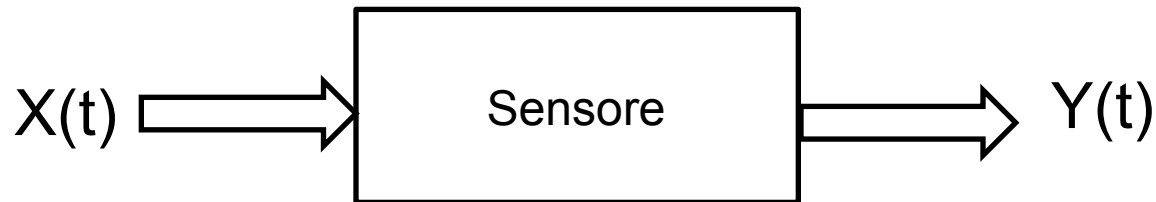


Sensori

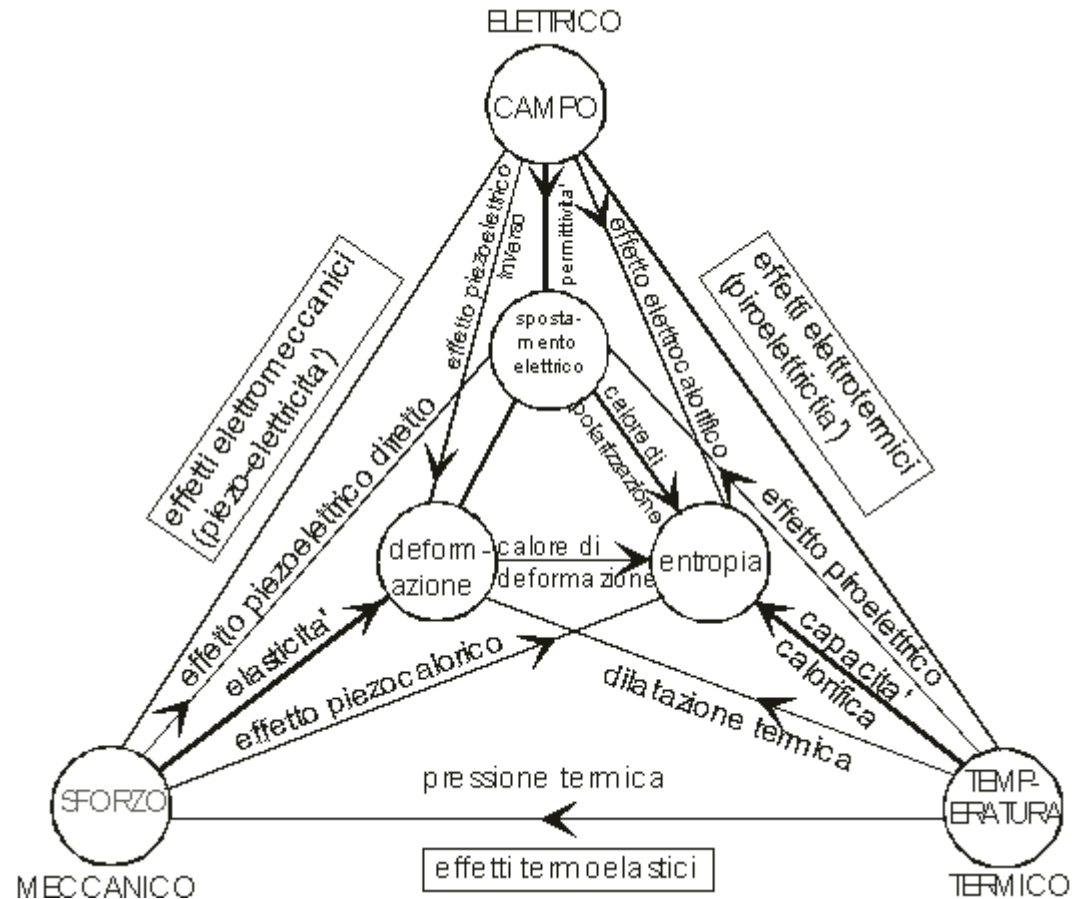
- Un sensore è un dispositivo che trasforma la grandezza fisica che vogliamo misurare in un'altra grandezza di natura diversa (tipicamente elettrica ovvero utilizzabile, memorizzabile ed elaborabile in modo estremamente veloce attraverso circuitistica elettronica)



- La variabile in ingresso, ovvero la grandezza che vogliamo misurare, è detta **misurando** $X(t)$. La variabile di **uscita** $Y(t)$ è quella direttamente disponibile all'utilizzatore e sarà prevalentemente una grandezza di tipo elettrico (corrente, tensione).
- **NB: attraverso l'osservazione della variabile di uscita $Y(t)$ il nostro obiettivo è quello di stimare il misurando $X(t)$**
- In generale il sensore può contenere o no la circuitistica analogica di trattamento del segnale. Inoltre l'uscita $Y(t)$ può essere anche di tipo digitale.

Fenomeni fisici di conversione energetica

Scelta del trasduttore
Scelta del fenomeno di conversione legato alla grandezza fisica da misurare



Classificazione dei trasduttori/sensori (1)

Classificazione in base alle grandezze di ingresso

GRANDEZZA D'INGRESSO		GRANDEZZA MISURATA
SPOSTAMENTO	LINEARE ANGOLARE	lunghezza, spessore, livello, stato della superficie, erosione usura, vibrazioni, forza, pressione, durezza, sforzo, accelerazione angolo di incidenza, angolo di scorrimento, vibrazione angolare
VELOCITA'	LINEARE ANGOLARE	Velocità, velocità di scorrimento, vibrazioni, suoni, momenti Velocità, frequenza di rotazione, vibrazioni, momenti angolari
ACCELERAZIONE	LINEARE ANGOLARE	Accelerazione, massa, vibrazioni, urti Accelerazione, vibrazioni, urti obliqui, momento di inerzia
FORZA		Peso, densità, urti, sforzo, coppia, vibrazioni, pressione Velocità di fluidi e gas, altitudine, suoni
TEMPERATURA		Conduzione e radiazione di calore, pressione, velocità di gas, turbolenza
RADIAZIONE LUMINOSA		Flusso e densità di luce, distribuzione spettrale, lunghezza d'onda, deformazione, forza coppia, frequenza
DURATA		Frequenza, numerazione, distribuzioni statistiche

Classificazione dei trasduttori (2)

ATTIVI	PASSIVI
Resistenza, induttanza capacità controllate geometricamente.	Elettromagnetico
Meccanicoresistivo	Piezoelettrico
Magneto-resistivo	Termoelettrico
Termoresistivo	Fotoemissivo
Fotoconduttivo	Fotovoltaico
Piezoresistivo	Elettrocinetico (potenziale di scorrimento)
Effetto Hall	Piroelettrico

Attivi/passivi

SEGNALI RADIANTI	Intensità, lunghezza d'onda, polarizzazione, fase
SEGNALI MECCANICI	Forza, pressione, torsione, flusso, volume, densità, massa, posizione, spostamento, velocità, accelerazione, ampiezza e lunghezza d'onda acustica
SEGNALI TERMICI	Temperatura, calore, calore specifico, entropia, flusso di calore
SEGNALI ELETTRICI	Tensione, corrente, carica resistenza, induttanza, capacità, costante dielettrica, polarizzazione elettrica, frequenza.
SEGNALI MAGNETICI	Intensità di campo, momento, magnetizzazione, permeabilità
SEGNALI CHIMICI	Composizione, concentrazione, tossicità, potenziale di ossidoriduzione. pH, inquinanti, velocità di reazione.

Fenomeno fisico

Principali fonti di errore nelle misure biomediche (1)

Obiettivo della misura: effettuare una STIMA accurata di una variabile di interesse

**Errore
misura**

$$e = x - \tilde{x}$$

Stima

Misurando

- Artefatti legati al metodo
- Artefatti di interazione meccanica dovuti al posizionamento, ingombro, disadattamento o movimento del trasduttore
- Errori propri del trasduttore e dei relativi circuiti di condizionamento del segnale.

Principali fonti di errore nelle misure biomediche (2)

■ Artefatti legati al metodo

– Misure indirette

- Utilizzo di un modello che, per quanto accurato, rappresenta un'idealizzazione del dato reale
- Es. Portata di sangue attraverso diluizione dell'indicatore
- Possibile errori: Ipotesi sulle cinetiche di mescolamento e i profili di flusso

■ Artefatti di interazione meccanica

– Ingombro, mal posizionamento, movimento relativo tra trasduttore e corpo, dimensioni finite del trasduttore

- Es. Artefatti movimento segnale elettrocardiografico

– Misure di flusso e pressioni intra-vasali via catetere

- Es. Alterazione dei profili naturali di flusso

Sensori – Funzioni di conversione

- **Funzione di conversione diretta:** uscita come variabile indipendente, misurando come variabile dipendente. **Data l'uscita si ricava il misurando.**

$$X(t) = f_d(Y(t))$$

- **Funzione di conversione inversa:** misurando come variabile indipendente, uscita come variabile dipendente. **Dato il misurando si ricava l'uscita invertendo la funzione.**

$$Y(t) = f_i(X(t))$$

Cosa significa misurare?

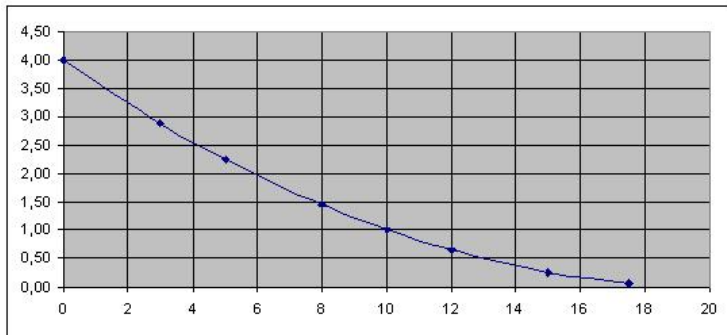
Ricavare in modo quantitativo una stima della grandezza $X(t)$.

$X(t)$ non è direttamente “osservabile”, ma si “manifesta” tramite l'uscita del sensore $Y(t)$.

La mancata conoscenza di queste relazioni rende impossibile la misura

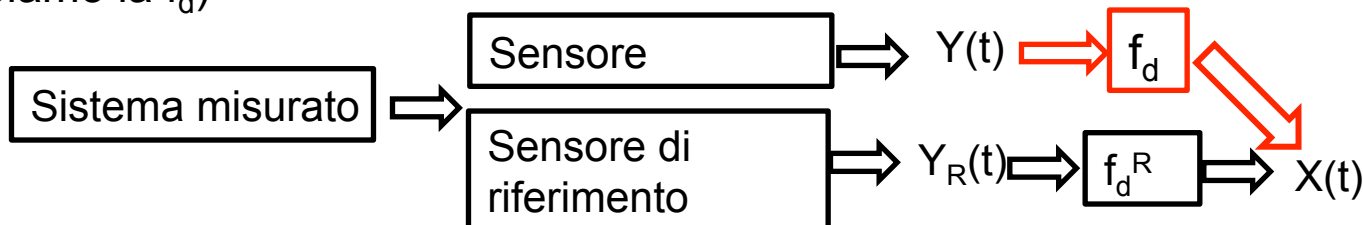
Sensori – Funzioni di conversione (2)

- La funzione di conversione diretta f_d può essere ricavata in diverse modalità
 - Nota a priori conoscendo il modello fisico/elettrico del sensore
 - È abbastanza raro che la funzione diretta sia costruita in questo modo. Inoltre le inevitabili tolleranze sui componenti elettronici e sulla costruzione renderanno necessari i passi descritti nei punti successivi (taratura).
 - Costruita per punti imponendo X noti (**non sempre possibile**)
 - metodo valido per una caratterizzazione quasi-statica



X	Y
x_0	y_0
x_1	y_1
x_2	y_2

- Costruita per punti utilizzando un sensore di riferimento molto preciso (di cui sappiamo la f_d)



Sensori

- Modello matematico generale del comportamento di un sensore
 - partiamo dal caso stazionario ovvero distanza temporale dallo stimolo applicato abbastanza grande da avere tutti i transitori esauriti
 - la variabile tempo t sparisce dalle equazioni

- In generale il modello dipenderà, oltre che dal misurando, da altre grandezze fisiche che sono dette **grandezze di influenza**

$$x(t) = f_d(x, t, g_1, \dots, g_m) \qquad y(t) = f_i(y, t, g_1, \dots, g_m)$$

- Le **grandezze di influenza** sono grandezze fisiche diverse dal misurando che influenzano la risposta del sensore
 - in pratica l'uscita del sensore non dipende solo dal misurando, ma anche da altre grandezze che “disturbano” la misura
 - la presenza di grandezze di influenza fa sì che, a parità di misurando, il sensore possa rispondere in modo diverso
 - Esempi: variazione della temperatura e/o umidità, fluttuazioni della tensione di alimentazione, impedenza ingresso

Sensori

- In generale si può usare una relazione diversa che permette di evidenziare il contributo principale del misurando X e il contributo secondario (non per questo piccolo) delle grandezze d'influenza.

– Da ora in poi ci riferiamo alla sola funzione inversa, ma le stesse considerazioni valgono per quella diretta

$$y(t) = f(x(t)) + f'(x(t), g_1(t), \dots, g_m(t))$$

NB: nella f' compare il misurando

- Ipotizziamo l'indipendenza tra x e le grandezze d'influenza

$$y(t) = f(x(t)) + f''(g_1(t), \dots, g_m(t))$$

- Ulteriore semplificazione: indipendenza tra le grandezze d'influenza

$$y(t) = f(x(t)) + f^1(g_1(t)) \dots + f^m(g_m(t))$$

- $f^1 \dots f^m$ sono definite **funzioni di influenza** e descrivono l'effetto sull'uscita della rispettiva grandezza di influenza

•Sensori

- In questa trattazione il tempo non è stato menzionato, tra le funzioni di influenza. Questo è corretto nel caso in cui il sensore operi in uno stato stazionario.
- Nella stragrande maggioranza dei casi, siamo in presenza di sensori per i quali la misura ha un carattere marcatamente dinamico, in questo caso dobbiamo esplicitare il tempo

$$y(t) = f(x(t)) + f^1(g_1(t)) + \dots + f^m(g_m(t)) + f^{m+1}(t)$$

←
La funzione di influenza f^{m+1} indica che la caratteristica ingresso/uscita del sensore può essere **tempo variante**

Caratteristiche dei sensori

Principali caratteristiche richieste ad un sensore

CARATTERISTICHE ESTERNE

Dimensioni ridotte (eventuale miniaturizzazione)
Facilità di posizionamento
Resistenza e durata (anche in ambiente ostile)
Riutilizzabilità
Presentazione ottimale dei risultati
Schermatura contro interferenze esterne
Misure su esseri viventi: non-invasività e uso di materiali biocompatibili

CARATTERISTICHE INTERNE

Elevato rapporto segnale-rumore
Capacità di eliminare il rumore (filtraggio, averaging...)
Funzione di trasferimento opportuna (diagramma di ampiezza e di fase)
Velocità di risposta
Accoppiamento tra i vari stadi senza attenuazioni o distorsioni
Elevata impedenza d'ingresso
Utilizzo della reazione (stabilità)
Linearità
Sistema di calibrazione
Sensitività indipendente dai fattori ambientali
Configurazione di tipo differenziale
Assenza di isteresi
Capacità di resistere ad un sovraccarico

Caratteristiche Sensori

- Definizioni importanti
 - **Campo di misura:** intervallo di valori del misurando per cui è valido il modello descrittivo sopra riportato
 - nota: se aumenta il campo di misura è necessario modificare il modello descrittivo
 - **Campo di sicurezza:** intervallo di valori del misurando per il quale non si provochino danni al sensore stesso
 - nota: campo di misura < campo di sicurezza
 - **Campo di funzionamento normale:** range di valori dell'uscita relativi al campo di misura
 - **Valori estremi:** range di valori dell'uscita relativi al campo sicurezza

Campi di variabilità del misurando

Le relazioni semplificate precedentemente introdotte valgono solo per determinati valori del misurando; il campo dei valori del misurando che assicurano la validità del modello costituiscono il campo di misura.

Nel caso in cui si debba ampliare il campo di misura è spesso necessario cambiare il modello matematico rappresentativo del sensore rinunciando a parte delle semplificazioni introdotte.

Viene talvolta indicato il campo di sicurezza, da non confondersi con il campo di misura, definito come il campo dei valori del misurando che assicurano il funzionamento del sensore senza che si verifichino danni al sensore stesso; è evidente che il campo di sicurezza è in generale non minore in ampiezza del campo di misura.

Campi di variabilità del misurando

- **Campo di misura:**

« intervallo comprendente i valori di misura che si possono assegnare mediante un dispositivo per misurazione e/o regolazione. »

Il campo di misura è l'intervallo entro cui deve mantenersi il misurando affinché il trasduttore operi secondo le specifiche.

Campi di variabilità del misurando

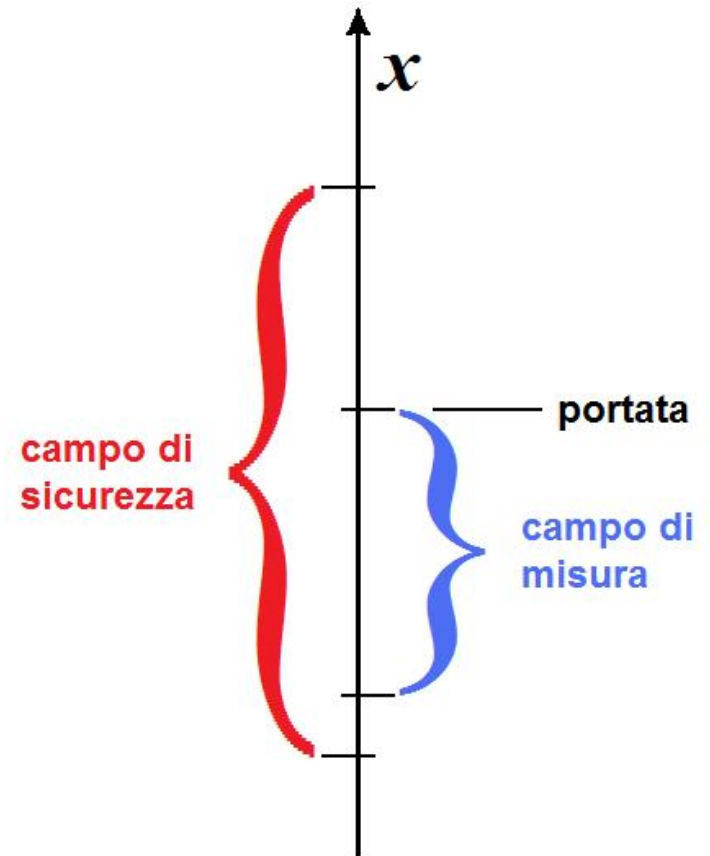
- **Campo di sicurezza:**

« intervallo comprendente tutte le misure del misurando cui un dispositivo per misurazione può essere applicato senza che il suo “*diagramma di taratura*” resti permanentemente alterato. »

Il campo di sicurezza è l'intervallo entro cui deve mantenersi il misurando per non provocare danni permanenti al trasduttore.

Campi di variabilità del misurando

- il campo di misura è l'intervallo entro cui deve mantenersi il misurando affinché il trasduttore operi secondo le specifiche.
- Il campo di sicurezza è l'intervallo entro cui deve mantenersi la grandezza di ingresso per non provocare danni permanenti al trasduttore.



- Il campo di misura è sempre interno al campo di sicurezza

Campi di variabilità del misurando

Tempo di ripristino: se il misurando, rimanendo nel campo di sicurezza, supera la portata si può creare un danno temporaneo che viene recuperato nel “tempo di ripristino”

Campi di variabilità dell'uscita

- **Campo di lettura utile:** intervallo di valori entro il quale si trova l'uscita quando la grandezza di ingresso è nel campo di misura.
- **Valori estremi dell'uscita:** estremi entro i quali si mantiene il segnale di uscita se la grandezza di ingresso non esce dal campo di sicurezza.

Condizioni operative

- Condizioni che devono essere rispettate durante l'impiego del trasduttore affinché sia applicabile o ottenibile un definito diagramma di taratura.
 - **Campo di impiego per una grandezza di influenza:**
Intervallo entro il quale deve essere compreso il valore della grandezza di influenza affinché sia possibile ottenere la trasduzione del misurando.
 - **Campo di riferimento per una grandezza di influenza:**
Intervallo entro il quale deve essere compreso il valore della grandezza di influenza durante l'esecuzione della verifica di taratura di un trasduttore

Caratteristiche del Sensore

Informazioni sulle caratteristiche dell'uscita del sensore

- Natura dell'uscita: tensione, corrente.....
- Campo di normale funzionamento (output range)
- I valori estremi dell'uscita
- La potenza erogabile al sistema utilizzatore, in alternativa la massima tensione o corrente erogabile o il valore massimo dell'impedenza di carico (se il segnale di uscita è una corrente)
- L'impedenza di uscita
- Incertezza intrinseca dell'uscita
 - in conseguenza di particolari operazioni eseguite sul segnale di uscita quali una quantizzazione oppure ad una amplificazione in presenza di rumore;

Caratteristiche del sistema di alimentazione

Taratura e calibrazione

La **taratura** è una tipologia di caratterizzazione che ha come scopo la definizione delle caratteristiche metrologiche di uno strumento di misura. Questo avviene tramite un confronto di misure con uno strumento di riferimento, definito campione.

Lo strumento oggetto della taratura viene anche definito **tarando**.

È necessario evitare di confondere la taratura con **la calibrazione**

- mentre la taratura è un'operazione che permette di definire le caratteristiche metrologiche di uno strumento, la calibrazione ha come obiettivo rendere lo strumento più accurato.

Con la taratura si calcolano la funzione di conversione diretta e inversa

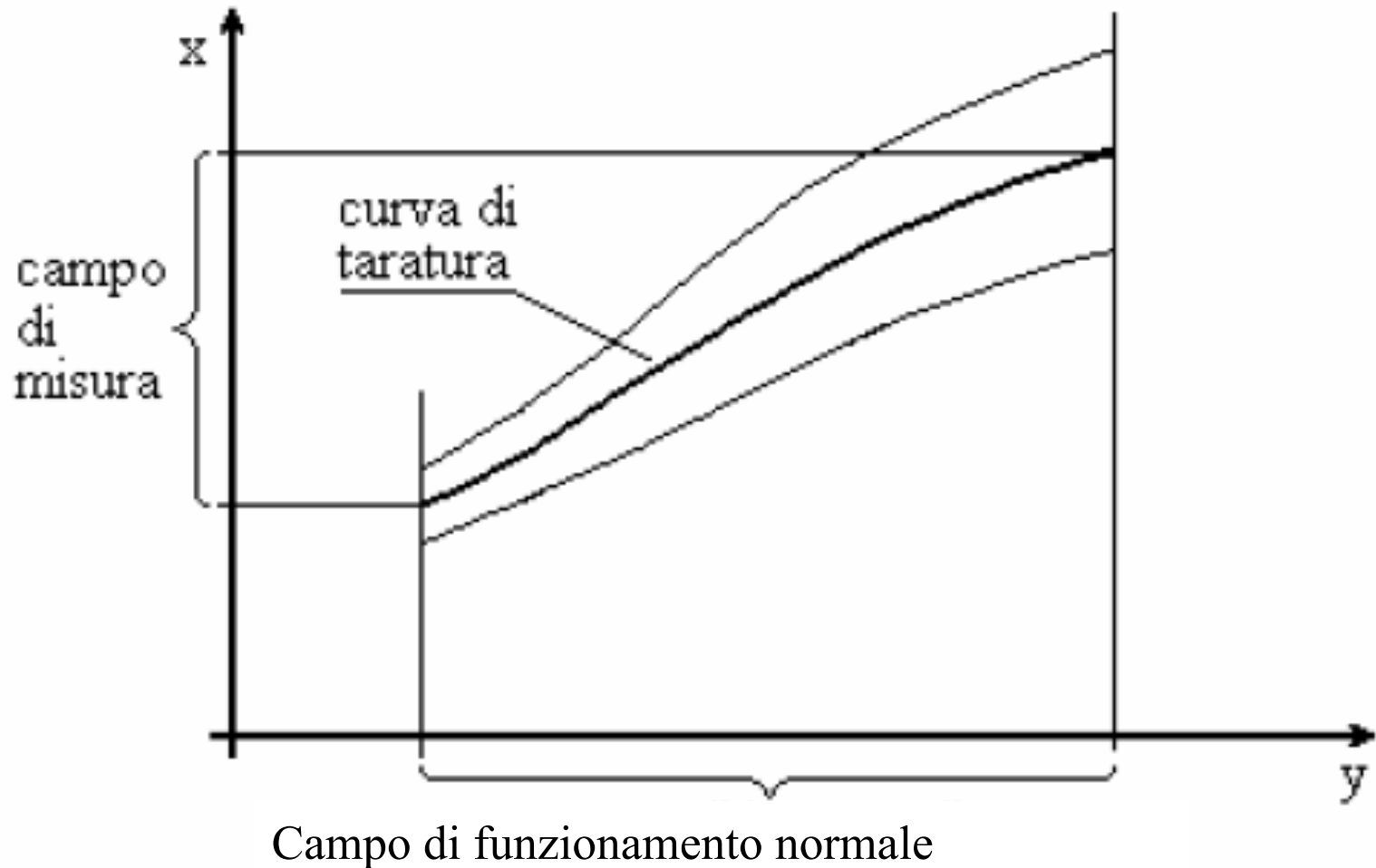
Sensori - Caratteristiche metrologiche

- Nell'ambito sensoristico, sia dal punto di vista del progettista che dell'utilizzatore, non vengono mai fornite f_d o f_i
- Solitamente vengono utilizzati dei formalismi sintetici che permettono di ricostruire le caratteristiche ingresso/uscita del sensore stesso
- In condizioni quasi statiche faremo riferimento alle “caratteristiche metrologiche in regime stazionario”
- In condizioni dinamiche verranno definite le caratteristiche principali sia nel dominio del tempo che della frequenza.

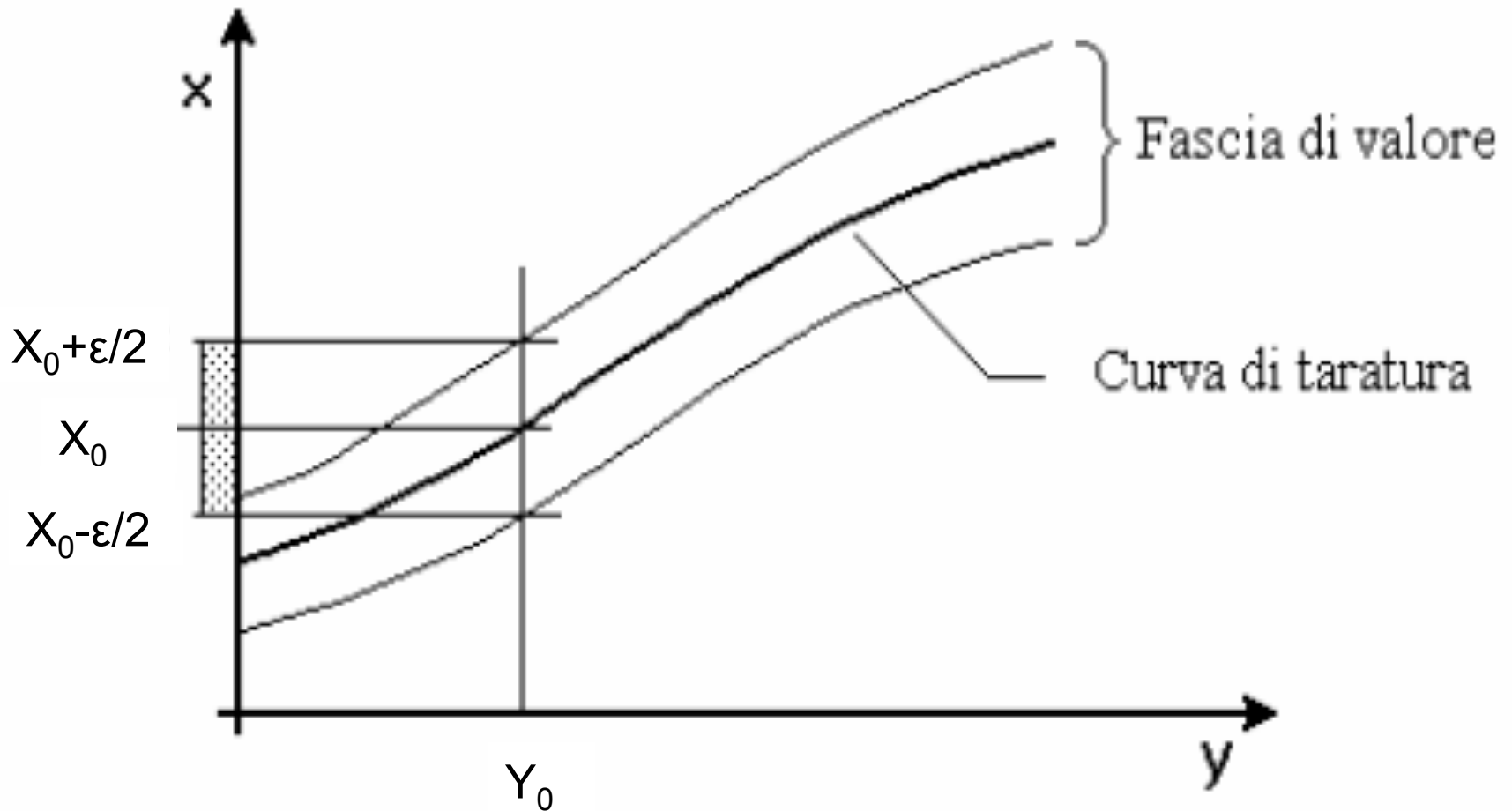
Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **Funzione di taratura:** la relazione che permette di ricavare per ogni valore dell'uscita (appartenente al campo di funzionamento normale) la corrispondente fascia di valore del misurando.
 - A causa delle incertezze (grandezze e funzioni di influenza) non si parla mai di valore, ma di "fascia di valore"
- **Curva di taratura:** è la relazione tra ogni valore della grandezza di uscita e il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando.
 - Quando la curva di taratura è rettilinea, cioè esiste una relazione di proporzionalità fra uscita e misurando, essa viene espressa di regola con un coefficiente chiamato costante di taratura

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario



Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario



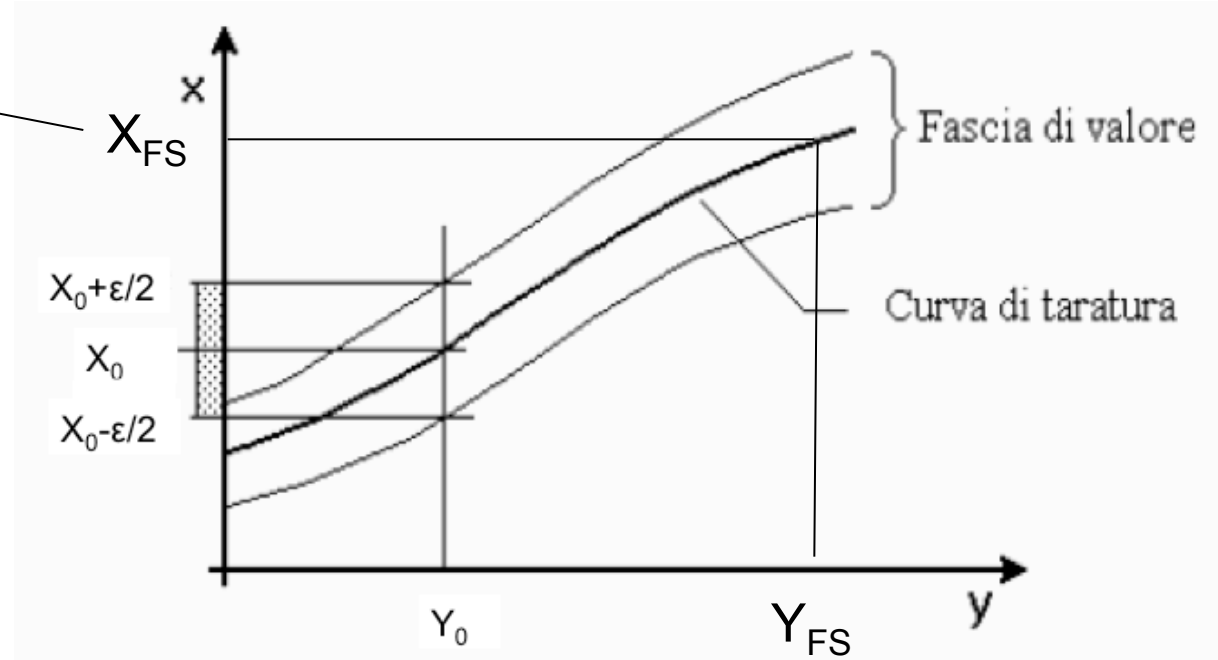
Per Y_0 abbiamo che il misurando è compreso nell'intervallo $[X_0 - \epsilon/2; X_0 + \epsilon/2]$. Incertezza assoluta pari alla lunghezza dell'intervallo ovvero ϵ

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **Incertezza di taratura (errore):** è la larghezza della fascia di valore.
 - Anche se tale larghezza non è costante all'interno del campo di funzionamento normale, di norma il costruttore ci fornisce un unico valore relativo all'incertezza di taratura. Tale numero è da interpretarsi come la massima incertezza all'interno del campo di funzionamento normale.
 - L'incertezza può essere espressa secondo diverse modalità:
 - in **valore assoluto** con la stessa unità di misura del misurando (**incertezza assoluta**)
 - in **valore relativo** rapportandola al valore del punto intermedio della fascia a cui è associata (**incertezza relativa**)
 - in **valore ridotto** rapportandola a un determinato valore del campo di misura, di solito il limite superiore (**incertezza ridotta**)
 - Precisione o accuratezza sono sinonimi di incertezza relativa.
- **NB:** Anche se spesso sentiremo parlare di una misura come un unico numero, deve essere chiaro che abbiamo sempre a che fare con una stima, ovvero con un campo di valori al quale siamo ragionevolmente confidenti che il misurando appartenga

• Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

Fondo scala:
misurando relativo
all'estremo superiore
del campo di misura



Incertezza assoluta: $\epsilon \rightarrow [X_0 - \epsilon/2; X_0 + \epsilon/2]$

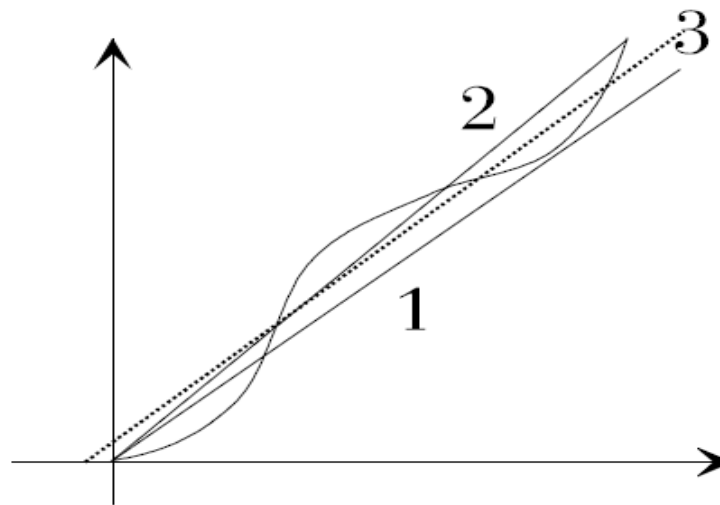
Incertezza relativa: $\epsilon_r = \epsilon/X_0 \rightarrow [X_0 - (\epsilon_r X_0)/2; X_0 + (\epsilon_r X_0)/2]$

Incertezza ridotta: $\epsilon_{rid} = \epsilon/X_{FS} \rightarrow [X_0 - (\epsilon_{rid} X_{FS})/2; X_0 + (\epsilon_{rid} X_{FS})/2]$

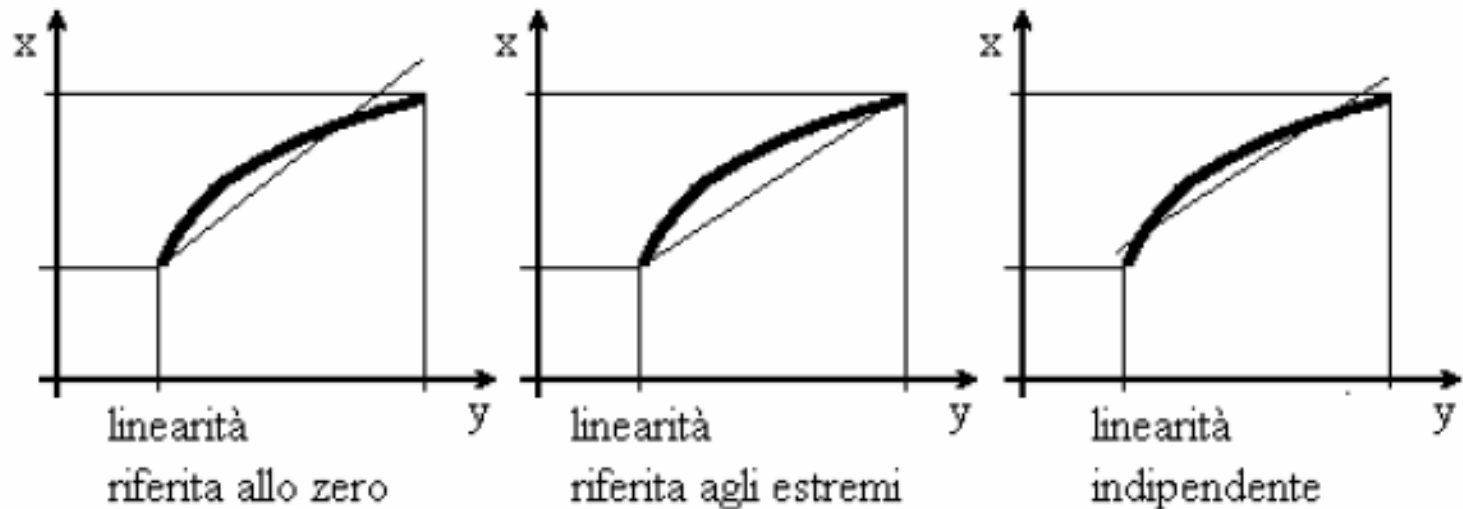
Caratteristiche del sensore

- **Linearità:** è un'indicazione di quanto la curva di taratura si discosta dall'andamento rettilineo. E' specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita.
 - linearità riferita allo zero: la retta di riferimento passa per l'estremo inferiore della curva di taratura, corrispondente all'estremo inferiore del campo di misura, ed è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti;
 - linearità riferita agli estremi: la retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura;
 - Linearità secondo i minimi quadrati: la retta di riferimento è quella che corrisponde al valor minimo della somma dei quadrati degli scostamenti;
 - linearità indipendente: la retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti.

Caratteristiche del Sensore

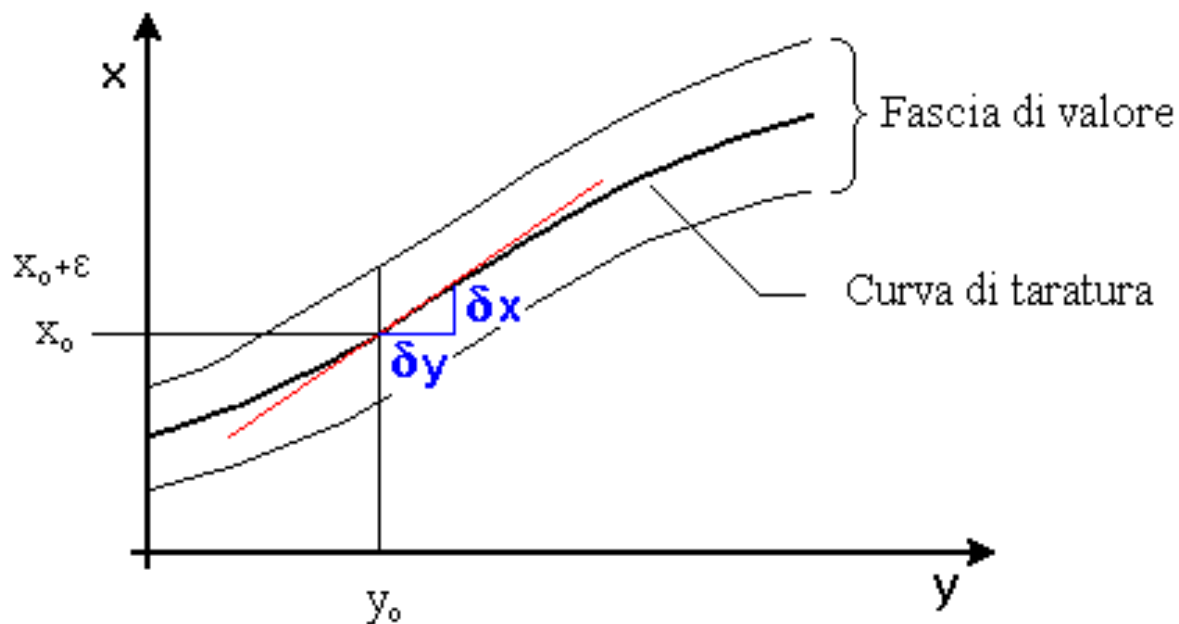


Sono riportate le curve di linearizzazione ottenute
(1) con riferimento allo zero; (2) con riferimento agli estremi e,
(3) secondo il metodo dei minimi quadrati.



•Sensibilità

- La sensibilità (sensitivity) rappresenta il rapporto fra la variazione dell'uscita del trasduttore e la corrispondente variazione del misurando $\delta y / \delta x$
- Offset: il valore dell'uscita quando il misurando è nullo $Y=F(0)$

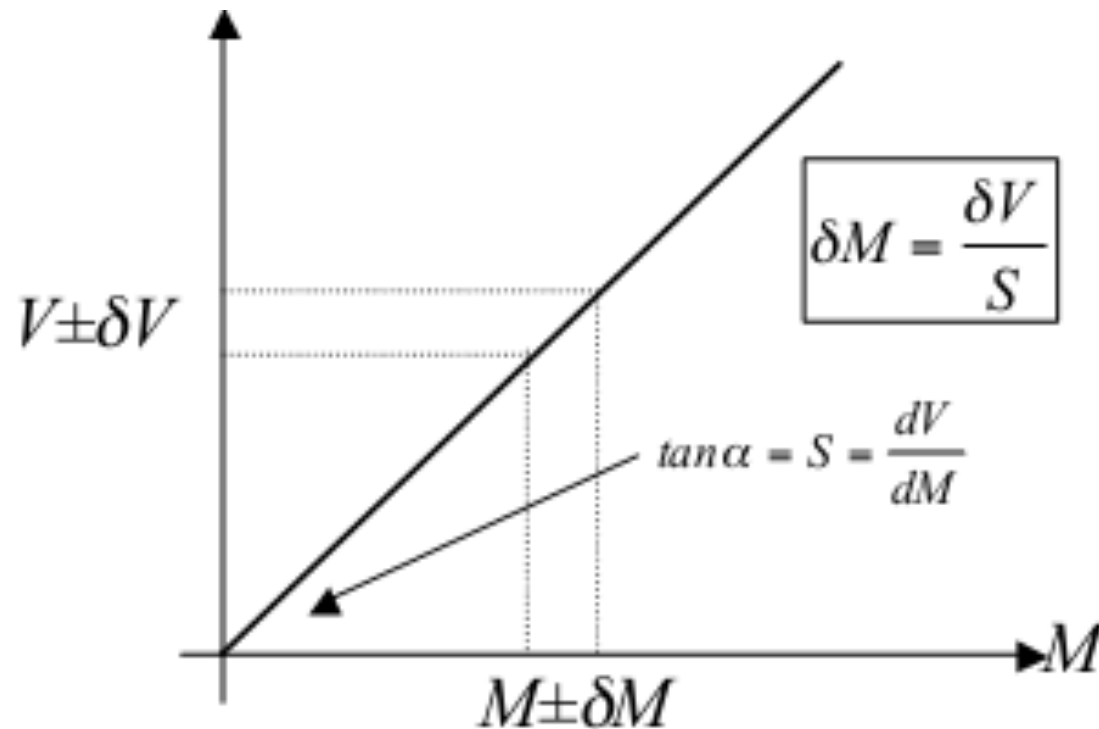


•Sensibilità

- Il valore della sensibilità può essere ricavato, per ogni valore del misurando, dalla funzione di taratura: è pari al reciproco del coefficiente angolare della tangente alla curva di taratura nel punto considerato.
- Nel caso particolare di trasduttore lineare la curva di taratura è rettilinea e la sensibilità è pari al reciproco della costante di taratura.
- Le dimensioni della sensibilità sono riferite a quelle del misurando e dell'uscita; per esempio, in un sensore di pressione con uscita in tensione la sensibilità è espressa in volt/bar.

Risoluzione

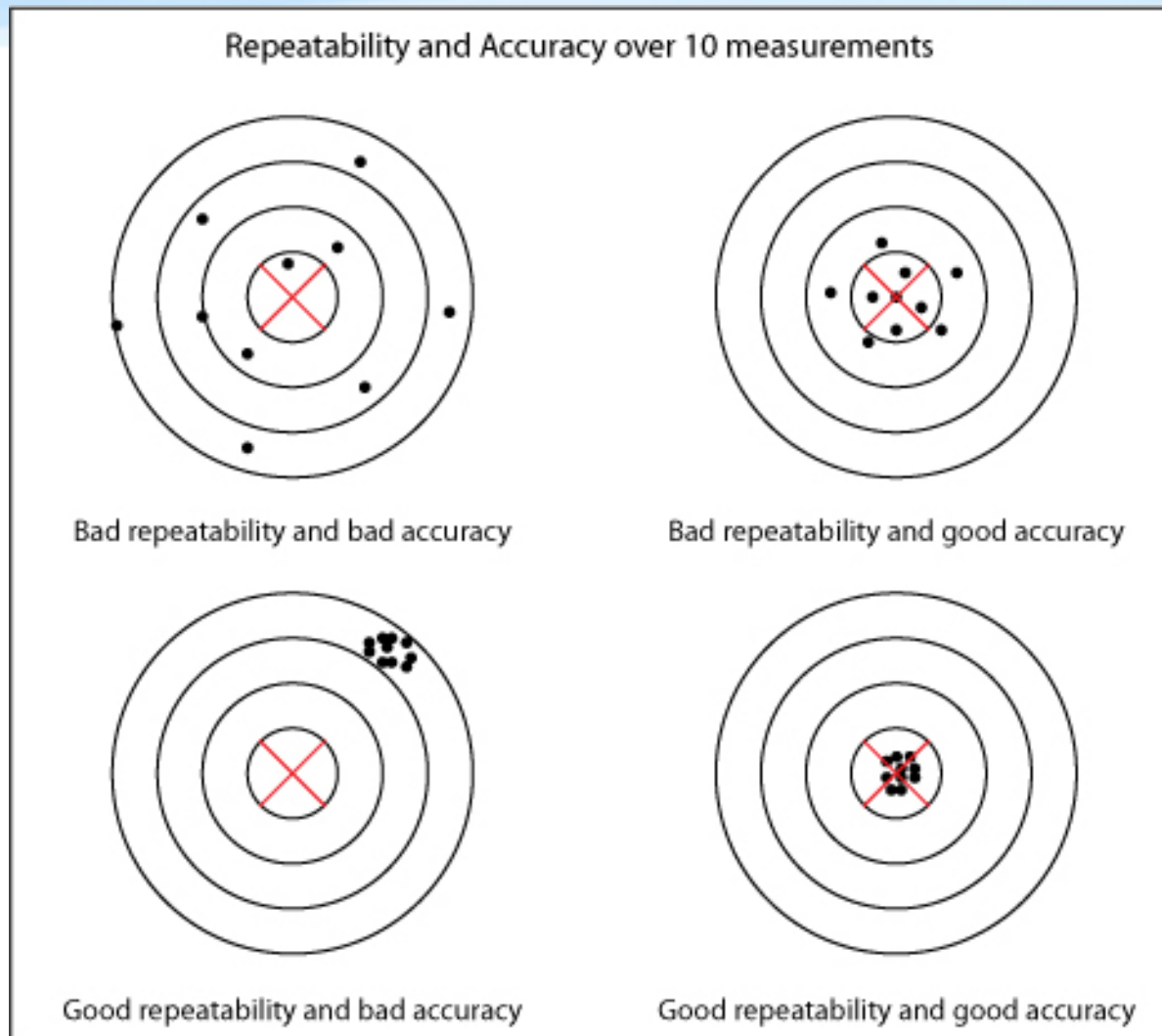
- E' la minima variazione del misurando che comporta una variazione dell'uscita del sensore



Ripetibilità - Stabilità

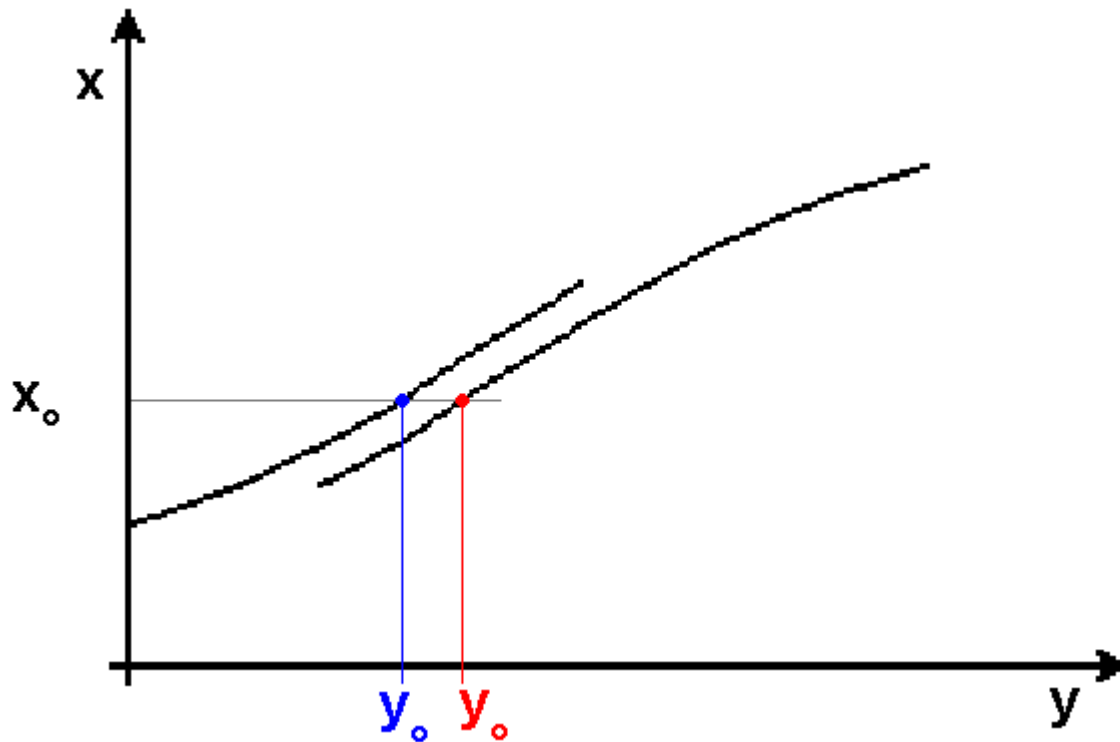
- La ripetibilità (repeatability) quantifica la attitudine del sensore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro quando all'ingresso è applicato più volte, consecutivamente, lo stesso misurando. La ripetibilità è di regola espressa con le medesime modalità dell'incertezza di taratura.
- La stabilità (stability) è la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi oppure anni).
- Accuratezza è l'errore di misura quindi la differenza fra valore rilevato e valore reale del misurando.

•Ripetibilità e accuratezza



Isteresi

L'isteresi (hysteresis) quantifica la presenza di un effetto di "memoria" del sensore la cui uscita, a parità di valore del misurando, potrebbe essere influenzata dalla precedente condizione operativa



Isteresi

- La isteresi viene valutata individuando, per ogni valore del misurando compreso nel campo di misura, la differenza fra i due valori dell'uscita che si ottengono quando il segnale di ingresso viene fatto variare in modo da raggiungere il valore desiderato partendo una volta dall'estremo inferiore del campo di misura, ed un'altra volta dall'estremo superiore.
- **Il valore massimo dell'insieme delle differenze così determinate costituisce l'isteresi del sensore.**
- Le due prove devono essere effettuate entro un determinato intervallo di tempo per evitare fenomeni di rilassamento..

•Vita del trasduttore

vita del trasduttore: si misura in tempo oppure in “cicli operativi” indica quanto a lungo il trasduttore opera senza discostarsi in modo significativo dalle caratteristiche metrologiche mostrate durante la taratura iniziale.

Stabilità temporale: La capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi oppure anni). La stabilità, quindi, legando le caratteristiche del sensore alla grandezza tempo, riveste un ruolo assai simile a quello della ripetibilità che, si ricorda, tiene conto degli effetti a breve termine delle grandezze di influenza. La stabilità viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative entro un determinato intervallo di tempo. A volte è usato il termine "deriva" (offset oppure shift), con significato più o meno equivalente. Viene anche usata, solamente con riferimento alla situazione di misurando nullo, la espressione "deriva dello zero" (zero shift oppure offset drift).

Caratteristiche del Sensore

- **Condizioni di riferimento:** l'insieme delle fasce di valore delle grandezza d'influenza in corrispondenza delle quali sono valide le specificazioni metrologiche riassumibili nella funzione di taratura.
- **Funzione di influenza:** azione di una determinata grandezza d'influenza su una delle caratteristiche metrologiche.
 - Curva o valori numerici, ciascuno dei quali, in un determinato campo di valori, esprime la sensibilità della caratteristica metrologica considerata rispetto alle variazioni della grandezza d'influenza. Tipica è la sensibilità termica (thermal sensitivity).
 - Esempio: l'effetto della tensione della sorgente di alimentazione ausiliaria sulla costante di taratura mediante un coefficiente del tipo $-0,1\%/V$, volendo significare che l'aumento di un volt nella tensione provoca una diminuzione della costante di taratura pari a $0,1\%$

Caratteristiche del Sensore

Rumore

- E' una variazione del segnale non correlata ad alcuna informazione. E' di solito fornito in valore efficace, precisando la banda di frequenze entro la quale viene preso in considerazione.
- Ipotesi: che il rumore sia presente solo sull'uscita
 - la risoluzione è un'informazione sintetica che dovrebbe conglobarne l'effetto.

Affidabilità:

numero cicli, tempo di vita in funzionamento continuo e/o intermittente.

Calibrazione (1)

Calibrazione: insieme di operazioni svolte su un sistema di misura, affinché esso fornisca indicazioni prescritte in corrispondenza di determinati valori di una grandezza da sottoporre a misurazione

- La calibrazione (adjustment) è l'operazione in cui il sistema di misura viene regolato in modo da migliorarne l'accuratezza
 - Da non confondersi con la parola inglese "calibration" che si traduce con taratura
- Effettuata dal costruttore o da suoi delegati
 - Regolata da normative in alcuni casi
 - Necessità di ri-calibrazione
- Due modalità
 - Disponibilità di una sorgente di segnale biomedico simulata
 - Simulatore elettrocardiografico
 - Simulatore di pressione arteriosa dinamica
 - Comparazione con trasduttori di riferimento (standard secondari)

Calibrazione (2)

