



POLITECNICO DI BARI

**DIPARTIMENTO DI
Elettrotecnica
ED ELETTRONICA**

**Laurea in Ingegneria Elettrica
Corso di Misure per l'Automazione e la Produzione Industriale**

Caratterizzazione dei Sensori

(raccolta di lucidi)

Dovrebbe ormai essere chiaro che un sensore/trasduttore può effettuare più conversioni di energia prima di produrre alla sua uscita un segnale che sia facile da elaborare, trasmettere e rappresentare.

L'analisi delle caratteristiche di un sensore richiede soltanto lo studio delle relazioni fra gli stimoli e le risposte del dispositivo senza la necessità di dover esaminare i processi di trasformazione dell'energia che avvengono al suo interno. Pertanto,

nella fase di caratterizzazione si guarderà al sensore come a una "black-box" esaminando soltanto le relazioni ingresso-uscita del dispositivo.

Vale la pena precisare che:

- per ogni sensore esiste una relazione di **ingresso-uscita ideale** che permette di ottenere in uscita, generalmente in un'altra forma, il valore "vero" dello stimolo. E' ovvio che questo non si verifica mai nel caso reale (idealità dalla fase di progettazione a quella realizzazione).
- questa funzione ideale viene espressa sotto forma di equazione matematica, di tabella o di grafico; può essere di tipo lineare (termoresistori, sensore meccanico di pressione, ecc.) o non lineare (termistore, pirometro, ecc.). Solo nel primo caso la *responsivity* è un valore fissato.
- nel funzionamento reale il sensore descrive una caratteristica che si discosta dalla funzione ideale. Per portare in conto l'inaccuratezza del dispositivo occorre misurare le deviazioni esistenti fra i valori reali e i valori ideali.

Span e Full Scale Output

Span [FS]

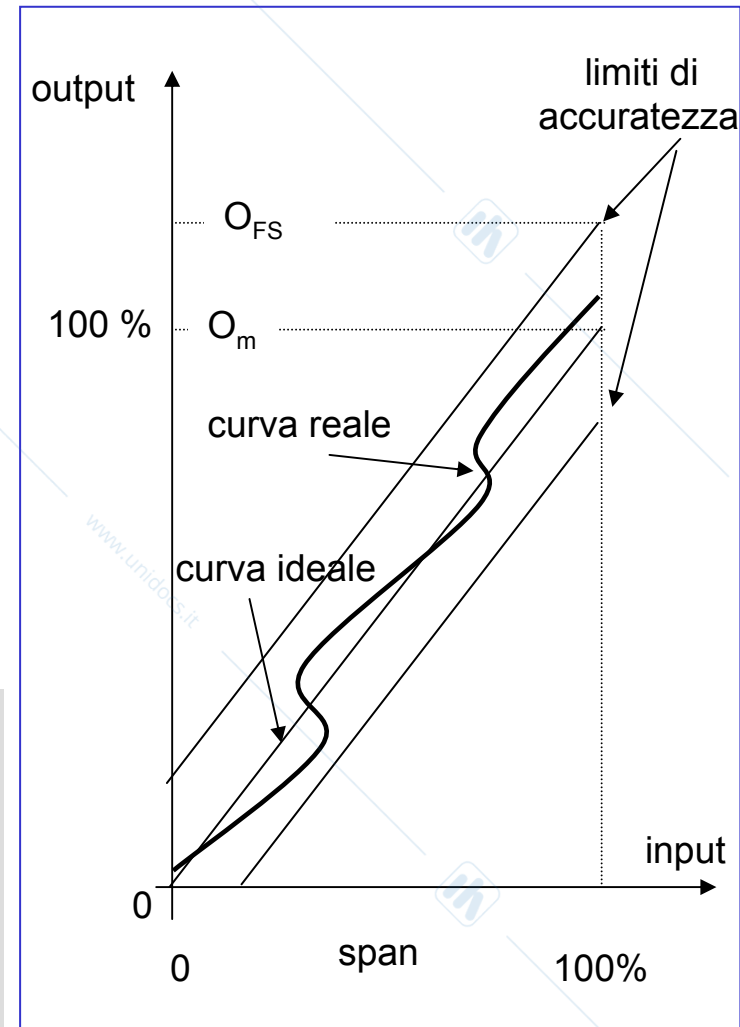
L'input full scale o span o range o portata è l'intervallo dinamico di ingresso che può essere convertito dal sensore con una incertezza prestabilita

Note

- L'overrange o overload è il massimo valore che si può applicare in ingresso al trasduttore senza comprometterne le sue prestazioni. Il tempo necessario al dispositivo per riprendere a funzionare entro le tolleranze specificate è detto *recovery time*.

Full Scale Output [FSO]

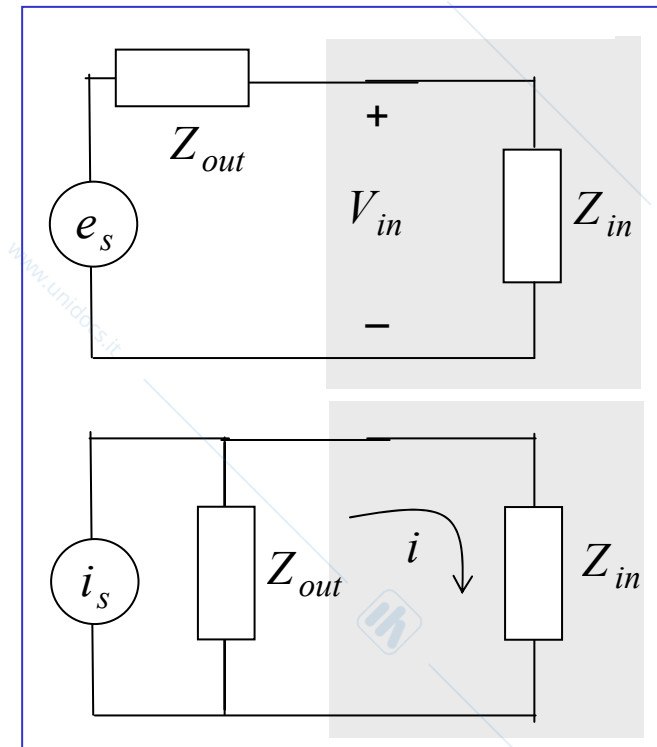
Il full scale output è la differenza fra i segnali di uscita del sensore quando ad esso sono applicati il più alto ed il più basso valore di ingresso



Impedenza di Uscita

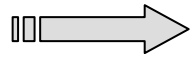
La rappresentazione equivalente di un sensore è data da un generatore di tensione con impedenza in serie (uscita normalizzata in tensione) o da un generatore di corrente con impedenza in parallelo (uscita normalizzata in corrente).

Questa impedenza dovrà essere connessa alla impedenza di ingresso del circuito di interfaccia. Per minimizzare la distorsione del segnale di uscita nella banda di funzionamento del dispositivo, è preferibile, nel caso di uscita in tensione un sensore con Z_{out} bassa ed una interfaccia con Z_{in} elevata, nel caso di uscita in corrente un sensore con Z_{out} elevata ed una interfaccia con Z_{in} bassa.



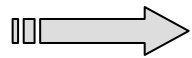
Caratterizzazione dei Sensori

Una caratterizzazione completa del sensore richiede la descrizione delle seguenti caratteristiche:



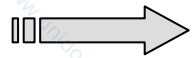
• statiche

descrivono le prestazioni del sensore in **condizioni normali** con variazioni lente dell'ingresso ed in assenza sollecitazioni esterne.



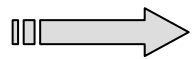
• dinamiche

descrivono il comportamento del sensore alle variazioni dell'ingresso con il tempo.



• ambientali

si riferiscono alle prestazioni del sensore dopo l'esposizione (c.a. non operative) o durante l'esposizione (c.a. operative) a specifiche sollecitazioni esterne.



• di affidabilità

sono relazionate alla vita utile del sensore e a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito.

1. Caratteristiche Statiche nei Sensori

Le *caratteristiche statiche* in un sensore descrivono il suo comportamento in **condizioni normali con variazioni lente dell'ingresso ed in assenza di di urti, vibrazioni, accelerazioni, ecc.**

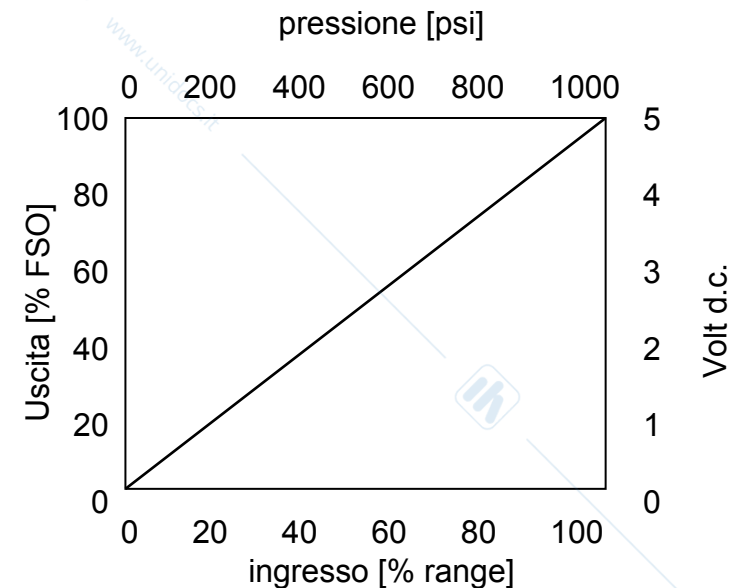
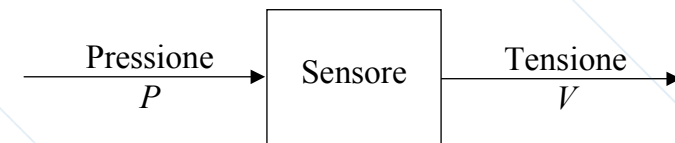
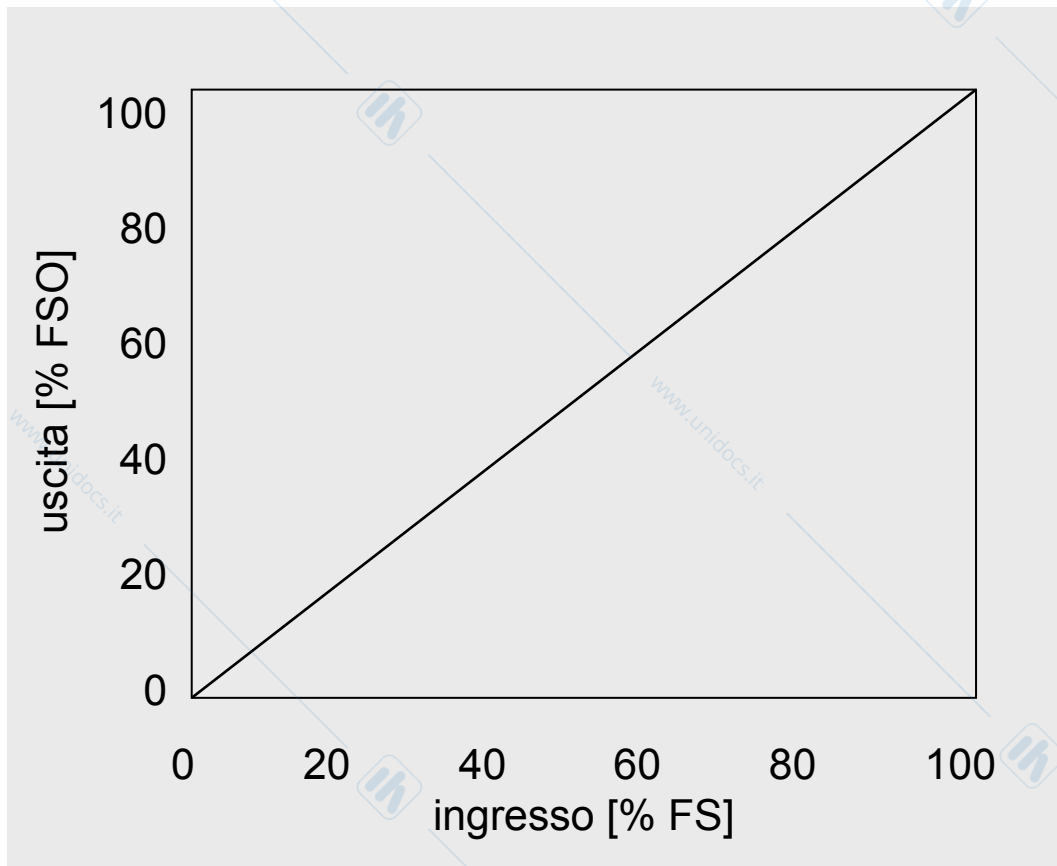
condizioni
normali di
funzionamento

- $25\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ temperatura
- $\leq 90\%$ umidità relativa
- $88 \div 100\text{ kPa}$ pressione atmosferica

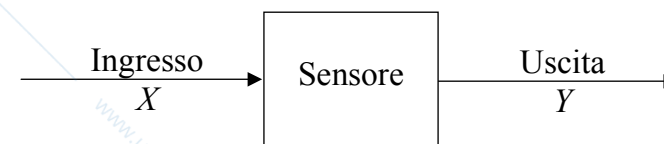
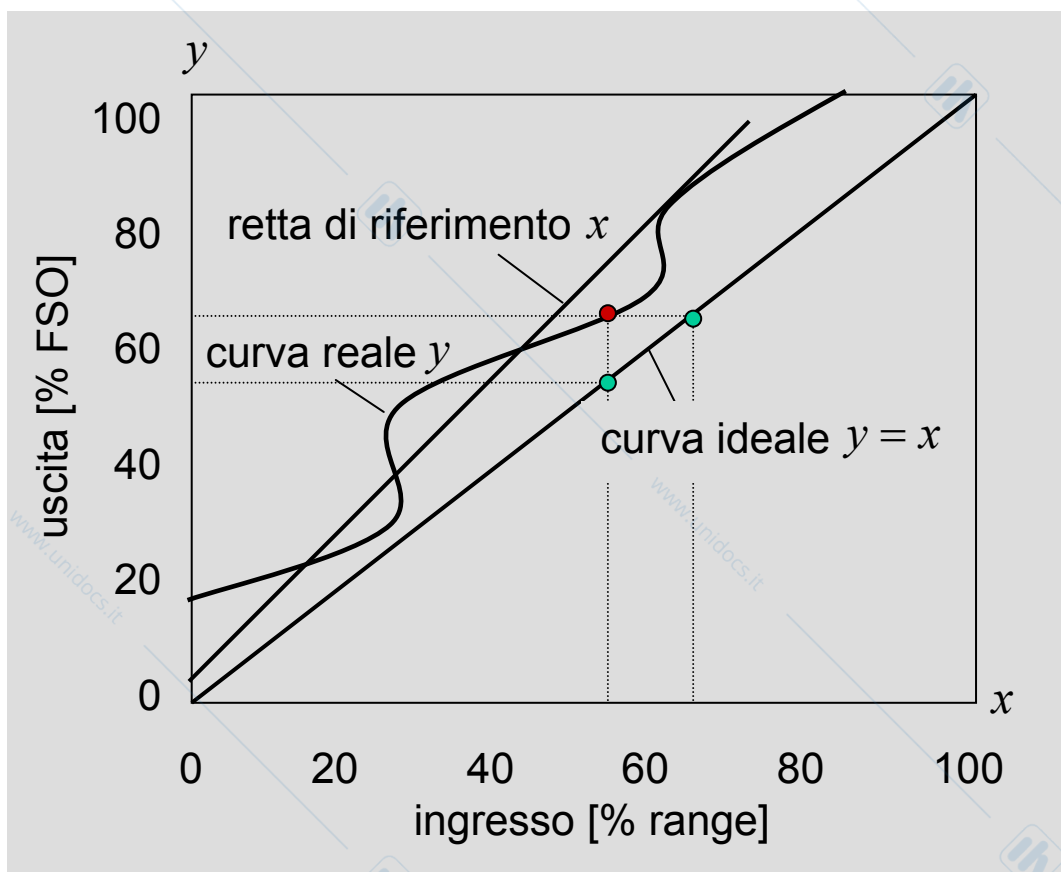
Un sensore ideale presenterà in uscita sempre il valore “vero” della grandezza rilevata e seguirà esattamente *la curva teorica o ideale* che relaziona ingresso ed uscita nel suo range di funzionamento.

La *caratteristica ideale o teorica* di un sensore è una retta con pendenza unitaria (espressa in percentuale di full-scale output [% FSO] per percentuale della portata [% FS]).

Nel caso non lineare la caratteristica ideale sarà una curva con pendenza variabile da punto a punto



Il *sensore reale* ha un comportamento non ideale che produce una deviazione dell'uscita dal valore "vero". La differenza fra valore indicato e valore "vero" rappresenta l' *errore del sensore* .



$$e = Y - X \quad \text{errore del trasduttore}$$

Il modo più immediato di considerare l'errore del sensore è quello di definire la sua **fascia di incertezza** $[\pm \%FSO]$ che rappresenta la massima deviazione dalla sua retta di riferimento

La scomposizione dell'errore totale nelle sue componenti (non linearità, guadagno, *offset*, *etc.*) può essere utile per effettuare la correzione finale dei dati e migliorare l'accuratezza complessiva

Le caratteristiche di errore possono essere determinate con la **calibrazione** (o **taratura**).

La **calibrazione** è un test durante il quale si applicano al sensore valori noti del misurando e si registrano i corrispondenti valori di uscita

Note

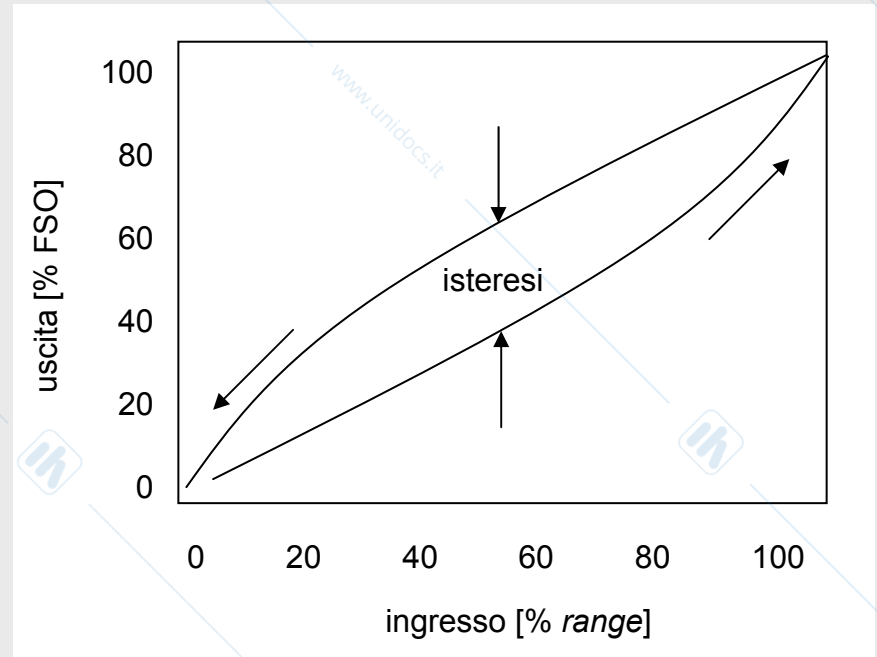
- Un **ciclo di calibrazione** si ottiene con una prova sull'intero *range* del sensore per valori crescenti e decrescenti
- Una **calibrazione completa** comprende due o più cicli di calibrazione

• isteresi [%FSO]

rappresenta la massima differenza tra i valori di uscita corrispondente ad uno stesso ingresso, ottenuto prima per valori crescenti e poi decrescenti

Note

- è causato da un ritardo nell'azione degli elementi sensibili.

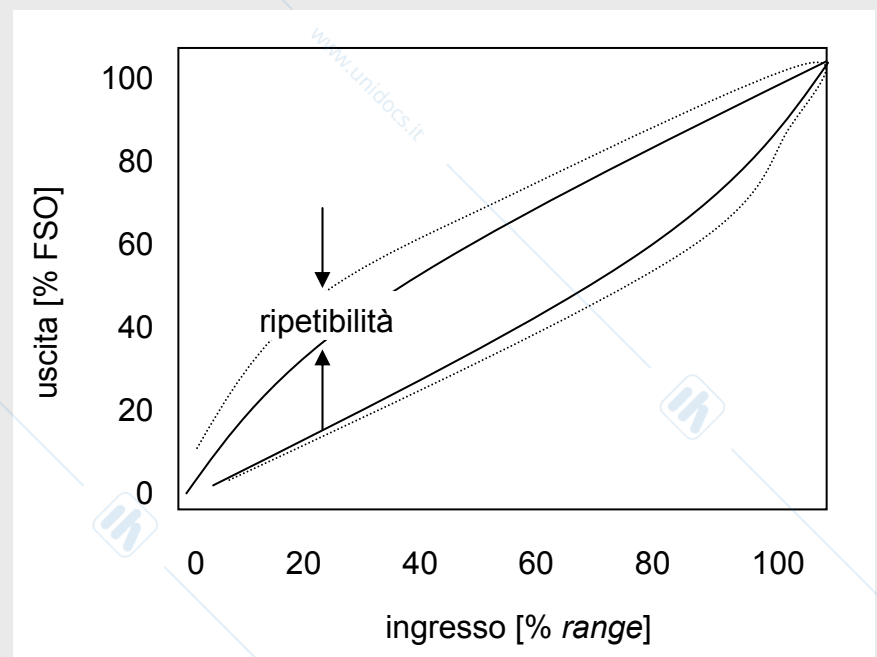


• ripetibilità [entro....%FSO]

rappresenta la capacità di riprodurre la stessa uscita quando è applicato lo stesso ingresso, consecutivamente, nelle stesse condizioni operative e nella stessa direzione. E' espressa come massima differenza tra le uscite di due cicli di calibrazione

Note

- una migliore stima della ripetibilità può essere ottenuta aumentando il numero di cicli di calibrazione.



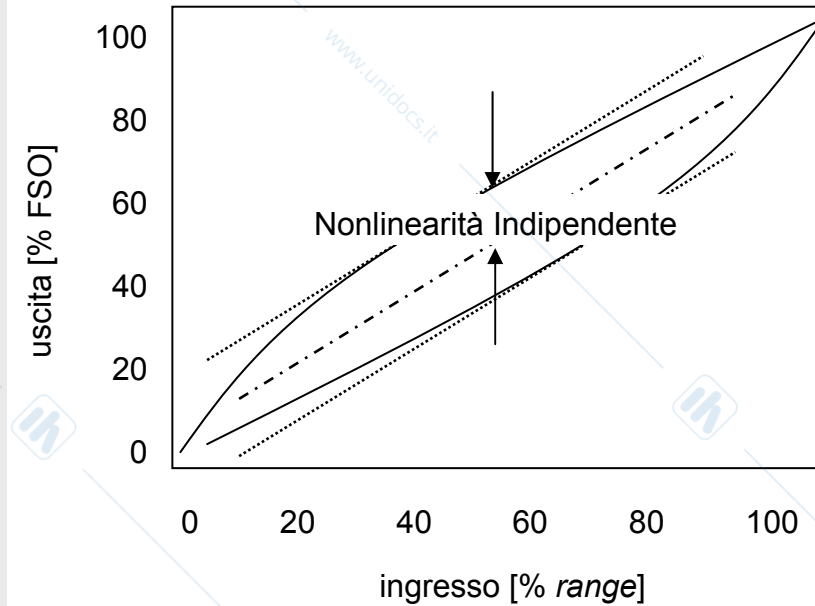
• linearità [entro \pm%FSO]

indica lo scostamento della curva di taratura dalla retta di riferimento (r.r.). Sono possibili diversi tipi di rette di riferimento:

- linearità terminale (r.r. per gli estremi)
- linearità indipendente (r.r. a metà fra le rette estreme)
- linearità ai minimi quadrati (r.r. ottenuta con il metodo dei minimi quadrati)

Note

- le specifiche sulla linearità includono quelle sull'isteresi in quanto la linearità è determinata attraverso un ciclo di calibrazione

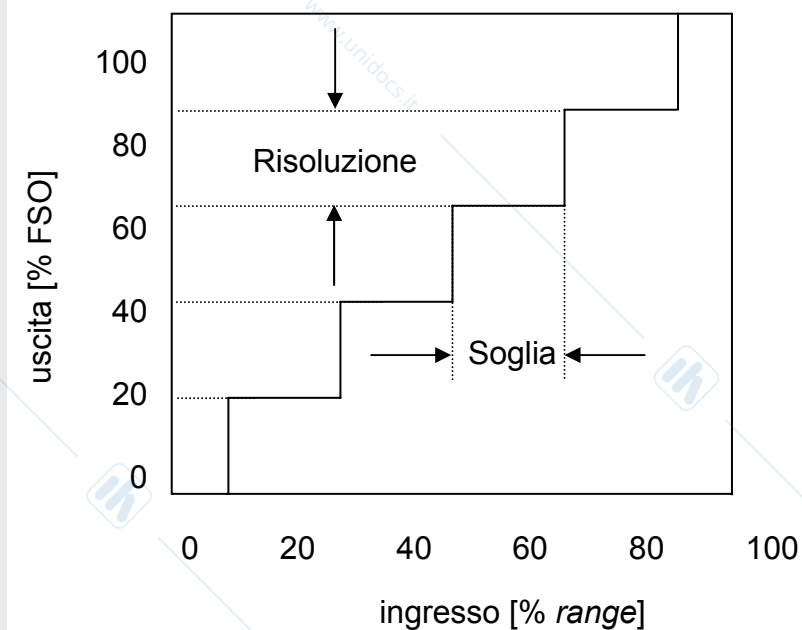


• risoluzione [%FSO]

rappresenta l'ampiezza del passo delle uscite (distanza fra due uscite consecutive) al variare dell'ingresso in tutto il suo *range*

Note

- la soglia (e i livelli di soglia) rappresenta l'ampiezza del passo dell'ingresso che causa una variazione del valore dell'uscita (è simile a una "risoluzione in ingresso")



- sensibilità o guadagno [....%]

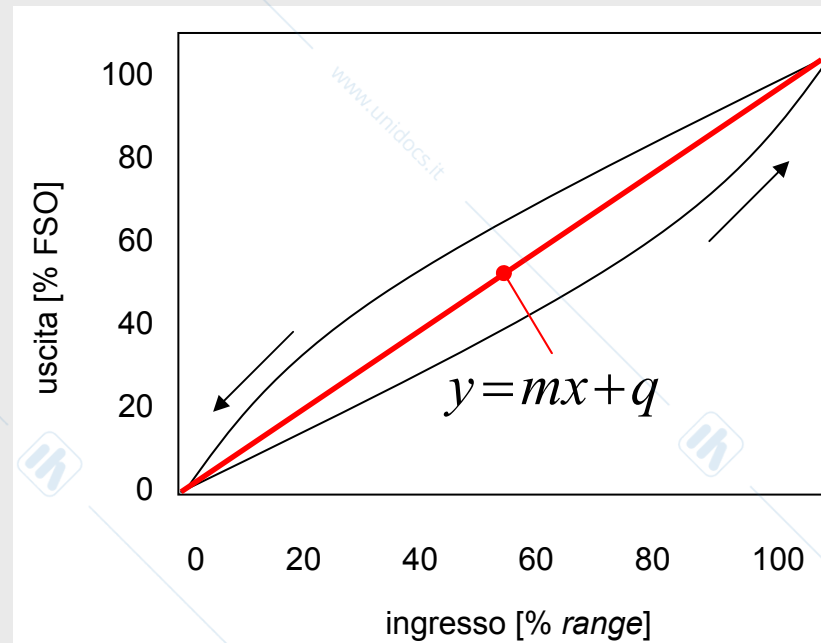
rappresenta il rapporto tra la variazione dell'uscita, dovuta ad una variazione dell'ingresso, e quest'ultima variazione. E' proprio la pendenza G della retta di riferimento.

- *offset* [....%]

rappresenta il segnale in uscita anche in assenza del segnale di ingresso. E' proprio il termine noto O della retta di riferimento.

- conformità

rappresenta l'accordo fra la curva di taratura e una curva teorica (scelta per le inerenti non linearità del sensore)



2. Caratteristiche Dinamiche nei Sensori

Le *caratteristiche dinamiche* in un sensore descrivono il suo comportamento per **variazioni rapide dell'ingresso** con il tempo, in condizioni normali ed in assenza di sollecitazioni

Un sensore non sempre risponde “istantaneamente” a stimoli di ingresso variabili nel tempo e questo determina un errore nella sua risposta (**errore dinamico**). L'errore è dipendente dal tempo e può produrre delle oscillazioni se il sensore è inserito in un sistema di controllo.

Per i sensori occorre precisare l'intervallo di tempo che intercorre fra l'istante di applicazione del segnale di eccitazione e l'istante in cui inizia a funzionare entro i valori di accuratezza specificati. Questo intervallo di tempo va sotto il nome di *warm-up time*.

• risposta in frequenza [\pm ..% da ..a..Hz]

rappresenta

- (1) la variazione con la frequenza del rapporto fra ampiezza di uscita e ampiezza di ingresso, entro una prefissata banda
- (2) la differenza al variare della frequenza fra la fase di ingresso e quella di uscita

• risposta nel tempo [s]


caratterizza la risposta del dispositivo ad una variazione dell'ingresso con il tempo.

- Il **tempo di risposta** è il tempo necessario affinché l'uscita raggiunga una specificata percentuale del valore finale (al 95% o al 98%).
- Il **tempo di salita (t_{rise})** è il tempo necessario affinché l'uscita vada da un prefissato valore ad uno maggiore definiti in percentuale del valore finale (10%-90% o 5%-90%).
- La **costante di tempo (τ)** è il tempo necessario affinché l'uscita raggiunga il 63% del valore finale.

3. Caratteristiche Ambientali

Le caratteristiche ambientali **si riferiscono alle prestazioni del sensore dopo l'esposizione** (c.a. non operative) o durante l'esposizione (c.a. operative) a specifiche sollecitazioni esterne (temperatura, vibrazioni, urti, accelerazioni)

Le caratteristiche statiche e dinamiche di un sensore sono specificate e verificate in condizioni normali di funzionamento ed in assenza di sollecitazioni esterne che ne possono alterare le prestazioni



I trasduttori operano spesso volte in condizioni operative diverse da quelle di normale funzionamento.

In questo caso le deviazioni dalle caratteristiche statiche - **errori ambientali** - devono essere limitate **entro prefissate tolleranze** e determinate tramite opportune verifiche (*test*).

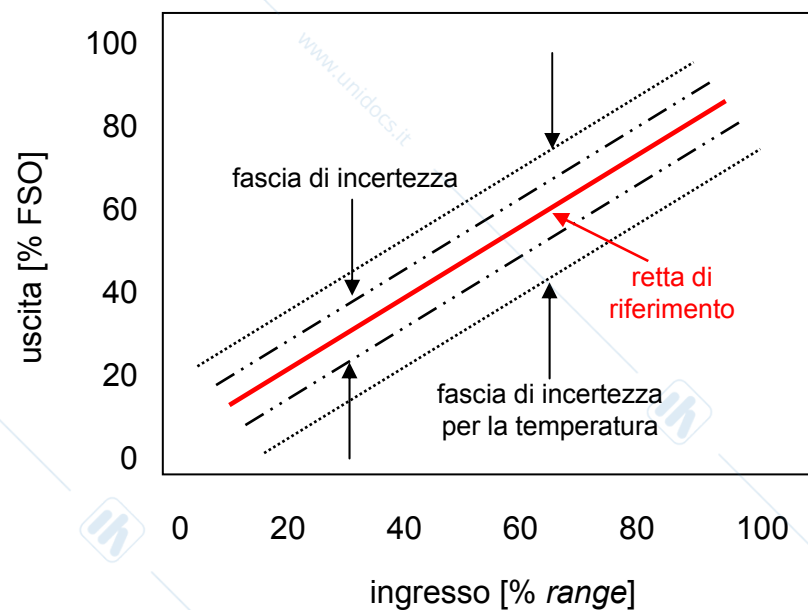
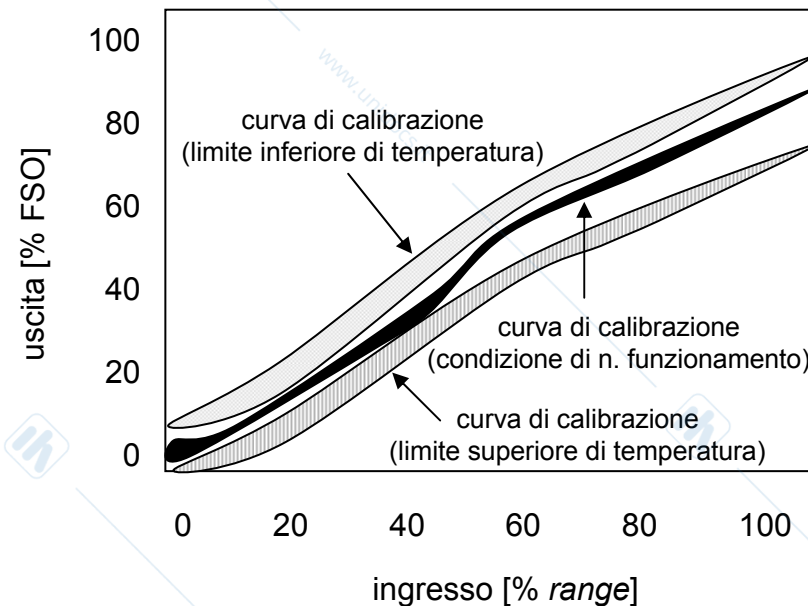
Esse danno garanzia di corretto funzionamento durante (c.a. **operative**) o dopo l'esposizione (c.a. **non operative**) a sollecitazioni esterne assicurando il funzionamento del dispositivo entro le tolleranze prestabilite.

• errore di temperatura [%FSO]

rappresenta la massima variazione dell'uscita -per ogni valore di ingresso compreso nel range del dispositivo- determinata da una variazione di temperatura (da una condizione di normale funzionamento a due prefissati valori estremi)

Note

- L'**intervallo operativo della temperatura** stabilisce il *range* di temperatura che garantisce il corretto funzionamento del dispositivo.
- Il modo più immediato di considerare l'errore di temperatura è quello di definire la **fascia di incertezza per la temperatura** [\pm %FSO] che rappresenta la massima deviazione della risposta del sensore dalla sua retta di riferimento

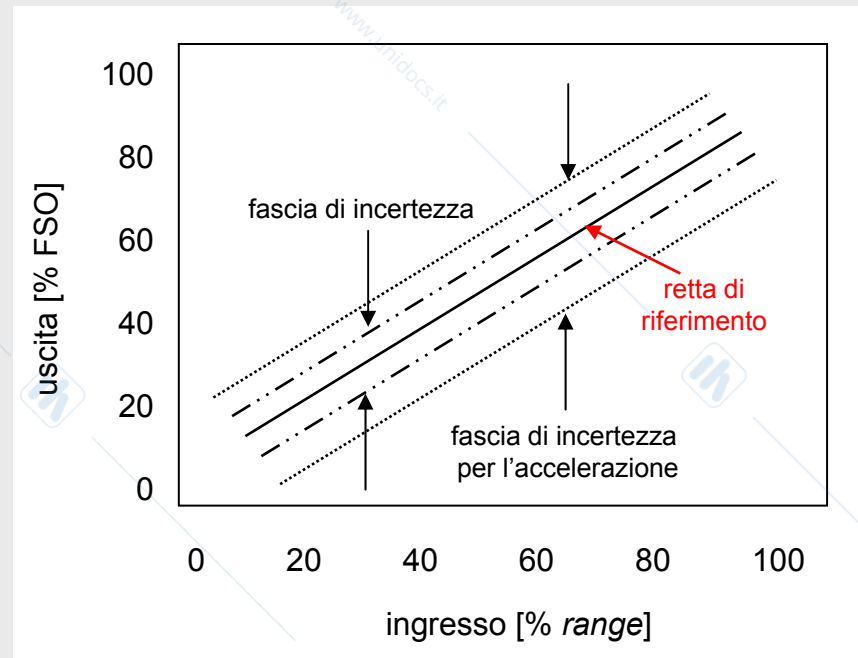


• errore di accelerazione [%FSO]

rappresenta la massima differenza fra le uscite (per ogni valore di ingresso compreso nel *range* del dispositivo) senza e con l'applicazione di una fissata accelerazione agente lungo una specifica direzione

Note

- Il modo più immediato di considerare l'errore di accelerazione è quello di definire la **fascia di incertezza per l'accelerazione** [\pm %FSO] che rappresenta la massima deviazione della risposta dalla sua retta di riferimento.
- Gli effetti dell'accelerazione su un trasduttore sono in genere maggiori in alcune direzioni rispetto ad altre. Perciò deve essere possibile selezionare la posizione più adatta a minimizzare questi disturbi.

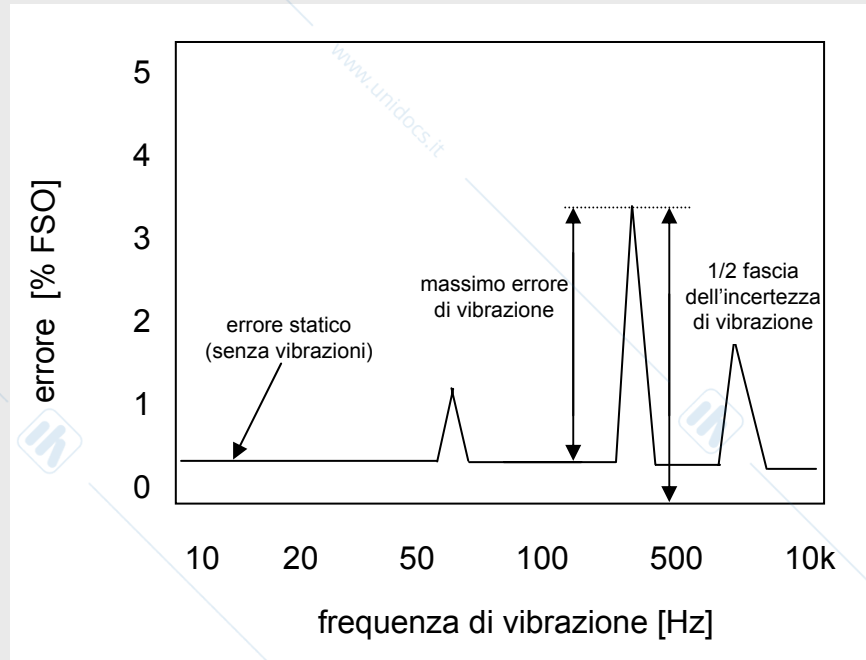


• errore di vibrazione [%FSO]

rappresenta la massima variazione dell'uscita (per ogni valore di ingresso compreso nel *range* del dispositivo) quando vibrazioni di specificata ampiezza e frequenza sono applicate al sensore lungo una prefissata direzione (in condizione di funzionamento normale)

Note

- Molti effetti negativi sono connessi con le frequenze di vibrazione che possono essere amplificate (risonanza) lungo specifiche direzioni.
- Il modo più immediato di considerare l'errore di vibrazione è quello di definire la **fascia di incertezza di vibrazione** [\pm %FSO] che rappresenta il doppio (per la bipolarità) della ampiezza della massima risonanza.



• errore di pressione [%FSO]

rappresenta la massima variazione dell'uscita (per ogni valore di ingresso compreso nel *range* del dispositivo) determinata da una variazione di pressione (da una condizione di normale funzionamento a due prefissati valori estremi)

Note

- Una netta degradazione delle prestazioni del sensore sono connesse con la variazione della pressione ambiente quando questi dispositivi sono utilizzati ad elevate altitudini (aerei, razzi) o sottoterra (miniere, sottofondi marini).
- Il modo più immediato di considerare l'errore di vibrazione è quello di definire la **fascia di incertezza di pressione (o di altitudine)** come $[\pm \%FSO]$.

• sovraccarico (o *overrange*)

rappresenta il massimo valore applicabile all'ingresso senza che ci siano variazioni permanenti alle specifiche di tolleranza dichiarate

Note

- Questo parametro è rappresentativo di una condizione ambientale non operativa (in quanto tiene conto del corretto funzionamento del sensore solo dopo la sollecitazione).
- Il dispositivo richiede un certo intervallo di tempo, detto ***recovery time***, prima di tornare a funzionare nelle specifiche richieste.

4. Caratteristiche di Affidabilità

Le caratteristiche di affidabilità in un sensore sono relazionate alla sua vita **utile ed a possibili cause di mal funzionamento** nel sistema in cui è inserito

Infatti l'affidabilità è la capacità del sensore di espletare la funzione per cui è stato costruito in condizioni prestabilite e per un tempo fissato; questo parametro è espresso in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni per un tempo o per un numero di cicli specificato. Solo di rado esso è specificato dai costruttori.

- vita operativa

rappresenta il minimo intervallo di tempo (specificato) nel quale il dispositivo opererà senza che cambino le sue caratteristiche di funzionamento

- numero di cicli

rappresenta il minimo intervallo di escursioni nel suo *range* di funzionamento (specificato) nel quale il dispositivo opererà senza che cambino le sue caratteristiche di funzionamento