

Caratteristiche della strumentazione

Per paragonare le caratteristiche di strumenti diversi occorre disporre di descrittori quantitativi della risposta dello strumento rispetto ad un dato segnale in ingresso.

Tali caratteristiche vengono solitamente divise in:

- *caratteristiche statiche*
- *caratteristiche dinamiche*

J.G.Webster: Medical Instrumentation, Application and Design
Capitolo 1 Basic Concepts of Medical Instrumentation

UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Caratteristiche statiche

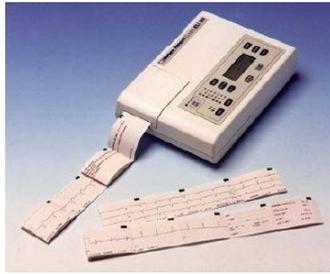
Le *caratteristiche statiche* descrivono il comportamento dello strumento di misura rispetto ad un ingresso stazionario, cioè **costante nel tempo**, o rispetto ad un ingresso che varia molto lentamente rispetto alle costanti di tempo di ingresso dello strumento.



UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Caratteristiche dinamiche

Le *caratteristiche dinamiche* descrivono la risposta di un strumento di misura rispetto ad un **ingresso variabile nel tempo**, per esempio in strumenti destinati a misurare segnali (Elettroencefalografi, Elettromiografi, Elettrocardiografi, Monitor in Unità di Cura Intensiva, accelerometri, goniometri, ecc).



UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

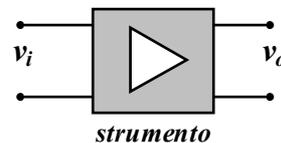
Caratteristiche statiche: risposta dello strumento

Facciamo riferimento, per esempio, ad uno strumento generico con una tensione di ingresso v_i ed una tensione di uscita v_o .

Tale strumento è pensato per fornire una amplificazione unitaria, cioè una tensione

$$v_o = v_i.$$

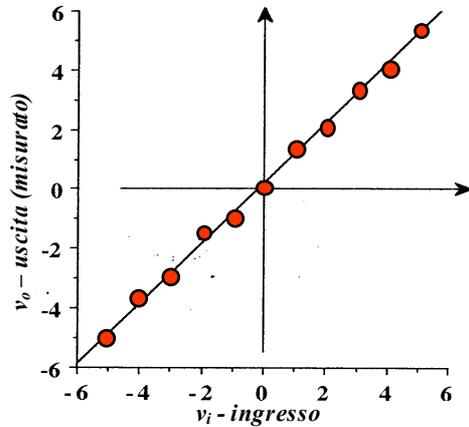
Consideriamo le seguenti letture effettuate applicando all'ingresso delle tensioni variabili da -5 a +5 volt con incrementi di 1 volt per ogni nuova misura:



v_i	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
v_o	-5.0	-3.6	-3.0	-1.6	-1.0	.2	1.4	2.0	3.4	4.0	5.4

UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Grafica delle misure



v_i	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
v_o	-5.0	-3.6	-3.0	-1.6	-1.0	.2	1.4	2.0	3.4	4.0	5.4

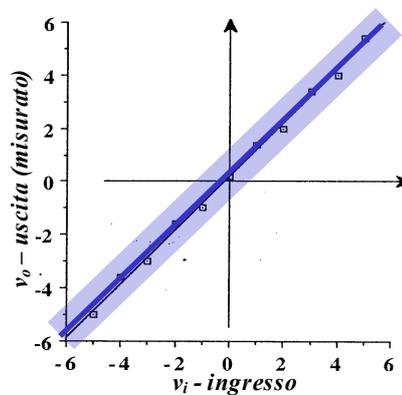
UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Retta di regressione

Le serie di coppie possono essere rappresentate con un grafico x - y , dove sull'asse x e y sono riportati rispettivamente i valori di ingresso e quelli misurati.

Utilizzando una tecnica di interpolazione dei dati, nota come **regressione lineare**, è possibile tracciare la retta che meglio descrive i dati, cioè la retta che spiega al meglio i valori v_o rispetto ai valori v_i rendendo più piccoli possibile gli scarti fra previsione ed valore osservato.

Notiamo che, calcolando la retta di regressione, otteniamo anche lo scarto quadratico medio (SQM) che mi dice quanto i punti sono mediamente distanti dalla retta.

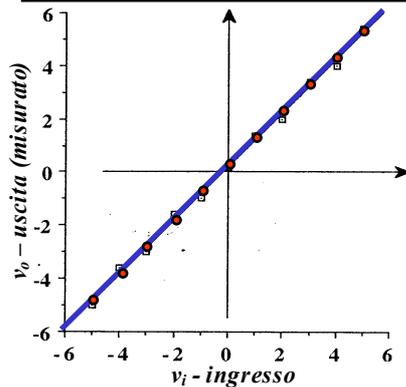


UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Misure stimate e retta interpolante

Sulla retta e' possibile calcolare dei nuovi punti u_o (misure stimate) ottenuti in corrispondenza dei valori sulla x .

v_i	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
v_o	-5.0	-3.6	-3.0	-1.6	-1.0	.2	1.4	2.0	3.4	4.0	5.4
u_o	-4.85	-3.84	-2.83	-1.82	-0.81	.2	1.21	2.22	3.23	4.24	5.25



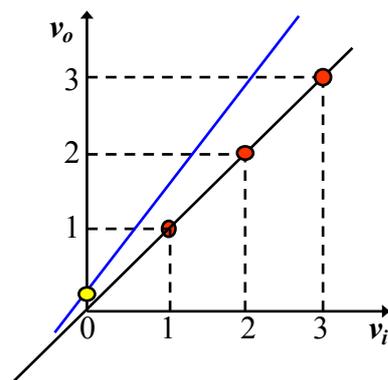
$$v_o = g v_i + k$$

$$v_o = 1.01 v_i + 0.2$$

La retta di regressione indica quindi il comportamento di quello specifico strumento nei confronti delle misure, e consente di sapere quale è il probabile valore ottenuto dallo strumento in corrispondenza di qualsiasi ingresso.

UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Retta di regressione: caso ideale e reale



Nel caso di uno strumento ideale l'equazione della retta di regressione

$$v_o = g v_i + k$$

dovrebbe essere

$$v_o = v_i$$

dove $g=1$, cioè la retta è a 45° , e $k=0$, cioè la retta passa per l'origine 0 .

In realtà la retta di regressione del mio strumento è

$$v_o = 1.01 v_i + 0.2$$

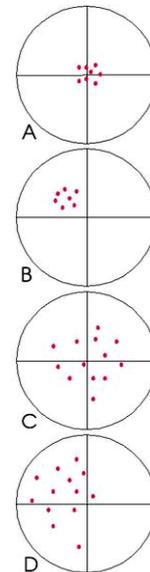
cioè ha una inclinazione $>45^\circ$ e incontra l'asse v_o nel punto 0.2 .

UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Accuratezza e precisione

Facciamo un test chiedendo a 4 persone di lanciare un certo numero di freccette verso un bersaglio.

Supponiamo che i risultati siano quelli rappresentati nelle figure A, B, C e D.



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

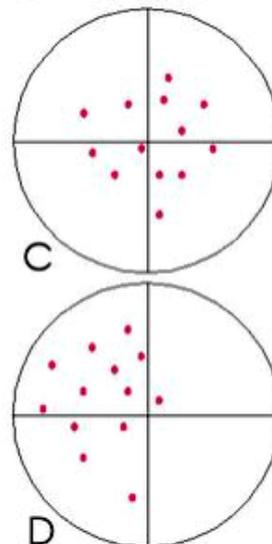
Accuratezza

Consideriamo ora il caso C e D.

Nel caso C, come in A, le freccette cadono “mediamente” attorno al **centro vero**; questa volta però i lanci colpiscono il bersaglio con una maggiore dispersione.

Anche nel caso D, come in B, le freccette hanno colpito il bersaglio “mediamente” lontano dal **centro vero**, e anche qui con maggiore dispersione.

Facendo riferimento a dove cadono le freccette rispetto al **vero centro**, come nel caso precedente possiamo ancora dire che il **caso C è più accurato del caso D**.



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Precisione

Riguardando i 4 casi si vede comunque che sono molto diversi tra di loro, anche se ho potuto dire che il giocatore A è più accurato di B, ed il giocatore C più accurato di D.

In più potrei dire che, considerando la distanza “media” dei lanci di ciascun giocatore dal centro vero, il giocatore A è accurato quanto il giocatore C, ed il giocatore B quanto D.

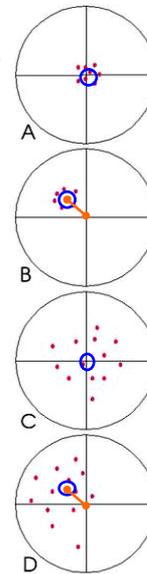
Prendiamo ora in considerazione, per ogni giocatore, la “dispersione” dei lanci rispetto alla loro “media”.

Con riferimento alle figure, qualitativamente si può dire che la dispersione è piccola nei casi A e B, ed è più grande nei casi C e D.

Questa **dispersione è strettamente legata al concetto di Precisione**, tanti più piccola è la dispersione tanto maggiore sarà la precisione.

Si può quindi affermare che i giocatori A e B sono più precisi dei giocatori C e D.

Da notare che nella definizione di Precisione non viene considerato il fatto che i lanci siano più o meno vicini al centro vero.



UNIPI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

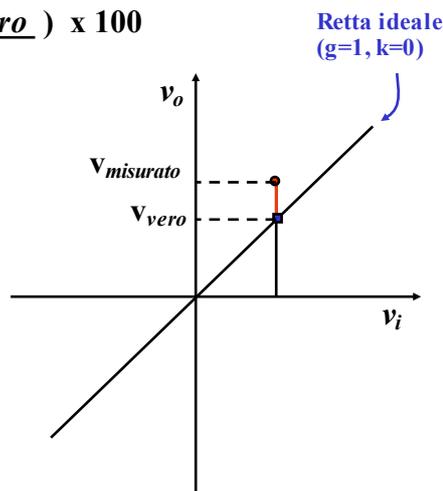
Accuratezza

L'accuratezza di una *singola misura* è definita come:

$$\left(\frac{V_{\text{misurato}} - V_{\text{vero}}}{V_{\text{vero}}} \right) \times 100$$

E' solitamente espressa in percentuale.

L'accuratezza è **una misura dell'errore totale**, indipendentemente dalle cause che lo hanno originato.



UNIPI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

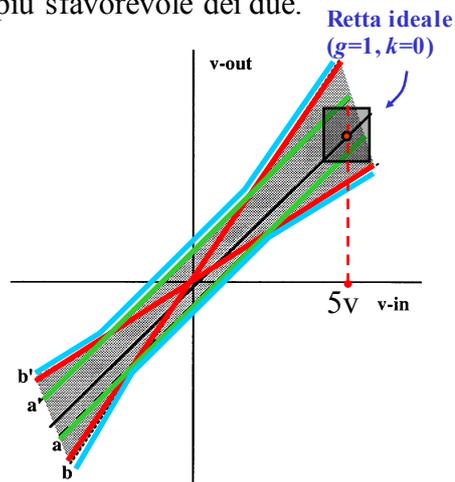
Accuratezza

Per uno strumento, l'accuratezza può essere espressa in % del **fondo scala** o in % della **lettura**, oppure può essere specificato che si deve utilizzare il valore più sfavorevole dei due.

Per esempio, diciamo che il nostro strumento ha una accuratezza del $\pm 1\%$ fondo scala.

Dato che i valori di ingresso variano fra $+5V$ e $-5V$, il valore di uscita garantito sarà compreso in un intervallo di 50 mV al di sopra o al di sotto del valore teorico.

Cioè ad una lettura di $1V$ corrisponderà una uscita certamente compresa fra 950 mV e 1050 mV .



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

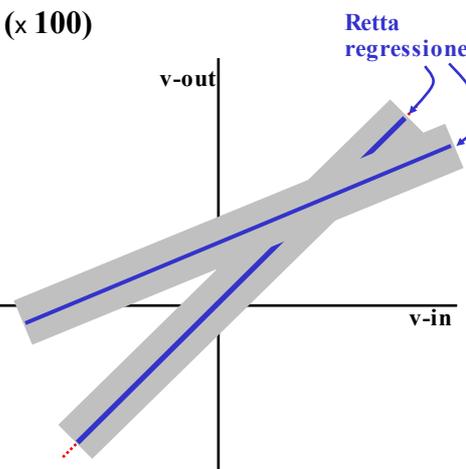
Precisione

A differenza dell'accuratezza, la **precisione** di una **singola misura** prescinde dal valore vero dell'ingresso, ed è definita:

$$\frac{V_{\text{misurato}} - V_{\text{medio}}}{V_{\text{medio}}} (\times 100)$$

dove per V_{medio} si intende la media di ripetute misurazioni nelle stesse condizioni.

Estendendo la definizione ad un insieme di possibili misure, possiamo ripetere per la precisione le considerazioni fatte per l'accuratezza, avendo ora come riferimento non la retta ideale ($g=1$ e $k=0V$), ma la retta ottenuta con la procedura di regressione descritta prima.



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

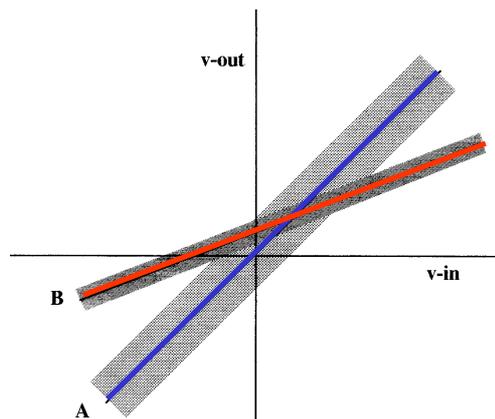
Accuratezza e Precisione

La *precisione* e l'*accuratezza* indicano due caratteristiche diverse dello strumento.

Nella figura sono le misure effettuate con due strumenti.

**Lo strumento A è
accurato ma poco
preciso**

**Lo strumento B è
preciso ma poco
accurato**



UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Risoluzione

E' definita come la più piccola quantità incrementale che può essere misurata con certezza.

La risoluzione è un indice della capacità di un sistema di discriminare fra quantità diverse ma prossime fra loro.



Per esempio, uno strumento con risoluzione a 3 cifre e mezza può visualizzare tre cifre complete, comprese tra 0 e 9, ed una "mezza" cifra, che mostra solo 1 oppure nulla (per esempio, il simbolo + e -).

Lo strumento potrà visualizzare valori positivi di 3 cifre (cioè da 0 a 999, e quindi 1000 valori) e valori negativi (cioè da -999 a -1, cioè 999 valori) per un totale di 1.999 valori.

Un modello a 4 ½ cifre avrà invece una risoluzione di 19.999 valori.

UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Riproducibilità (o ripetibilità)

E' un indice della capacità dello strumento di dare la stessa risposta a pari stimolo di ingresso.

E' simile alla *precisione*, ma mentre questa si intende riferita a misure ripetute nelle stesse condizioni e nello stesso tempo, la riproducibilità è normalmente riferita a *condizioni esterne diverse*.

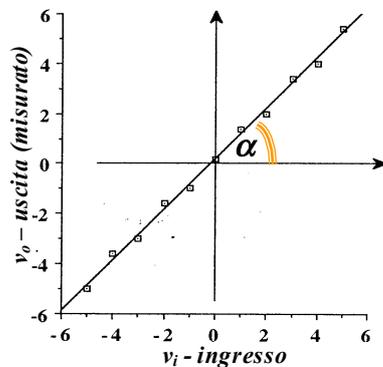
Se non specificato si intende la riproducibilità della misura *nel tempo*; si può però parlare di riproducibilità al cambiare dell'operatore, del tipo di elettrodi e così via.

UNIPI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Sensibilità statica

La sensibilità statica è sinonimo del guadagno g come è stato definito nell'equazione della retta di regressione.

Negli strumenti multi-scala in generale viene definita una sensibilità statica per ogni scala di lettura.



$$v_o = g v_i + k$$

$$g = \text{tang} (\alpha)$$

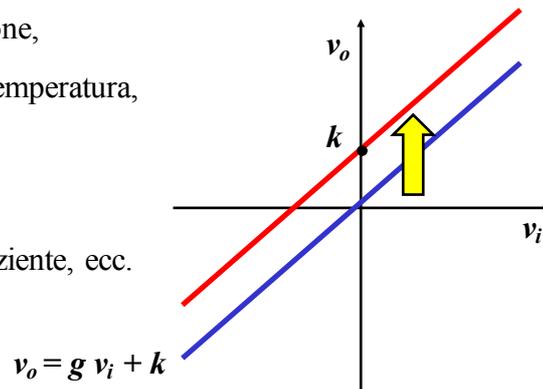
UNIPI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Deriva dello zero

Un cambiamento nel termine k al variare delle condizioni esterne viene indicato come *deriva dello zero o della linea base (drift)*.

I motivi più frequenti per questa deriva sono:

- errori di calibrazione,
- cambiamento di temperatura,
- isteresi,
- vibrazioni,
- movimenti del paziente, ecc.



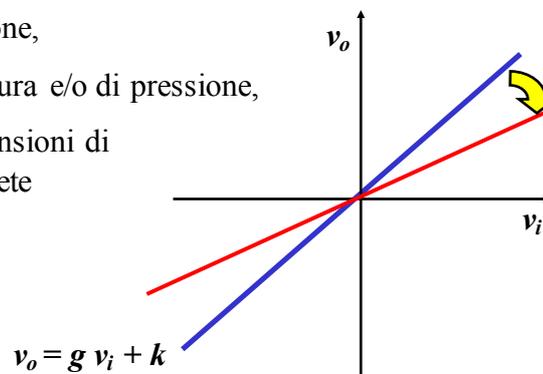
UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Deriva della sensibilità

Si chiama *deriva della sensibilità* un cambiamento del guadagno g .

I motivi più frequenti per questa deriva sono:

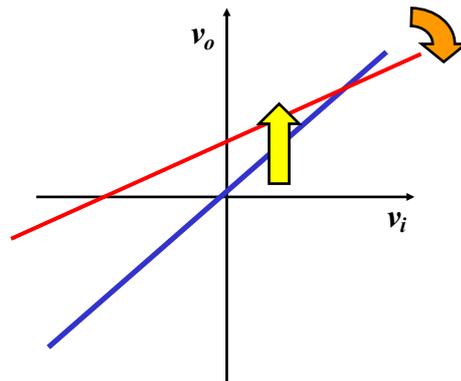
- errori di calibrazione,
- cambi di temperatura e/o di pressione,
- variazioni nelle tensioni di alimentazione di rete o interne, ecc.



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Deriva dello zero e della sensibilità

I due inconvenienti possono verificarsi congiuntamente provocando un effetto combinato delle due derive:

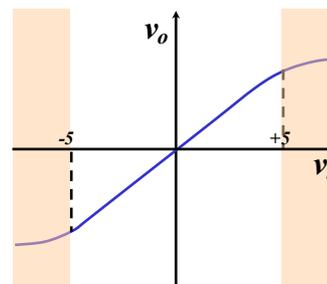
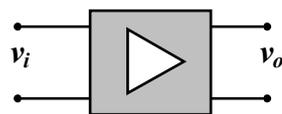


UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Campo di ingresso

L'intervallo (o gli intervalli) di ingresso capaci di fornire una risposta significativa sono definiti come **campo (range) di ingresso**.

Al di fuori di tale intervallo lo strumento può dare valori non significativi, o esibire una risposta non lineare, o comportarsi in modo non prevedibile o infine lo strumento può subire un danno.



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Impedenza di ingresso

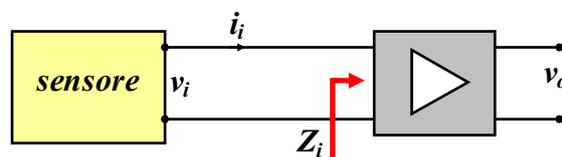
In generale si definisce come il rapporto fra la tensione all'ingresso v_i e la corrente i_i che fluisce nello strumento:

$$Z_i = v_i / i_i$$

La potenza assorbita è:

$$W_i = v_i i_i = v_i^2 / Z_i$$

Nella misura, si cerca di minimizzare l'interferenza dello strumento con la sorgente da misurare; si cerca di minimizzare la potenza assorbita massimizzando l'impedenza di ingresso.

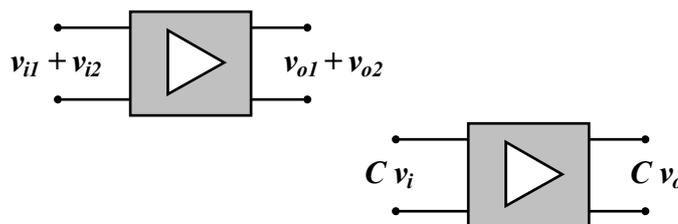


UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Linearità

Un sistema si dice lineare se sono verificate le condizioni:

- 1) se v_{o1} e v_{o2} sono rispettivamente le risposte a due diverse tensioni di ingresso v_{i1} e v_{i2} , la risposta all'ingresso ottenuto come somma delle 2 tensioni $v_{i3} = (v_{i1} + v_{i2})$ deve essere $v_{o3} = (v_{o1} + v_{o2})$;
- 2) se v_{o1} è la risposta all'ingresso v_{i1} , allora la risposta all'ingresso $v_{i2} = C \times v_{i1}$ deve essere $v_{o2} = C \times v_{o1}$

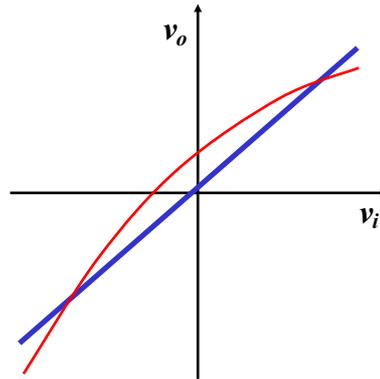


UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità

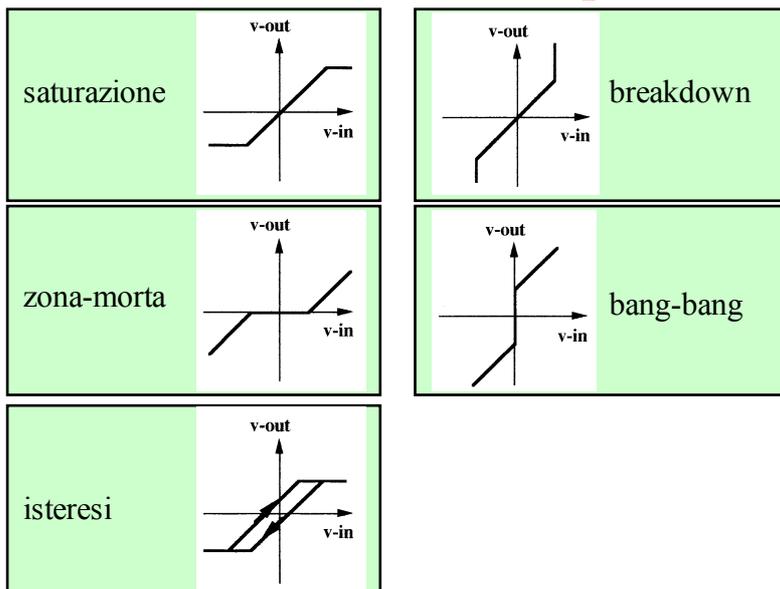
Come per l'accuratezza, la **non linearità** può essere definita in termini di deviazione massima espressa in forma percentuale o del valore misurato o del fondo scala o come caso peggiore fra i precedenti.

Si noti che la linearità presuppone uno strumento con range di ingresso e di uscita illimitati: per gli strumenti reali è implicito l'assunto che tutte le quantità definite rientrino nell'intervallo utile (range di ingresso).



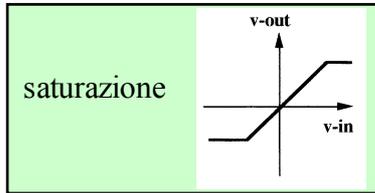
UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità: esempi



UNIPI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità: esempi

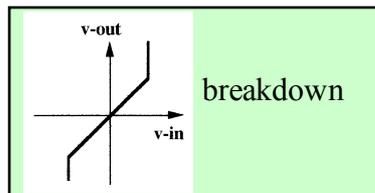


Tutti gli strumenti reali presentano **saturazione** al di fuori del range di lavoro. La saturazione si presenta come una progressiva o rapida riduzione del guadagno fino ad annullarsi quando l'ingresso supera gli estremi del range di lavoro ammesso (in qualche caso particolare il guadagno può anche divenire negativo).

La saturazione può anche essere una caratteristica intenzionalmente imposta allo strumento come protezione per sovrapuntaggi o altre situazioni potenzialmente pericolose per lo strumento stesso o alcune sue parti.

UNIFI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità: esempi



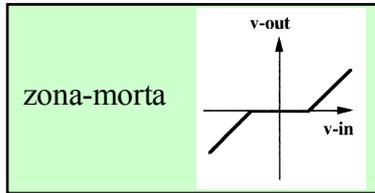
Il breakdown è per così dire il contrario della saturazione.

In questo caso il guadagno g aumenta progressivamente all'aumentare dell'input.

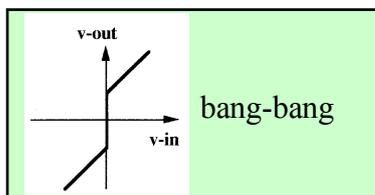
Tale comportamento è tipicamente mostrato dai componenti elastici quando si entri nella cosiddetta zona delle deformazioni permanenti, ed in effetti è più frequente nei componenti meccanici che non nell'elettronica (è tale però la risposta dei diodi Zener).

UNIFI-SM- Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità: esempi



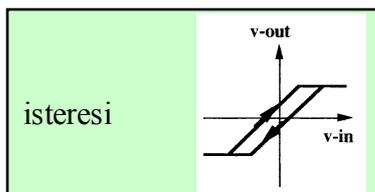
La zona morta corrisponde normalmente all'annullarsi di g per un certo intervallo dei valori di ingresso, tipicamente intorno allo zero come soglia di attivazione. Anche questo fenomeno è tipico dei componenti meccanici (per esempio ingranaggi), o quando vi sia da vincere un attrito statico.



Il bang bang corrisponde ad un brusco salto dell'uscita intorno ad un particolare valore dell'ingresso, tipicamente intorno allo zero. Questo fenomeno è tipico delle membrane, per esempio quelle che si utilizzano in alcuni tipi di trasduttori di pressione.

UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale

Non linearità: esempi



Si ha isteresi quando i valori di uscita per un dato ingresso sono diversi per ingressi progressivamente *crescenti* e *decrescenti*.

L'isteresi è talora un effetto desiderato (per esempio comparatori di voltaggio) per eliminare punti di instabilità o potenziali comportamenti oscillanti.

Un certo grado di isteresi è comunque inevitabile in tutti gli strumenti reali.

UNIFI-SM-Caratteristiche della strumentazione biomedicale