

# **Dispositivi Minimamente Invasivi**

per Diagnosi, Monitoraggio e Terapia

Inroduzione al corso

Alessandro Tognetti

[a.tognetti@centropiaggio.unipi.it](mailto:a.tognetti@centropiaggio.unipi.it)

# Ambito del corso

- Studio, l'analisi e la progettazione di Dispositivi Minimamente invasivi con applicazioni in diagnostica, monitoraggio e terapia.
- Dispositivo minimamente invasivo: ***sistema che agisce sul paziente senza creare traumi, lesioni o alterazioni dei parametri vitali di ragionevole entità.***
- Applicazioni: monitoraggio/diagnosi e dispositivi con applicazioni in terapie minimamente invasive.

# Argomenti

- Sistemi portatili non invasivi (wearable)
  - monitoraggio continuo durante le normali attività giornaliere
- Cateterismo
  - diagnostica minimamente invasiva anche in sede operatoria/post operatoria
- Terapia minimamente invasiva
  - laparoscopia
  - ablazione termica
  - pacing cardiaco
- Proprietà fisiche dei tessuti
  - principale interfaccia al sistema minimamente invasivo

# Sistemi portatili non invasivi (wearable)

- Monitoraggio di segnali fisiologici
  - Elettrocardiogramma (ECG), elettromiogramma (EMG), elettroencefalogramma (EEG) -> **Bioelettrodi**
  - Respiro -> **Sensori piezoresistivi, piezoelettrici**
  - Impedenza elettrodermica -> **Bioelettrodi**
  - Pulsiossimetria transcutanea (saturazione di ossigeno SpO2) -> **metodi ottici**
- Monitoraggio movimento umano/attività
  - cinematica articolare -> **sensori inerziali (accelerometri, giroscopi), magnetometri, sensori piezoresistivi**
  - passo, classificazione attività, caduta -> **sensori inerziali (accelerometri, giroscopi), magnetometri**

# Cateterismo

- Tubo sottile e flessibile dotato di uno o più cavità (dette **Lumi**) che possono essere utilizzate per effettuare misure di parametri di interesse diagnostico
  - Pressione arteriosa/venosa -> **sensori piezoelettrici/piezoresistivi, diaframma e trasduttore secondario**
  - Portata cardiaca
  - Temperatura interna (core temperature) -> **termoresistenze (RTD, termistori), termocoppie**
  - Saturazione di ossigeno -> **sensori ottici**
    - indice ematico che riflette la percentuale di emoglobina satura di ossigeno rispetto alla quantità totale di emoglobina presente nel sangue.

# Terapia

- Termoablazione
  - rimozione di tessuti malati tramite riscaldamento -> **metodi ultrasonici transcutanei ad alta frequenza**
- Laparoscopia
  - Tecnica chirurgica che consente di operare utilizzando strumentazione appositamente predisposta, attraverso alcune piccole incisioni di meno di 1 cm ognuna. La laparoscopia è da considerare una tecnica chirurgica meno invasiva della chirurgia addominale tradizionale.
  - Pinza laparoscopica sistema complesso dotato di sensori e canali di ritorno aptico verso l'operatore
- Pacing cardiaco
  - sistema complesso in anello chiuso (sensing e attuazione) per la regolazione della funzione cardiaca in pazienti cronici

# Il corso

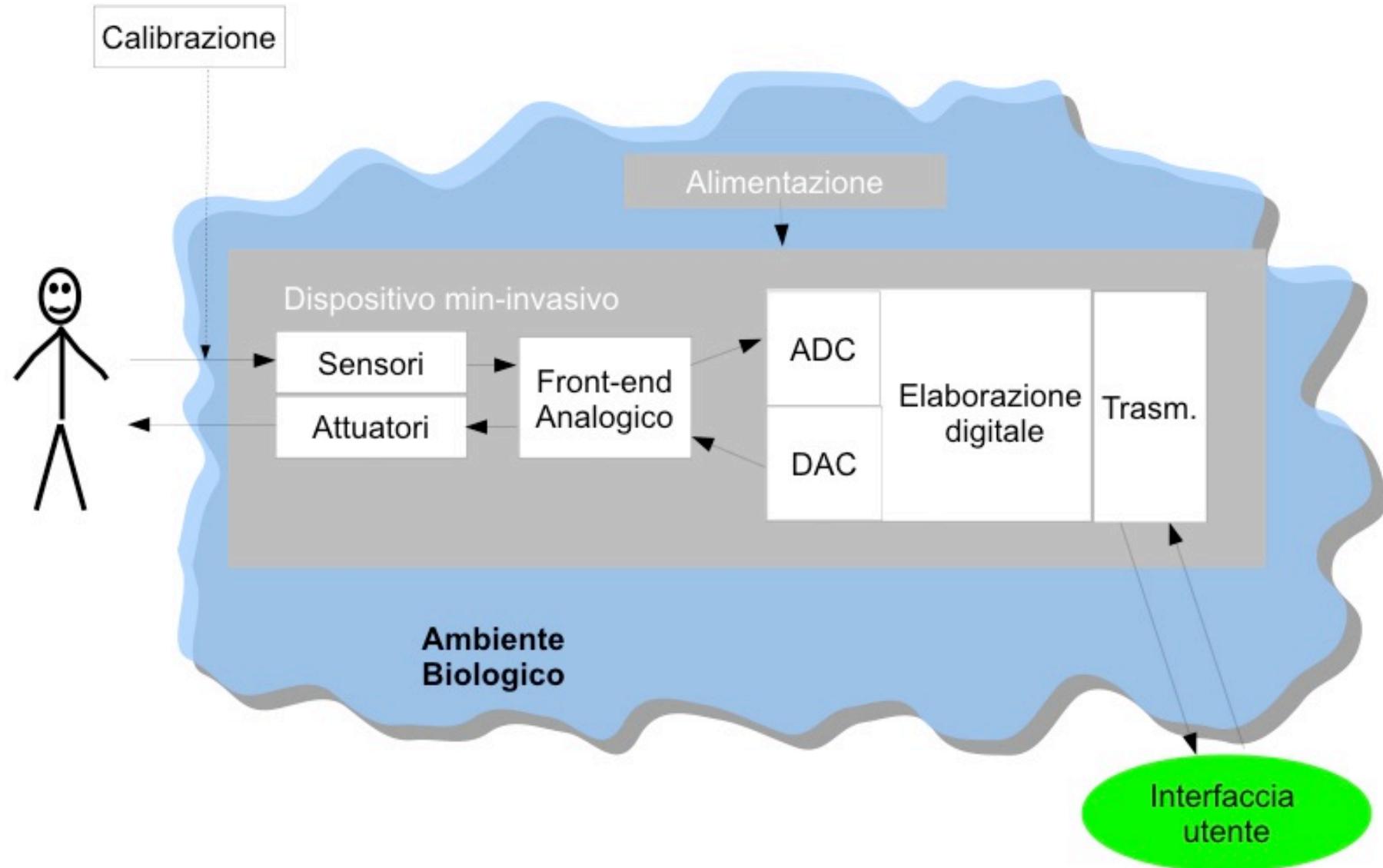
- Modalità d'esame
  - Orale con due domande ampie sul programma (o esercizi pratici)
- Docente
  - Alessandro Tognetti (a.tognetti@centropiaggio.unipi.it)
  - Interessi di ricerca: sistemi di monitoraggio portatili (movimento e parametri fisiologici), sviluppo sensori, processing di segnali e dati
  - Possibilità di tesi sperimentale
  - Orario ricevimento
- Materiale
  - Dispense:  
<http://www.centropiaggio.unipi.it/course/dispositivi-minimamente-invasivi.html>

# **Dispositivi Minimamente Invasivi**

per Diagnosi, Monitoraggio e Terapia

Aspetti di carattere generale

# Schema generale di un sistema minimamente



# Sottosistemi

Nell'ambito della progettazione di sistemi minimamente invasivi 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 minimamente invasivo
  - 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
- Recupero dell'energia (energy harvesting)
  - argomento di ricerca molto studiato e attuale

## ▪ Ambiente biologico

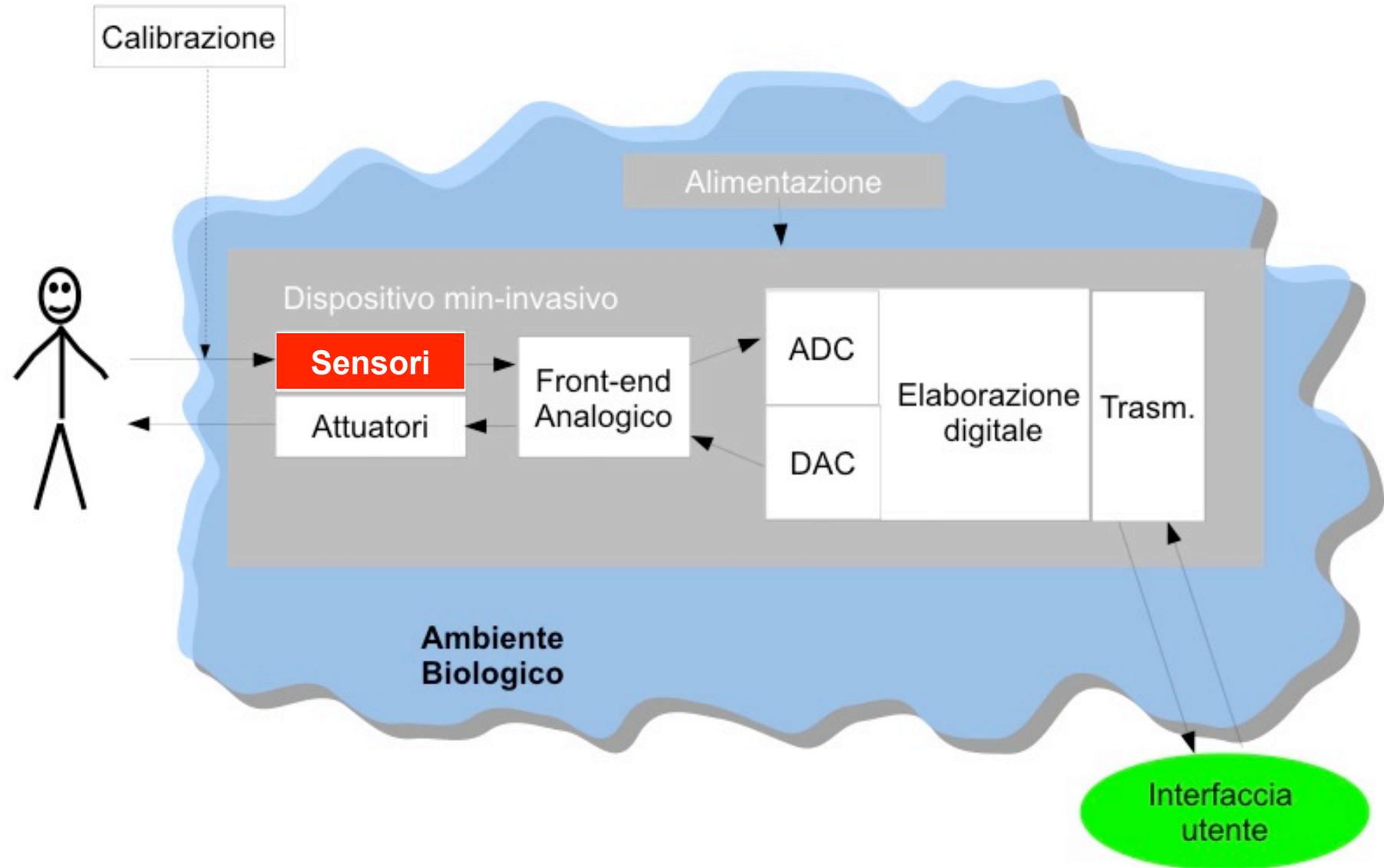
- contesto principale del sistema minimamente invasivo
- studio delle principali proprietà dei tessuti
  - elettriche, ottiche, termiche, ultrasoniche

## ▪ 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

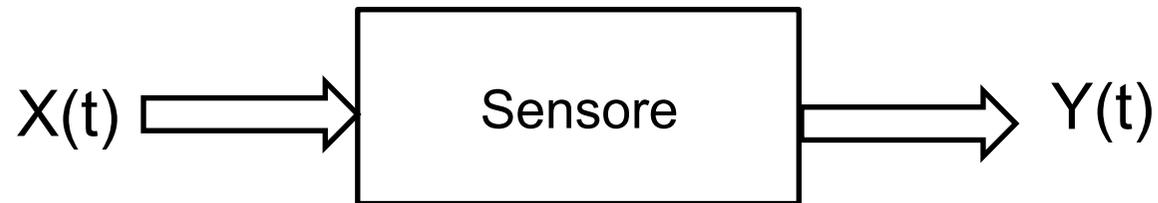
# Sensori

# Sensori



# Sensori

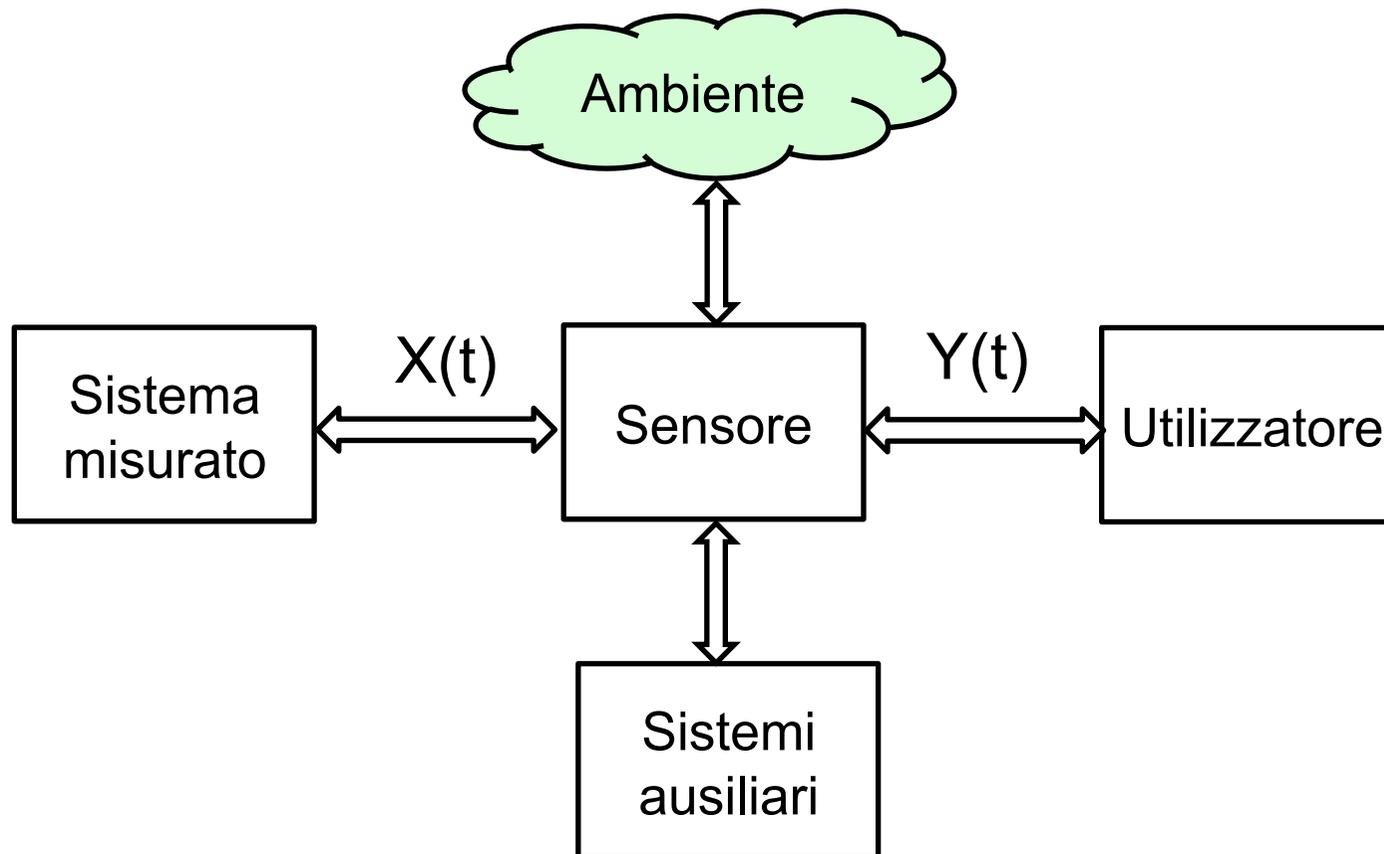
- Un sensore è un dispositivo che trasforma la grandezza fisica che vogliamo misurare in un'altra grandezza di natura diversa (tipicamente elettrica ovvero utilizzabile, memorizzabile ed elaborabile in modo estremamente veloce attraverso circuitistica elettronica)



- 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 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.

# Sensori

- Sistema complesso con interagisce con diversi fattori esterni



# 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  $X(t)$ .

# Sensori

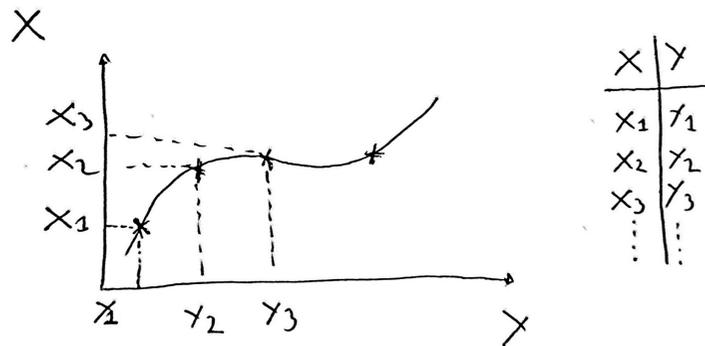
- La funzione di conversione diretta  $f_d$  può essere ricavata in diverse modalità

1. Nota a priori conoscendo il modello fisico/elettrico del sensore

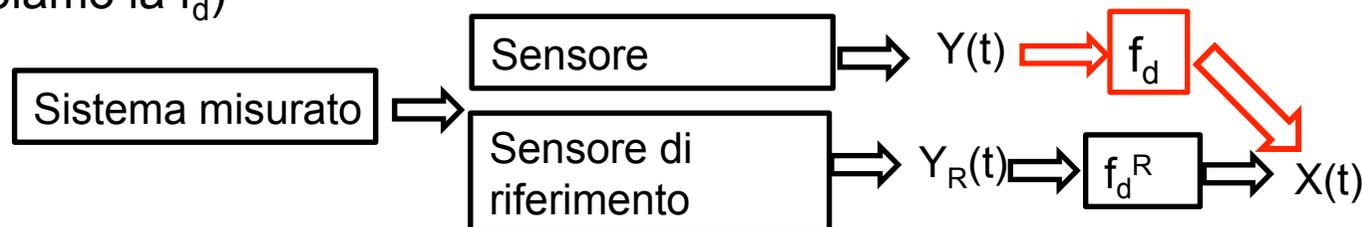
- È abbastanza raro che la funzione diretta sia costruita in questo modo. Inoltre le inevitabili tolleranze sui componenti elettronici e sulla costruzione renderanno necessari i passi descritti nei punti successivi (taratura).

2. Costruita per punti imponendo  $X$  noti (**non sempre possibile**)

- metodo valido per una caratterizzazione quasi-statica



3. 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 transienti 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  $x$  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: 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

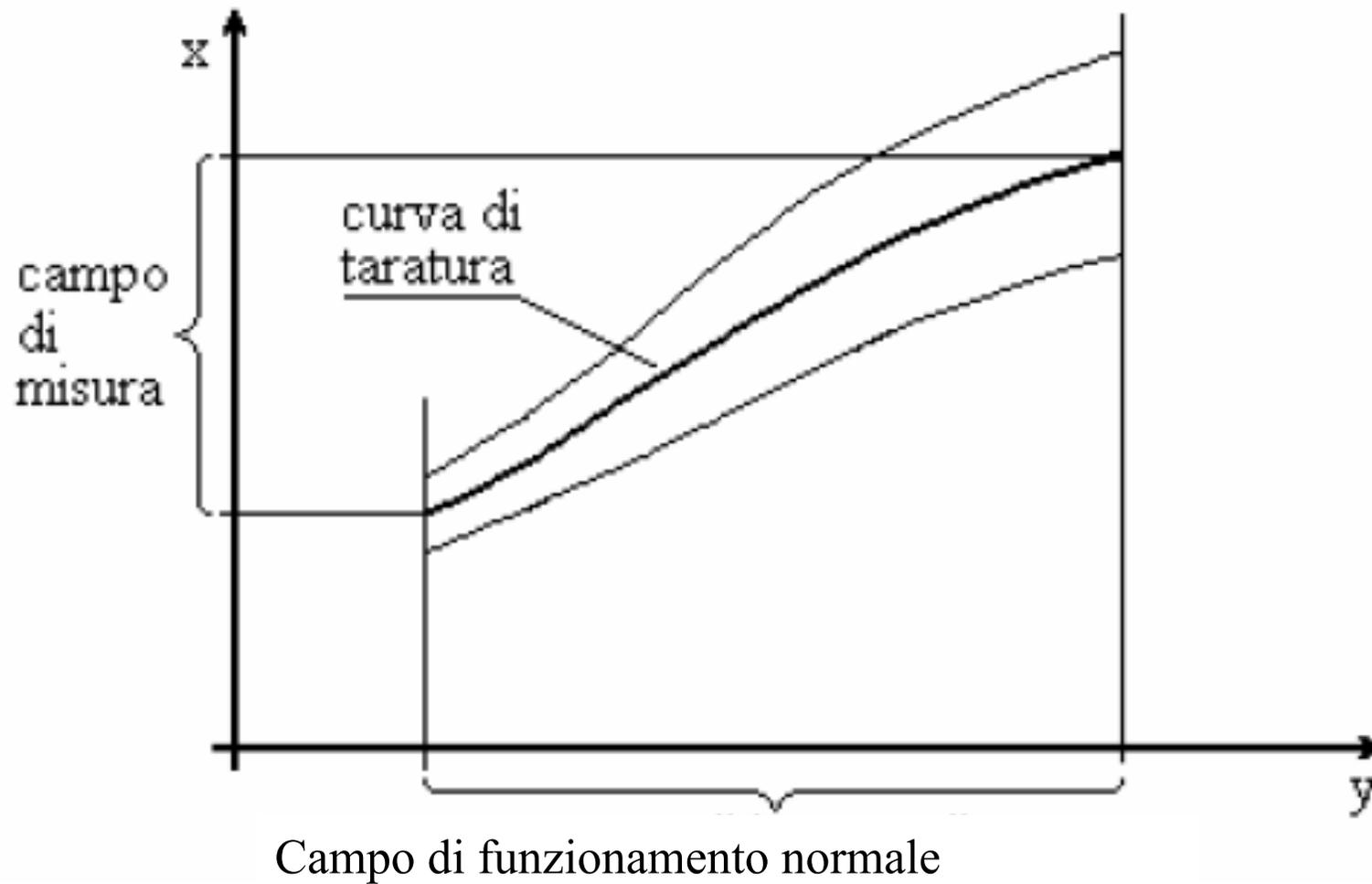
# Sensori

- 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.

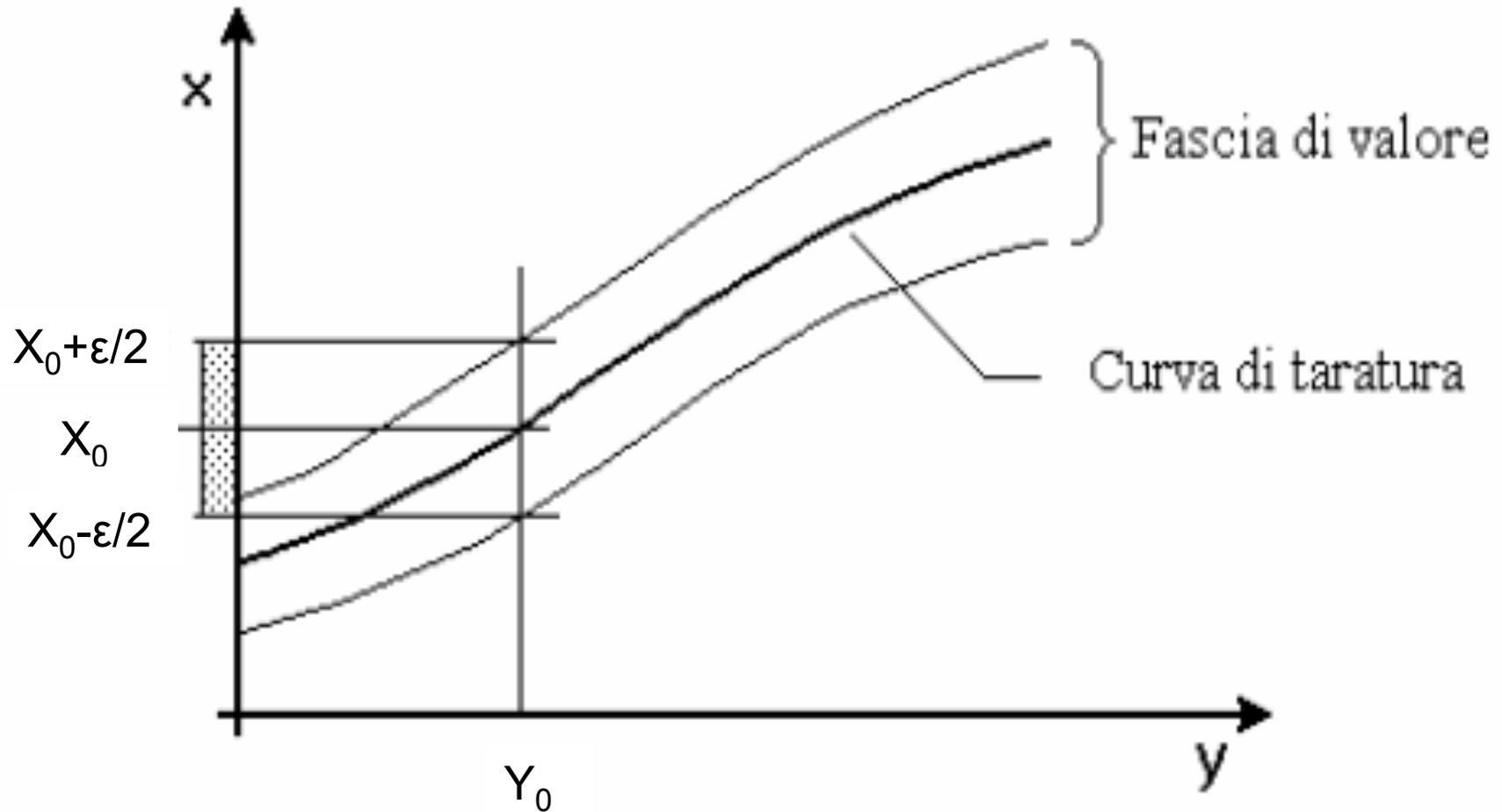
# Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **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



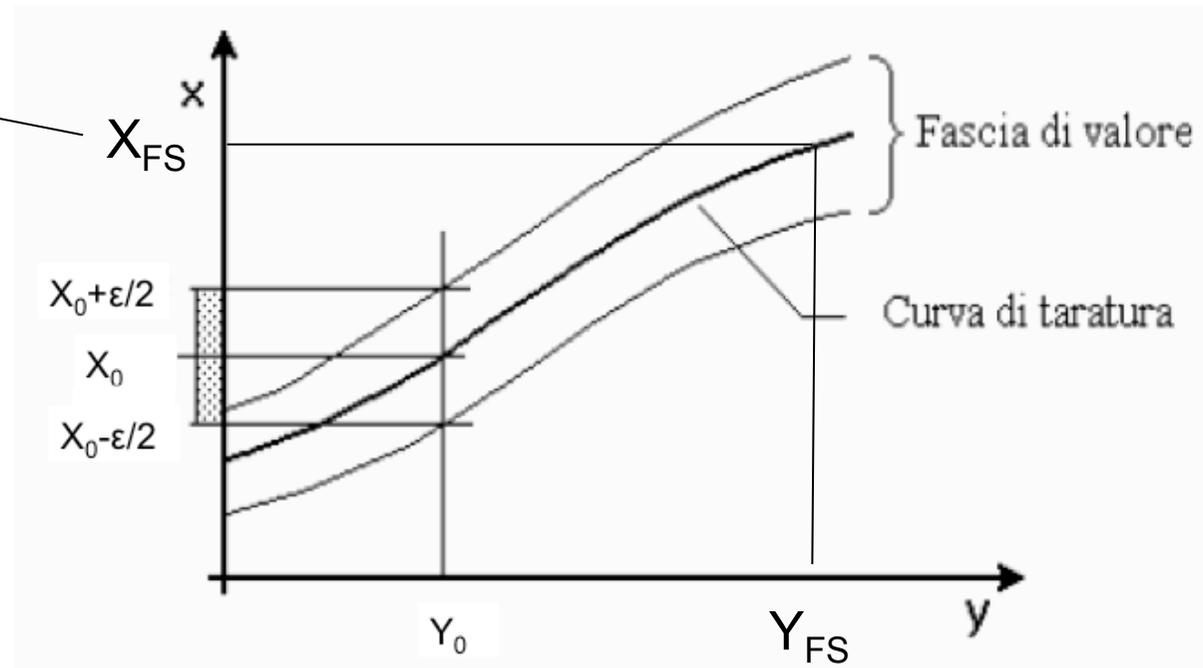
Per  $Y_0$  abbiamo che il misurando è compreso nell'intervallo  $[X_0 - \epsilon/2; X_0 + \epsilon/2]$ . Incertezza assoluta pari alla lunghezza dell'intervallo ovvero  $\epsilon$

# 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 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:  $\varepsilon \rightarrow [X_0 - \varepsilon/2; X_0 + \varepsilon/2]$

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

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

# 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?**

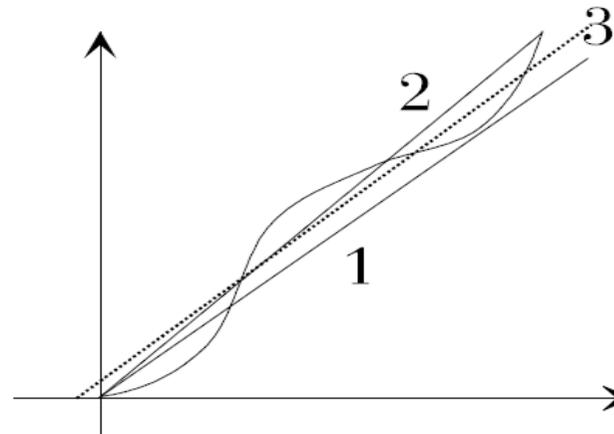
# Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **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.
  - Far riferimento all'incertezza dell'uscita corrisponde in pratica a considerare la minima variazione apprezzabile.
- **Offset:** uscita con misurando nullo.
- **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.

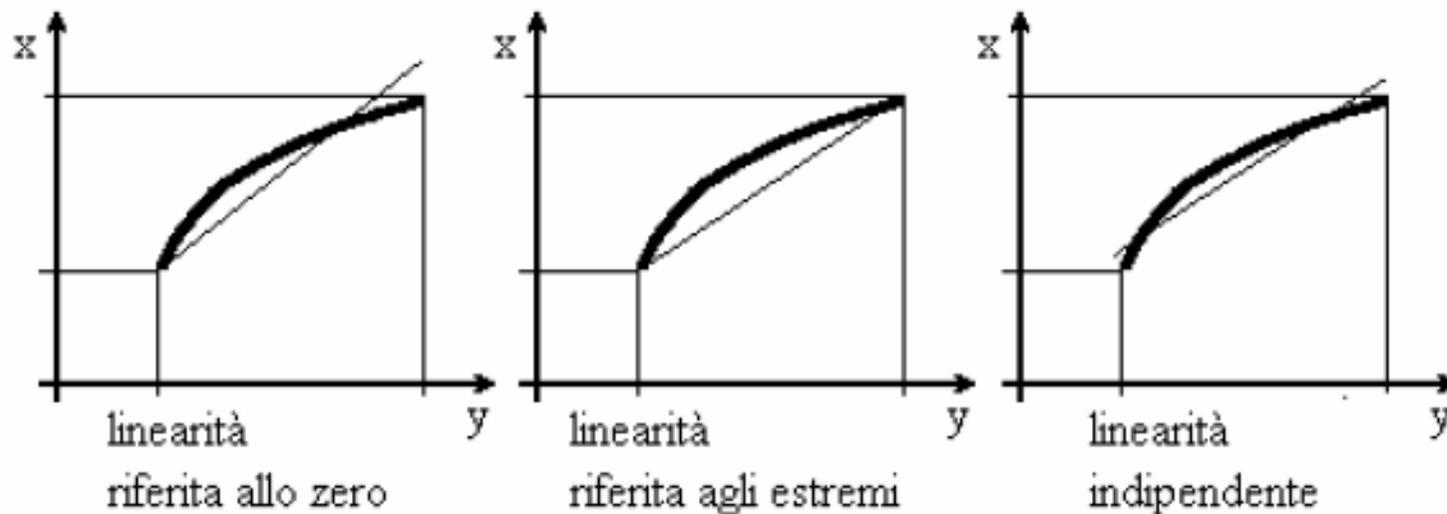
# Sensori - Caratteristiche metrologiche in regime stazionario

- **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  $\varepsilon$
  - 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

## Sensori - caratteristiche

- **Ripetibilità:** attitudine del sensore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando è applicato all'ingresso lo stesso misurando più volte consecutivamente, nelle stesse condizioni operative. 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 (e può essere inglobata in essa).
- **Condizioni di riferimento:** l'insieme delle fasce di valore delle grandezza d'influenza in corrispondenza delle quali sono valide le caratteristiche metrologiche riassumibili nella funzione di taratura.

## 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  $0,1\%$

# Sensori Caratteristiche

## Stabilità temporale

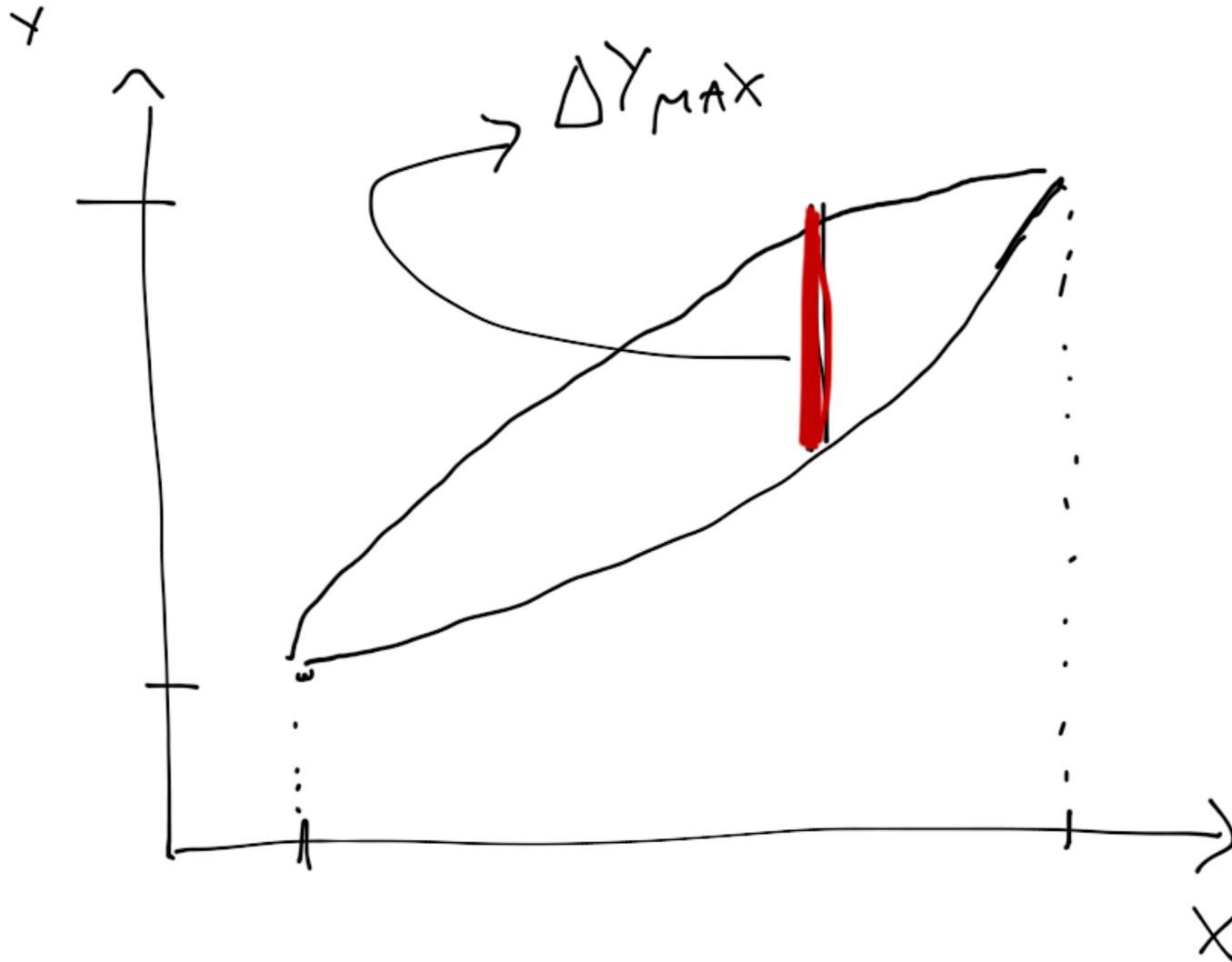
- La capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi oppure anni). La stabilità, quindi, legando le caratteristiche del sensore alla grandezza tempo, riveste un ruolo assai simile a quello della ripetibilità 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).

# Sensori Caratteristiche

## Isteresi

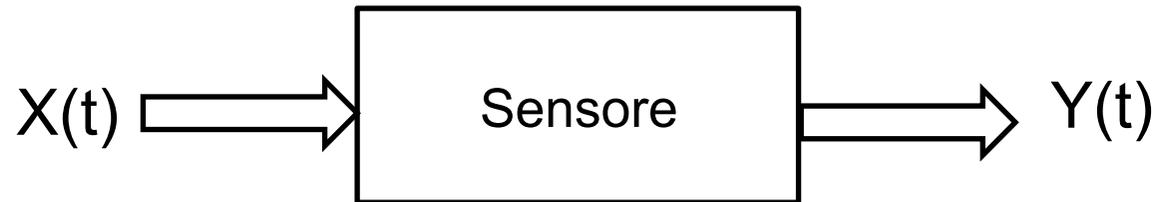
- Quantifica la presenza di un effetto di "memoria" del sensore la cui uscita, a parità di valore del misurando, potrebbe essere influenzata dalla precedente condizione operativa.
- La isteresi viene valutata individuando, per ogni valore del misurando compreso nel campo di misura, la differenza fra 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 dinamiche

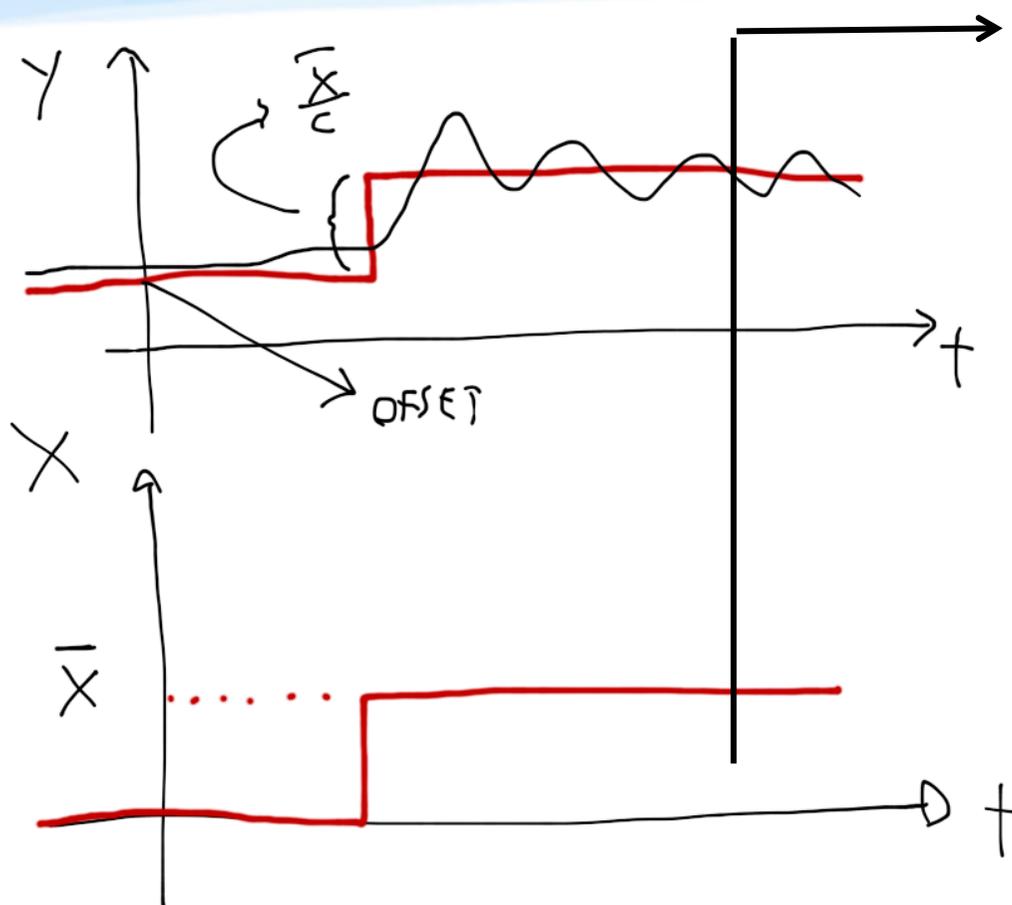
- La domanda a cui si vuole rispondere è: come si comporta l'uscita del sensore quando il misurando varia nel tempo?



**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.

# 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 caratteristiche dinamiche

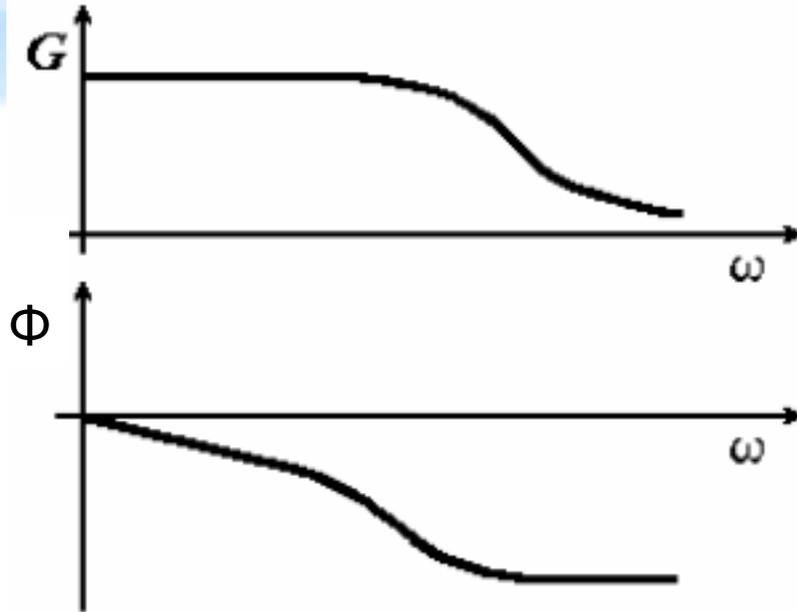
## – Dominio frequenza

- 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 ( $\Phi$ ) 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  $\Phi$  variano al variare di  $\omega$**

# 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.

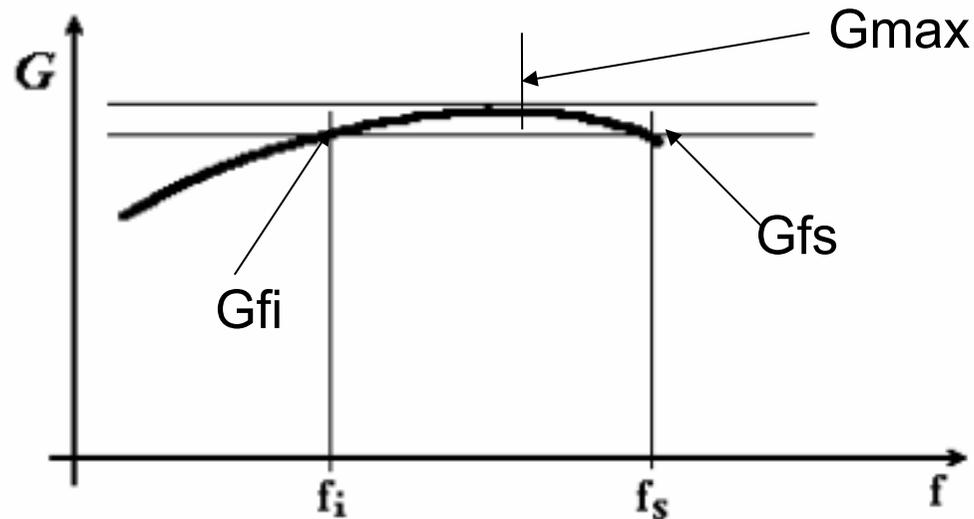
**La banda passante è solitamente l'unico parametro che ci viene fornito**

# 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 fornita la risposta in frequenza del sensore
    - 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  $\omega$  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



## Caso Reale:

Si considera come banda passante quel campo di frequenze in cui il guadagno  $G$  del trasduttore si mantiene entro una fascia di valore prefissata (rispetto al massimo). Gli estremi della banda passante si chiamano "frequenza di taglio inferiore" e "frequenza di taglio superiore"

- Nota: nella maggioranza dei casi troveremo  $f_i=0$
- Di solito si parla di banda a -3dB ovvero attenuazione rispetto al massimo di  $1/2^{0.5}=0.707\dots$  ( $20 \log(G_{fi}/G_{max})= 20 \log(G_{fs}/G_{max})=-3$ )
  - circa il 70% del guadagno massimo

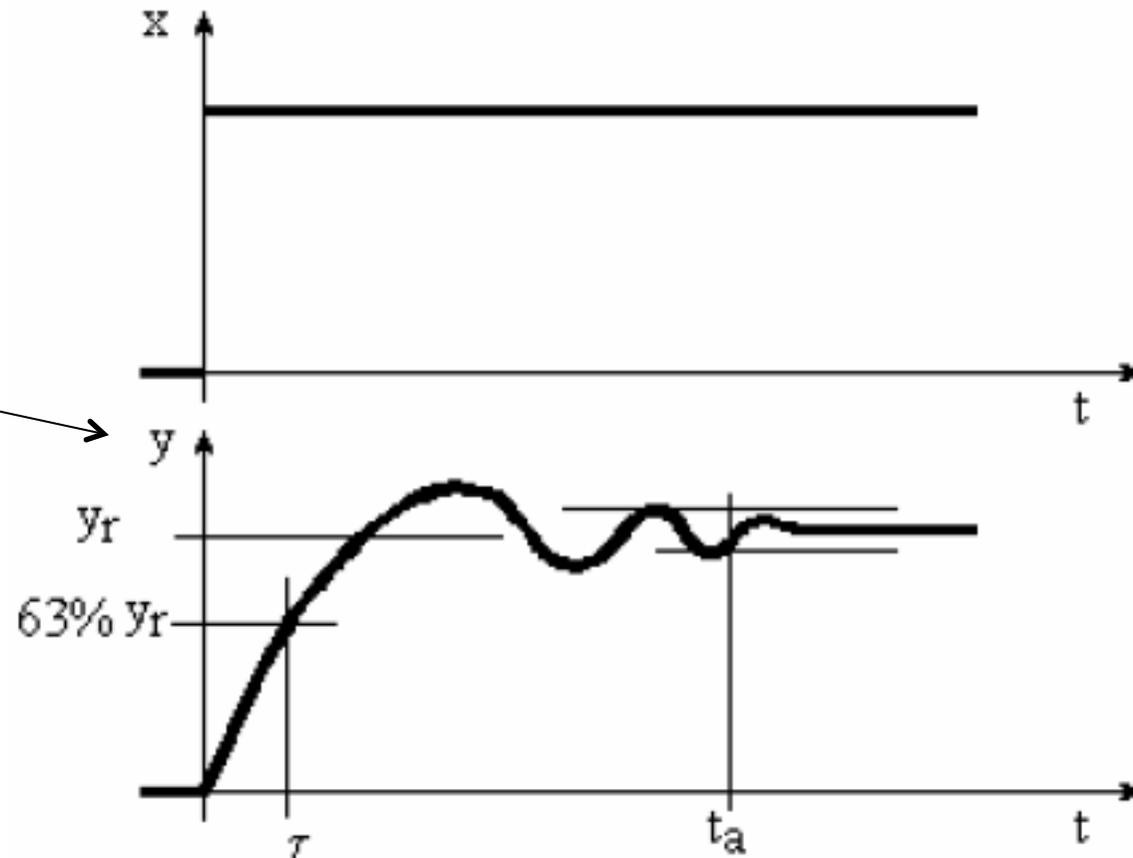
# Caratteristiche del Sensore

## – 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 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



# Esempi di caratteristiche tecniche

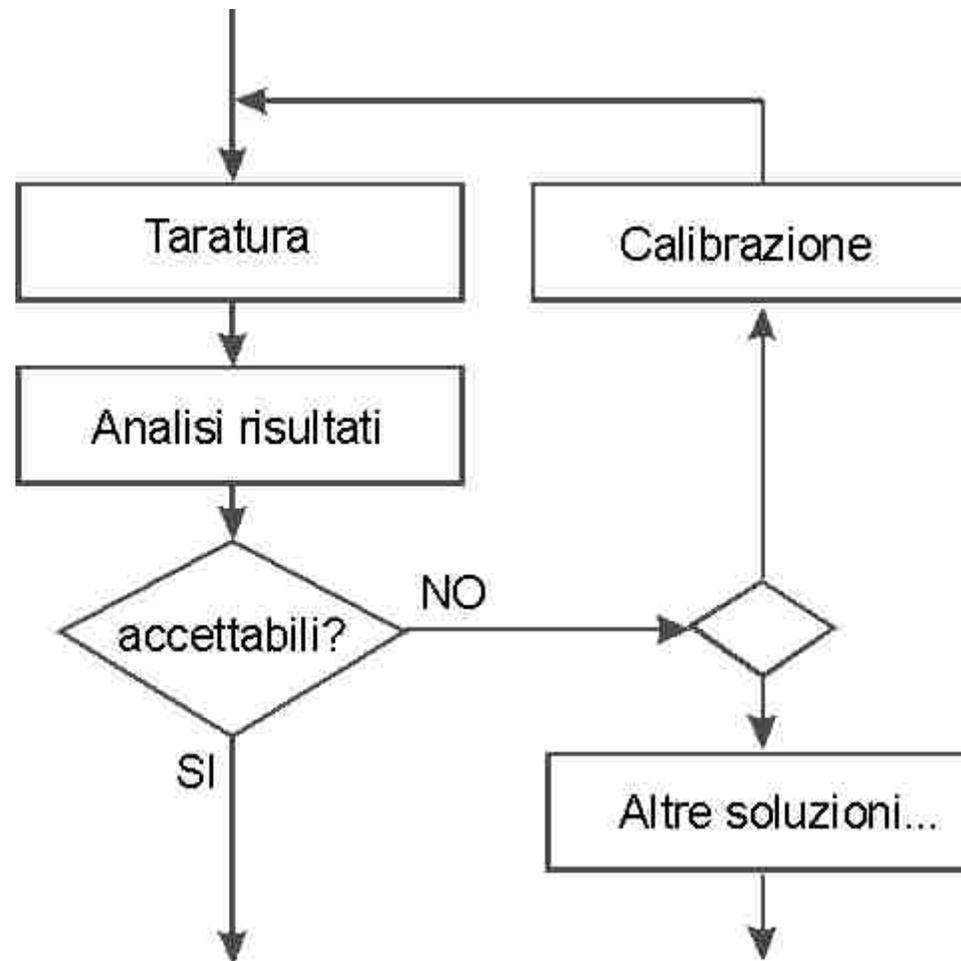
- ADXL303
  - Accelerometro triassiale
    - <http://www.analog.com/en/sensors/inertial-sensors/adxl335/products/product.html>
- AD592
  - Sensore di temperatura
    - <http://www.analog.com/en/sensors/analog-temperature-sensors/ad592/products/product.html>

# 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

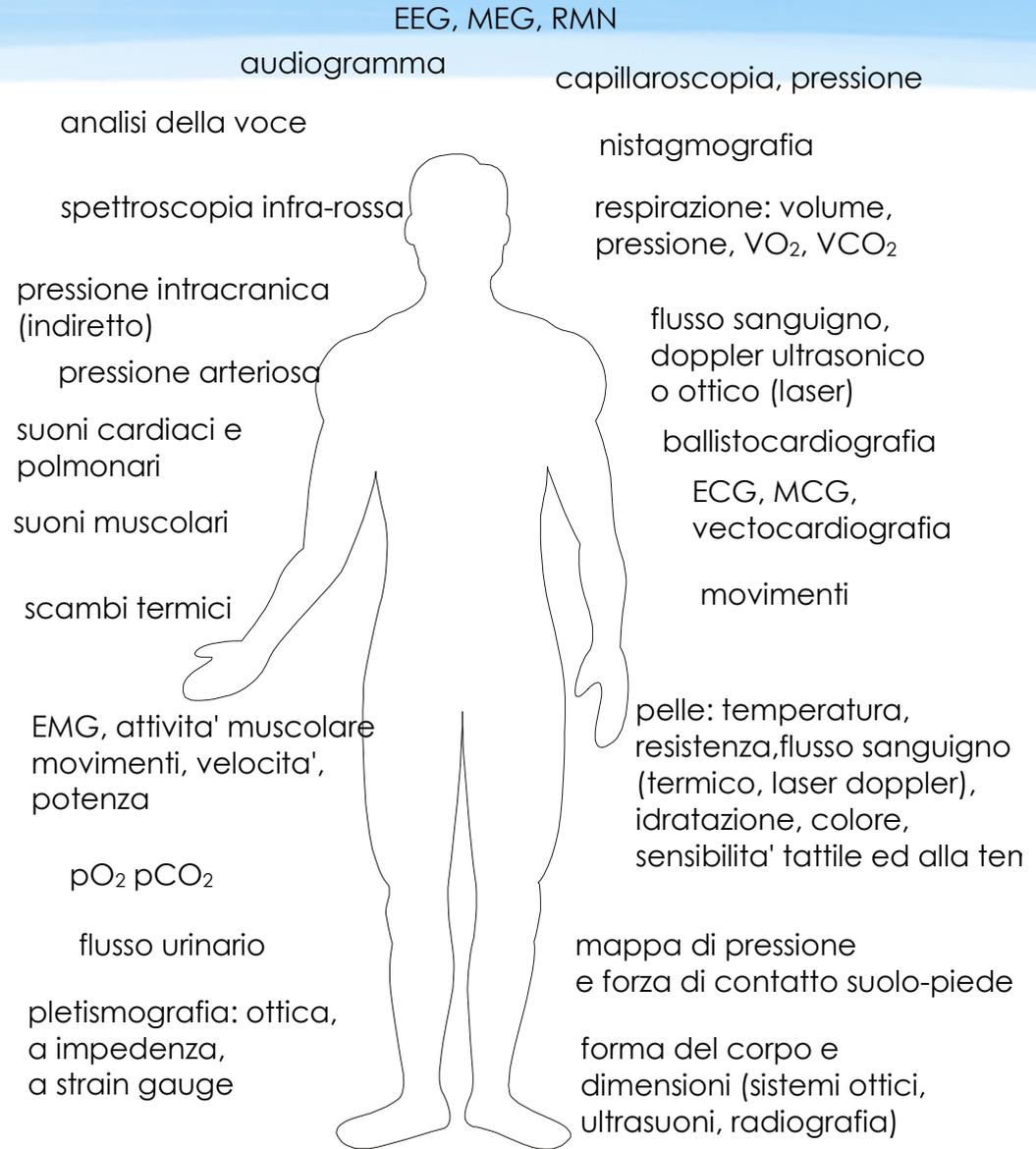
- La calibrazione (adjustment) è l'operazione in cui il sistema di misura viene regolato in modo da migliorarne l'accuratezza
  - Da non confondersi con la parola inglese "calibration" che si traduce con taratura
- Effettuata dal costruttore o da suoi delegati
  - Regolata da normative in alcuni casi
  - 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)

# Calibrazione (2)

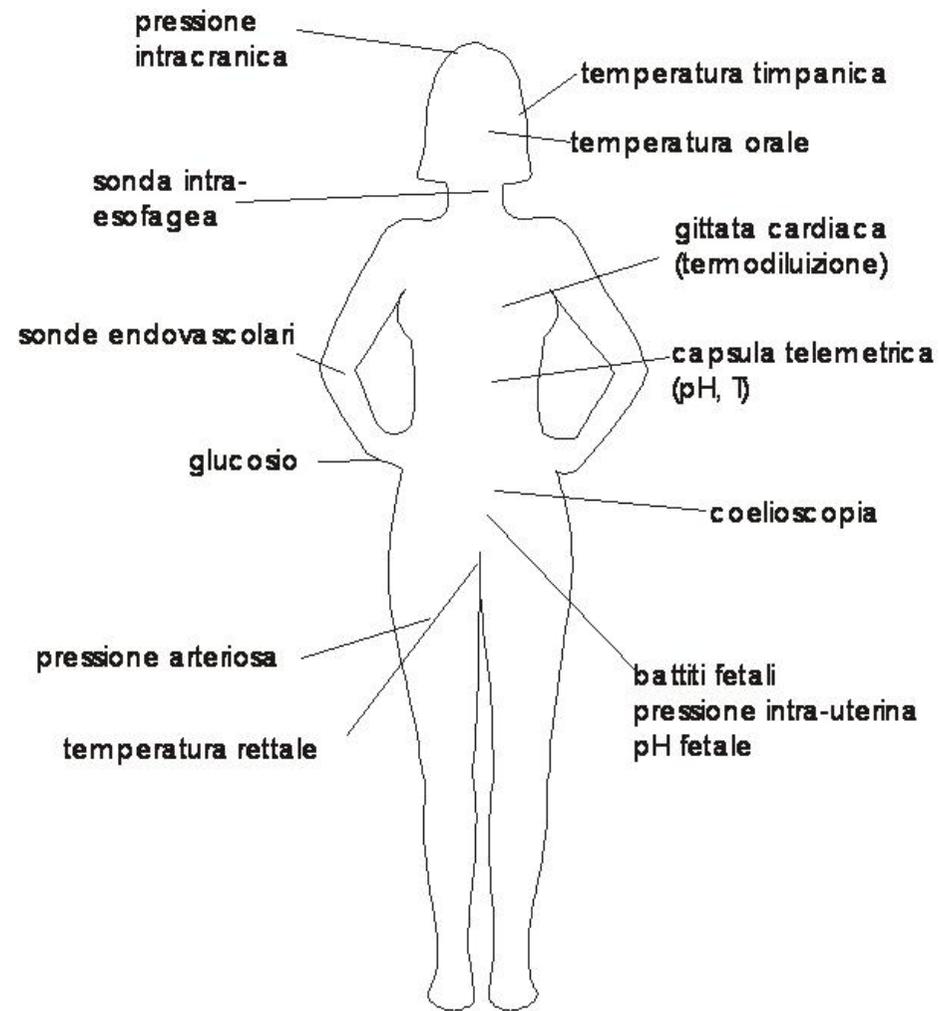


# Classificazione delle misure

**Misura non-invasiva**  
Preleva il segnale senza creare traumi, lesioni o alterazioni dei parametri vitali



# Classificazione delle misure



MISURE MINIMAMENTE INVASIVE

# 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)
<b>VARIABILI MECCANICHE</b>		
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 <sup>-4</sup> Pa.	5 - 2 10 <sup>3</sup>
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 <sup>2</sup>	0 - 20
Portata volumetrica di sangue	varia con l'organo sotto esame	0-20
Gittata cardiaca	1 - 300 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s	0 - 40
Pneumotacografia	4 - 25 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /min	0.1 - 10
Frequenza respiratoria	0 - 0.6 m <sup>3</sup> /min	0.1 - 10
Volume Tidal	2 - 50 respiri/min	0 - 0.1
Temperatura corporea	(0.05 - 1) 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /respiri 32 - 42 C	

# 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)
<b>VARIABILI CHIMICHE</b>		
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 <sub>2</sub>	40 - 100 mmHg	0 - 2
pCO <sub>2</sub>	1 - 3 mmHg	0 - 2
pN <sub>2</sub>	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 <sup>+</sup>	0.0002 - 0.002 M	0 - 2
K <sup>+</sup>	0.001 - 0.005 M	0 - 2
Mg <sup>++</sup>	0.05 - 0.2 M	0 - 2
Ca <sup>++</sup>	0.01 - 0.1 M	0 - 2
Cl <sup>-</sup>		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
<b>VARIABILI BIOCHIMICHE</b>		
Urea	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-2</sup> M	0 - 1
(via biosensore a ureasi)	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-1</sup> M	0 - 1
Glucosio		
(via biosensore a glucosio-ossidasi)		