

Sistemi sensoriali

Biosensori

Alessandro Tognetti

a.tognetti@centropiaggio.unipi.it

<http://www.centropiaggio.unipi.it/course/biosensori.html>

Ambito del corso

- In un dispositivo biomedicale il sensore rappresenta la primaria e principale interfaccia col paziente
 - Diagnosi, misura di parametri vitali in tempo reale, terapia
- Il corso di **biosensori** riguarda lo studio e l'analisi dei principali sensori e trasduttori ad oggi utilizzati in biomedica
 - accezione più ampia rispetto al tradizionale concetto di bio-sensore (i.e. sensore avente un recettore biologico associato all'elemento sensibile)
- L'obiettivo primario del corso è quello di fornire le basi teorico/pratiche per affrontare il problema della misura in campo biomedico,
 - Aspetti generali della misura
 - Analisi caratteristiche metrologiche dei sensori
 - Utili sia dal punto di vista del progettista del sensore sia per l'utilizzatore (il progettista del sistema biomedico)
 - Studio ed analisi delle principali tipologie di sensori ad oggi utilizzati in biomedica
 - Principio di funzionamento, caratteristiche statico/dinamiche, circuiti analogici di lettura, esercizi su applicazioni pratiche

Dettagli sul corso

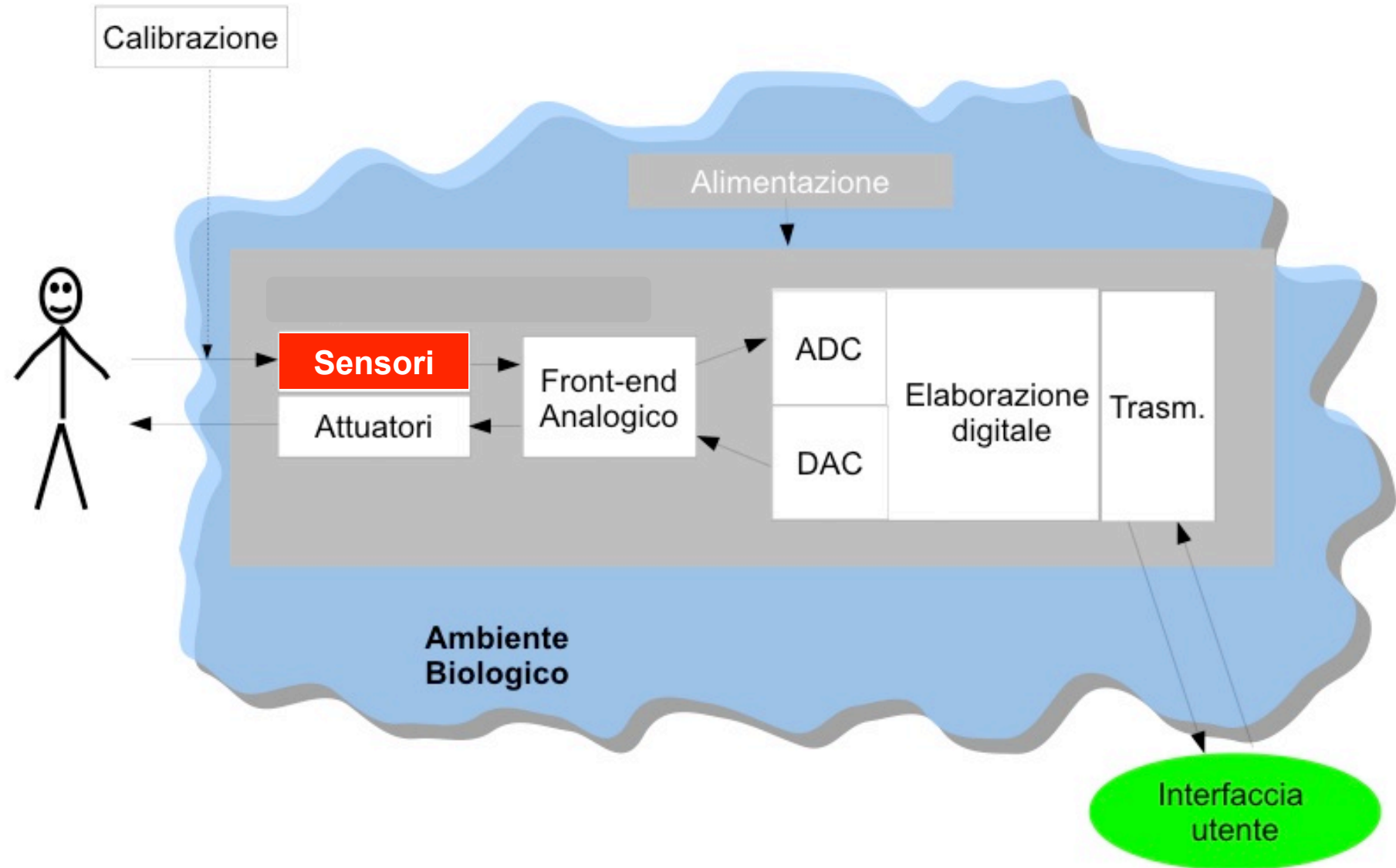
- Programma di massima
 - Misure in campo biomedico
 - Aspetti carattere generale su misure biomediche e sensori
 - Sensori fisici
 - Misure di temperatura, forza/deformazione, pressione.....
 - Elettrodi e sistemi per la misura di biopotenziali
 - Teoria elettrodi, impedenza di elettrodo, macroelettrodi,....
 - Sensori chimici
 - pH, concentrazione ioni, pO₂,
 - Biosensori
 - Catalitici, immunosensori.....
- Modalità esame
 - Prova scritta con esercizi e domande teoriche
 - prova orale
- Materiale didattico
 - Dispense

Misure in Campo Biomedico

Modulo Biosensori

Alessandro Tognetti

Schema Generale sistema di misura biomedico



Sottosistemi

Nell'ambito della progettazione di sistemi di misura l'Ingegnere Biomedico dovrà essere in grado di conoscere le principali caratteristiche/ problematiche relative ai singoli sottoinsiemi che costituiscono il dispositivo.

▪ Sensori

- Costituiscono la principale interfaccia con il paziente servono per misurare le variabili di interesse
 - bioelettrodi, fisici (temperatura, deformazione, velocità/accelerazione), ottici, chimici/ elettrochimici

▪ Attuatori

- si interfacciano al paziente fornendo l'”energia” necessaria
 - per terapia
 - per valutare l'interazione dell'energia trasmessa ai fini della misura di parametri di interesse diagnostico

Sottosistemi

▪ Front-end analogico

- Anche se gran parte delle operazioni più complesse potrà essere fatta in digitale, la circuitistica analogica di interfacciamento ai sensori/attuatori è una componente essenziale e imprescindibile di un dispositivo biomedicale
 - amplificatori per la trattazione di segnali analogici provenienti dai sensori (amplificatori da strumentazione)
 - filtraggio passa basso anti-aliasing prima del blocco di conversione analogica/digitale
 - amplificatori da isolamento per problematiche di sicurezza legate alla circuitistica di alimentazione
 - circuitistica di pilotaggio degli attuatori

Sottosistemi

▪ Conversione A/D

- Il segnale analogico è un segnale **continuo a tempo continuo** che contiene un'informazione **limitata**
- **Conversione A/D**: trasferire l'informazione contenuta nel segnale analogico in una successione di numeri interi rappresentati con una serie di simboli di un alfabeto finito.
 - **Campionamento**: passaggio dal segnale continuo a una successione di campioni ($v(t) \rightarrow v(kT)$ $k=0,1,2,\dots$)
 - **Quantizzazione**: ad ogni campione viene associato un numero intero rappresentato con una serie di simboli
- Il segnale digitale è facilmente memorizzabile e processabile tramite le moderne unità di elaborazione, ha un range di variazione finito ed in qualche modo l'errore è definito a priori (errore di quantizzazione)
- Il tempo di campionamento (T) deve essere commisurato al contenuto frequenziale del segnale di interesse

▪ Conversione D/A

- Passaggio inverso alla conversione A/D
- Il risultato dell'elaborazione può essere convertito in analogico per pilotare gli attuatori

Sottosistemi

▪ Elaborazione digitale

- PC, laptop, Smartphone, scheda dedicata (microprocessore, microcontrollore, DSP,...)
- Filtraggio digitale
 - passa basso, passa banda, passa alto....
- Elaborazione del segnale
 - Estrazione parametri di interesse: ECG intervallo R-R, EMG involuppo....
 - reazione alla misura nei sistemi ad anello chiuso
 - gestione dell'interfaccia di trasmissione (seriale, I2C, RS485)

▪ Trasmissione

- Wired (seriale, USB)
- Wireless (Bluetooth, ZigBee, ANT+)

▪ Interfaccia utente

- display, graphical user interface (GUI), app...

Sottosistemi

▪ Sistema di alimentazione

- Rete elettrica
 - Problemi di sicurezza
- Batteria
 - durata, ricarica, biocompatibilità

▪ Ambiente biologico

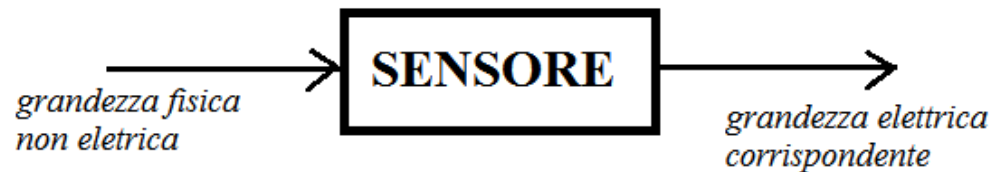
- contesto principale del sistema di misura
- studio delle principali proprietà dei tessuti
 - elettriche, ottiche, termiche, ultrasoniche

▪ Importanza del segnale di calibrazione

- simulazione di un segnale biomedico di riferimento atto a verificare il corretto funzionamento della catena e ad apportare eventuali correzioni

Sensori/Trasduttori

- Il sensore o trasduttore è uno degli elementi più critici di un sistema biomedico
 - Scopo: convertire la variabile da misurare in una forma più facilmente e velocemente elaborabile ovvero un segnale elettrico



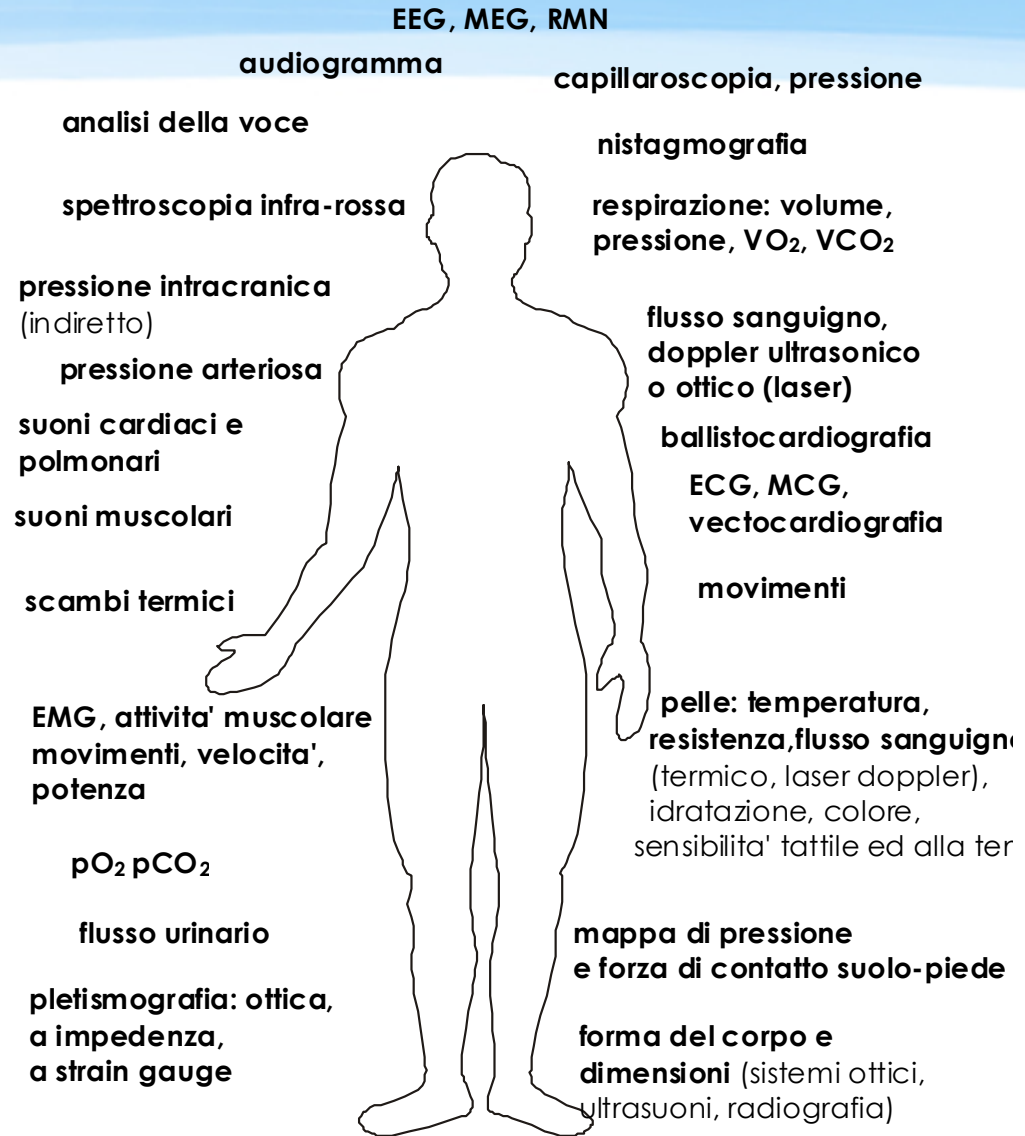
- Il sensore in campo biomedico è utilizzato per una valutazione **oggettiva** delle variabili di origine biologica
 - sostituisce, o meglio, migliora quello che in qualche modo sono stati per secoli e secoli i 5 sensi dei medici.....
- Obiettivo della misura: valutare se una determinata variabile di importanza clinica sta dentro valori normali
- Problematiche:
 - Interazioni con sistemi viventi (biochimico, fisiologico o psicologico)
 - Effetto della misura sul sistema misurato difficile da prevedere

Classificazione delle misure

Una prima fondamentale classificazione delle misure in campo biomedico è quella tra misure invasive e non invasive.

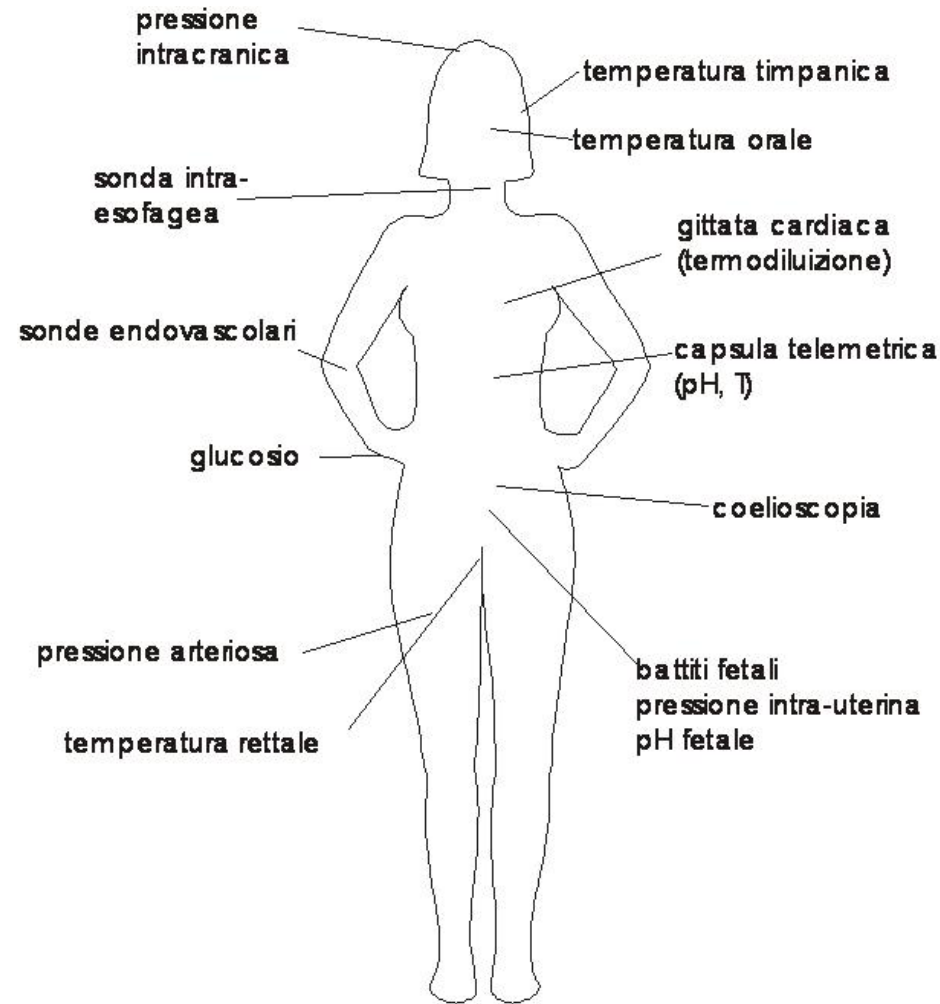
Misura non-invasiva

Preleva il segnale senza creare traumi, lesioni o alterazioni dei parametri vitali



MISURE NON INVASIVE

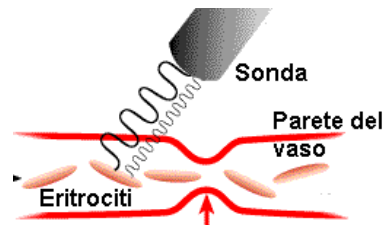
Classificazione delle misure



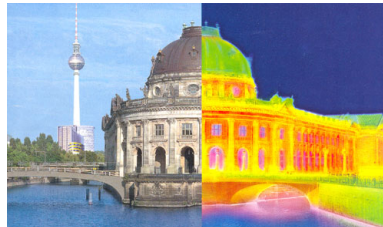
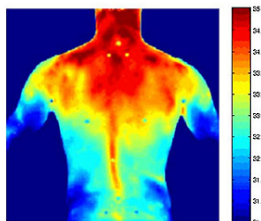
MISURE MINIMAMENTE INVASIVE

Classificazione delle misure (1)

- **Active**, in cui il segnale che poi verrà elaborato viene emesso dall'apparecchiatura stessa.
 - Esempio, in un ecografo viene elaborato il segnale ultrasonico generato dalla macchina e mediato dalle interazioni coi tessuti.



- **Passive**, in cui l'origine del segnale da elaborare deriva spontaneamente e direttamente dall'organismo.
 - Esempio: nella termografia viene sfruttata la radiazione infrarossa emessa dalle varie parti del corpo in funzione della loro temperatura superficiale.



Classificazione delle misure (2)

- **Dirette**, rilevano le quantità fisiche e chimiche d'interesse semplicemente confrontandole con valori di riferimento.
 - Esempi: misura di temperatura pelle, misura resistenza elettrica pelle.
- **Indirette**, si basano su relazioni matematico-fisico-statistiche che intercorrono tra la variabile biomedica di interesse e la quantità rilevata dal sensore.
 - Esempio: misurare la portata sanguigna in uscita dal cuore attraverso l'aorta (gittata cardiaca), attraverso il principio di diluizione dell'indicatore.

Mediante l'uso di cateteri, si inietta un indicatore e si misura la variazione nel tempo della concentrazione dell'indicatore nel sistema cardiovascolare. Tale misura è chiaramente indiretta poiché facciamo uso della relazione tra gittata e concentrazione dell'indicatore

Classificazione delle misure (3)

- In campo biomedico possono essere raggruppate in relazione a:
 - **Grandezza misurata**
 - Es. potenziali elettrici, pressioni, portate...
 - un vantaggio di tale classificazione è quello che i differenti metodi utilizzati per la misura di una certa grandezza possono essere confrontati facilmente
 - **Principio di trasduzione**
 - Es. resistivo, induttivo, capacitivo, piezoelettrico, elettrochimico, ecc
 - **Sistema fisiologico analizzato**
 - Es. sistema cardiovascolare, polmonare, nervoso, endocrino, ecc.
 - **Specialità medica**
 - Es. pediatria, i, cardiologica, neurologia, radiologia ecc.
 - questo approccio è valido soprattutto per il personale medico, che è interessato a strumenti specializzati per il proprio campo.

Complessità della misura

- Misura
 - Si rileva una quantità dalla quale risaliamo alla grandezza “desiderata”
 - Misura diretta: misuriamo direttamente la variabile di interesse
 - Misura indiretta: necessita la conoscenza di un modello matematico
- Processo complesso
 - Taratura, misura, elaborazione del segnale
 - Fattori che influenzano le misure: variabilità tra soggetti, artefatti, effetto temperatura, rumore elettrico.....
- Stima dell'accuratezza della misure
 - Errore < massimo consentito
 - Interazione uomo/sistema di misura
 - Minimizzata il più possibile
- Scelta dello strumento più adatto o sua progettazione
 - Specifiche della misura
- Conoscenza e riduzione del rumore
 - Filtraggio, averaging
- Scopo della misura
 - Misurare una grandezza e le sue variazioni temporali (ambito diagnostico)
 - La grandezza misurata è il nostro obiettivo finale
 - Comprensione di un processo (ambito fisiologico)
 - oltre ai valori precisi assunti dalla grandezza sotto misura, siamo interessati a conoscere il suo andamento nel tempo e a relazionarlo con determinati modelli fisiologici
 - Controllo di un processo (ambito terapeutico)
 - Sistema di controllo “retro-azionato”, interessa conoscere la variazione di una variabile rispetto ad un riferimento.

Principali fonti di errore nelle misure biomediche (1)

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

**Errore
misura**

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

Misurando

Stima

- 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

Parametri di interesse biomedico (1)

- I Campi di variabilità sono fondamentali in fase di progetto

Variabile misurata o tecnica di misura	Campo dei valori in ampiezza della variabile (tipico range di misura)	Campo utile di frequenza del segnale misurato (Hz)
VARIABILI MECCANICHE		
Pressione arteriosa (diretta)	10 - 300 mmHg	0 - 50
Pressione arteriosa (indiretta)	25 - 400 mmHg	0 - 60
Pressione venosa	0 - 50 mmHg	0 - 50
Pressione gastrointestinale	0 - 80 mmHg	0 - 10
Pressione vescicale	1 - 100 mmHg	0 - 10
Pressione intracranica	10 - 60 mmHg	0 - 40
Forza gastrointestinale	10 ⁻² - 0.5 N	0 - 1
Fonocardiografia	soglia > 10 ⁻⁴ Pa.	5 - 2 · 10 ³
Ballistocardiografia	range dinamico 80 dB	0 - 40
Pedobarografia	0 - 7 mg	16 immagini/s
Pletismografia	0 - 100 μm	0 - 30
(cambiamenti di volume)	2 - 130 N/cm ²	0 - 20
Portata volumetrica di sangue	varia con l'organo sotto esame	0-20
Gittata cardiaca	1 - 300 · 10 ⁻⁶ m ³ /s	0 - 40
Pneumotacografia	4 - 25 · 10 ⁻³ m ³ /min	0.1 - 10
Frequenza respiratoria	0 - 0.6 m ³ /min	0.1 - 10
Volume Tidal	2 - 50 respiri/min - (0.05 - 1) · 10 ⁻³ m ³ /respiri	0 - 0.1
Temperatura corporea	32 - 42 C	0 - 0.1

Parametri di interesse biomedico (2)

Variabile misurata o tecnica di misura	Campo dei valori in ampiezza della variabile (tipico range di misura)	Campo utile di frequenza del segnale misurato (Hz)
VARIABILI ELETTRICHE e MAGNETICHE		
Potenziali nervosi	0.01 - 3 mV	0 - 10 ⁴
Elettrocardiografia (ECG)	0.5 - 4 mV	0.01 - 250
Elettroencefalografia (EEG)	5 - 300 μ V	0 - 150
Elettrogastrografia (EGG)	10 - 1000 μ V	0 - 1
Elettromiografia (EMG)	0.1 - 5 mV	0 - 10 ⁴
Potenziali evocati visivi		
EOG	50 - 3500 μ V	0 - 50
ERG	0 - 900 μ V	0 - 50
Risposta galvanica cutanea	1 - 500 K Ω	0.01 - 1
Magnetocardiografia (MCG - SQUID)	- 100 pT	0 - 50

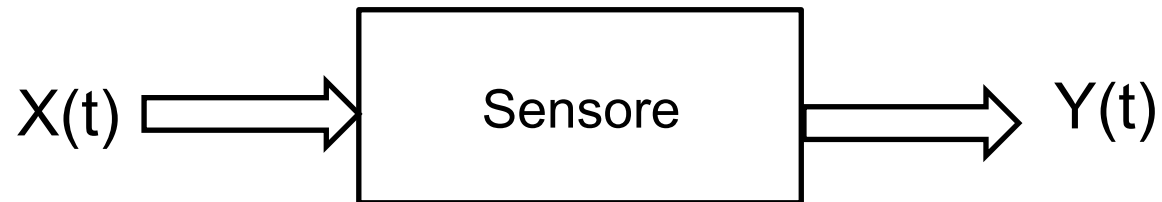
Parametri di interesse biomedico (3)

Variabile misurata o tecnica di misura	Campo dei valori di ampiezza della variabile (tipico range di misura)	Campo utile di frequenza del segnale misurato (Hz)
VARIABILI CHIMICHE		
pH del sangue	6.8 - 7.8 unità pH	0 - 2
pH gastrico	3 - 13 unità pH	0 - 1
Gas disciolti nel sangue:	30 - 100 mmHg	0 - 2
pO ₂	40 - 100 mmHg	0 - 2
pCO ₂	1 - 3 mmHg	0 - 2
pN ₂	0.1 - 0.4 mmHg	0 - 2
pCO	0.05 - 0.3 M	0 - 2
Principali ioni nel plasma:	0.001 - 0.01 M	0 - 2
Na ⁺	0.0002 - 0.002 M	0 - 2
K ⁺	0.001 - 0.005 M	0 - 2
Mg ⁺⁺	0.05 - 0.2 M	0 - 2
Ca ⁺⁺	0.01 - 0.1 M	0 - 2
Cl ⁻		
HCO ₃ ⁻		
VARIABILI BIOCHIMICHE		
Urea	10 ⁻⁴ - 10 ⁻² M	0 - 1
(via biosensore a ureasi)	10 ⁻³ - 10 ⁻¹ M	0 - 1
Glucosio		
(via biosensore a glucosio-ossidasi)		

SENSORI

Sensori

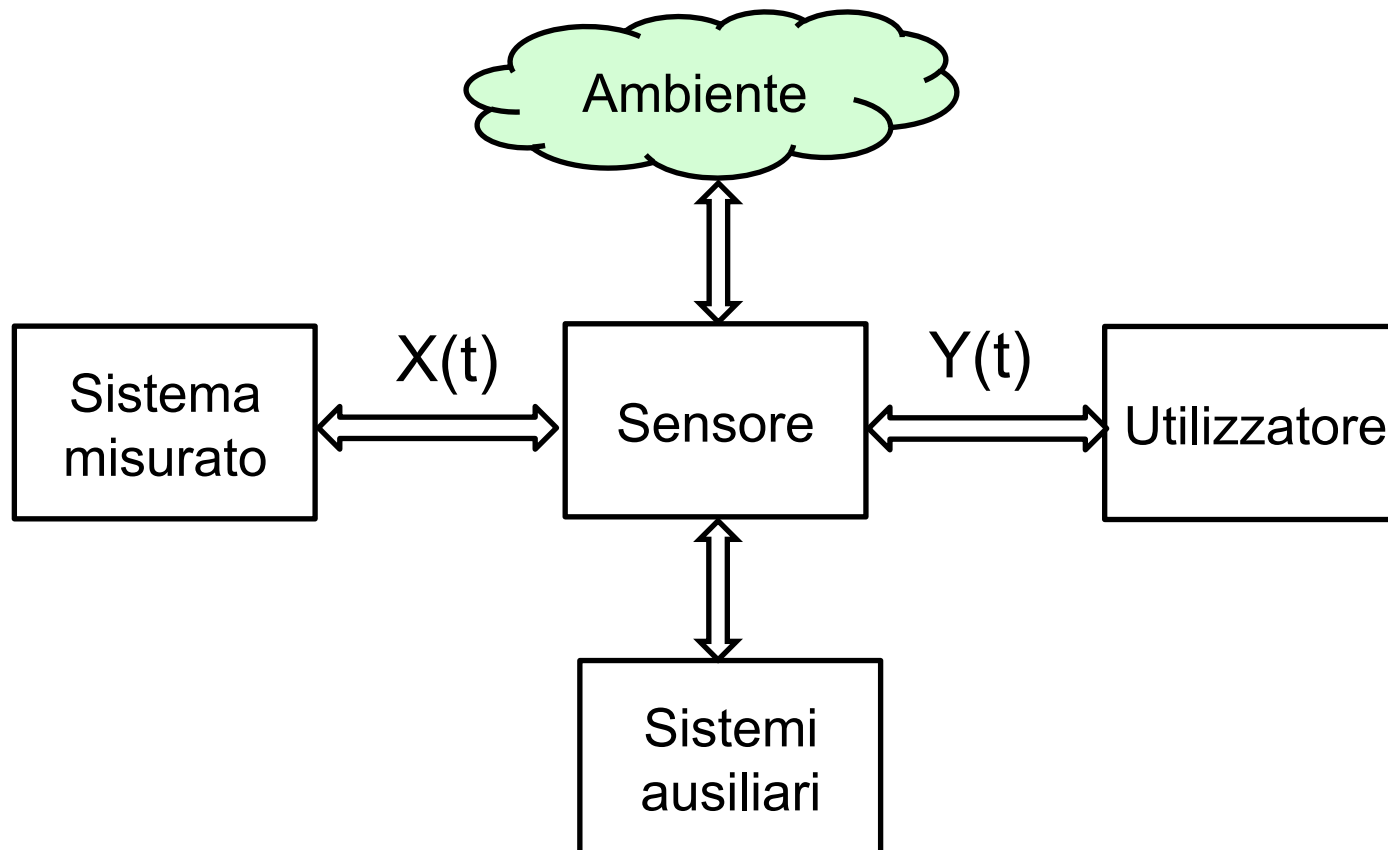
- Un sensore è un dispositivo che trasforma la grandezza fisica che vogliamo misurare in un'altra grandezza di natura diversa (tipicamente elettrica ovvero utilizzabile, memorizzabile ed elaborabile in modo estremamente veloce attraverso circuitistica elettronica)



- 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 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.

Sensori

- Sistema complesso con interagisce con diversi fattori esterni



Modello risposta sensori

- **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.** E' possibile ottenere il misurando dall'uscita **invertendo la funzione.**

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

La mancata conoscenza di queste relazioni rende impossibile la misura

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 f_d (o in alternativa di f_i) rende impossibile la misura di $X(t)$.

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 di norma avviene tramite un confronto di misure con uno strumento di riferimento, definito campione. Lo strumento oggetto della taratura viene anche definito **tarando**.

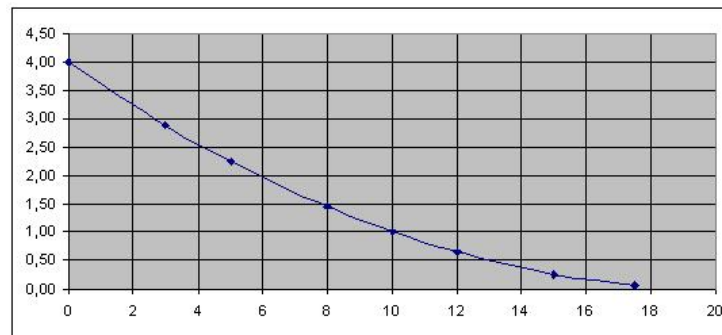
È necessario evitare di confondere la taratura con **la calibrazione**

- 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/o inversa

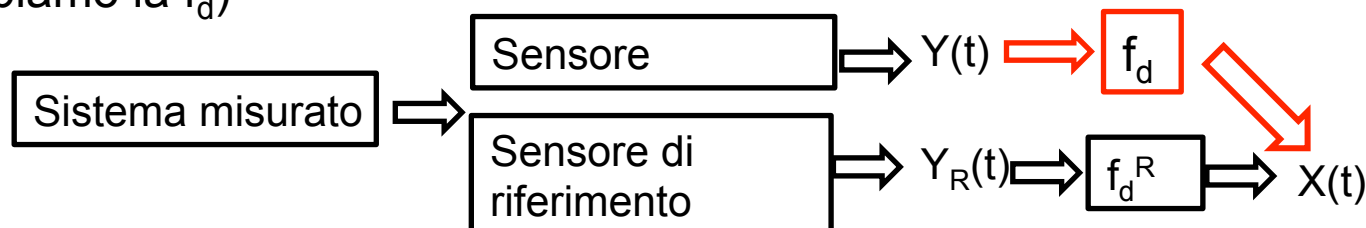
Sensori – Funzioni di conversione (2)

- 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
x0	y0
x1	y1
x2	y2

- 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**

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

- 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” 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, fluttuazioni della tensione di alimentazione

Sensori

- In generale si può usare una relazione diversa. La quale 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

$$y = f(x) + f'(x, g_1, \dots, g_m)$$

NB: nella f' compare il misurando

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

$$y = f(x) + f''(g_1, \dots, g_m)$$

- Ulteriore semplificazione: indipendenza tra le grandezze d'influenza

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

- $f^1 \dots f^m$ 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

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

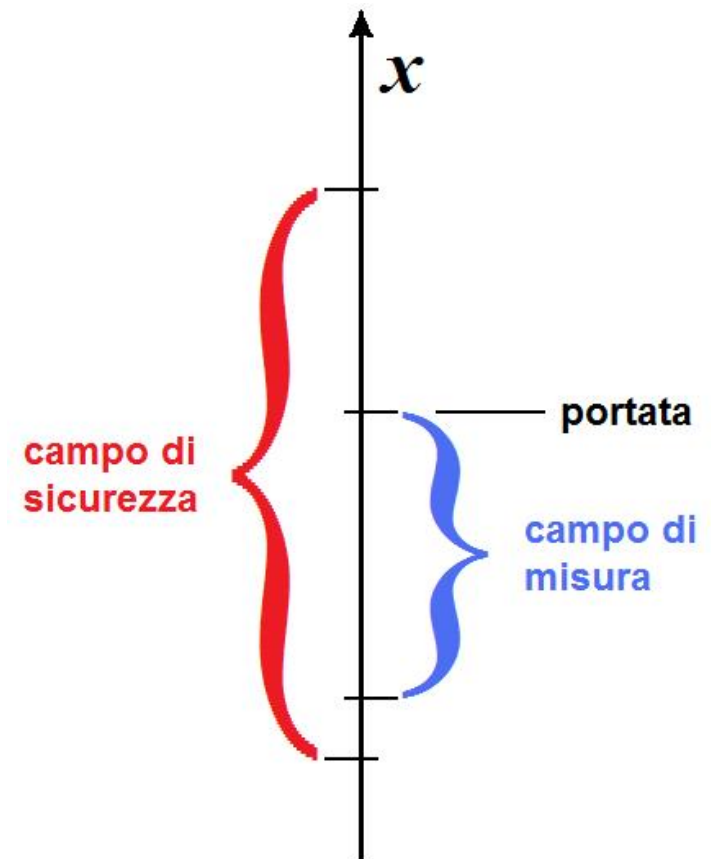
←
La funzione di influenza f^{m+1} indica che la caratteristica ingresso/uscita del sensore può essere **tempo variante**

Sensori

- Definizioni importanti
 - **Campo di misura:** intervallo di valori del misurando per cui è valido il modello descrittivo sopra riportato
 - nota: per valori del misurando al di fuori del 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

- 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**

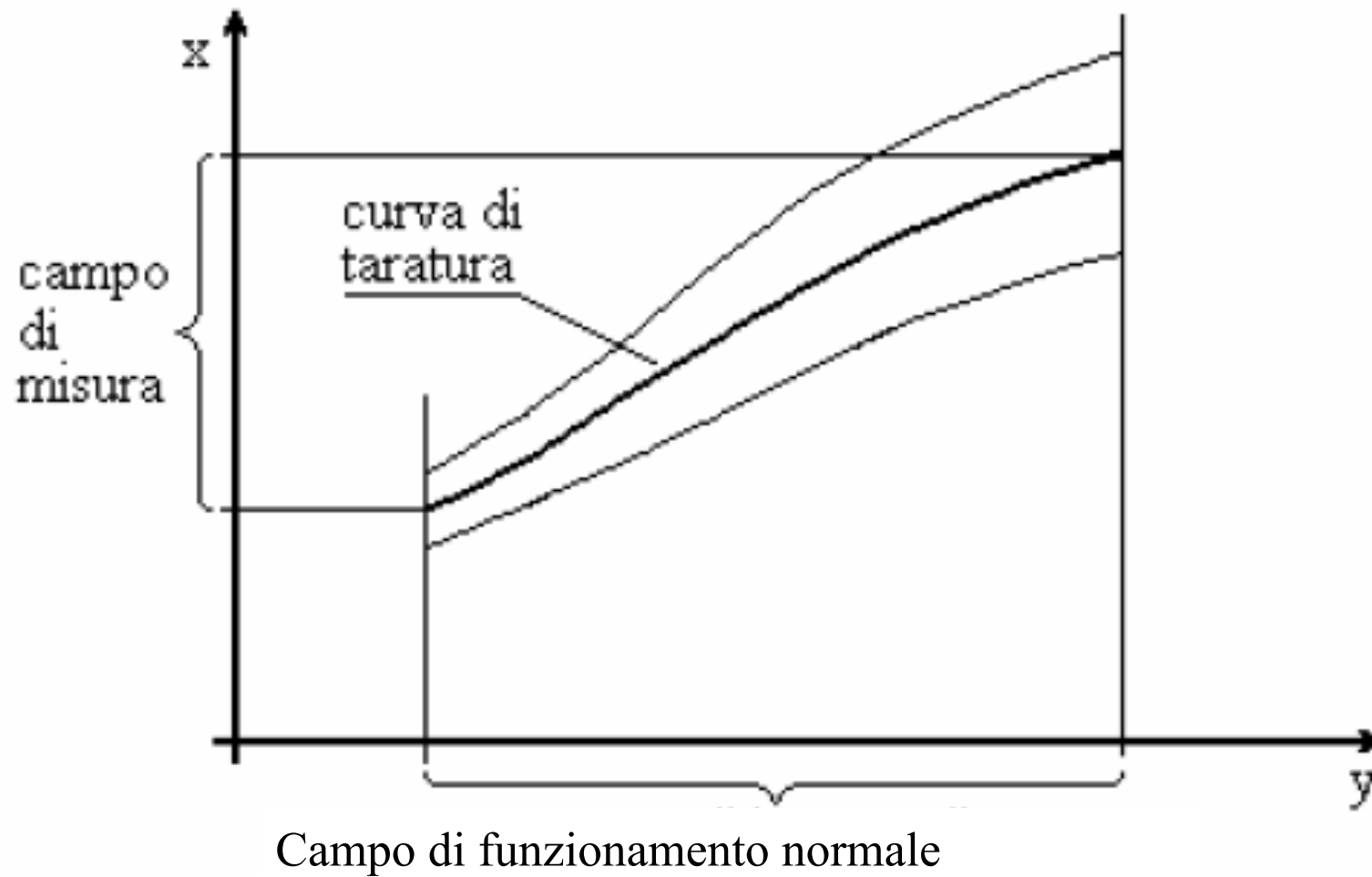
Caratteristiche Sensori

- 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.

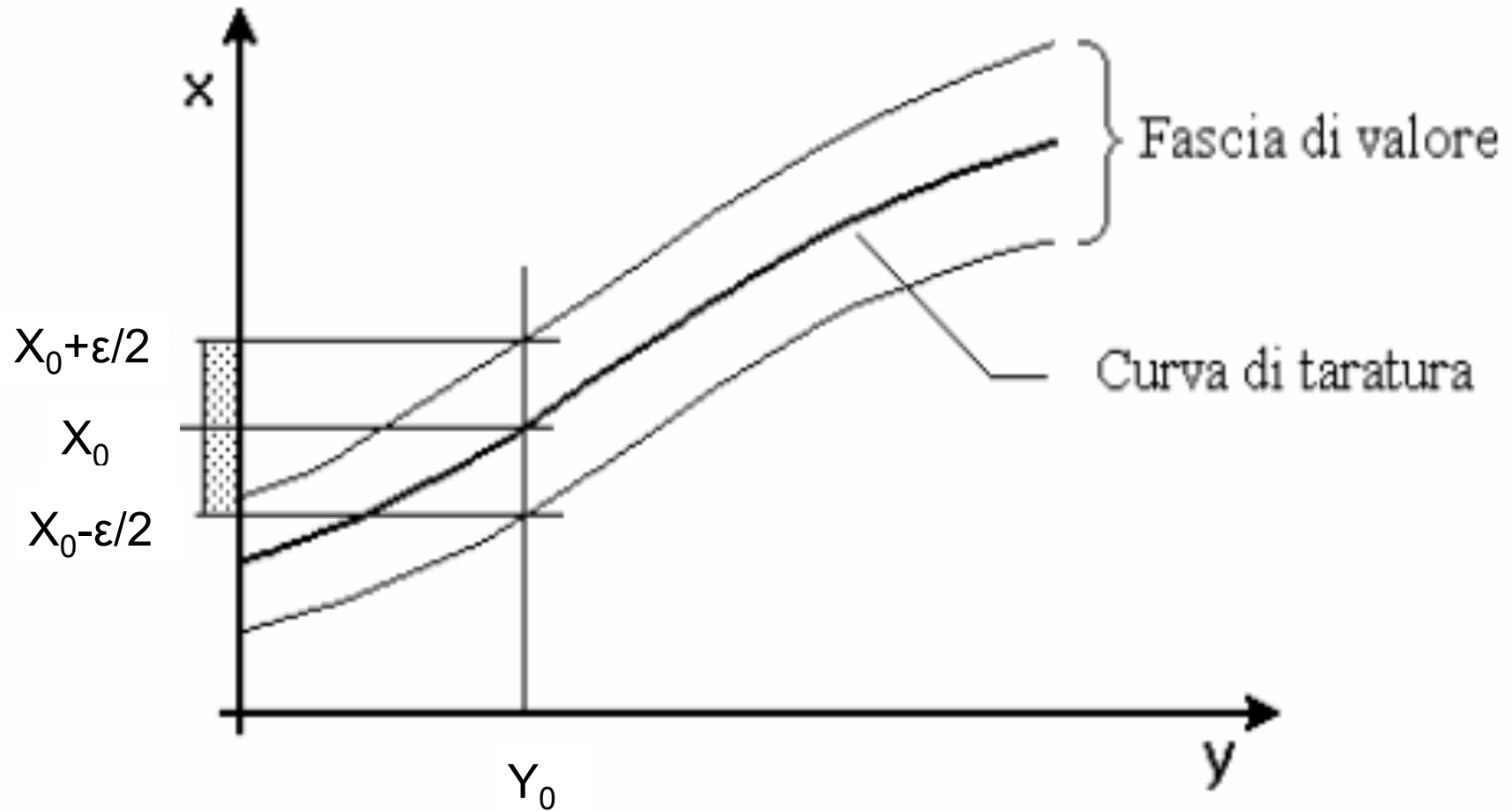
Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **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



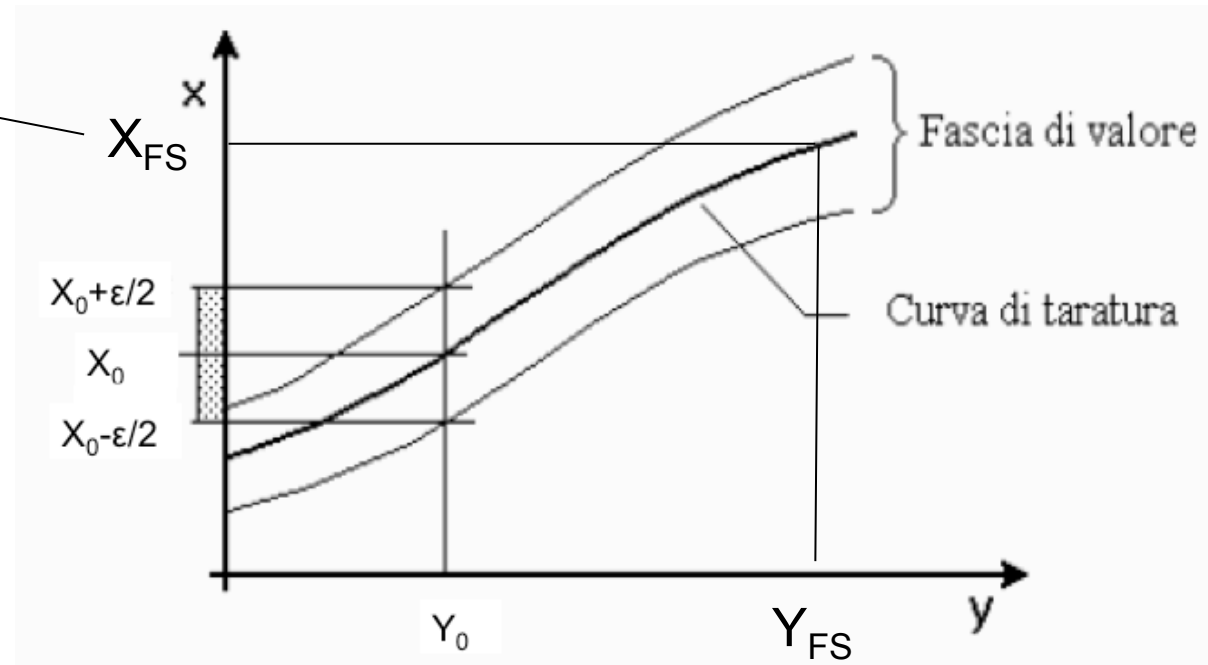
Per Y_0 abbiamo che il misurando è compreso nell'intervallo $[X_0 - \epsilon/2; X_0 + \epsilon/2]$. Incertezza assoluta pari alla lunghezza dell'intervallo ovvero ϵ

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **Incertezza di taratura (errore):** è la larghezza della fascia di valore.
 - 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.
 - 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
- **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 intervallo 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: $\epsilon_{rid} = \epsilon/X_{FS} \rightarrow [X_0 - (\epsilon_{rid} X_{FS})/2; X_0 + (\epsilon_{rid} X_{FS})/2]$

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

Costruttore/progettista fornisce:

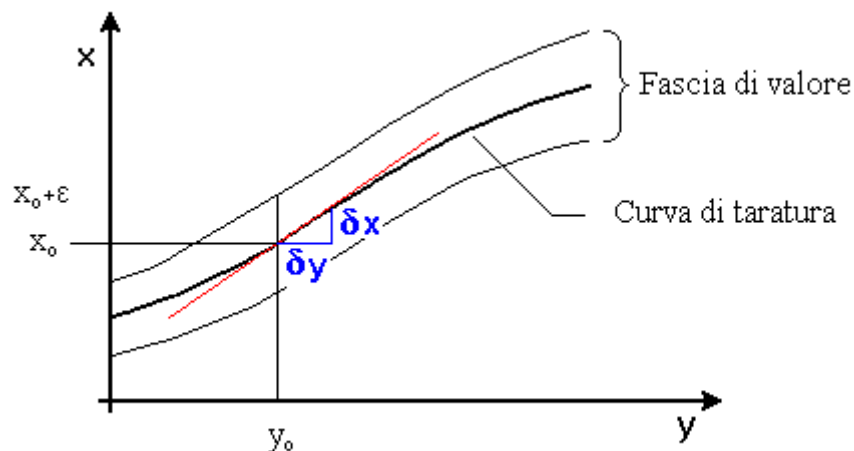
- curva di taratura
- incertezza di taratura: un unico valore e non su tutto il range

Come interpretiamo questi valori?

- Per ogni valore dell'uscita Y^* ricaviamo il rispettivo valore di X^* sulla curva di taratura
- Utilizzando il valore di incertezza fornito ricaviamo la stima della misura ovvero l'intervallo di appartenenza del misurando
- **Desideriamo avere una curva di taratura molto pendente o molto piatta?**

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **Sensibilità:** rapporto fra la variazione dell'uscita del trasduttore e la corrispondente variazione del misurando riferita ad un qualsiasi punto della curva di taratura. Coincide con l'inverso della pendenza della curva stessa. Nel caso particolare in cui la curva di taratura è rettilinea, è l'inverso della costante di taratura. Essa è dunque espressa, come unità di misura, con riferimento alle unità di misura del misurando e della grandezza di uscita. Ad esempio, in un sensore di temperatura con uscita in tensione, in volt/°K.
- **Offset:** uscita con misurando nullo.



$$S = \frac{\delta y}{\delta x}$$

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.

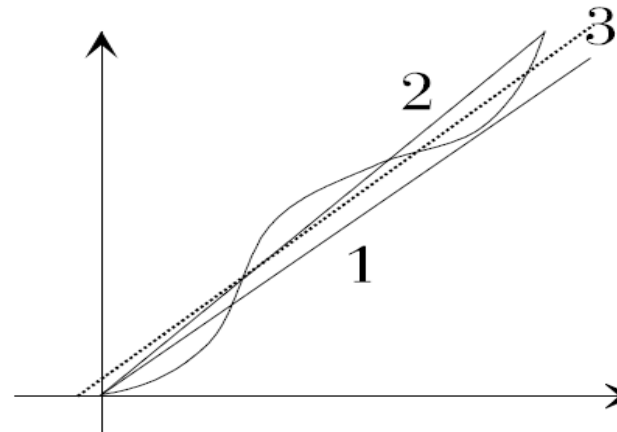
Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **Risoluzione:** minima variazione del misurando che provoca una variazione dell'uscita pari all'incertezza dell'uscita.
 - Può essere espressa in valore assoluto, in valore relativo o in valore ridotto.
 - Equivale alla minima variazione della grandezza da misurare apprezzabile dal sistema di misura.

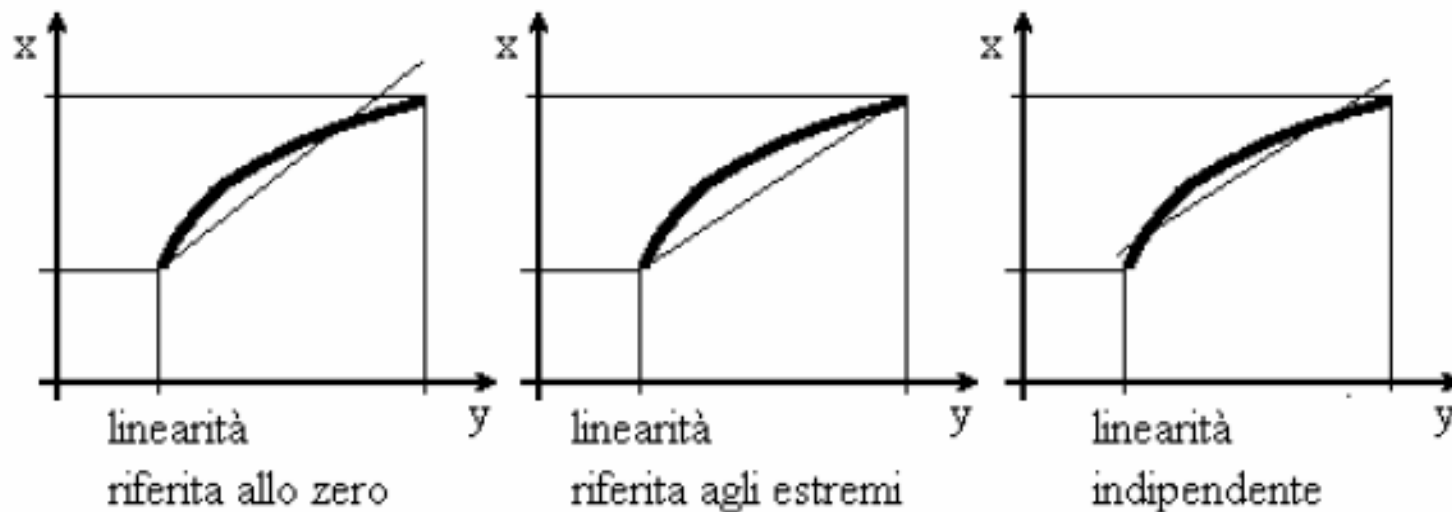
Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **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.

Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario



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.

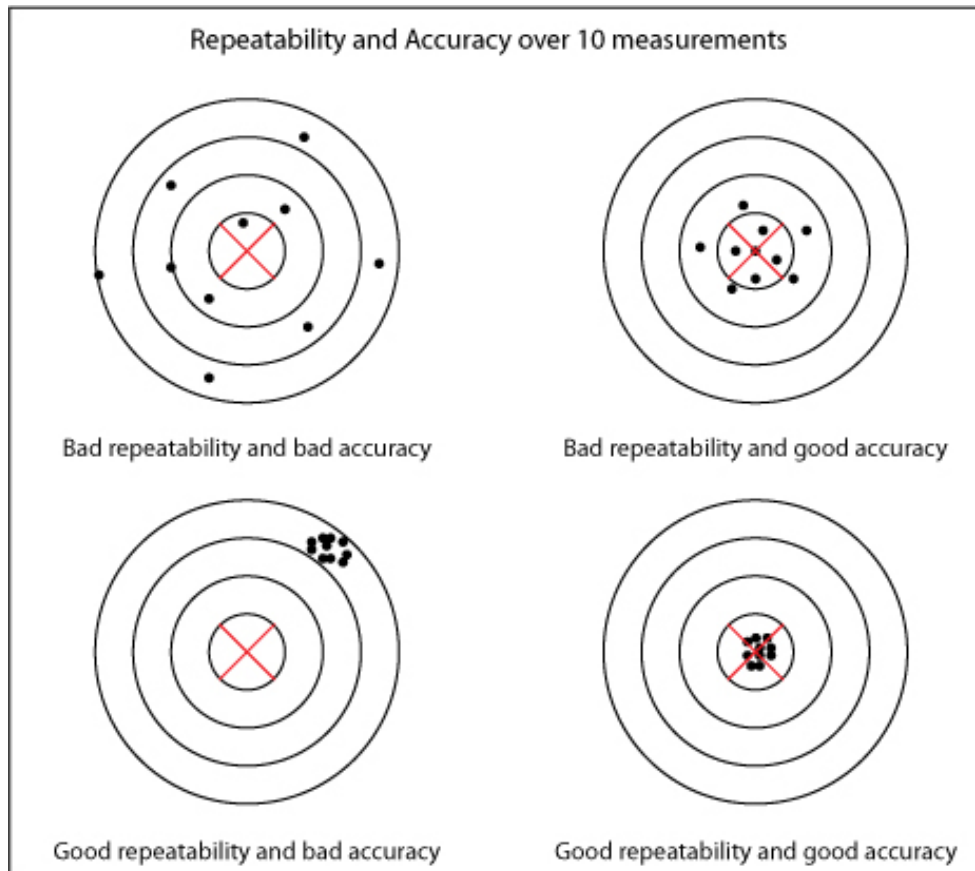


Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- Esempio: data una generica uscita Y come interpretare i dati che il costruttore/progettista ci fornisce?
 - linearità l
 - incertezza ε
 - offset o
 - in alternativa potrebbe darci un qualsiasi valore dell'uscita all'interno del campo di misura (spesso l'uscita relativa al punto inferiore del campo di misura stesso)
 - costante di taratura c (o sensibilità)
 - da intendersi come la pendenza della approssimazione lineare della curva di taratura
 - campo di misura

Ripetibilità

- 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 esprime in modo globale, l'effetto a breve termine delle grandezze di influenza. La ripetibilità è di regola espressa con le medesime modalità dell'incertezza di taratura.



Ripetibilità vs. accuratezza

Sensori Caratteristiche

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" (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).

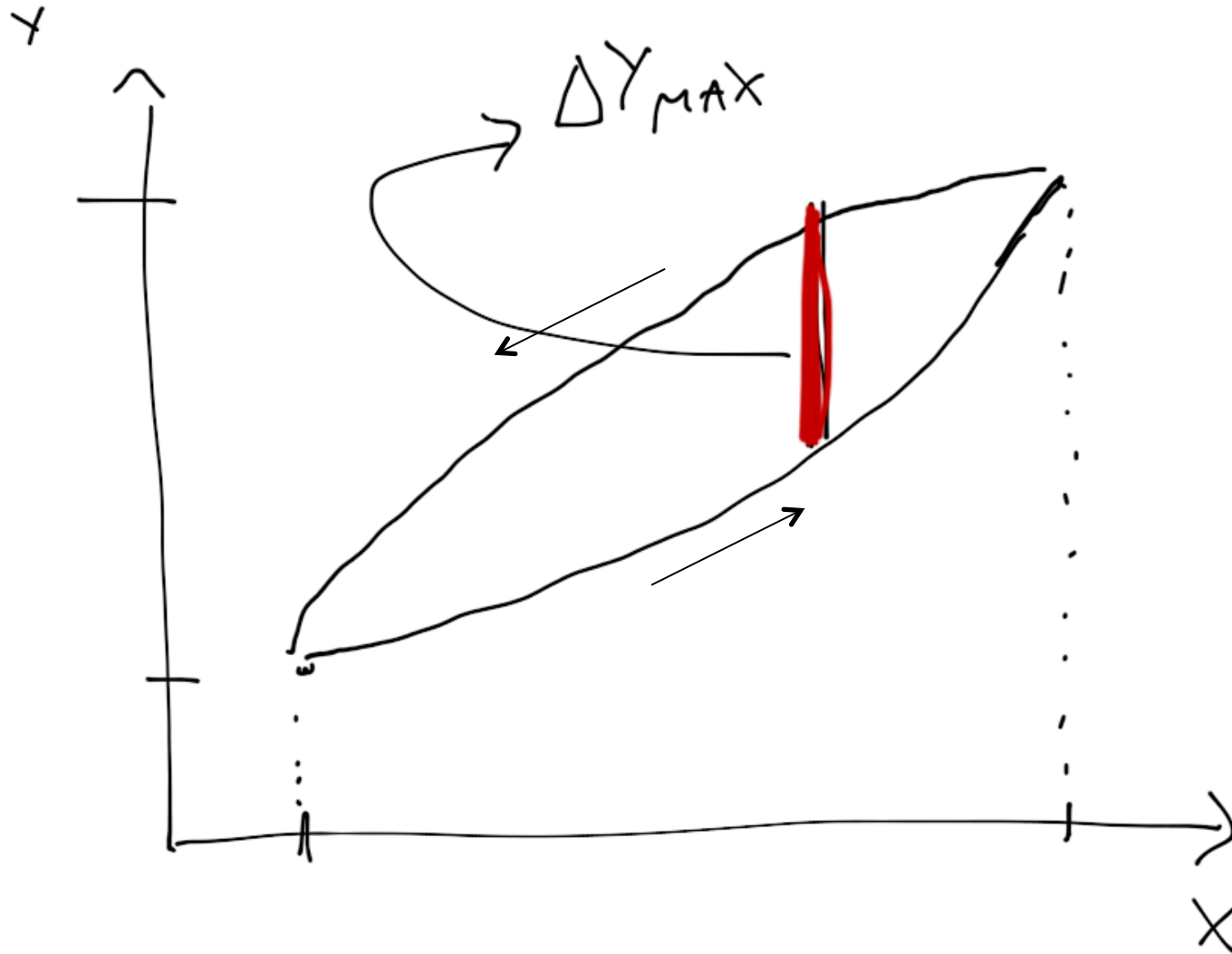
vita del trasduttore: si misura in tempo oppure in "cicli operativi" indica quanto a lungo il trasduttore opera senza discostarsi in modo significativo dalle caratteristiche metrologiche mostrate durante la taratura iniziale.

Sensori Caratteristiche

Isteresi

- 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.
- 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 misurando 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.

Sensori Caratteristiche



Sensori - Caratteristiche

- **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 $0,1\%$

Esempi di caratteristiche tecniche

- ADXL303
 - Accelerometro triassiale
 - <http://www.analog.com/en/sensors/inertial-sensors/adxl335/products/product.html>
- AD592
 - Sensore di temperatura
 - <http://www.analog.com/en/sensors/analog-temperature-sensors/ad592/products/product.html>

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)

Sensori caratteristiche metrologiche in regime dinamico

Premessa

▪ Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

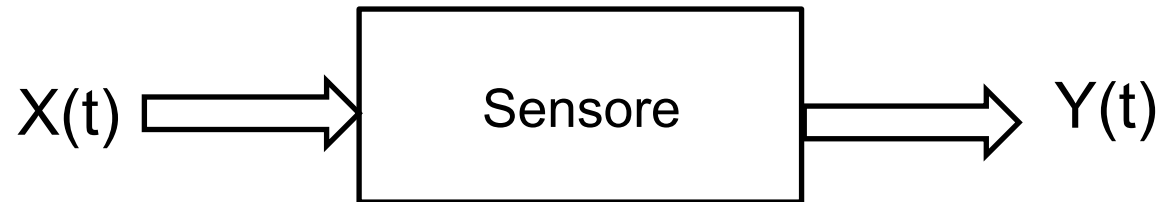
- Sono l'insieme delle indicazioni necessarie a legare l'uscita del sensore al misurando, quando il sensore funziona in regime stazionario

▪ Caratteristiche metrologiche in regime dinamico

- Sono l'insieme di quelle indicazioni che consentono di legare l'uscita del sensore al misurando, quando questo varia in modo tale che non si può più assumere che il sistema funzioni in regime stazionario.
- Spesso sono tra le indicazioni più difficili da interpretare; spesso sono del tutto mancanti, perché il costruttore presume che il sensore venga usato in regime stazionario.

Sensori caratteristiche dinamiche

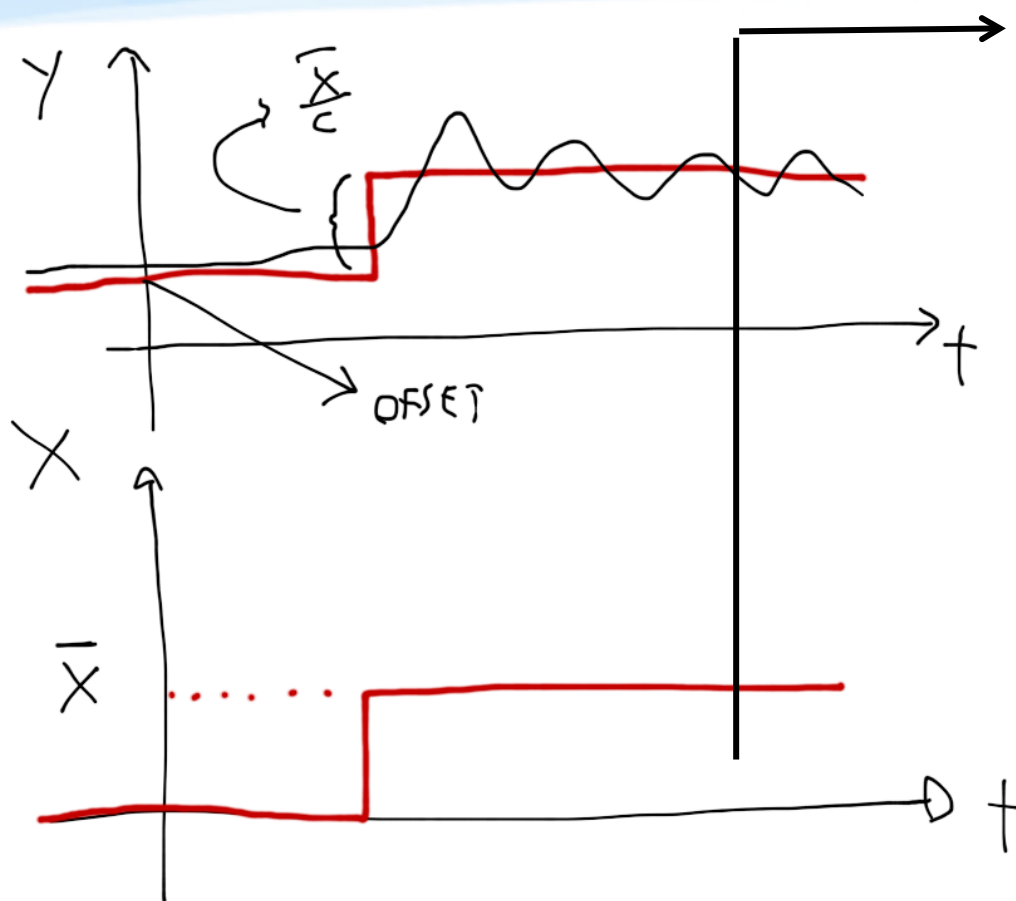
- La domanda a cui si vuole rispondere è: come si comporta l'uscita del sensore quando il misurando varia nel tempo?



**Sistema dinamico caratterizzato dalle leggi
fisiche legate al suo principio di funzionamento**

Cosa ci aspettiamo ad esempio per un misurando che varia con una funzione a gradino?

Sensori caratteristiche dinamiche



Da qui in poi valgono le condizioni stazionarie viste prima

Necessità di fornire dei parametri sintetici che descrivano il comportamento dinamico del sensore. Non viene mai data la funzione di trasferimento o la risposta al gradino.

Analisi della risposta dinamica

Risposta dinamica del trasduttore: modello matematico che descrive le relazioni dinamiche (basate su opportune leggi fisiche) tra ingresso (misurando $X(t)$) e uscita ($Y(t)$) del sensore.



▪ Ipotesi: sistema lineare e tempo invariante

– Vediamo il sensore come un sistema dinamico lineare tempo-invariante (LTI)

- Il modello matematico è descritto attraverso equazioni differenziali derivate rispetto al tempo e con coefficienti costanti

$$\left. \begin{aligned} y_1(t) &= f(x_1(t)) \\ y_2(t) &= f(x_2(t)) \\ y_1(t) + y_2(t) &= f(x_1(t) + x_2(t)) \\ a \cdot y_1(t) &= f(a \cdot x_1(t)) \end{aligned} \right\} \text{ sensore lineare}$$

Risposta dinamica

- La relazione tra misurando e uscita (**modello descrittivo del sensore**) può essere espressa da un'equazione differenziale con derivate rispetto a alla sola variabile tempo
 - Ipotesi: sistema lineare a coefficienti costanti.
- Ordine dell'equazione = ordine del sensore stesso cui si riferisce;
 - Parliamo infatti di elementi sensibili del primo ordine, del secondo ordine e di ordine superiore.
- Soluzione = risposta temporale del sensore al segnale in ingresso ovvero a variazioni dinamiche del misurando

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned}$$

$n > m$

Equazione differenziale
lineare di ordine n

Calcolo Risposta dinamica

- Metodo della **trasformata di Laplace**
 - Sostituzione delle equazioni differenziali lineari a coefficienti costanti con equazioni algebriche (la cui soluzione è più agevole)
- Determinazione della risposta temporale del sensore
 1. Implementazione del modello descrittivo in termini di equazioni differenziali a coefficienti costanti che legano il misurando all'uscita e che contengono i parametri fisici del sensore stesso
 2. Effettuare la trasformazione di Laplace sulle equazioni differenziali temporali ottenendo delle equazioni algebriche nella variabile s
 3. Risolvere le equazioni algebriche in s ($Y(s)=F(s)*X(s)$)
 4. Effettuare la trasformazione inversa di Laplace per ottenere la risposta temporale del sensore ($y(t)=L^{-1}(Y(s))$)
- La **Funzione di Trasferimento $F(s)$** di un sistema lineare è definita come il rapporto fra la trasformata di Laplace della variabile di uscita e quella della variabile in ingresso

$$\frac{dy(t)}{dt} \rightarrow s Y(s) \qquad \begin{array}{l} x(t) \rightarrow X(s) \\ y(t) \rightarrow Y(s) \end{array} \qquad F(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

Trasformate e anti-trasformate di Laplace

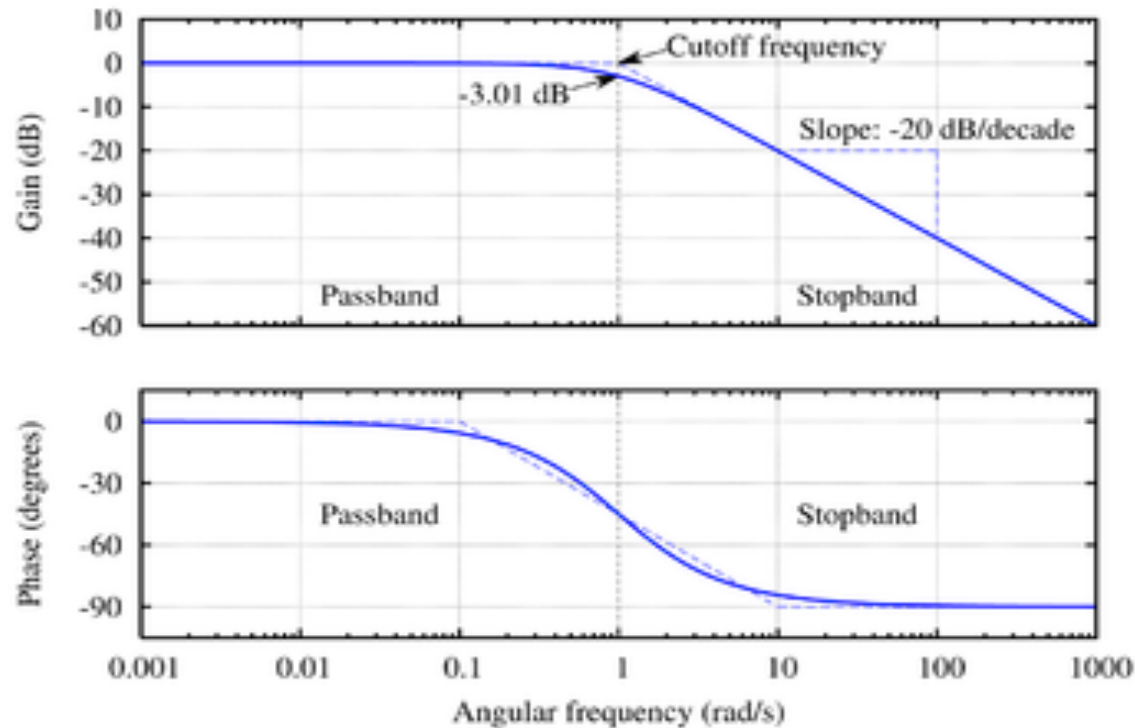
TRASFORMATA $f(t)$	ANTITRASFORMATA $f(s)$
$\delta(t)$	1
$u(t)$	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
t^n	$\begin{cases} \frac{\Gamma(n+1)}{s^{(n+1)}} \text{ for } n < -1 \\ \frac{n!}{s^{(n+1)}} \text{ for } n \text{ positivo intero} \end{cases}$
e^{-kt}	$\frac{1}{s+k}$
$t e^{-kt}$	$\frac{1}{(s+k)^2}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-kt} \sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s+k)^2 + \omega^2}$
$e^{-kt} \cos(\omega t)$	$\frac{(s+k)}{(s+k)^2 + \omega^2}$
Onda quadra, periodo 2T $f(t) = \begin{cases} 1 & \text{per } 0 < t < T \\ -1 & \text{per } T < t < 2T \end{cases}$	$\frac{1}{s} \frac{1 - e^{-st}}{1 + e^{-st}} = \frac{1}{s} \tanh sT/2$
Onda triangolare, periodo 2T $f(t) = \begin{cases} t/T & \text{per } 0 < t < T \\ -(t-2T)/T & \text{per } T < t < 2T \end{cases}$	$\frac{1}{Ts^2} \frac{1 - e^{-st}}{1 + e^{-st}} = \frac{1}{Ts^2} \tanh sT/2$
Onda a dente di sega, periodo T $f(t) = t/T \text{ per } 0 < t < T$	$\frac{1}{Ts^2} - \frac{e^{-st}}{s(1 - e^{-st})}$
Onda rettificata $f(t) = \sin \omega t $	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \frac{1 + e^{-\frac{s\pi}{\omega}}}{1 - e^{-\frac{s\pi}{\omega}}} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \coth \frac{s\pi}{2\omega}$
Frequenza angolare ω $f(t) = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{per } 0 < t < \frac{\pi}{\omega} \\ 0 & \text{per } \frac{\pi}{\omega} < t < \frac{2\pi}{\omega} \end{cases}$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \frac{1}{1 - e^{-\frac{s\pi}{\omega}}}$

TRASFORMATA $f(t)$	ANTITRASFORMATA $f(s)$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$\frac{1}{\omega} \sin \omega t$	$\frac{1}{(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t)$	$\frac{1}{s(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{\omega^3} (\omega t - \sin \omega t)$	$\frac{1}{s^2(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{2\omega} t \sin \omega t$	$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{1}{2\omega^3} (\sin \omega t - \omega t \cos \omega t)$	$\frac{1}{(s^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{1}{\omega^4} (1 - \cos \omega t - \frac{\omega t}{2} \sin \omega t)$	$\frac{1}{s(s^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{1}{a^2 - \omega^2} (\cos \omega t - \cos at)$	$\frac{s}{(s^2 + a^2)(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{a\omega(a^2 - \omega^2)} (a \sin \omega t - \omega \sin at)$	$\frac{1}{(s^2 + a^2)(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{a^2 \omega^2} \left\{ 1 - \frac{1}{a^2 - \omega^2} (a^2 \cos \omega t - \omega^2 \cos at) \right\}$	$\frac{1}{s(s^2 + a^2)(s^2 + \omega^2)}$
Nelle seguenti formule: $\omega^2 = \omega_0^2 - k^2 > 0$, cosicchè $s^2 + 2ks + \omega_0^2 = (s+k)^2 + \omega^2$ $A = (a-k)^2 + \omega^2$ $B = (a-2k)/\omega_0^2$	
$e^{-kt} \left(\cos \omega t - \frac{k}{\omega} \sin \omega t \right)$	$\frac{s}{s^2 + 2ks + \omega_0^2}$
$\frac{1}{\omega} e^{-kt} \sin \omega t$	$\frac{1}{(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$
$\frac{1}{\omega_0^2} \left\{ 1 - e^{-kt} \left(\cos \omega t + \frac{k}{\omega} \sin \omega t \right) \right\}$	$\frac{1}{s(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$
$\frac{1}{\omega_0^4} \left\{ \omega_0^2 t - 2k + e^{-kt} \left(2k \cos \omega t + \frac{k^2 - \omega^2}{\omega} \sin \omega t \right) \right\}$	$\frac{1}{s^2(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$
$\frac{1}{A} \left\{ -a e^{-kt} + e^{-kt} \left(a \cos \omega t + \frac{\omega_0^2 - ak}{\omega} \sin \omega t \right) \right\}$	$\frac{s}{(s+a)(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$
$\frac{1}{A} \left\{ e^{-at} - e^{-kt} \left(\cos \omega t + \frac{k-a}{\omega} \sin \omega t \right) \right\}$	$\frac{1}{(s+a)(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$
$\frac{1}{a\omega_0^2 A} \left\{ -\frac{e^{-at}}{a} - e^{-kt} \left(B \cos \omega t + \frac{kB+1}{\omega} \sin \omega t \right) \right\}$	$\frac{1}{s(s+a)(s^2 + 2ks + \omega_0^2)}$

Risposta in frequenza

- Risposta a segnali di ingresso sinusoidali (risposta in frequenza)
 - Risposta a sinusoidi di ampiezza unitaria con pulsazione angolare ω (frequenza $f = \omega / (2\pi)$)
 - Utilizzo delle s-trasformate e sostituzione di $s = j\omega$
 - Nota la risposta in frequenza è possibile conoscere la risposta a qualsiasi segnale in ingresso
- Diagrammi di Bode
 - rappresentazione grafica della risposta in frequenza di un sistema lineare tempo invariante (LTI) e che consiste in due grafici che rappresentano rispettivamente l'ampiezza (A_o/A_i) e la fase della risposta in frequenza

Diagrammi di Bode



Esempio: filtro di Butterworth primo ordine

Frequenza di taglio (attenuazione 3dB): $\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ Sfasamento di 90 gradi

Banda passante

Sensori caratteristiche dinamiche

– Dominio frequenza

- risposta in frequenza
 - Ipotesi: trasduttore lineare
 - » ovvero rappresentato da un sistema dinamico di tipo lineare
 - Supponiamo di poter applicare in ingresso al trasduttore un misurando che ha l'andamento di un segnale sinusoidale di ampiezza costante (X) e di poter quindi variare la sua frequenza ($f=\omega/2\pi$)

$$x(t) = X \sin(\omega t)$$

Sensori in regime dinamico

Obiettivo: ricostruire l'andamento di $x(t)$ data l'uscita $y(t)$

Sensori caratteristiche dinamiche

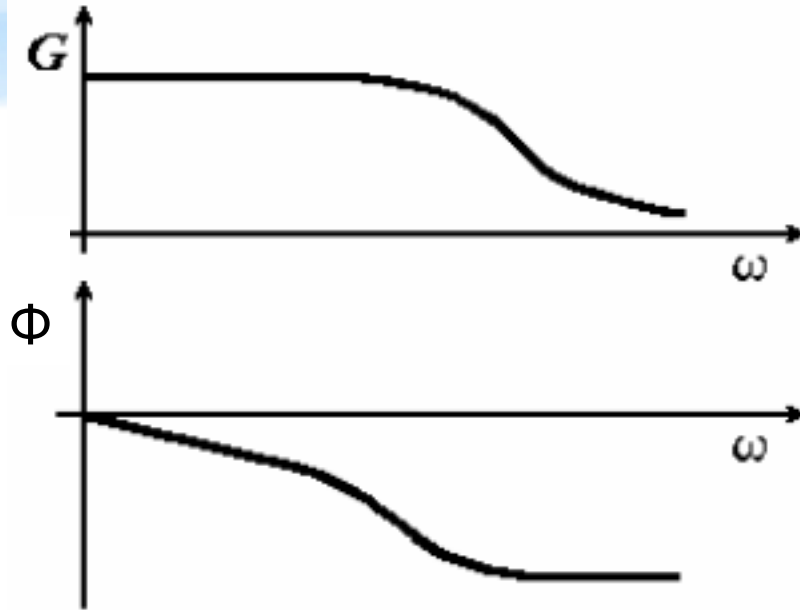
– Dominio frequenza

- Ci aspettiamo che l'uscita abbia ampiezza costante (in funzione della sensibilità del sensore) e di frequenza uguale a quella del corrispondente misurando.
- Possiamo anche ragionevolmente pensare che l'uscita sia in lieve ritardo sull'ingresso e quindi che le due onde sinusoidali che rappresentano ingresso ed uscita siano sfasate (Φ) con quest'ultima in ritardo.

$$y(t) = G(\omega)X \sin(\omega t + \phi(\omega)) \quad \tau_{ritardo} = \frac{\phi(\omega)}{\omega}$$

- G rapporto tra l'ampiezza della sinusoide in uscita e l'ampiezza di quella di ingresso (guadagno del trasduttore)
- **G e Φ variano al variare di ω**

Caratteristiche del Sensore



Risposta in ampiezza

Risposta in fase

Banda passante

La banda passante rappresenta **il campo di frequenze del misurando per cui l'ampiezza delle oscillazioni dell'uscita viene mantenuta proporzionale alla ampiezza delle oscillazioni del misurando stesso**, cioè il campo di frequenze in cui il guadagno G può essere considerato costante.

La banda passante è solitamente l'unico parametro che ci viene fornito

Sensori caratteristiche dinamiche

- Per frequenze maggiori della banda passante?
 - Distorsione di ampiezza: le componenti frequenziali al di fuori della banda passante subiscono un'attenuazione maggiore e **non nota** visto che non ci viene di solito fornito il modello dinamico del sensore (non ci vengono fornite la funzione di trasferimento o la risposta in frequenza)
 - In altre parole non siamo in grado di risalire tramite l'uscita all'ampiezza dell'oscillazione del misurando visto che non conosciamo la relazione che intercorre tra le due
 - Distorsione di fase: se la fase non ha un andamento lineare in ω le componenti frequenziali a frequenza diversa subiscono ritardi diversi
 - inizia a frequenze più basse

Nella pratica come mi comporto? Considero il campo utile di frequenze del segnale da analizzare. Scelgo il sensore che ha una banda passante maggiore rispetto alla massima frequenza utile e mi comporto come se fossi nel caso stazionario.

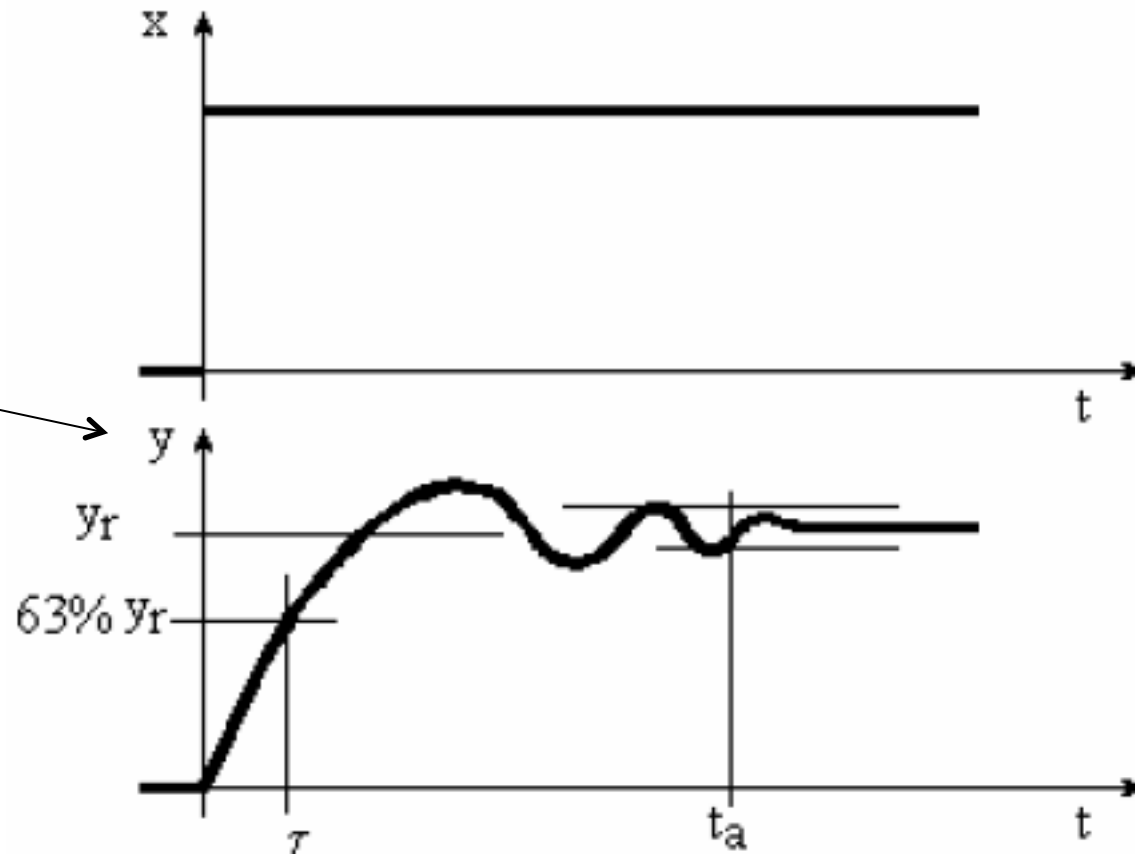
Caratteristiche del Sensore

– Dominio tempo

- Riposta al gradino: è la risposta del sensore a una variazione a gradino del misurando.
 - Costante di tempo: ritardo fra la applicazione dell'ingresso e l'istante in cui il valore dell'uscita raggiunge il 63% del valore che avrà una volta terminato il transitorio (quest'ultimo valore viene chiamato "valore di regime").
 - Tempo di salita: tempo che impiega il sistema ad andare dal 10% al 90% del suo valore di regime
 - Tempo di assestamento (settling time): fissata una fascia di valore intorno al valore di regime dell'uscita (ad esempio 5%), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita entra, per non uscirne più, nella suddetta fascia di valore;

Caratteristiche del Sensore

Nota: In questo caso particolare l'offset è nullo



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
Magnetoresistivo	Termoelettrico
Termoresistivo	Fotoemissivo
Fotoconduttivo	Fotovoltaico
Piezoresistivo	Elettrocinetico (potenziale di scorrimento)
Effetto Hall	Piroelettrico

Attivi
Richiede sorgente di alimentazione.

passivi
Auto - generante –
no sorgente alimentazione

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