300\%$ f.s.
Grado di protezione	IP60
Materiale	Alluminio
Lunghezza cavo standard	5 m

*
*
*
*

Effetto dell'ambiente

Caratteristiche tipiche

Caratteristiche fisiche

Normative

GUM: UNI CEI ENV 13005 “Guide to the expression of uncertainty in measurement”

VIM: ISO/IEC Guide 99 “International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms”

ISO/IEC Guide 43 “Proficiency testing by interlaboratory comparisons” part 1 e part 2

UNI CEI EN ISO/IEC 17025 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”

SIT Doc-504 “Management procedure for the assessment of calibration laboratories”

SIT Doc-519 “Introduction to estimation criteria of the uncertainty of measurement in calibration” – it includes the translation of EA-4/02 into Italian

EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”

EA-2/09 “EA Policy on the Accreditation of Providers of Proficiency Testing Schemes”

EA-2/10 “EA Policy for Participation in National and International Proficiency Testing Activities”

EA-02/14 “Procedure for Regional Calibration ILCs in Support of the EA MLA”

ILAC-P9 “ILAC Policy for Participation in National and International Proficiency Testing Activities”

ILAC-G13:08 “ILAC Guidelines for the Requirements for the Competence for Providers of Proficiency Testing Schemes”

ILAC-G22 “Use of Proficiency Testing as a Tool for Accreditation in Testing”