



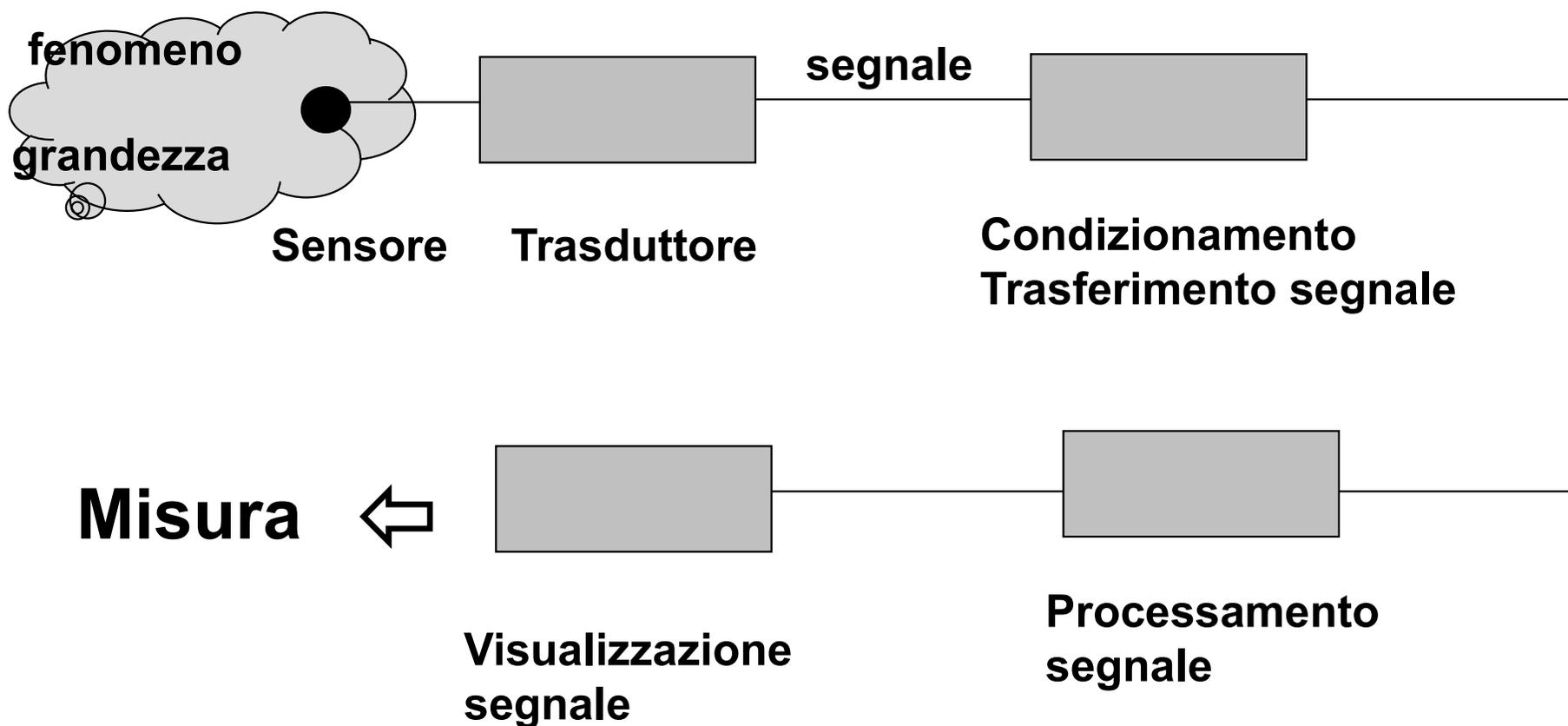
Misure Meccaniche e Collaudi

(A. A. 2020/21)

Generalità sugli strumenti di misura

M. De Lucia / D. Vangi

Catena di misura



Tipologie di strumenti

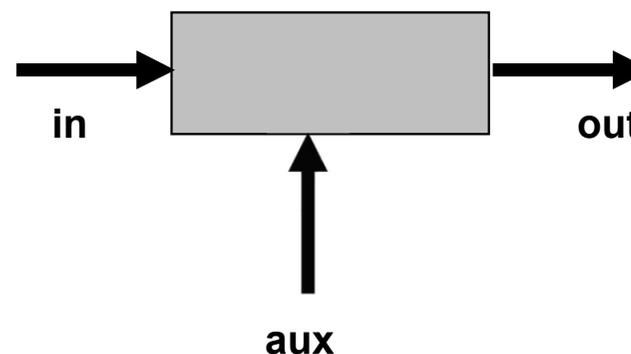
Strumenti con trasduttori attivi e passivi:

- **trasduttori attivi:** l'energia assorbita dal processo di misurazione è usata per ottenere un segnale di misura
- **trasduttori passivi:** è necessario prelevare una energia da una fonte esterna per ottenere un segnale di misura

Trasduttori attivi



Trasduttori passivi



! in alcuni testi tale classificazione è opposta !

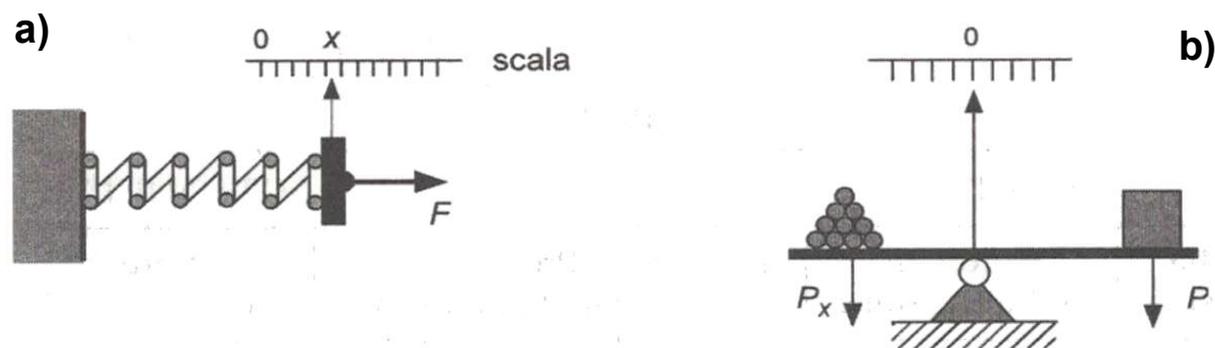
Tipologie di strumenti

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**

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.



Tipologie di strumenti

Schema di osservazione / strumentazione

Rigido

hardware

Programmabile

software

Adattabile

I.A. (intelligenza artificiale)

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**

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

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

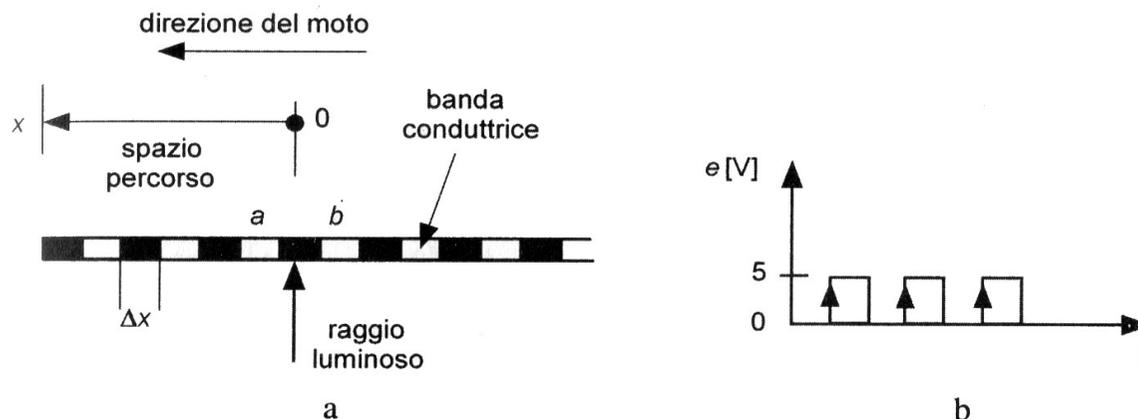
- **Trasduzione a riluttanza (LVDT)**

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

μ permeabilità magnetica
 S area tubo di flusso magnetico

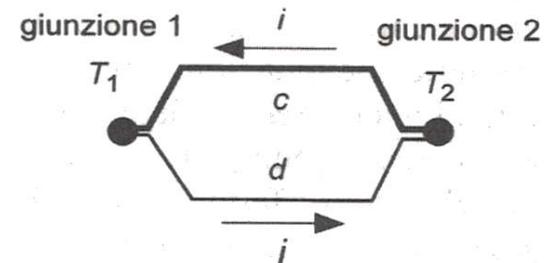
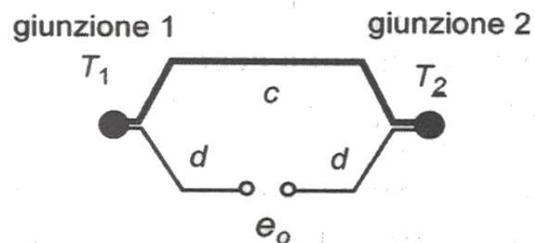
Classificazione in base ai principi fisici

- **Trasduzione ottica (es. encoder)**



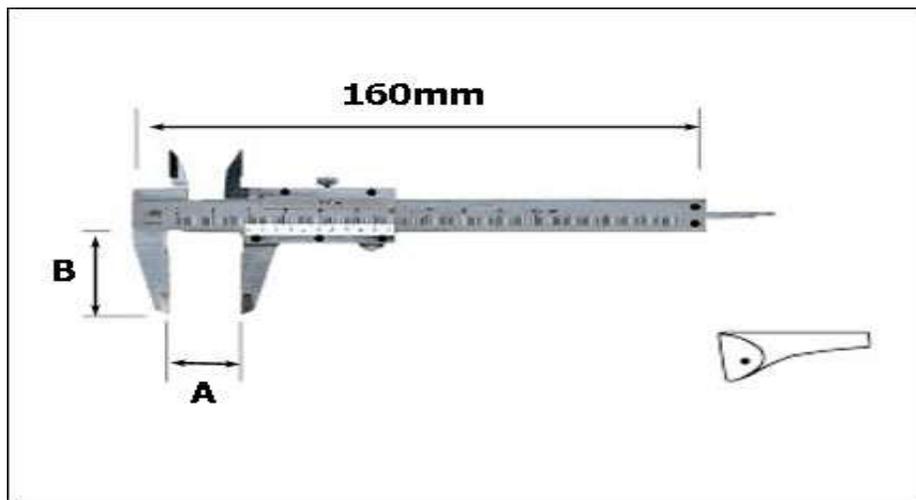
- **Metodi sonori - ultrasonori**
- **Effetto Seebeck (termocoppie)**

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

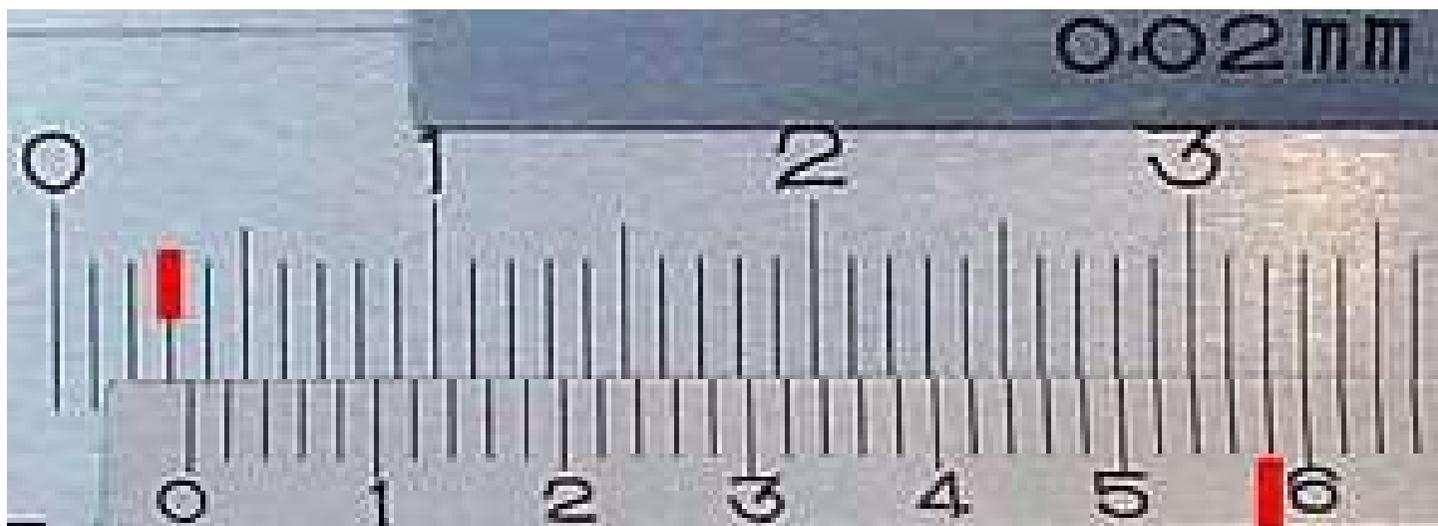


- **ecc.**

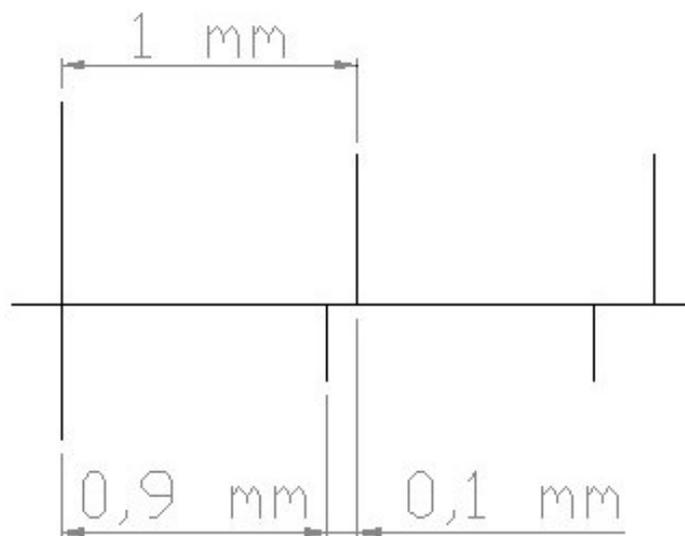
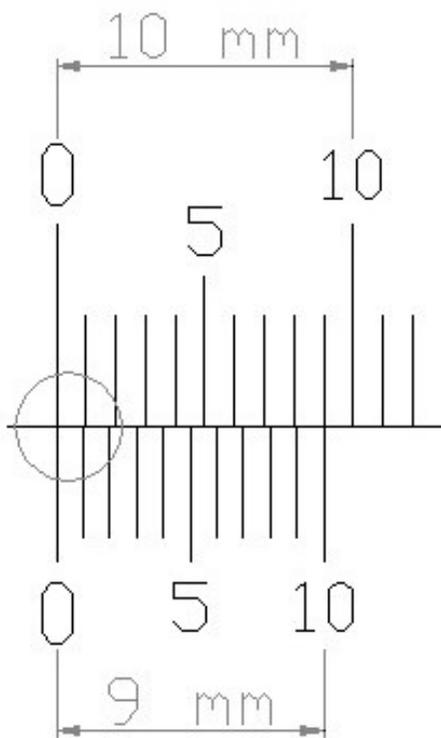
Es.: il calibro



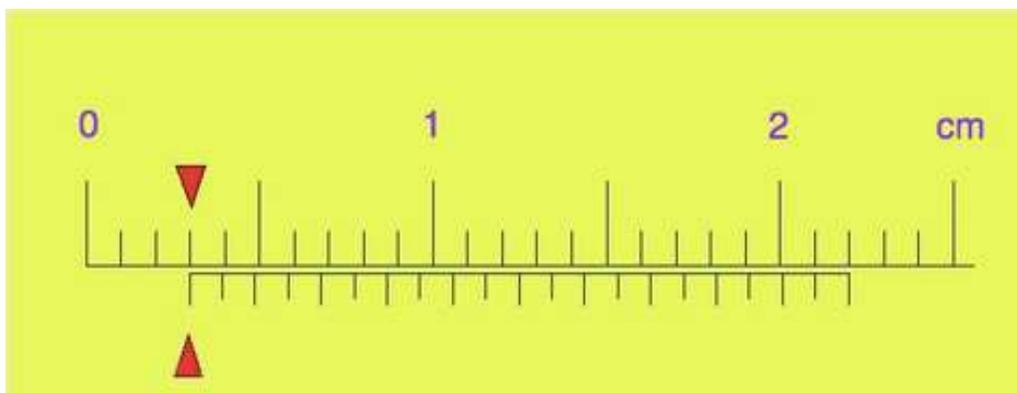
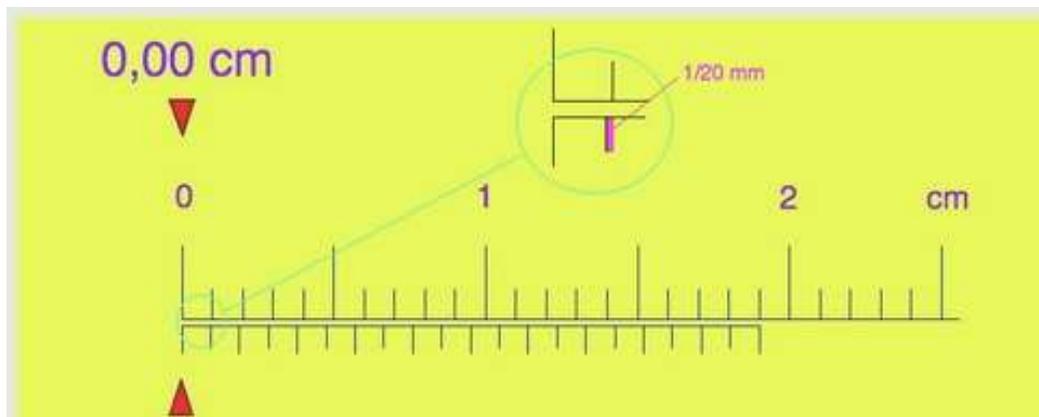
(la misura indicata è
3,58 mm)



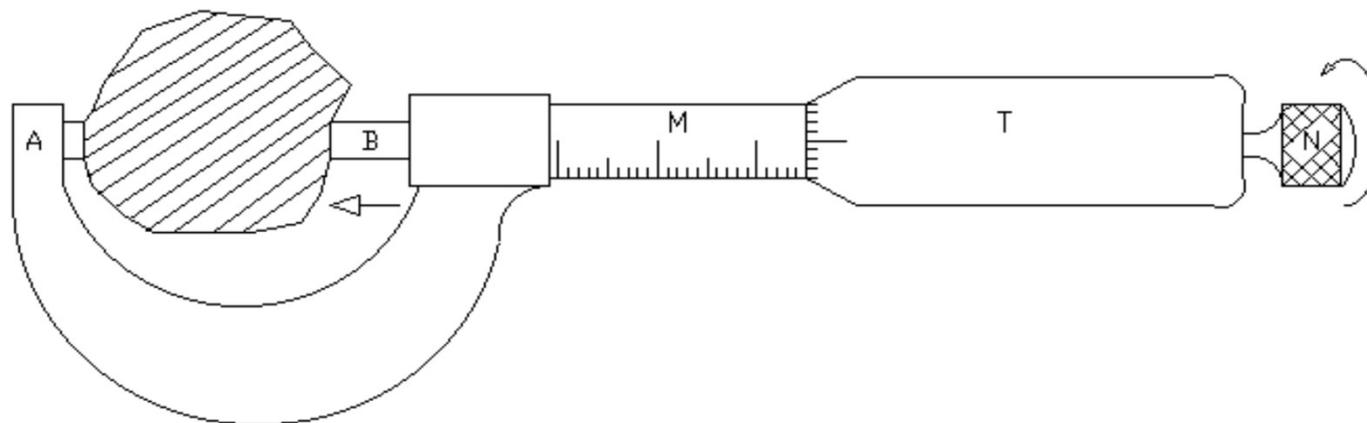
Calibro decimale



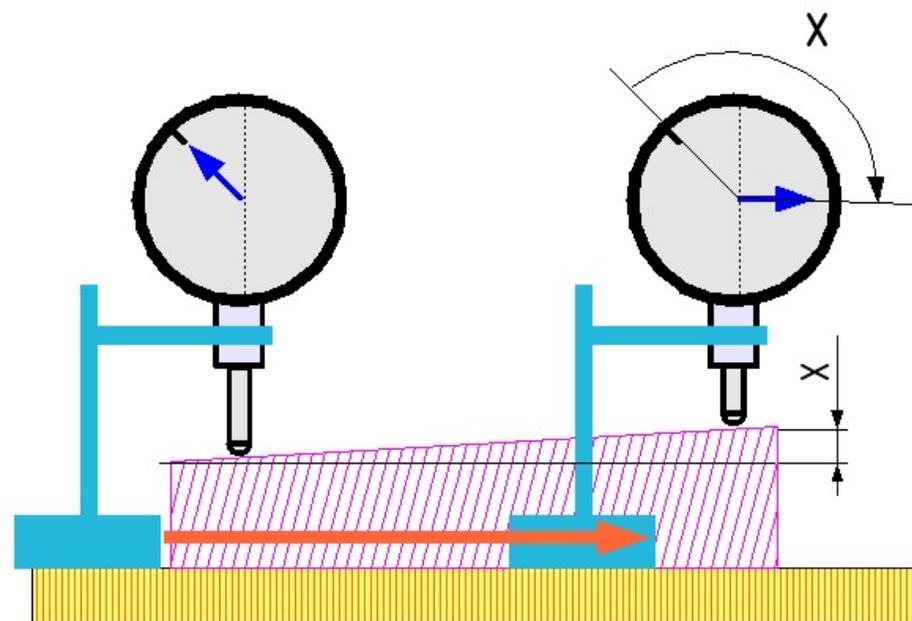
Calibro ventesimale



Esempio: micrometro

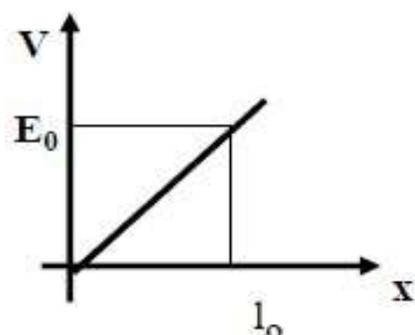
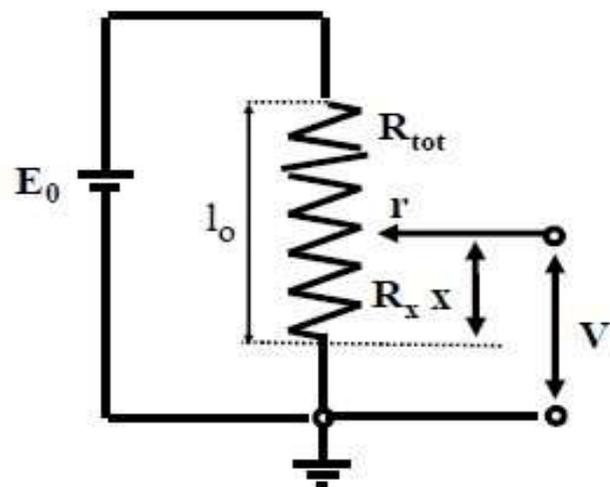


Esempio: comparatore



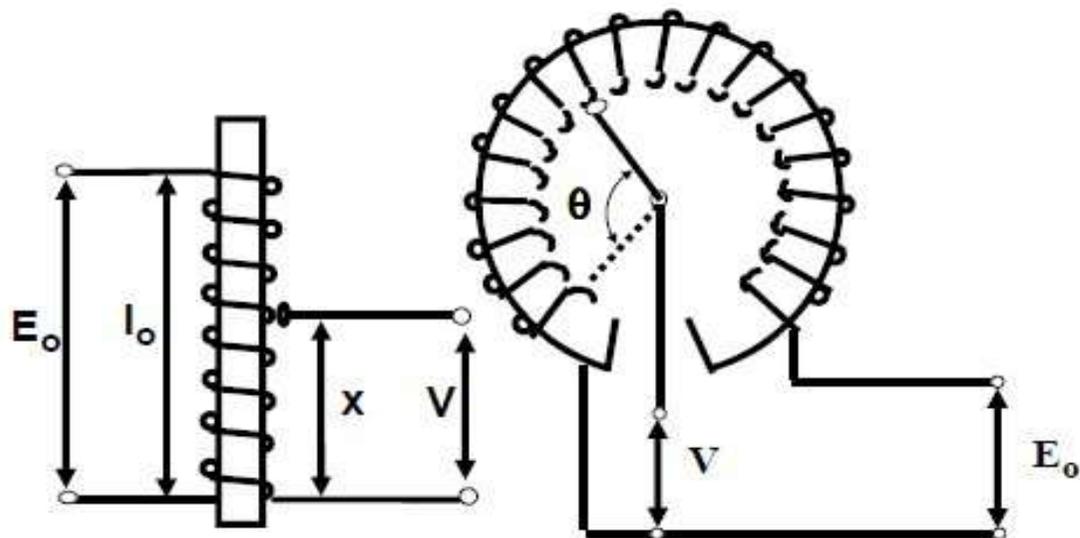
Esempio: trasduttore resistivo

(potenziometri)

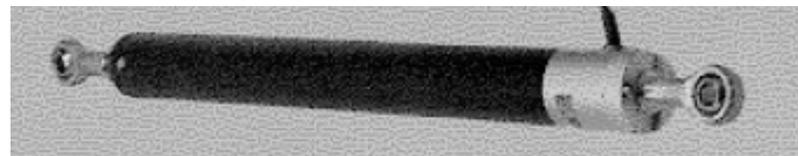


Legge teorica (lineare)

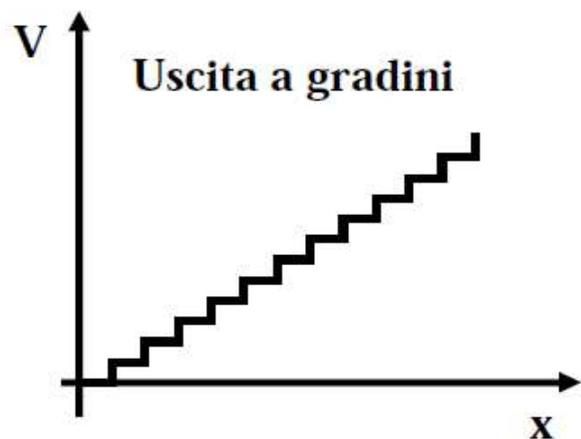
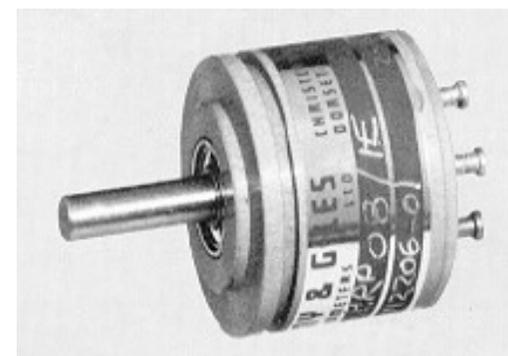
Esempio: trasduttore resistivo



Esistono sia di tipo lineare...



... che rotanti

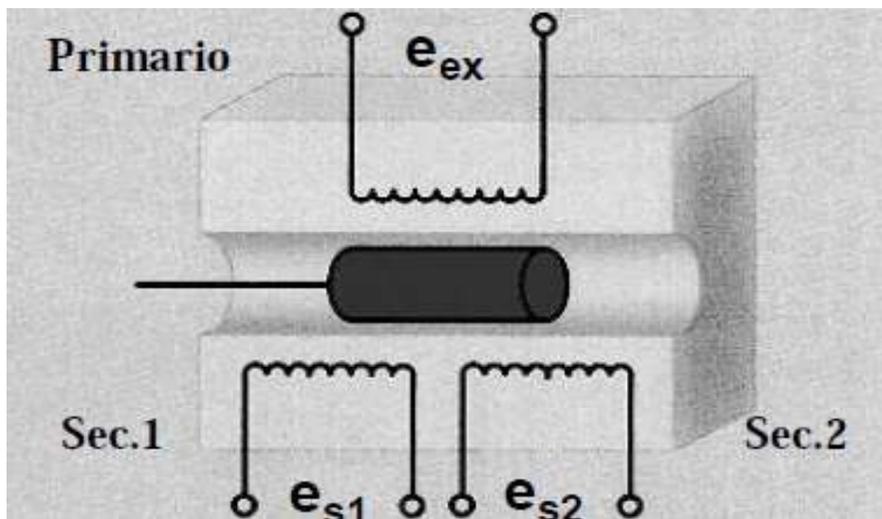


Se è di tipo a spire ha una
caratteristica a "gradini"

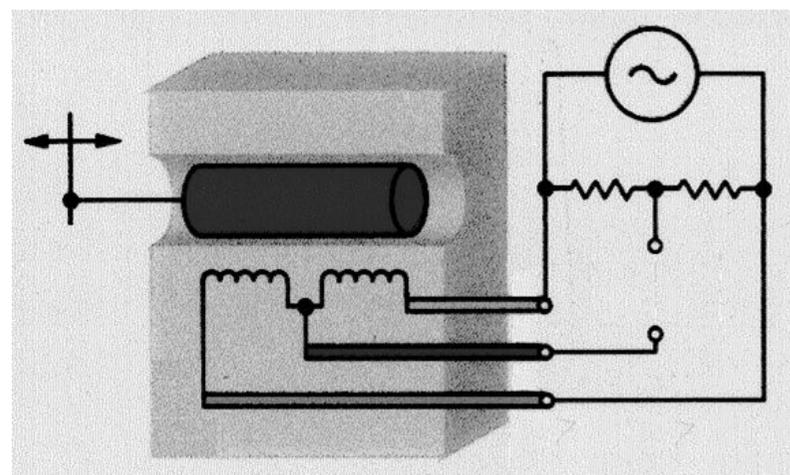
$$\text{(risoluzione teorica} = \frac{l_0}{N} \text{)}$$

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

Esempio: comparatore di spostamento a trasformatore differenziale (LVDT)



Esempio: comparatore induttivo



Esempio: cella di carico



- Estensimetriche
- Piezoelettriche
- Piezoresistive,
- etc.

Strumento

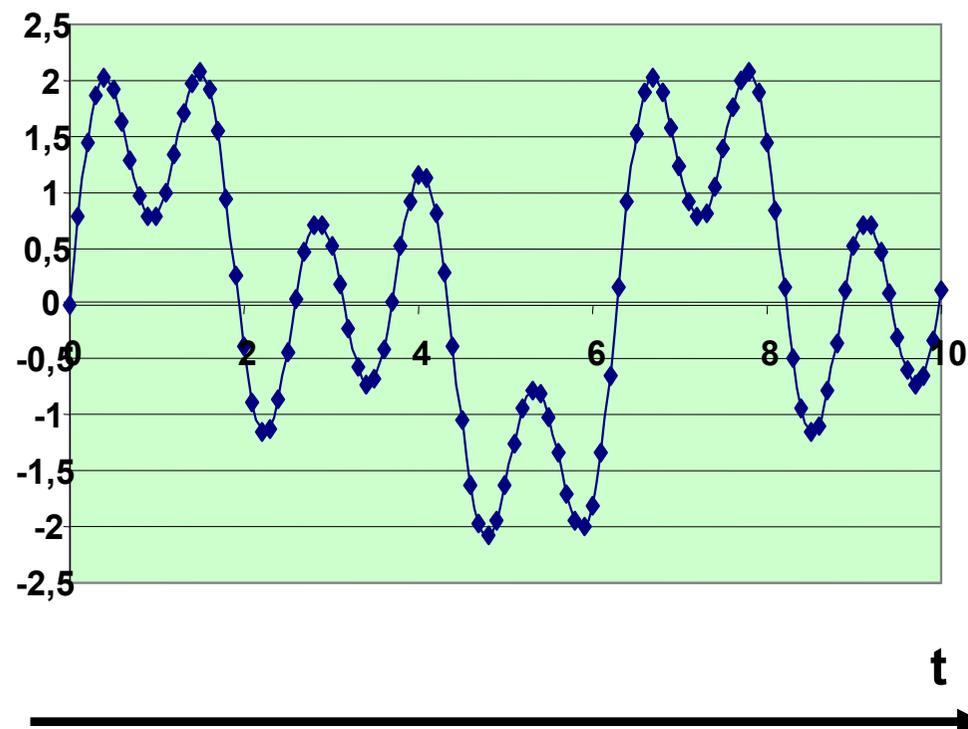
Indipendentemente dai principi fisici e dagli elementi funzionali presenti, spesso si può usare uno schema semplificato:



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

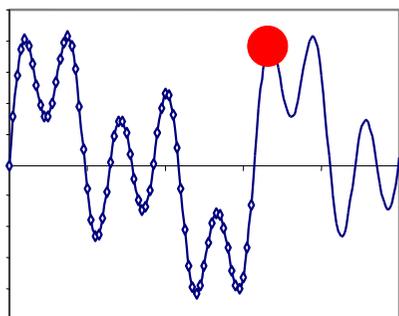
Segnale

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



Segnale

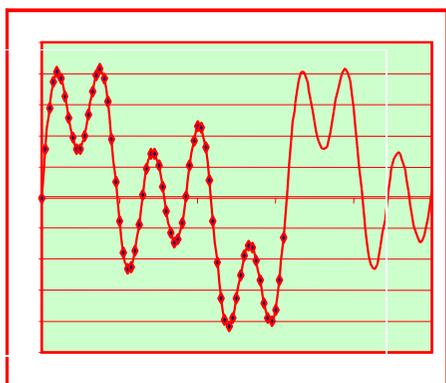
Misura (grandezza del segnale in un determinato istante)



Es.: voltmetro



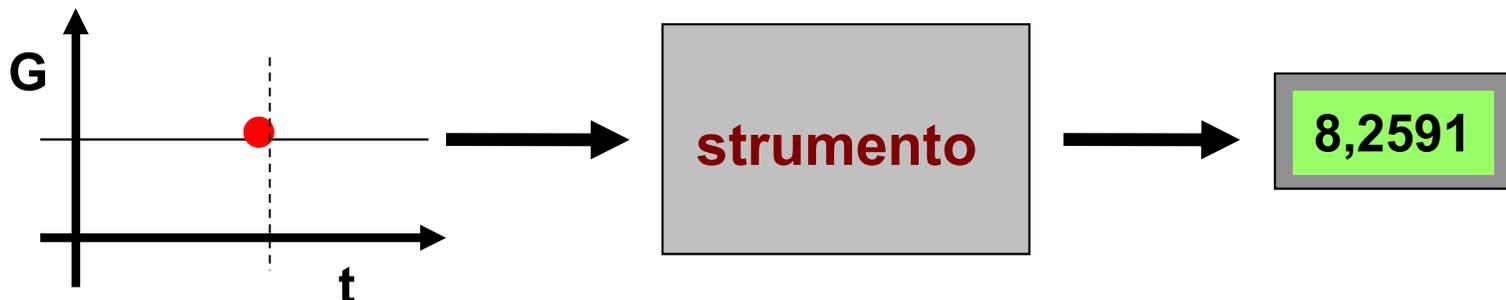
Acquisizione (dell'intero segnale o di una sua porzione)



Es.: oscilloscopio



Grandezza tempo invariante



Lo strumento dovrebbe quindi essere:

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



Impedenza

L'inserimento di un qualsiasi strumento nel sistema che vogliamo misurare comporta un prelievo di energia che perturba la quantità misurata. Le misurazioni perfette sono quindi teoricamente impossibili.

- **Fattore di carico / inserzione dello strumento**
- **Capacità di perturbare la catena di misura o il fenomeno / alterare la significatività della misura**

Impedenza

**Si definisce il concetto di impedenza di ingresso generalizzata Z_g :
se q_1 è la variabile di interesse, esiste un'altra variabile q_2 , associata a
 q_1 , tale che $q_1 q_2$ rappresenta la potenza prelevata;
quindi:**

$$Z_g \equiv \frac{q_1}{q_2}$$

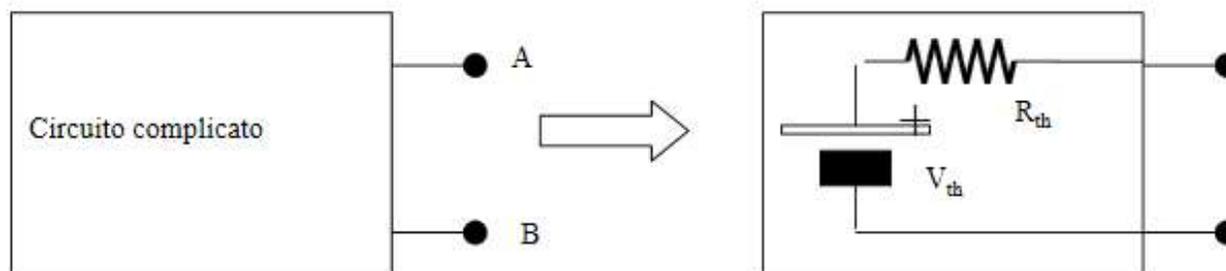
In termini di impedenza, la potenza assorbita si scrive come:

$$P = \frac{q_1^2}{Z_g}$$

Per minimizzare tale assorbimento serve una elevata impedenza d'ingresso.

Il teorema di Thevenin

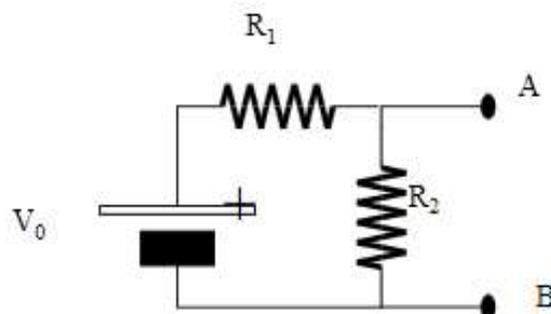
- Si consideri un circuito complicato, formato però esclusivamente da resistenze e generatori di tensione.
- Si scelgano due punti del circuito, A e B: si immagini di chiudere il circuito in una scatola da cui escono solamente due fili, collegati rispettivamente ai punti prescelti.
- Il teorema di Thevenin dice che in questi casi sussiste l'equivalenza:



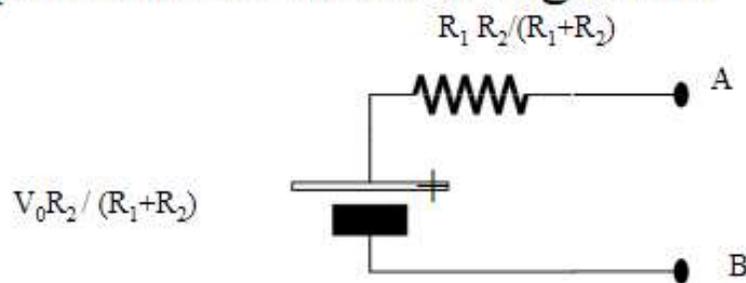
- “Una rete comunque complessa vista dall'esterno, a partire da due suoi punti A e B e' equivalente ad un generatore di tensione V_{Th} in serie ad una resistenza R_{Th} ”:
- V_{Th} è uguale alla differenza di potenziale tra i punti A e B
- R_{th} si ottiene sostituendo, nello schema del circuito, tutti i generatori di tensione con dei cortocircuiti (e i generatori di corrente con circuiti aperti) e calcolando la resistenza tra i punti A e B nel circuito così ottenuto.

Esempio I

- Ad esempio si consideri il circuito in figura:

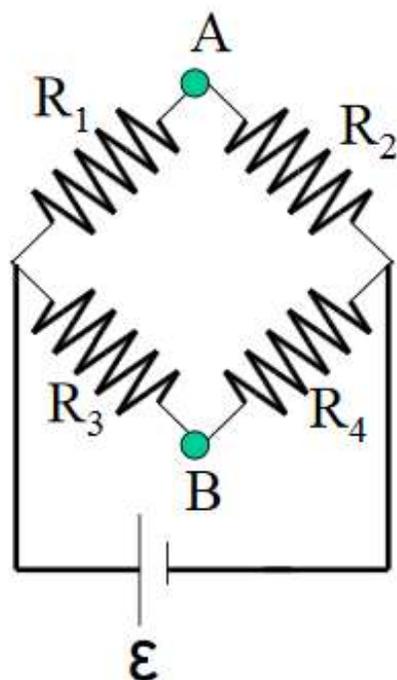


- La tensione a vuoto tra i punti A e B è data dalla formula del partitore, mentre sostituendo il generatore con un cortocircuito le resistenze R_1 ed R_2 vengono viste dai punti A e B in parallelo. Il circuito di Thevenin equivalente è allora il seguente:



Esempio II

Consideriamo il circuito a ponte con due suoi punti A e B.



Sostituiamo al generatore ϵ un corto-circuito e troviamo $R_{Th} = (R_1 // R_2) + (R_3 // R_4)$:
 $R_{Th} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) + R_3 R_4 / (R_3 + R_4)$

La ddp tra A e B risulta:

$$V_A - V_B = V_A - V_C - (V_B - V_C) =$$

$$V_{Th} = \epsilon [R_2 / (R_1 + R_2) - R_4 / (R_3 + R_4)] =$$

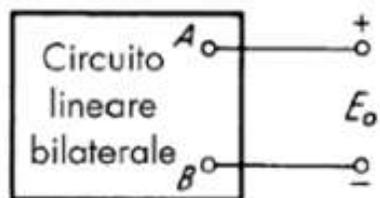
$$\epsilon [1 / (1 + R_1 / R_2) - 1 / (1 + R_3 / R_4)]$$

Mettendo una resistenza R come carico, non vi scorre alcuna corrente se V_{Th} e' nulla, ovvero vale la nota relazione:

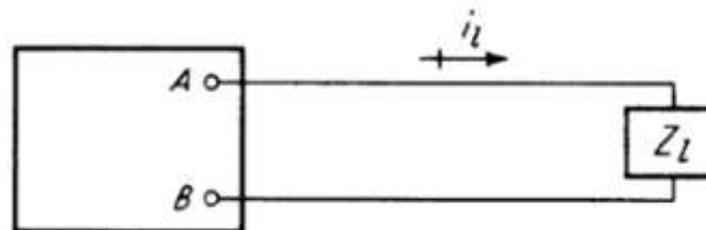
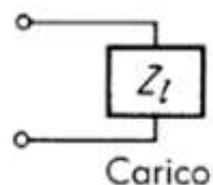
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Impedenza - Il teorema di Thévenin

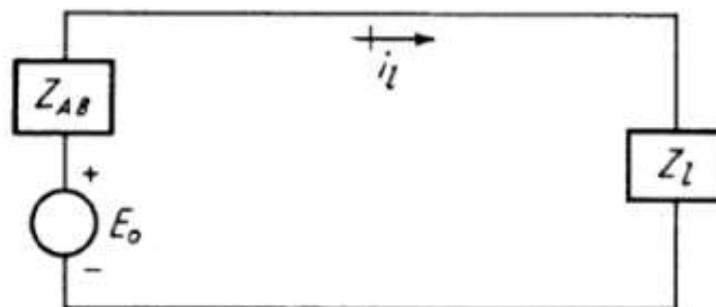
Generalizzando:



(a)



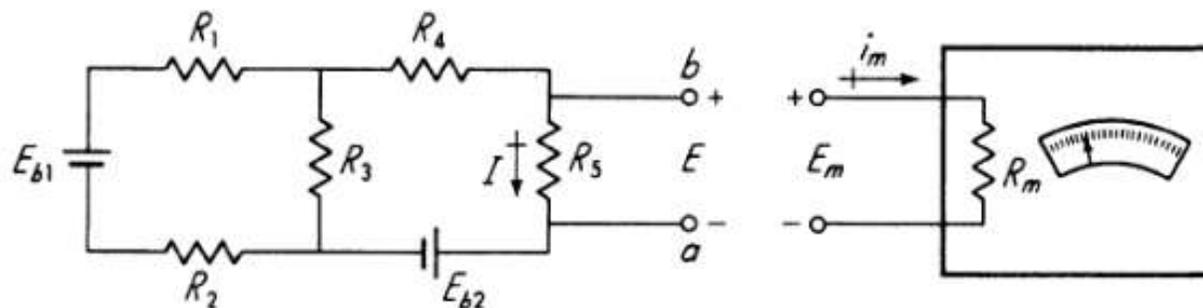
(b)



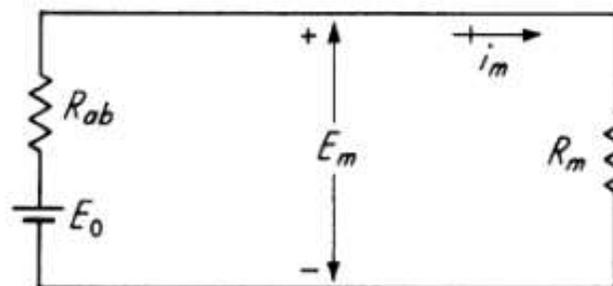
(c)

Un circuito elettrico qualsiasi (purché lineare e bilaterale) si può sostituire con una impedenza

Esempio: effetto di carico del voltmetro



(a)



(b)

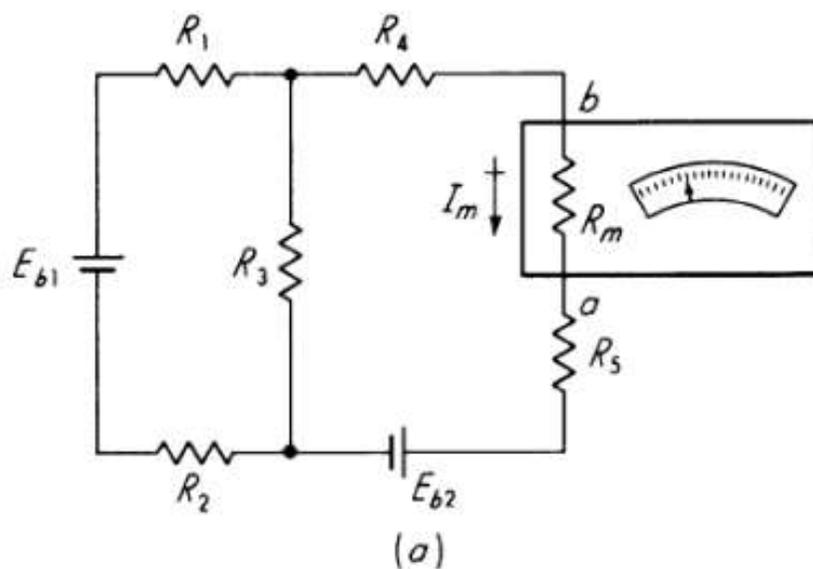
$$R_{ab} = \frac{\left[\frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \right] R_5}{\left[\frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \right] + R_5}$$

Risolvendo si vede che la tensione letta dal voltmetro è diversa da quella effettiva:

$$E_m = \frac{R_m}{R_{ab} + R_m} E_0$$

occorre quindi che sia $R_m \gg R_{ab}$

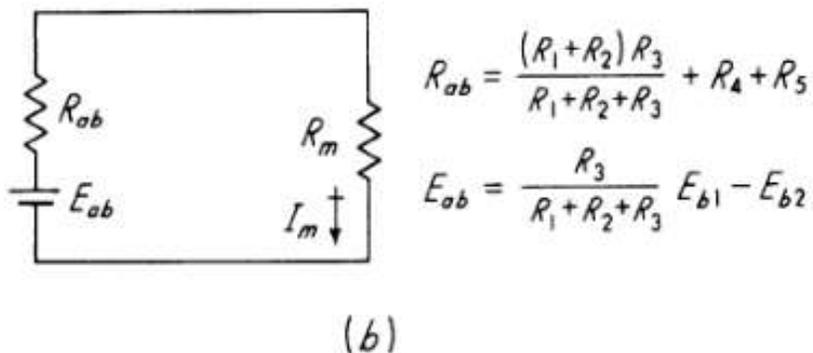
Esempio: effetto di carico dell'amperometro



La corrente misurata è:

$$I_m = \frac{E_{ab}}{R_{ab} + R_m}$$

diversa dal valore effettivo:



$$R_{ab} = \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 + R_5$$

$$E_{ab} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} E_{b1} - E_{b2}$$

$$I_u = \frac{E_{ab}}{R_{ab}}$$

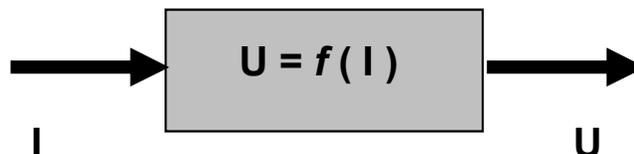
occorre quindi che sia $R_m \ll R_{ab}$

Strumenti di misura: definizioni

- **Range** I_{\min} I_{\max} (in Ingresso)
 U_{\min} U_{\max} (in Uscita)
- **Span** $I_{\max} - I_{\min}$ $U_{\max} - U_{\min}$
(campo di misura)
- **Risoluzione** min incremento in Ingresso cui corrisponde una variazione in Uscita
- **Caratteristica** funzione di trasferimento / legge di corrispondenza fra Ingresso e Uscita

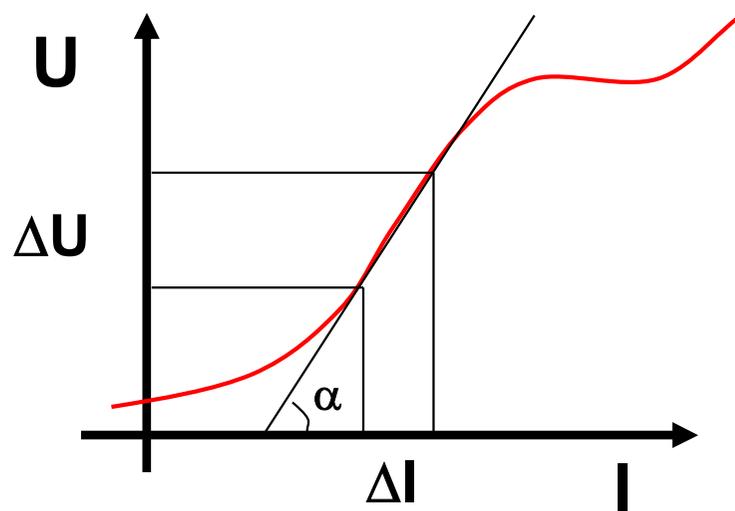
Strumenti di misura: definizioni

grandezza
fisica



valore
misurato

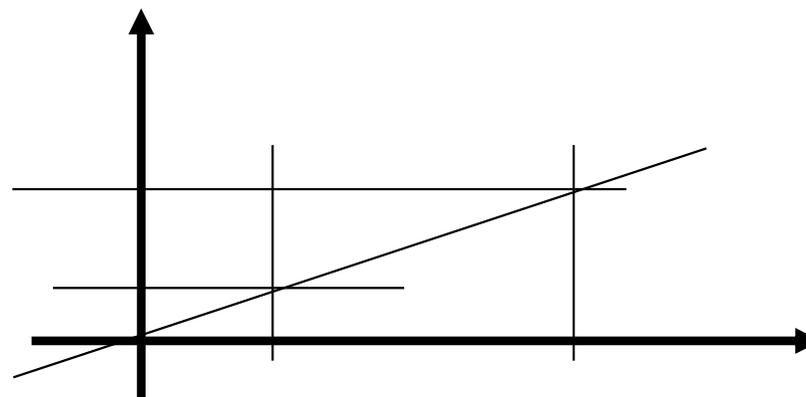
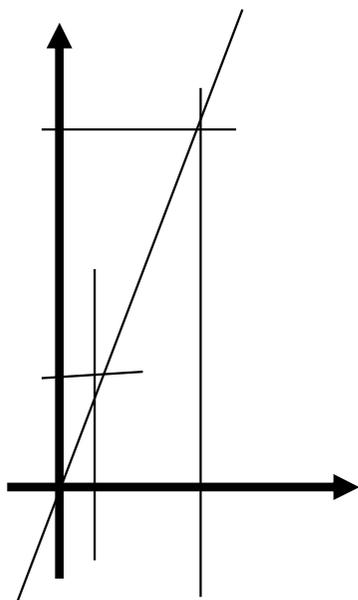
f = funzione di trasferimento \rightarrow curva
caratteristica



Sensibilità = $\Delta U / \Delta I$
(con unità di misura)

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





Sensibilità

- **Sensibilità assoluta**
es.: **dinamometro a molla:**

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

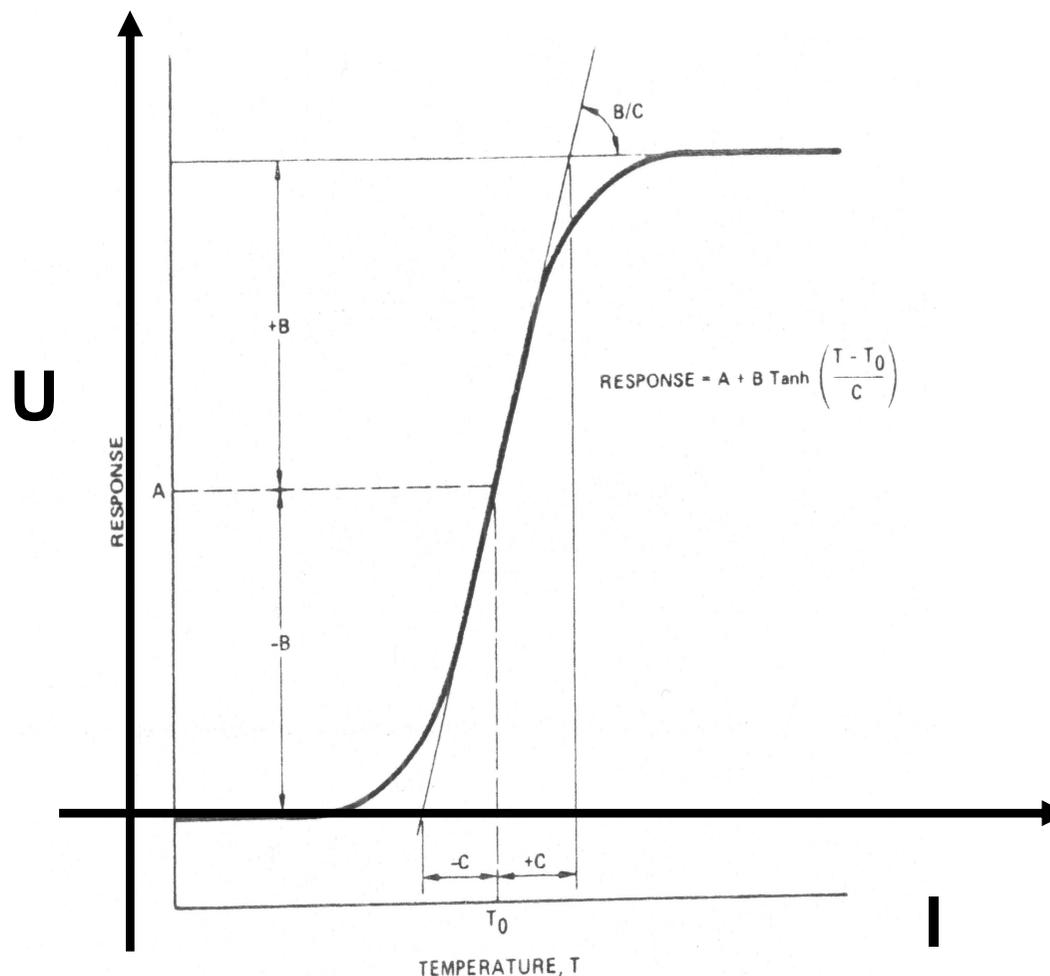
$$\text{Sensibilità} = \Delta U / \Delta I = 1/K \text{ [m/N]}$$

- **Sensibilità relativa**
es.: **rispetto al fondo scala / rispetto all'alimentazione (trasduttori passivi)**

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

Soglia e saturazione

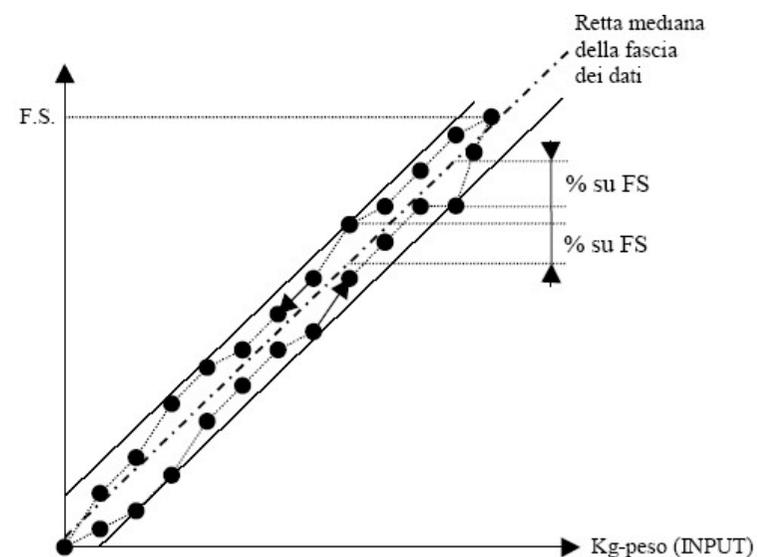
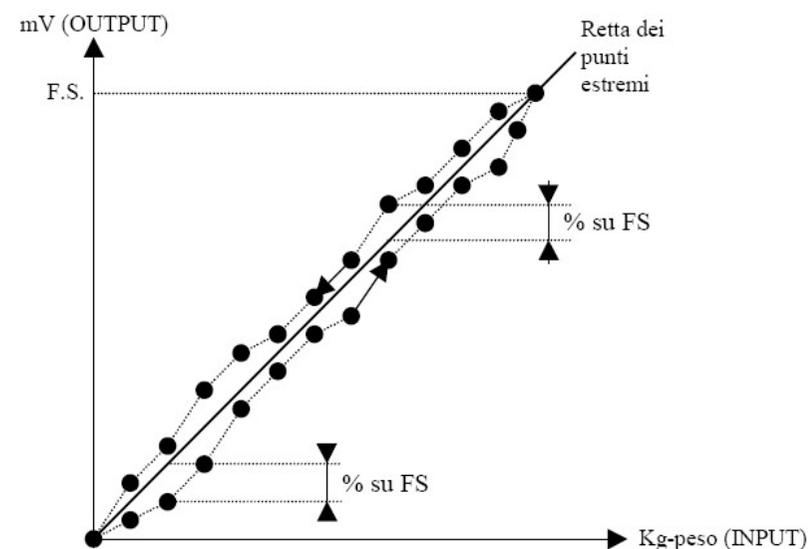
- **Soglia:** valore minimo che si riesce a misurare
- **Saturazione:** variazione della sensibilità per alti ingressi



Linearità

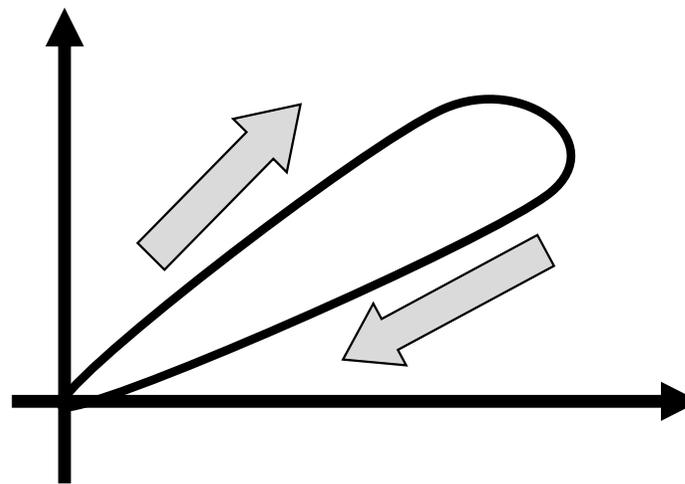
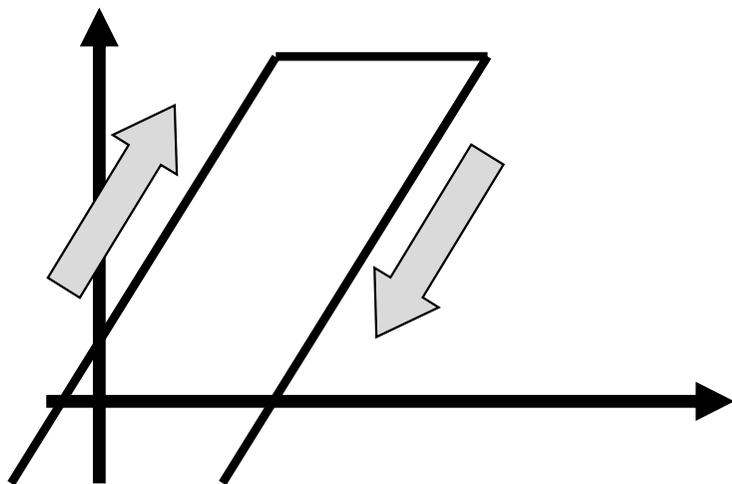
La **linearità** può essere espressa nelle tre forme seguenti:

- 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.

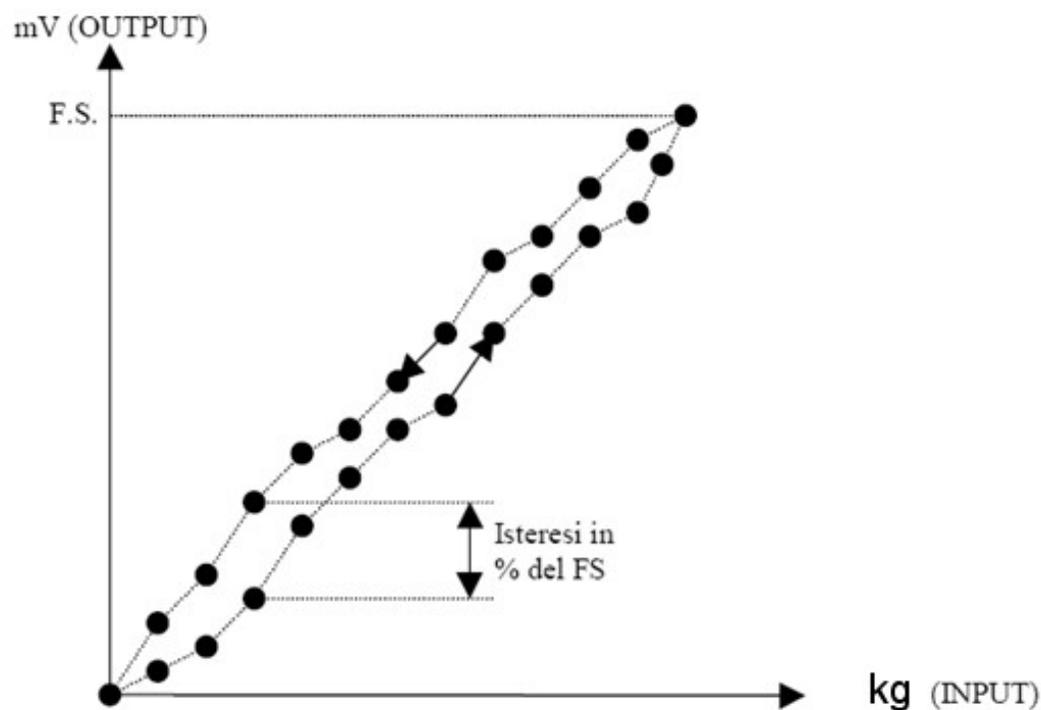


Isteresi

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



Isteresi

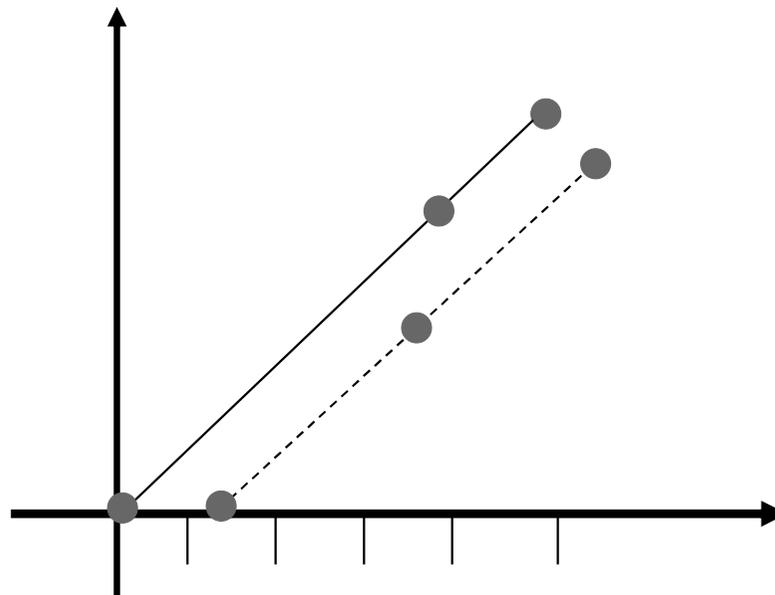


Fornisce una indicazione dell'attitudine di un trasduttore a produrre la stessa uscita sia nel caso che l'ingresso di riferimento sia raggiunto da valori inferiori sia che venga raggiunto da valori superiori.

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.

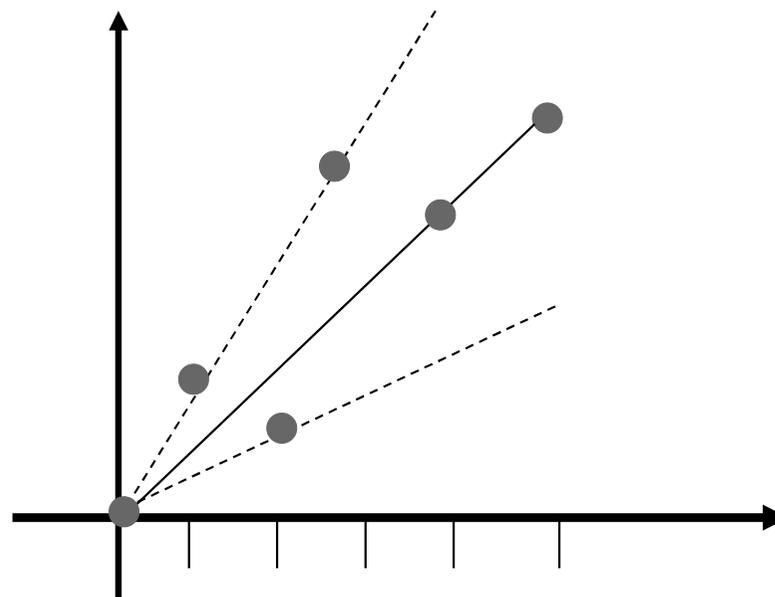
Deriva

- Deriva di zero



- Deriva di sensibilità

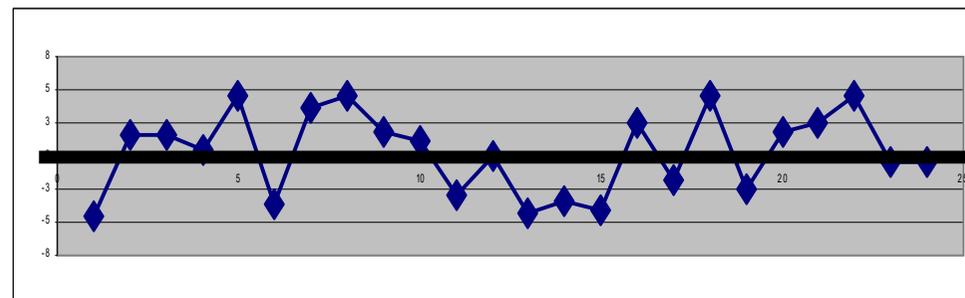
E' funzione del tempo



Ripetibilità

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

Input = 0



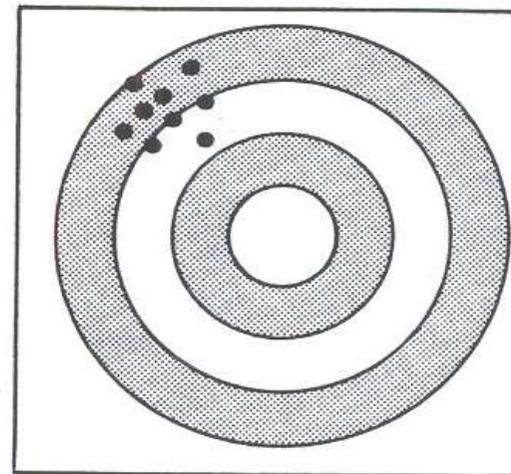
$$Rip_1 = \frac{misura_Max - misura_Min}{F.S.} \%$$

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

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.

**Esempio: fucile
ripetibile ma non
accurato**



Accuratezza

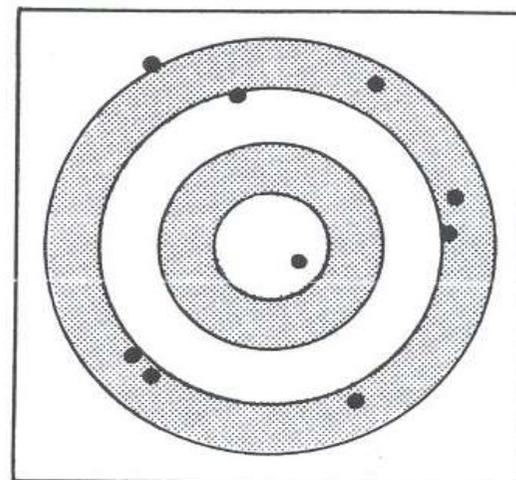
- L'**accuratezza** esprime l'assenza di errori sistematici nella misura: una misura è tanto più accurata quanto più la media delle misure si approssima al valore vero della grandezza. L'accuratezza è spesso espressa come rapporto fra l'errore sistematico e il valore della grandezza.

Esprime la differenza tra il valore ideale (corretto) dell'uscita e il valore reale dell'uscita del trasduttore con riferimento ad uno specifico ingresso.

L'accuratezza può essere espressa nelle tre forme seguenti:

- %FSO: percentuale sull'uscita di fondo scala (Full Scale Output)
- % SULLA LETTURA DI USCITA
- VALORE ASSOLUTO espresso nell'unità di misura dell'ingresso.

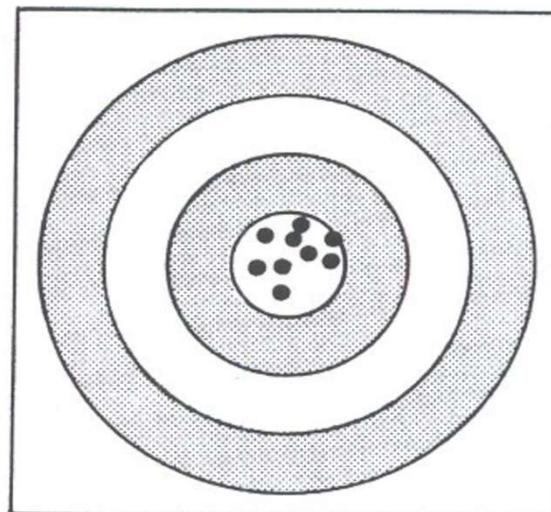
**Esempio: fucile
accurato ma non
ripetibile**



Ripetibilità - Accuratezza

- Il concetto di precisione è qualitativo. La variabilità dei risultati viene quantificata, come di consueto, nella deviazione standard. Ma questa di per sé non è atta a quantificare la precisione della misura secondo il significato usuale del termine di “qualità della misura”. Ad esempio una deviazione standard di 1 mm rappresenta ottima o pessima precisione a seconda che si stiano misurando lunghezze della decina di metri o inferiori al centimetro. Si preferisce quantificare la precisione con il modulo del coefficiente di variazione, in genere espresso in percentuale. Una deviazione standard di 1 mm su una misura di 10 cm corrisponde ad una precisione dell'1%. Si presti attenzione al fatto che nell'uso corrente “maggiore” è la precisione “minore” è il numero che la indica.

**Esempio: fucile accurato e
ripetibile: preciso**





Precisione

- 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



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”

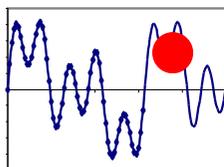
ILAC-P9 “ILAC Policy for Participation in National and International Proficiency Testing Activities”

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

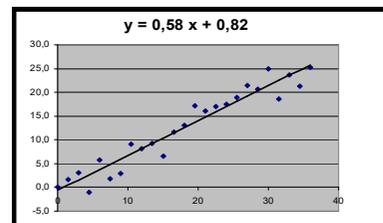
ILAC-G22 “Use of Proficiency Testing as a Tool for Accreditation in Testing”

Misura

Osservazione \Rightarrow Interazione
fenomeno



Taratura \Rightarrow assegnazione
valore con una unità di misura



- Modello
- Catena di misura
- Procedura





Taratura

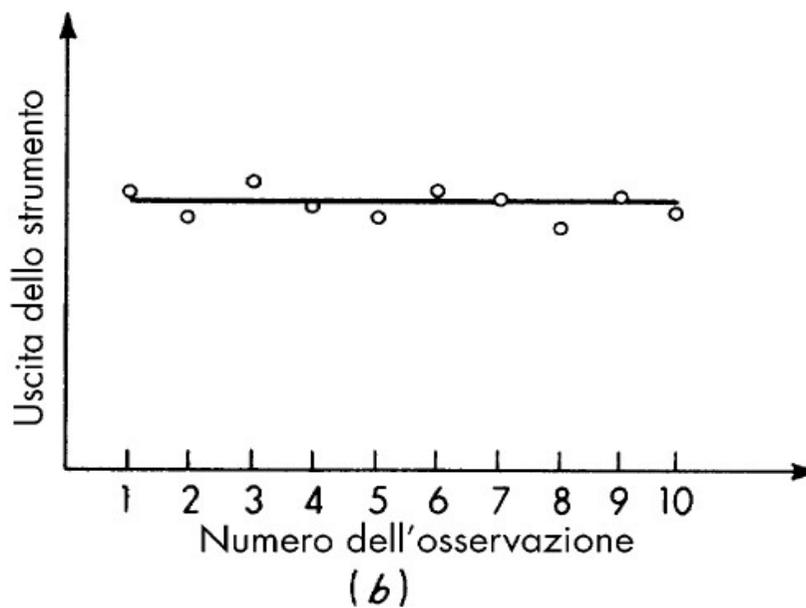
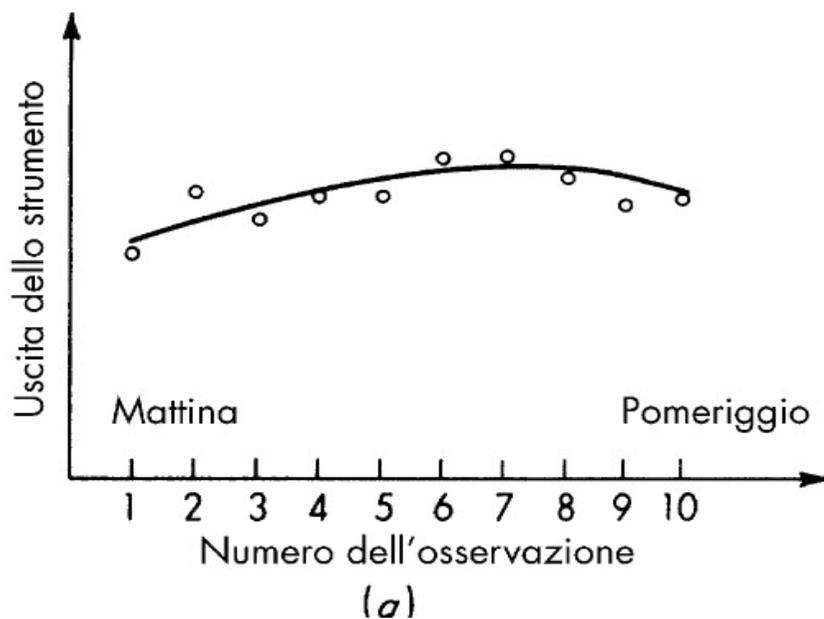
Taratura \Leftrightarrow calibrazione: $U = f(I)$

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

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

Taratura statica

- Tutti gli ingressi eccetto uno sono fissati a valori costanti
- Un ingresso viene fatto variare su un insieme di valori costanti
- Si osservano le uscite
- Le relazioni tra ingresso e uscita costituiscono la “taratura statica”

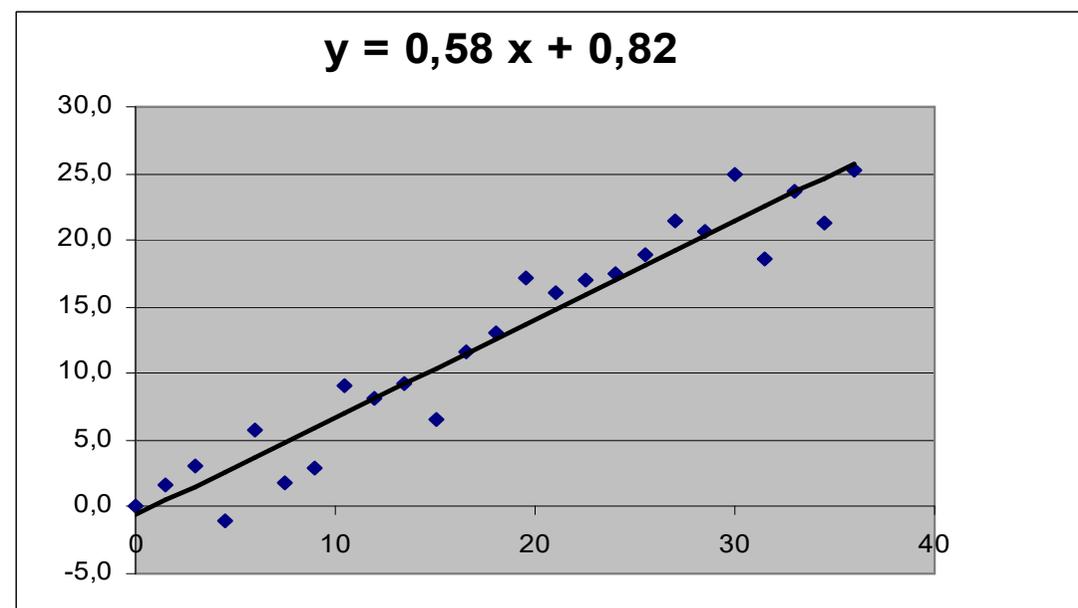


Effetto di ingressi non controllati sulla taratura

Taratura statica

X campione \Rightarrow *Y 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





Sistema SI - m kg s

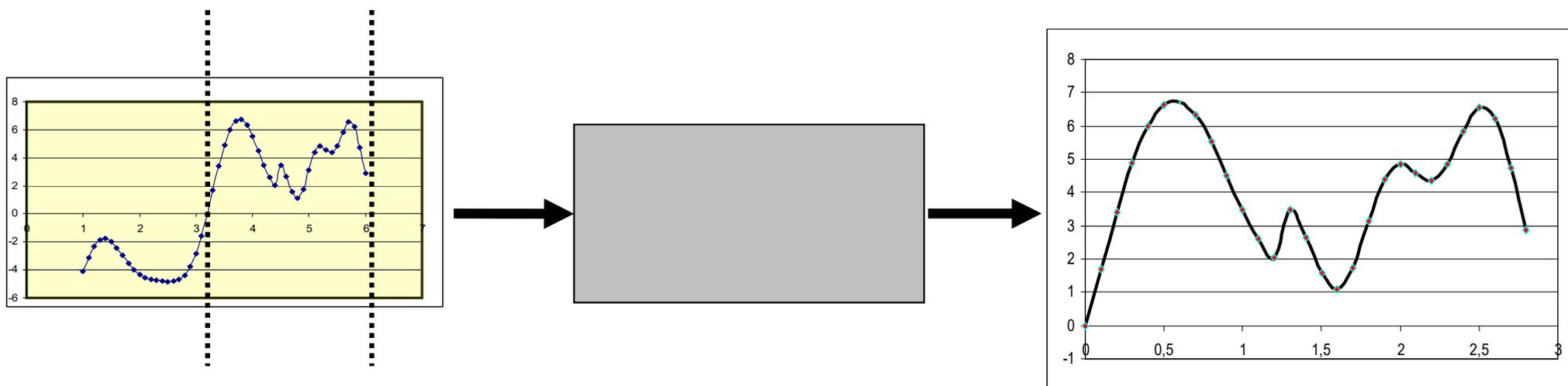
- **metro** = lunghezza del tratto percorso dalla luce nel vuoto in $1/299792458$ s.
- **chilogrammo** = massa campione primario - cilindro di altezza e diametro pari a 0,039 m di una lega di platino-iridio - depositato presso "Ufficio Internazionale dei Pesì e Misure" Sèvres (Francia).
- **secondo** = l'intervallo di tempo che contiene 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133

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

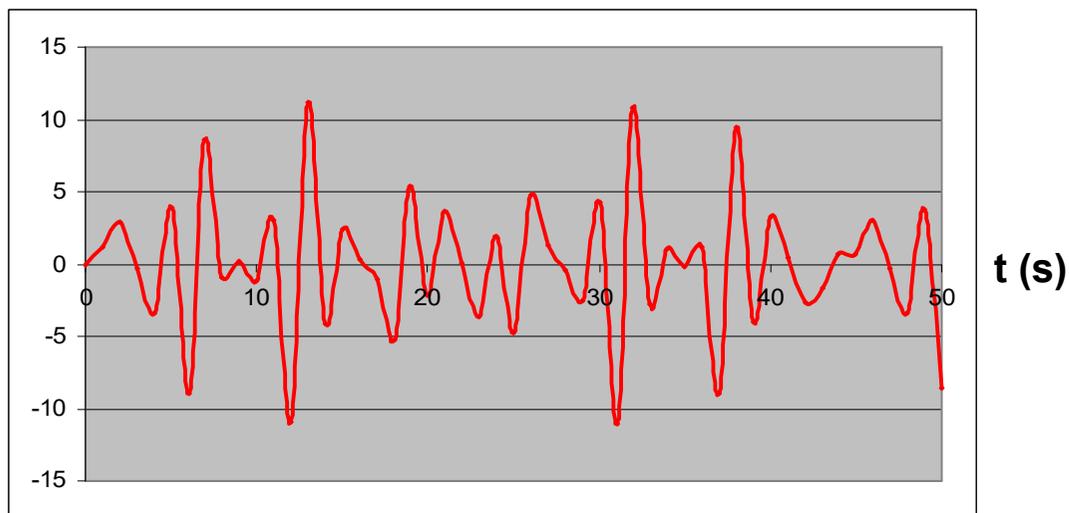
Grandezza tempo – variante acquisizione segnale



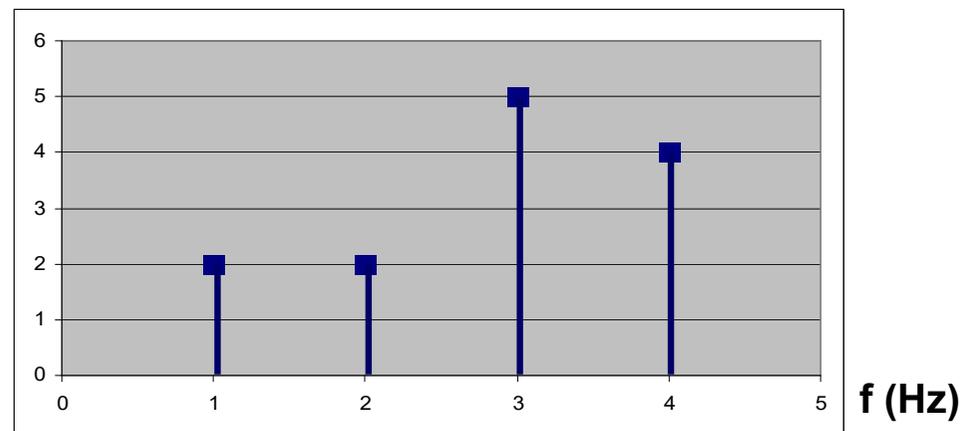
- “Sensibile” al segnale da acquisire
- “Insensibile” ad ogni altra entità (disturbo)
- “Acquisisce” il segnale senza alterazioni
- Segnale in “ingresso” ed in “uscita” **analogico**
- “Trasparente” per il fenomeno in osservazione

Rappresentazione del segnale

$$\text{es.: } y = 2a \sin \omega t + 2a \sin 2\omega t + 5a \sin 3\omega t + 4a \sin 4\omega t$$



Dominio del tempo

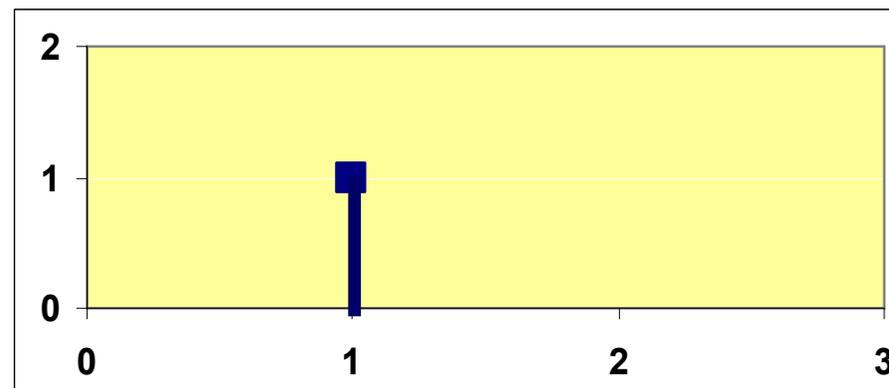
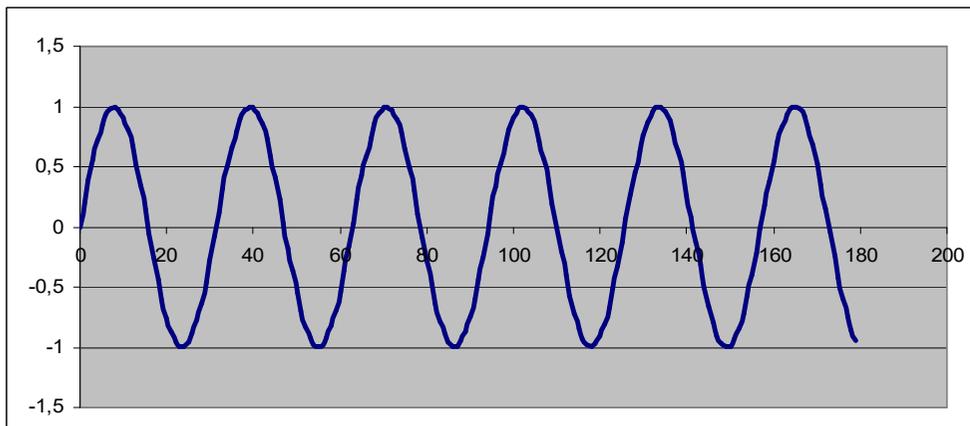


Dominio della frequenza

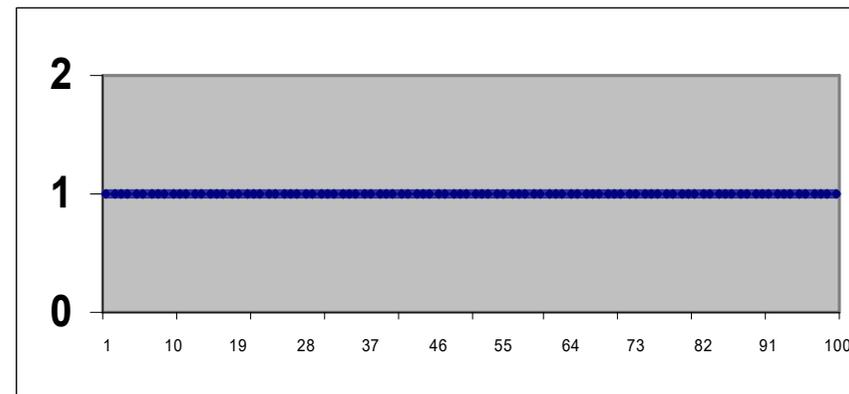
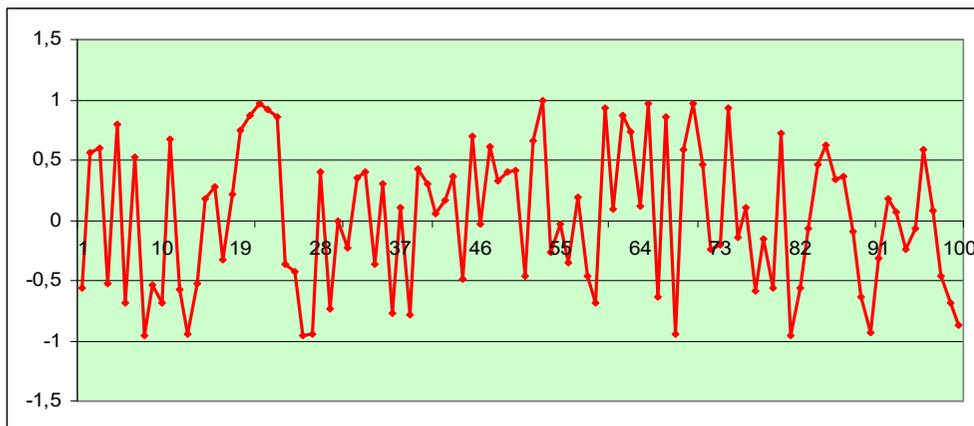
Segnali

dominio tempo \Leftrightarrow dominio frequenza

Sinusoide



Rumore bianco



Trasformata di Fourier



- Serie Fourier = contenuto armonico dei segnali:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk 2\pi f_0 t}$$

- FFT = Fast Fourier Transform – Trasformata veloce di Fourier - algoritmo di J. W. Cooley e J. W. Tukey (1965)

Trasformata di Fourier



Trasformata

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Antitrasformata

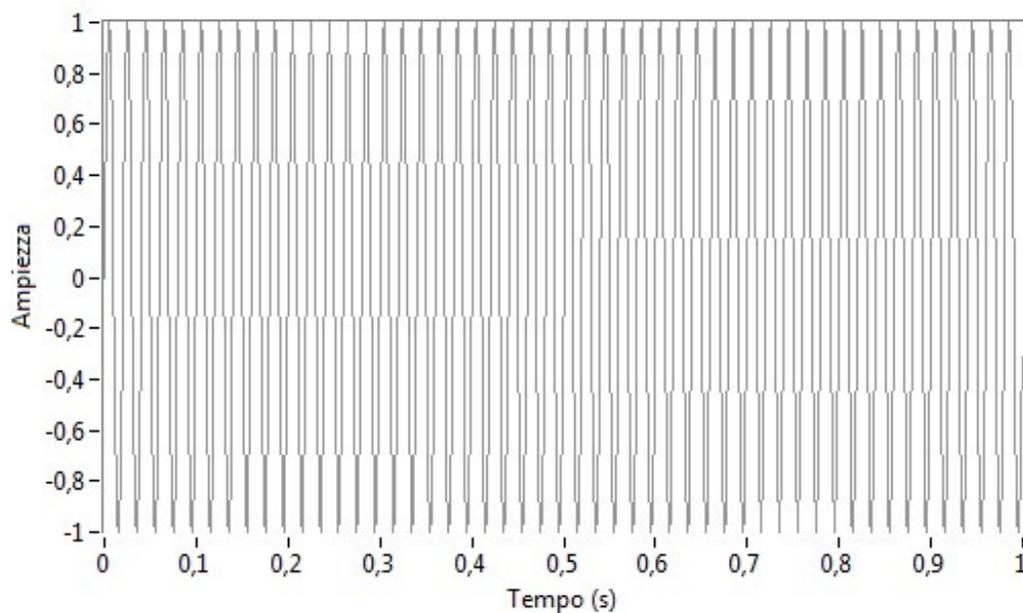
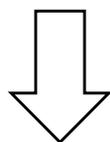
$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{+j2\pi ft} df$$

Trasformata di Fourier: spettro

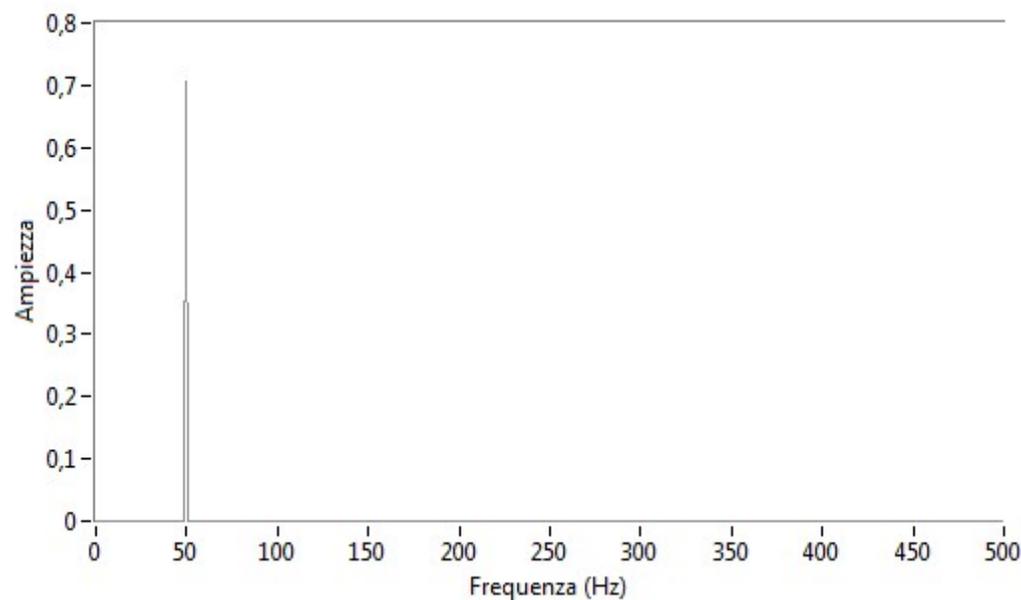
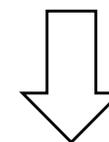
dominio del tempo



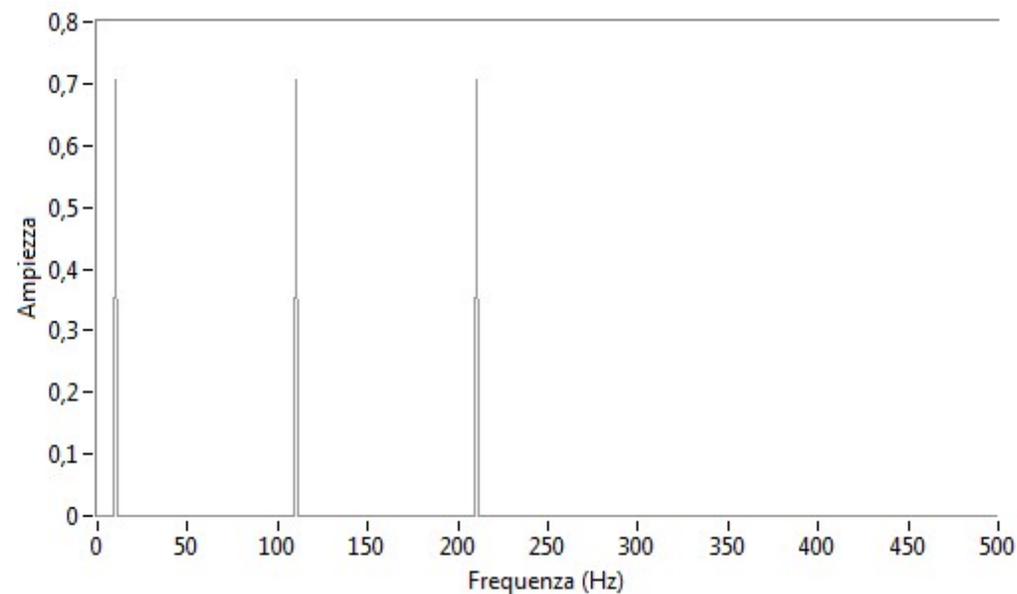
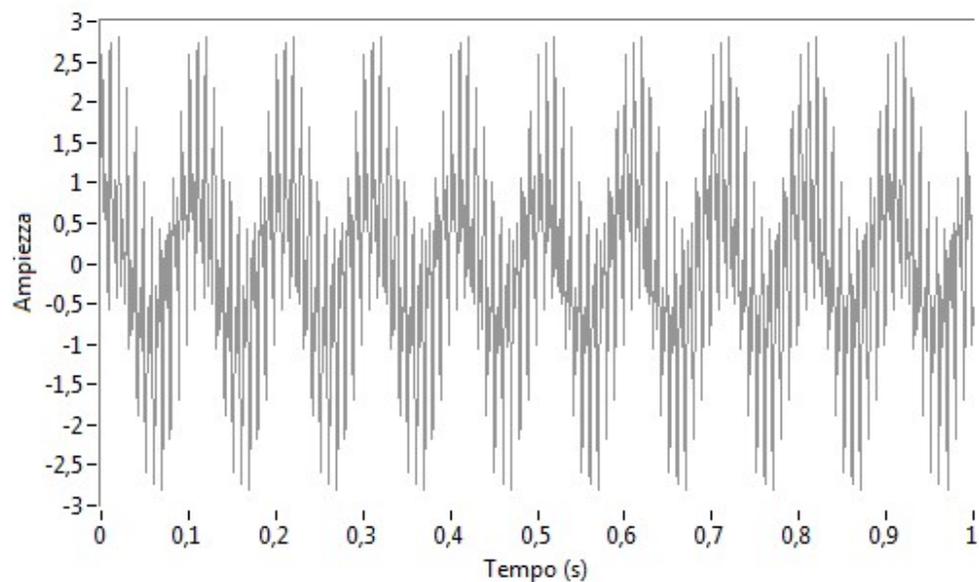
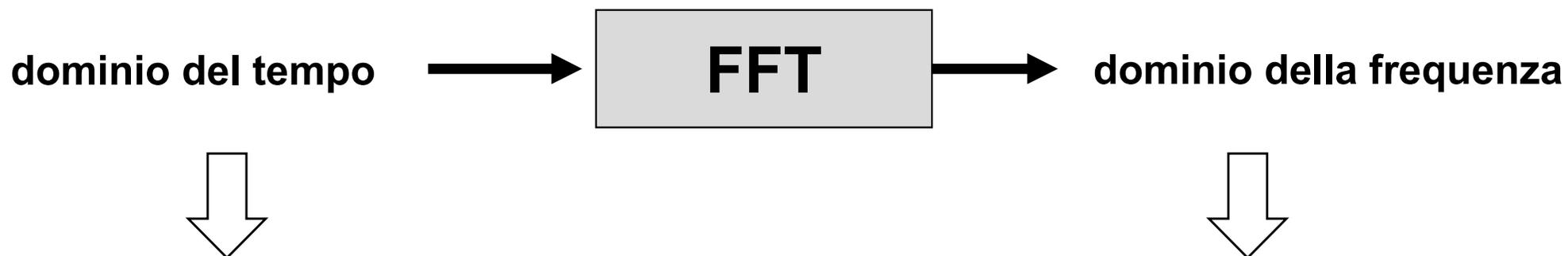
dominio della frequenza



(segnale tono singolo a 50 Hz)

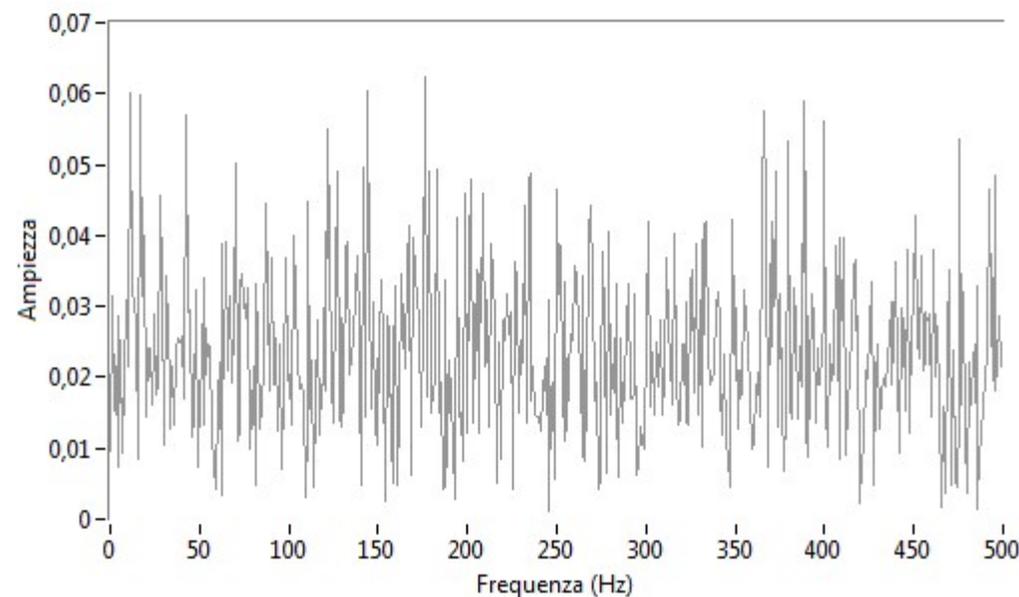
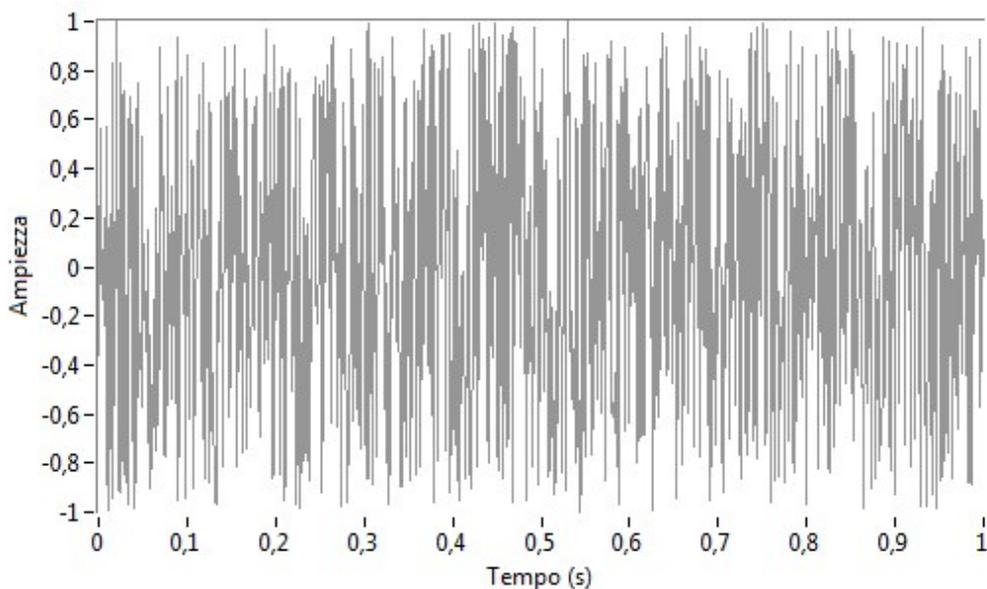
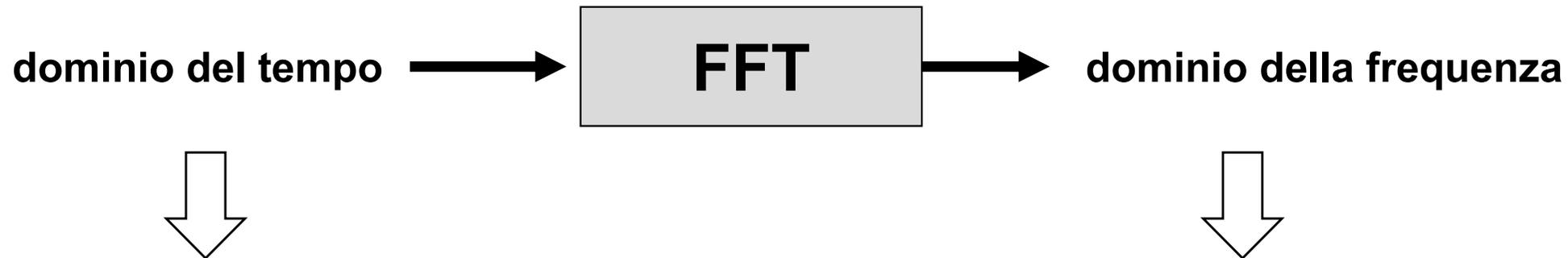


Trasformata di Fourier: spettro



(segnale multitono)

Trasformata di Fourier: spettro



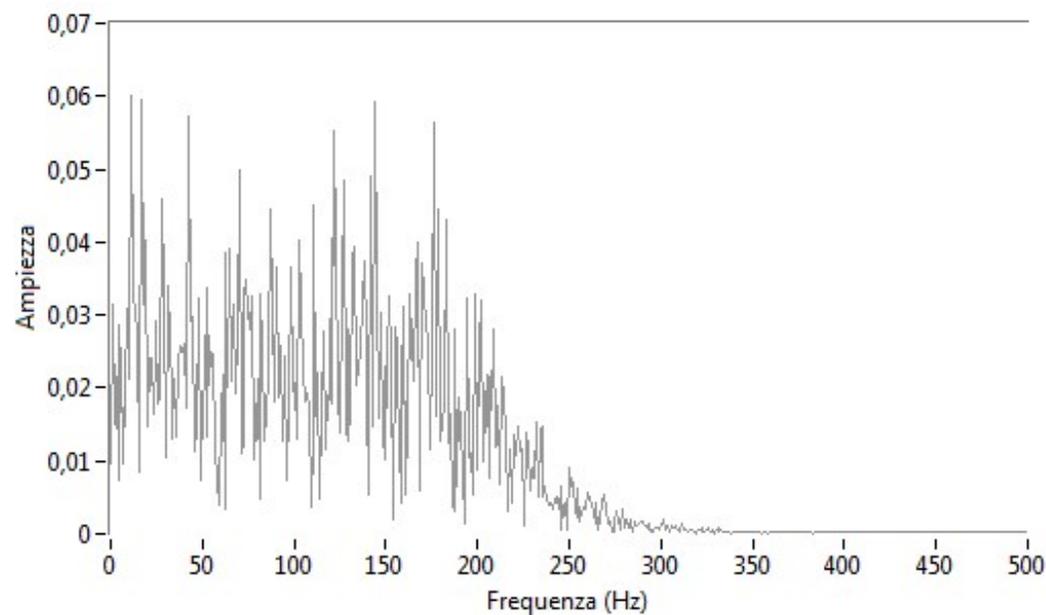
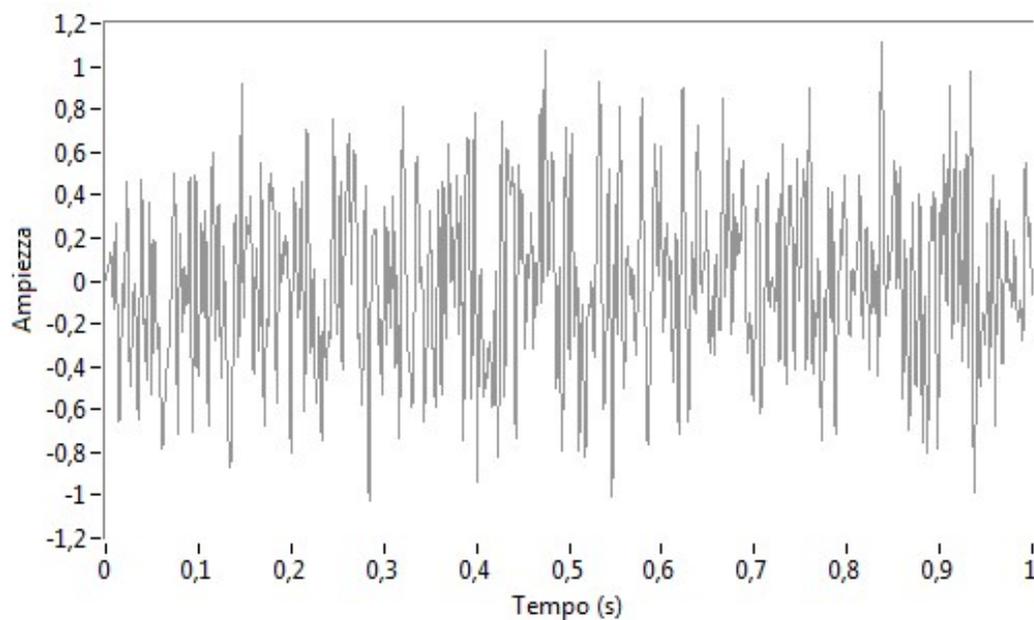
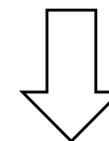
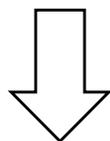
(rumore bianco)

Trasformata di Fourier: spettro

dominio del tempo



dominio della frequenza



(rumore bianco filtrato passa-basso)



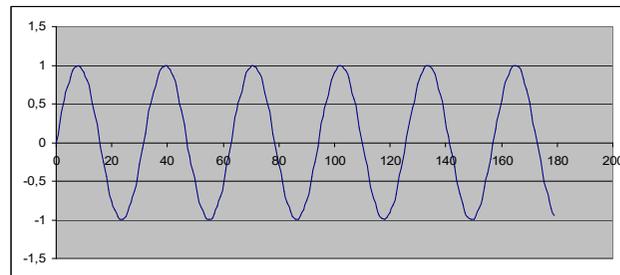
Risposta di uno strumento

- **Risposta in**
 - Ampiezza (risposta all'impulso)
 - Frequenza (funzione di trasferimento, modulo)
 - Fase (funzione di trasferimento, fase)
- **Prontezza di risposta**
- **Fedeltà**
- **ecc.**

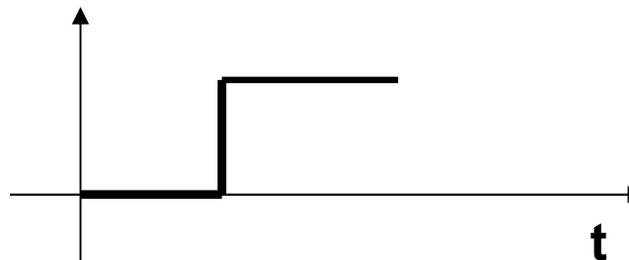
Risposta del sistema di misura a segnali “standard” di ingresso

Sinusoidale

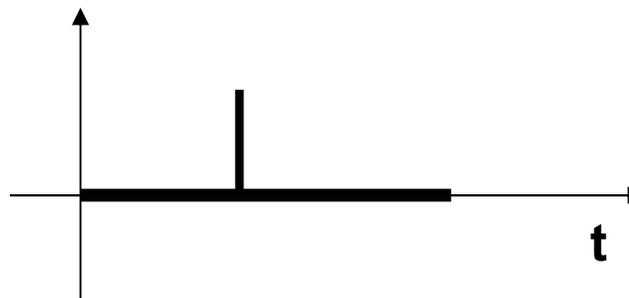
$$a = A \sin (\omega t + \varphi)$$



Gradino

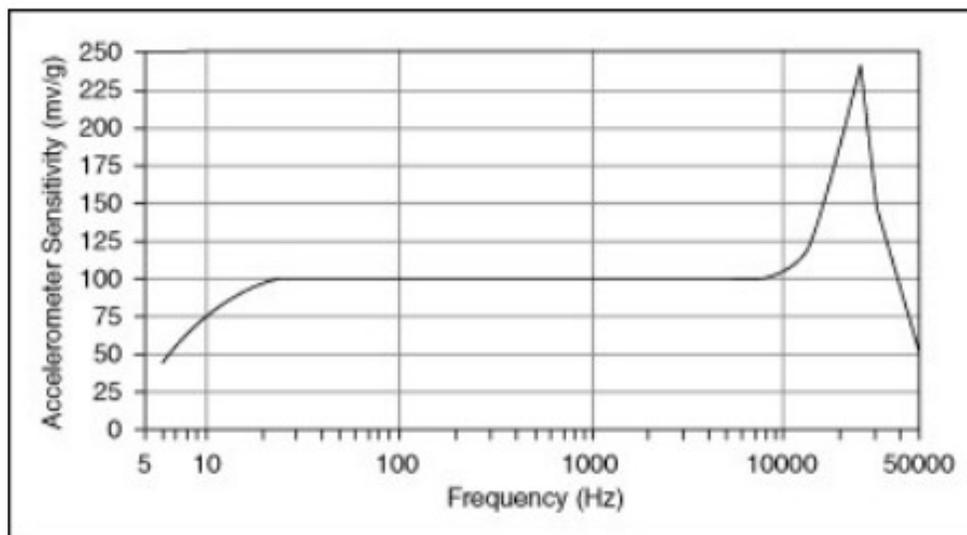


Impulso

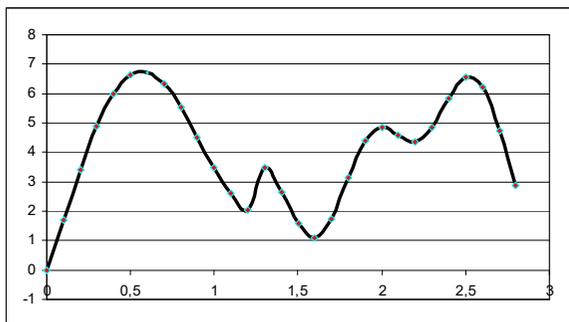


Esempio: risposta in frequenza

Accelerometro



Conversione Analogico/Digitale



analogico

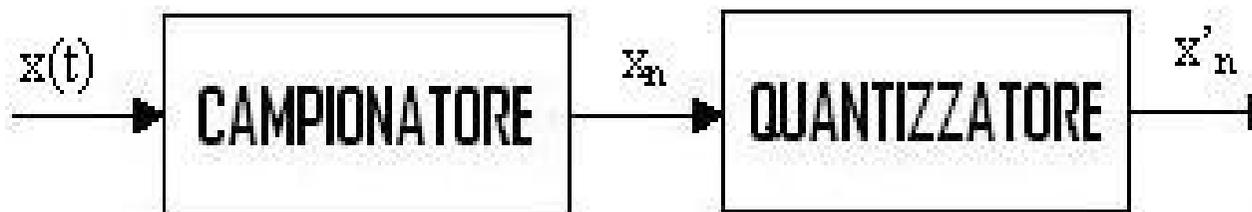


0	-0,0218
0,1	1,689697
0,2	3,386181
0,3	4,880178
0,4	6,001631

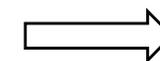
digitale

- **Acquisizione segnale analogico**
- **Segnale “analogico”**
- **Conversione A/D: Analogico \Rightarrow Digitale**
- **Segnale “digitale”**
- **Analisi segnale digitalizzato**

Conversione A / D

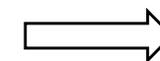


Segnale **Analogico**



Due fasi:

- Campionamento
(discretizzazione nel tempo)
- Quantizzazione
(discretizzazione dell'ampiezza)



Segnale **Digitale**

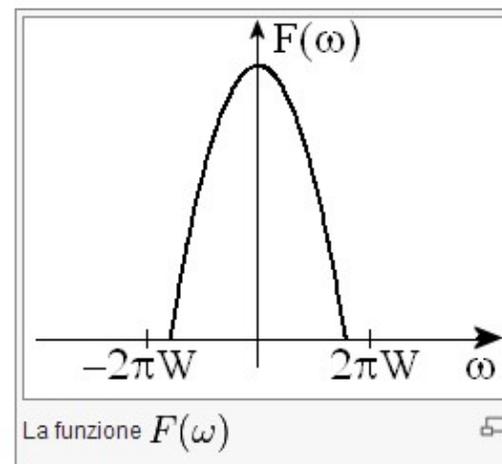
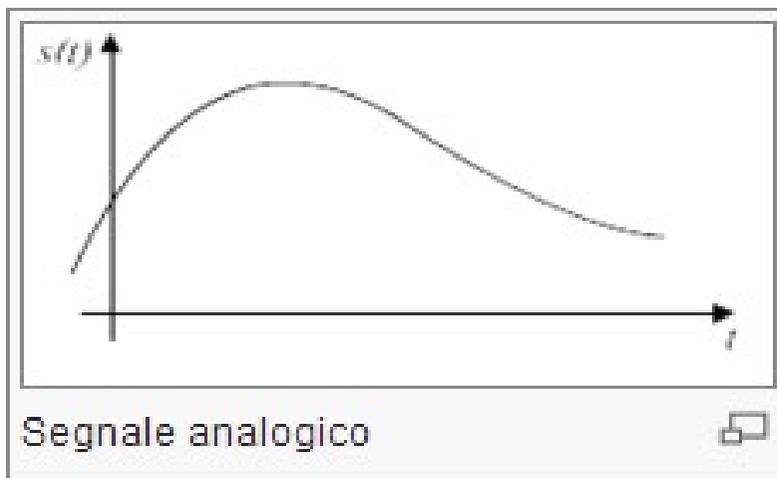
Teorema del campionamento

- Il teorema del campionamento è uno dei teoremi base per la misura di segnali variabili nel tempo. Mette in relazione il contenuto di informazione di un segnale campionato con la frequenza di campionamento e le componenti minime e massime di frequenza del segnale analogico originale, definendo così la minima frequenza necessaria per campionare un segnale analogico senza che si incorra nella perdita di informazioni per poter ricostruire il segnale analogico “tempo continuo” originario.
- A questa frequenza viene normalmente dato nome di **frequenza di Nyquist**
- Il teorema afferma che, sotto opportune ipotesi, in una conversione analogico-digitale la minima frequenza di campionamento necessaria per evitare ambiguità e/o perdita di informazione nella ricostruzione del segnale analogico originario con larghezza di banda finita e nota (ovvero nella eventuale ri-conversione digitale-analogico) è pari al doppio della sua frequenza massima.
- Il teorema, comparso per la prima volta nel 1949 in un articolo di C.E. Shannon, dovrebbe chiamarsi Whittaker-Nyquist-Kotelnikov-Shannon(WNKS), secondo l'ordine cronologico di chi ne dimostrò versioni via via più generalizzate.

Campionamento

- Se viene rispettato il teorema del campionamento è allora possibile ricostruire, con l'utilizzo di apposite funzioni interpolatrici, il segnale analogico senza perderne alcuna informazione. Se non viene rispettato il teorema del campionamento, si riscontra un effetto conosciuto con il nome di **aliasing**, che comporta una distorsione del segnale analogico ricostruito rispetto a quello originale campionato. Per evitare il fenomeno dell'aliasing è necessario:
 - 1-adottare una frequenza di campionamento superiore se non si vogliono perdere le informazioni contenute nelle componenti ad alta frequenza del segnale analogico acquisito
 - 2-adottare un filtraggio anti-aliasing (filtro passa-basso) così da eliminare le frequenze contenute nel segnale analogico superiori alla frequenza di Nyquist (frequenza di campionamento diviso 2) del campionatore
- Generalmente per una buona e fedele ricostruzione del livello analogico è richiesta una frequenza di campionamento che sia 5-10 volte superiore alla frequenza massima contenuta nel segnale campionato.

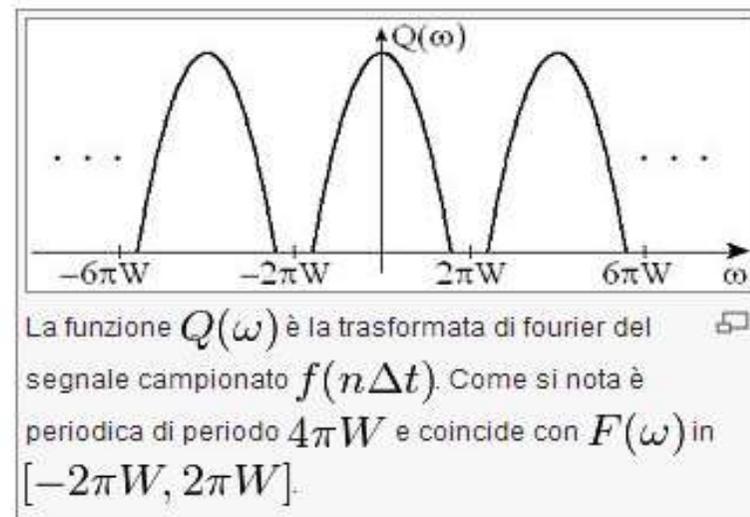
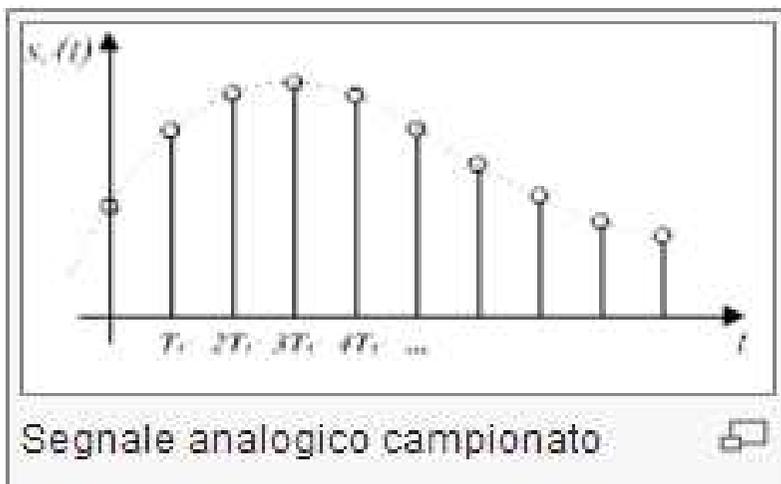
Rappresentazioni grafiche



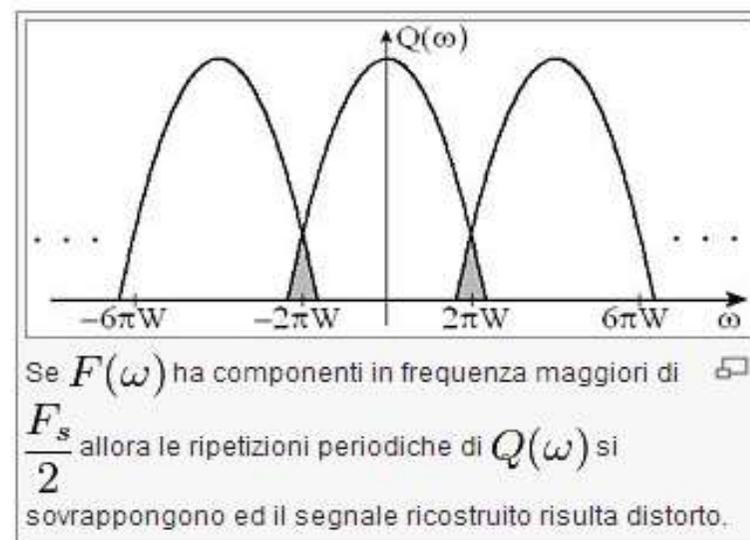
(spettro)

Rappresentazioni grafiche

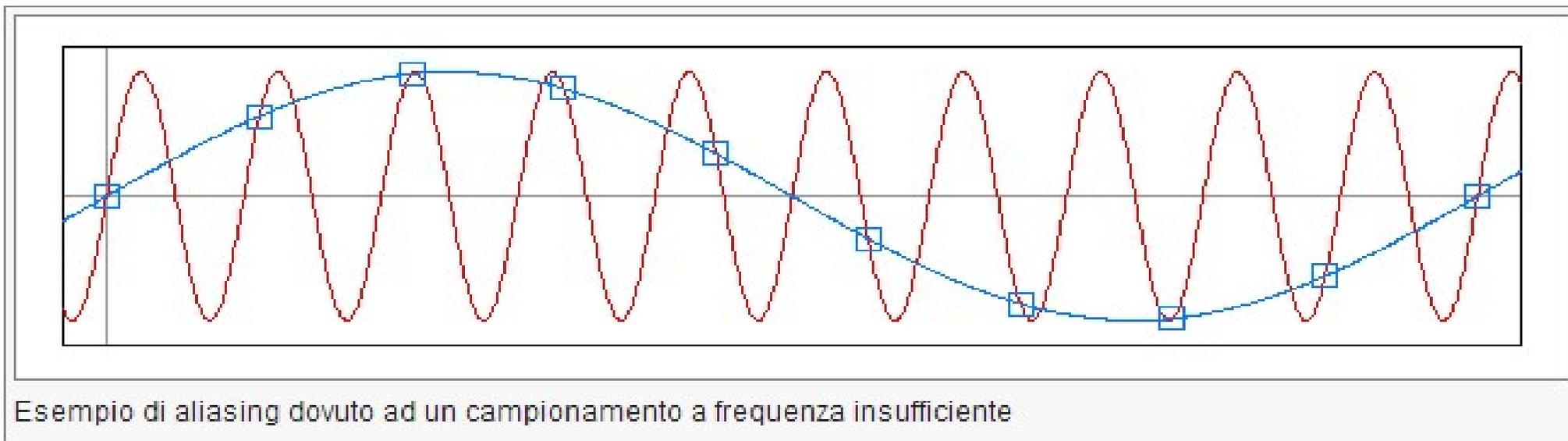
(spettro senza aliasing)



(spettro con aliasing)

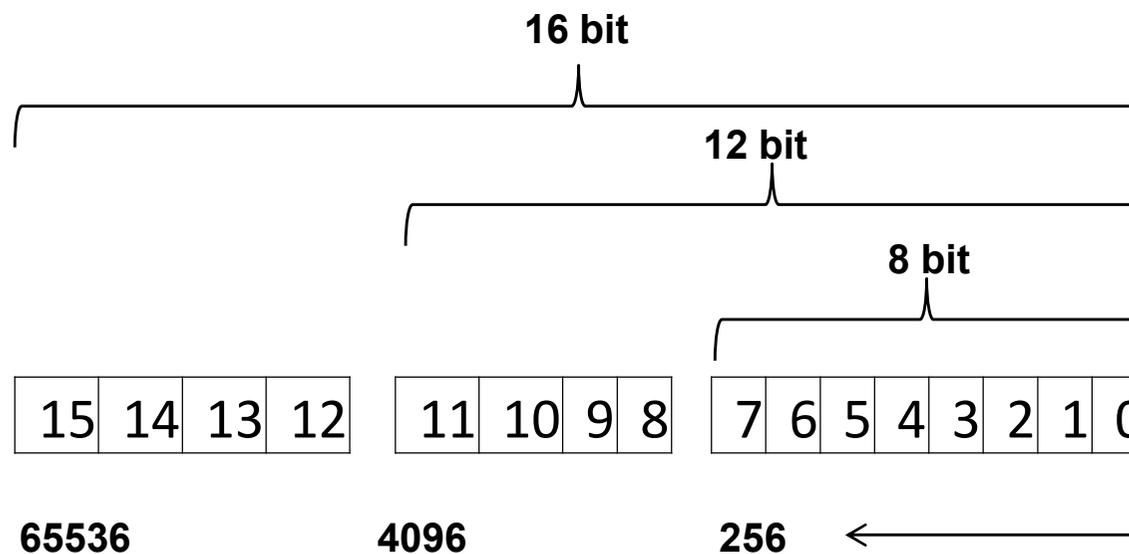


Rappresentazioni grafiche

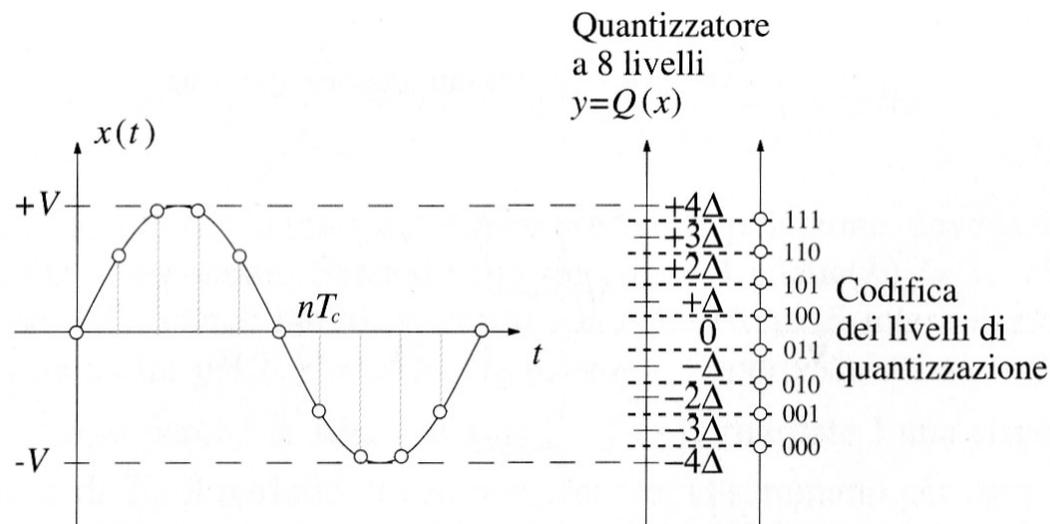


Esempio di errore di Aliasing nel dominio del tempo

Quantizzazione



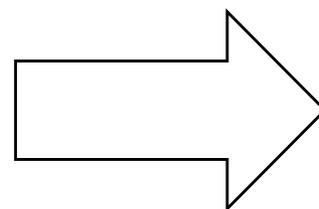
- $2^8 = 256$
- $2^{12} = 4096$
- $2^{16} = 65536$
- ecc.



Passo di quantizzazione

Se ho un sensore con:

- range = 0 -1000 °C
- dinamica di uscita $D = 0-10V$



10 mV/°C

**Risoluzione del quantizzatore
(passo di quantizzazione $p=D/2^b$)**

8 bit: 39,06 mV/bit \Rightarrow 3,91 °C/div

12 bit: 2,44 mV/bit \Rightarrow 0,244 °C/div

16 bit: 0,153 mV/bit \Rightarrow 0,015 °C/div

**Di conseguenza l'errore massimo di quantizzazione è:
 $q=\pm p/2$**



Scelta di uno strumento

Proprietà

- Range di misura / caratteristiche di precisione
- 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
- ecc.



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)**
- **ecc.**

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

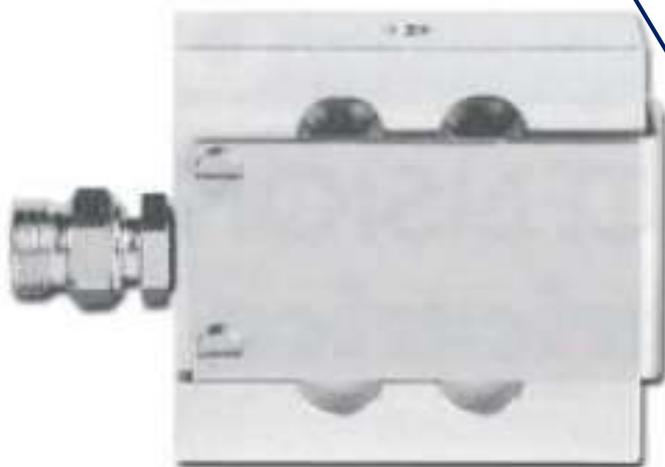
$$(\text{errore \% a fondo scala} = \frac{n \sigma}{FS} \cdot 100)$$

* errori

Esempio: cella di carico

Effetto del tempo

Sensibilità relativa



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



Pressure Range

Materials

Power supply
Signal output

Response Time

Accuracy
Hysteresis
Repeatability

Temperature

Specifications		Model S-10 / S-11										
Pressure ranges	bar	0.1	0.16	0.25	0.4	0.6	1	1.6	2.5	4	6	10
Over pressure safety	bar	1	1.5	2	2	4	5	10	10	17	35	35
Burst pressure	bar	2	2	2.4	2.4	4.8	6	12	12	20.5	42	42
Pressure ranges	bar	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000 ¹⁾	
Over pressure safety	bar	80	50	80	120	200	320	500	800	1200	1500	
Burst pressure	bar	96	96	400	550	800	1000	1200	1700 ²⁾	2400 ²⁾	3000	
(Vacuum, gauge pressure, compound range, absolute pressure are available)												
Materials												
■ Wetted parts		Stainless steel (other materials see WIKA diaphragm seal programm)										
> Model S-10		Stainless steel										
> Model S-11		Stainless steel (Hastelloy C4)										
■ Case		O-ring: NBR ³⁾ (Viton or EPDM)										
Internal transmission fluid		Stainless steel										
		Synthetic oil,										
		only for pressure ranges up to 0 ... 25 bar or for Model S-11 (flush diaphragm) units (Halocarbon oil for oxygen applications) ⁴⁾										
		(Listed by FDA for food industry)										
Power supply U _B	DC V	10 < U _B ≤ 30 (14 ... 30 with signal output 0 ... 10 V)										
Signal output and maximum load R _A		4 ... 20 mA, 2-wire R _A ≤ (U _B - 10 V) / 0.02 A with R _A in Ohm and U _B in Volt										
		0 ... 20 mA, 3-wire R _A ≤ (U _B - 3 V) / 0.02 A with R _A in Ohm and U _B in Volt										
		(0 ... 5 V, 3-wire) R _A > 5 kOhm										
		(0 ... 10 V, 3-wire) R _A > 10 kOhm (other signal outputs on request)										
Adjustability zero/span	%	± 10 via potentiometers in the instrument										
Response time (10 ... 90 %)	ms	≤ 1 (≤ 10 ms at medium temperatures below -30 °C for pressure ranges up to 25 bar or with flush diaphragm)										
Accuracy ⁵⁾	% of span	≤ 0.5 (0.25) ⁶⁾ (limit point calibration)										
	% of span	≤ 0.25 (0.125) ⁶⁾ (BFSL)										
Hysteresis	% of span	≤ 0.1										
Repeatability	% of span	≤ 0.05										
1-year stability	% of span	≤ 0.2 (at reference conditions)										
Permissible temperature of												
■ Medium		-90 ... +100 °C [-40 ... +125 °C]					-22 ... +212 °F [-40 ... +257 °F]					
■ Ambient		S-11 with cooling element: -20 ... +150 °C					S-11 with cooling element: -4 ... +302 °F					
		-20 ... +80 °C					-4 ... +176 °F					
■ Storage		S-11 with cooling element: -20 ... +80 °C					S-11 with cooling element: -4 ... +176 °F					
		-40 ... +100 °C					-40 ... +212 °F					
		S-11 with cooling element: -20 ... +100 °C					S-11 with cooling element: -4 ... +212 °F					
Compensated temp. range		0 ... +80 °C										
Temperature coefficients in compensated temp range												
■ Mean TC of zero	% of span	≤ 0.2 / 10 K (< 0.4 for pressure range < 250 mbar)										
■ Mean TC of range	% of span	≤ 0.2 / 10 K										