

MISURE MECCANICHE E COLLAUDI

Misurazione e Sperimentazione

Una misurazione è per definizione quando possiamo definire qualitativamente e quantitativamente un fenomeno o aspetti di un fenomeno. La misurazione viene fatta attraverso l'uso di grandezze fisiche ed ogni misurazione è caratterizzata da: specie, misura ed unità di misura.

La specie vuole indicare cosa andiamo a misurare in termini pratici e qualitativi del determinato fenomeno, la misura è un numero, definito su di una certa scala associato quindi al fenomeno stesso ed infine l'unità di misura indica l'unità di base della scala usata.

Se prendo come fenomeno, ad esempio, un corpo che si muove, posso misurare tre specie diverse, posizione, velocità e accelerazione, ognuno di queste tre misure è correlata ad un'apposita scala e unità di misura in funzione delle dimensioni del fenomeno.

Eseguire una misurazione, quindi significa avere a disposizione un dispositivo che attraverso una procedura specifica restituisca il valore attribuibile in istanti noti alle grandezze osservabili.

Le misurazioni sono poi suddivisibili in due diverse classi, **tradizionali** ed **esaustive**.

Le misurazioni tradizionali confrontano una grandezza fisica in esame con un'altra presa a riferimento. Un esempio di strumento che esegue una misurazione tradizionale è la vecchia bilancia a piatti dove su di un piatto si metteva l'oggetto di cui si voleva calcolare la massa e sull'altro si aggiungeva piano piano i pesi di riferimento presi come unità di misura. Quando i due piatti erano alla stessa altezza avevamo un'equivalenza delle masse e quindi conoscevamo il peso dell'oggetto in funzione di quanti pesini avevamo dovuto aggiungere sul secondo piatto. La bilancia che abbiamo appena descritto in realtà esegue una misurazione tradizionale a confronto diretto, ma esistono strumenti tradizionali che eseguono il così detto confronto differito. Un esempio sempre fatto relativo alla valutazione della massa di un corpo lo abbiamo con la bilancia a molla che basandosi sulla legge elastica e l'allungamento della molla muove un cursore analogico su di una scala graduata dove viene letto a risultato la massa dell'oggetto sul piatto. Per graduare la scala abbiamo dovuto pesare però a priori dei campioni in modo tale da poter così graduare la scala. La misurazione quindi che andiamo a fare è comunque un confronto che però eseguiamo prima. La procedura di confronto con i campioni per graduare una scala è detta **taratura**.

Una **misurazione esaustiva** invece porta ad assegnare dei numeri ad aspetti di un oggetto o di un evento in accordo a certe regole (qualsiasi purché non causale).

Detto questo dobbiamo fare una differenziazione molto importante. Una misurazione come abbiamo detto prevede di assegnare a un fenomeno (preso come oggetto dell'osservazione) un valore corrispondente che lo descriva qualitativamente. Una sperimentazione invece è qualcosa di un po' diverso. Fare una sperimentazione significa andare a cercare di studiare un fenomeno, immaginandosi quali possono essere le grandezze fisiche in gioco durante il processo e cercare di prelevare informazioni (ovvero delle misure) per riuscire a studiarlo.

Una misura, quindi, è diverso da una misurazione. Una misura è quindi un processo di prelievo delle informazioni e attribuzione di "numeri" per caratterizzare o descrivere certi aspetti del fenomeno in modo da descriverlo. Una sperimentazione è un processo sostanzialmente molto più lungo.

Si definiscono quindi due diverse figure professionali: il misurista che si preoccupa di come estrarre una misura sfruttando delle leggi fisiche e lo sperimentatore che vuole andare ad utilizzare invece questi strumenti per studiare determinati fenomeni ed elaborare delle procedure per eseguire delle misurazioni successive.

In sostanza, il misurista si preoccupa di come far funzionare, ad esempio, un termometro in modo tale che questo renda una misurazione il più istantanea, precisa e accurata possibile, mentre lo sperimentatore si preoccupa di dove collocare e quando eseguire una misurazione con un termometro all'interno di una turbina a gas per studiare il processo e capire come intervenire.

Lo sperimentatore deve quindi conoscere a priori qualcosa del suo fenomeno. Per studiare il fenomeno lo sperimentatore deve comprendere gli elementi e le grandezze fisiche che lo determinano, conoscere le loro caratteristiche e mutue relazioni.

A priori del fenomeno quindi lo sperimentatore deve avere in testa un **modello** ovvero un'astrazione del fenomeno che ci nasce dall'intuizione fisica delle cose ed attraverso i nostri sensi e gli strumenti di misura (estensione dei nostri sensi) andiamo ad eseguire le misure.

Grandezza fisica

Ma cosa è una grandezza fisica?

Una grandezza fisica è una classe di equivalenza di proprietà fisiche che possono essere misurate tramite un rapporto reciproco. Questo mi permette quindi come abbiamo già detto di andare a quantificare un fenomeno e di confrontarli dicendo quale dei due è più grande effettivamente.

Per determinare una grandezza fisica è però necessario definire come sappiamo un'unità di misura la quale non è altro che un'unità arbitraria presa come riferimento per tutti i fenomeni dello stesso tipo. Ad esempio, per quanto riguarda la massa, fino a poco tempo fa, si prendeva come riferimento il campione del Kg che non era altro che una sfera di platino la cui massa veniva assunta a priori come pari a 1 kg.

Ogni altra misurazione della massa, quindi, è un frazionamento o un multiplo di quel campione arbitrario. In realtà negli ultimi anni, dal 2019, il sistema internazionale di misura ha aggiornato tutte le grandezze campione per cui il kg non corrisponde più a tale campione.

Le grandezze si dividano poi in **estensive e intensive**. Le prime sono proprietà fisiche che dipendono dalle dimensioni del campione, tra queste ci sono quindi grandezze come la massa, il volume, la lunghezza e l'energia. Nelle grandezze intensive invece le proprietà fisiche di un materiale che non dipendono dalla dimensione del campione come la densità, la temperatura, la pressione etc.

Capire se una grandezza è estensiva o intensiva non è sempre banale però. Se considero ad esempio infatti la $\sigma_{rottura}$ come proprietà questa sembra essere indipendente dalle dimensioni, ma in realtà questa varia molto in funzione del processo produttivo dell'oggetto e dai difetti interni che questo può aver causato, per cui tanto è più grande un oggetto tanto più è probabile che questo abbia difetti che lo portino a rottura.

La resistenza massima è dunque una grandezza estensiva.

Misura

Concentriamo adesso invece il nostro interesse sulla misura. Per eseguire la misura occorre necessariamente avere i dispositivi per la misura (detti anche **catena di misura**), una procedura e un personale/laboratorio.

Ogni qual volta che andiamo ad eseguire una misura dobbiamo prima di tutto definire la procedura che andiamo ad utilizzare. Questo è molto importante in quanto in funzione della procedura che intendiamo usare possiamo ottenere risultati diversi. Nella maggior parte delle misurazioni quindi abbiamo una procedura normata dove al suo interno viene normata anche l'unità di misura da utilizzare e l'ambiente che deve rispettare certi standard. Come sappiamo fin dalle superiori poi, le unità di misura sono **fondamentali** o **derivate** le quali sono ottenute da una combinazione delle fondamentali. Se un laboratorio soddisfa tutti i requisiti di una norma viene accreditato dall'ente nazionale per eseguire misurazioni.

Le procedure non variano soltanto però in funzione della grandezza da misurare, ma anche in funzione delle dimensioni dell'oggetto o del fenomeno che andiamo a misurare. Un laboratorio può essere quindi abilitato a determinate prove, mentre gli può essere negato il riconoscimento finale.

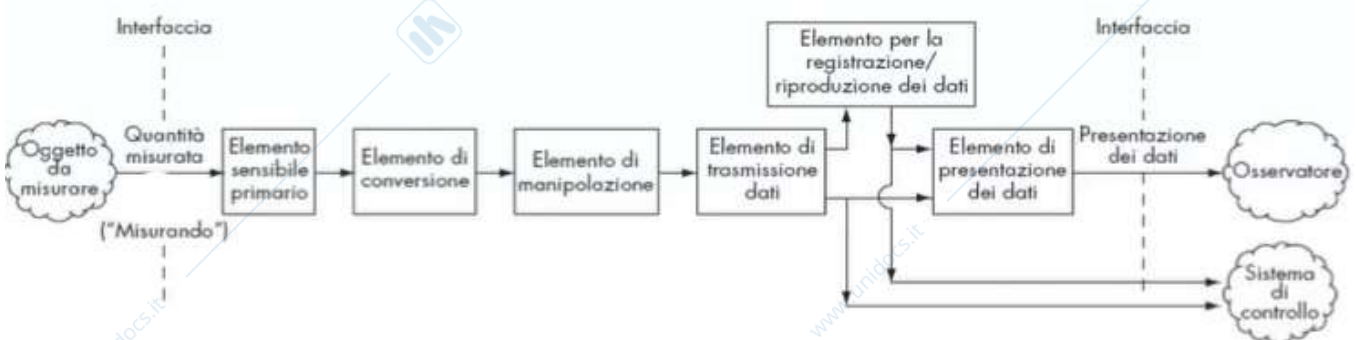
Nelle procedure reali vengono definite anche quelle che vengono chiamate procedure di prova, ovvero dei cicli di misurazione che vengono eseguiti a priori per stabilizzare tutte le possibili variabili in gioco durante il processo. In tale procedura andiamo quindi anche a raccogliere una serie di dati a priori che mi permettano di valutare gli errori assoluti e relativi che posso registrare durante la misurazione stessa.

Un laboratorio certificato può anche scrivere in autonomia delle procedure se gli viene richiesto di misurare un qualcosa che ancora non è stato normato. In queste procedure non normate viene richiesto anche di specificare la competenza del personale in quanto anche essa è oggetto di norma. In particolare, per fare certi tipi di misure è richiesta una certificazione di primo, secondo o terzo livello.

Un certificato di primo livello è limitato all'esecuzione della misurazione e basta, un certificato di secondo livello invece è autorizzato a scegliere la tipologia di procedura da utilizzare mentre un terzo livello è in grado ed è autorizzato di scrivere dei protocolli di misurazione propria.

Ovviamente esistono anche enti di certificazione nazionale del personale che si occupano di scrivere gli esami e rilasciare i patentini.

Per quanto riguarda la catena di misura, questa prende questo nome perché solitamente per effettuare una misurazione, raramente basta un dispositivo unico e anche dove questo è sufficiente in realtà noi possiamo individuare comunque diversi componenti funzionali.



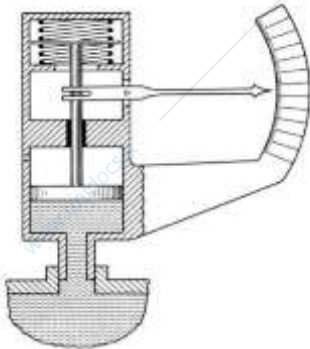
In una catena di misura possiamo quindi riconoscere più elementi funzionali che mi permettano di arrivare ad estrapolare l'informazione cercata. Analizziamo quindi un processo di misura generico, ad esempio la registrazione di una temperatura e determiniamo la ogni componente della catena di misura.

Il tutto parte ovviamente dall'oggetto da misurare (detto **misurando**), con il quale viene posto in contatto il **sensore primario** (elemento sensibile, ovvero che modifica una sua proprietà) che nel caso di una misura di una temperatura può essere ad esempio un filo con una resistenza (resistenza elettrica) variabile in funzione di T° . Il sensore deve indurre una modifica alla sua proprietà in funzione del fenomeno che vogliamo andare a misurare. Purtroppo, però nella maggior parte dei casi, sono più di uno i fenomeni che interagiscono e modificano una proprietà del sensore per cui dobbiamo tenere conto di quelli che vengono chiamati **effetti parassiti** i quali sono indesiderati e vanno limitati. Questa variazione di resistenza deve essere poi manipolabile per cui dobbiamo tramutarla in qualcos'altro. Necessitiamo di quello che viene chiamato **trasduttore ovvero un elemento di conversione**. In questo caso possiamo far passare nel filo una determinata quantità di corrente e registrando la caduta di potenziale determinare la resistenza istantanea del filo. Il trasduttore viene seguito quindi da un **manipolatore** che amplifica il segnale il prima possibile in

modo tale che l'informazione risulti più forte e soffochi disturbi ed interferenze. Il segnale viene a seguito **processato tramite appunto un processore a livello hardware con vari filtri, passa alto o passa basso oltre che a convertire un segnale da analogico a digitale.** Una volta digitalizzato il risultato viene visualizzato a schermo o registrato cartaceo.

Un altro esempio banale può essere il termometro a bulbo. In questo caso il sensore primario è il mercurio, che all'aumentare della temperatura aumenta il proprio volume. Il trasduttore in questo caso, quindi, è il capillare di espansione.

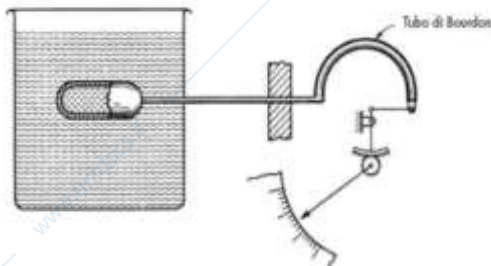
Esempio: Trasduttore di pressione



Questo è lo schema di funzionamento di un vecchio apparato meccanico analogico per la misurazione della pressione. Come possiamo vedere lo strumento presenta una scala graduata e va quindi ad eseguire una misura diretta (in quanto non usa nessuna relazione specifica per funzionare) di tipo differito.

Lo strumento è composto da un carter forato per permettere l'ingresso del fluido nella camera di scorrimento del pistone che funge da elemento sensibile. La pressione agente sul pistone lo fa risalire all'interno del cilindro andando a comprimere la molla sul lato opposto tramutando l'informazione pressione in una forza. La molla, quindi, agisce tra trasduttore della misura. Il tutto è collegato poi ad un'asticella piuttosto che lunga che anche per minimi spostamenti dell'albero, amplifica il segnale restituendo delle oscillazioni sensibili anche ad occhio nudo sulla scala graduata. La lancetta funge quindi da modellatore mentre la scala graduata da visualizzatore.

Esempio: Termometro a pressione



Funzionamento simile è quello del termometro a pressione. In questo caso un bulbo con all'interno del gas viene messo in contatto con l'oggetto di cui vogliamo calcolare la temperatura.

Il bulbo quindi, che funge da elemento sensibile, porta in equilibrio termico il gas con il misurando, facendo variare però la pressione del gas. Il gas, infatti, riempie già interamente il tubo e quindi ha un volume costante che permette la variazione solo della variabile termodinamica pressione. In questo modo quindi il tubo di Bourdon (chiamato così in onore del suo inventore) funge da trasduttore tramutando l'informazione temperatura in pressione. La pressione poi va ad agire su di un sensore meccanico nella parte terminale del tubo e questo porta al movimento di una lancetta che anche qui funge da modellatore. La misura viene poi letta sulla scala graduata (visualizzatore).

Campi di applicazione dello strumento di misura

Tutto l'ambito ingegneristico e scientifico si basa in parte e fa molto uso di misurazioni. I motivi per cui eseguirla però variano da situazione a situazione. **Una misurazione prende il nome di misura di laboratorio se si cerca di andare a misurare una specifica qualità di un fenomeno e di un oggetto con fine ultimo la progettazione, la ricerca o lo sviluppo.**

Prende il nome invece di **misura di controllo** ogni qual volta viene usata per generare un feedback, ovvero **mantenere il controllo in retroazione della macchina.** Tutte le macchine a controllo numerico, ad esempio, funzionano a questo modo, assumendo uno spostamento, verificando la posizione iniziale, eseguendo lo

spostamento, misurare lo spostamento per vedere se combacia con quello in input. In questo caso la misura si dice di controllo.

Le **misurazioni di monitoraggio** di un sistema invece vengono fatte per tenere sotto controllo un determinato processo o operazione. Qualora insorgano poi dei malfunzionamenti, per identificare delle anomalie e le sue cause si eseguono le **misure di diagnostica**.

Le misurazioni fatte fino ad adesso sono di ambito prettamente ingegneristico, ma anche in ambito scientifico eseguire la misurazione è fondamentale per aiutare l'**identificazione dei modelli**, altro campo di applicazione delle misurazioni.

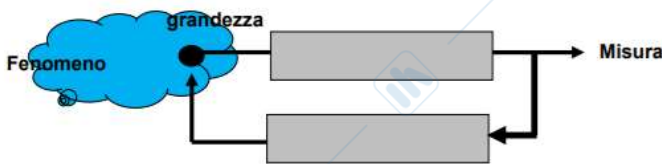
Ogni tipologia di misura richiede quindi però un'apposita procedura che serva per ottenere la misurazione o l'effetto desiderato.

Una misura, ad esempio, ha una catena detta **ad anello aperto** in quanto una volta acquisita l'informazione questa viene letta e registrata senza aver alcun tipo di retroazione.

→ MISURA DI USUATO



Un **controllo** invece ha quella che viene chiamata **catena di misura ad anello chiuso** per cui in funzione della misura, ovvero il feedback ricevuto, si ottiene una risposta diversa. Un esempio è il cruise control in una macchina, dove impostata una velocità, in funzione della velocità misurata si va a gestire il quantitativo di alimentazione del motore.



Regolatori di questo tipo usano poi tecnologie basate sulla derivata, per cui vanno a misurare la variazione di velocità imponendo che una volta raggiunta quella indicata del cruise control la variazione si minimi. Se infatti inserissimo un

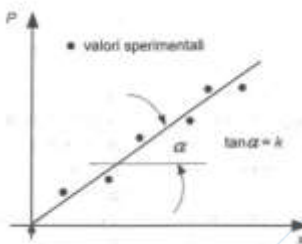
controllo a feedback basato sulla misura semplice, a causa del range di errore consentito alla misurazione si innescerebbe una gestione oscillatoria dell'alimentazione poco piacevole.

Per un **monitoraggio** una diagnostica invece la misurazione è **ramificata** e mai singola in quanto ovviamente tanto più è complesso il fenomeno tanti più parametri avrà bisogno per monitorare il sistema.



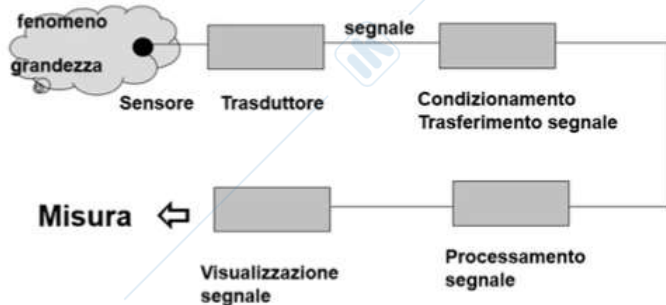
Infine, per quanto riguarda la misura per modello, questa è in realtà molto semplice e ci basti pensare alla legge di Hooke. La legge elastica di una molla venne infatti scoperta in seguito alla raccolta di dati eseguendo un'approssimazione dei dati sperimentali.

Le misure possono eventualmente confermare poi un modello o aiutarne la loro nascita (come nel caso della legge elastica).



Le catene di misura e i suoi componenti - I sensori/trasduttori/strumenti

Nelle catene di misura gli elementi sempre presenti sono riportati qui nello schema e rappresentano sia i passaggi che gli strumenti di cui abbiamo bisogno per effettuare la misurazione.



Il primo elemento, ovvero la grandezza da misurare però, è l'unico punto fisso in quanto il resto può essere variato nell'ordine. Passiamo quindi ad analizzare più nello specifico i componenti.

I sensori sono il primo elemento di una catena di misura. Essi entrano direttamente a contatto con il fenomeno fisico e la grandezza che vogliamo misurare. Questi

possono essere poi generalmente di due tipi, **trasduttori attivi e passivi**.

Un **trasduttore attivo** utilizza direttamente l'energia assorbita o consumata dal processo di misurazione per ottenere un segnale di misura.

Un **trasduttore passivo** al contrario per funzionare deve prelevare energia da una fonte esterna per ottenere un segnale di misura.

La scelta della tipologia di trasduttore da usare dipende dall'importanza della misura che dobbiamo effettuare, per cui se voglio avere sempre disponibile i dati di quella misura o meno. In alcuni casi un trasduttore passivo è addirittura vietato per legge in quanto potrebbe mettere a rischio le persone o il funzionamento di una macchina (ad esempio non posso misurare la temperatura interna dei condotti di gas metano usando un termometro a resistenza elettrica in quanto esploderebbe tutto).

Un'altra classificazione dei trasduttori li divide in funzione della legge fisica che usano per ottenere i dati in questione.

Alcuni trasduttori funzionano perché sono in grado di leggere una **trasduzione meccanica** sfruttando la legge di Hooke, di Newton. Questi misurano quindi spostamenti, deformazioni, forze, coppie, velocità ed accelerazioni.

Si dicano ad **effetto meccanico capacitivo** invece se sfruttano effetti di distribuzione di carica. Ad esempio, su di un'armatura le cariche vanno a distribuirsi in condizioni standard con una determinata configurazione, se tale configurazione cambia cambia anche la distribuzione delle cariche e quindi possiamo inviare un segnale diverso in funzione dello stato del sistema.

$$C \propto \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

dove ε è la costante piezo elettrica

A è l'area delle armature del condensatore ed d la loro distanza

Si dicano ad **effetto meccanico resistivo** se invece sfruttano la variazione di resistenza di un conduttore al variare di temperatura e forma.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

Quelli visti adesso sono in ogni caso i più comuni, si possono usare però anche trasduttori **induttivi, piezoelettrici, ottici, sonori e a riluttanza magnetica.**

Un trasduttore quindi non solo deve però registrare il dato, ma deve anche essere in grado di amplificare il segnale per renderlo leggibile. Uno degli strumenti meccanici più famosi per amplificare il segnale è il calibro. Il calibro si basa sul **principio del Nonio** per cui si amplifica il segnale sfruttando delle scale regolate superiormente e inferiormente ricavando la misura dalla lettura delle scale. Questo sfrutta lo scorrimento relativo dei cani sul corsoio per cui è un esempio chiaro di trasduttore meccanico.

Un trasduttore/sensore in genere è un oggetto poco flessibile, nasce per uno scopo e fa solo quello per tutta la sua. In questo caso viene descritto quindi come **rigido** e indicato come componente **hardware**.

Nel corso degli ultimi anni però, sono nati anche oggetti programmabili per cui questi vengono descritti come **flessibili** e prendono il nome di **software**. In alcuni casi questi diventano talmente avanzati da essere anche intelligenti e adattabili per cui vengono chiamati sensori **smart**.

L'unione di sensore e trasduttore (il cui compito è captare e amplificare il segnale) **forma lo strumento**. Lo strumento è quindi un dispositivo, ovvero un apparecchio che svolge una determinata funzione. In particolar modo uno strumento di misura capta un **segnale**, ovvero una modulazione di una grandezza fisica tale da veicolare un'informazione.

Gli strumenti di misura vengono poi classificati in funzione di:

- **range:** valore massimo e minimo di ingresso tollerabile dallo strumento.
- **span:** larghezza massima del range, ampiezza massima del segnale misurabile
- **risoluzione:** minimo incremento in cui corrisponde una variazione della misurazione
- **caratteristica:** funzione di trasferimento/legge fisica di corrispondenza tra il fenomeno e la misura.

In particolar modo l'ultima caratteristica è fondamentale e ci dice che, **una funzione caratteristica descrive anche un grafico**, alla cui derivata a una pendenza variabile in funzione della sensibilità, per cui strumenti più sensibili sono quelli con derivata della curva caratteristica più pendente. Va da se che **la sensibilità si definisce come la derivata della curva caratteristica.**

La sensibilità si divide in sensibilità assoluta e relativa, dove si definisce assoluta se definita direttamente dalla derivata o relativa se fa riferimento alla scala di misura.

La sensibilità viene poi influenzata dalla **soglia** ovvero il valore minimo che riesco a misurare e dalla **saturazione** ovvero la variazione della sensibilità per alti ingressi.

Le catene di misura e i suoi componenti – Il segnale

Come abbiamo detto il segnale è un'informazione che captiamo e che deve essere amplificata fin tanto che l'informazione possa essere veicolata.

Un segnale è caratterizzato da un'**entità della grandezza**, che nel caso di un segnale o informazione periodica si tratta di ampiezza di segnale.

La variazione della grandezza invece descrive la forma del segnale e da cosa dipende ad esempio il tempo. Nella lettura dei segnali variabili nel tempo bisogna fare particolarmente attenzione però a cosa leggo. Molti segnali sono estremamente variabili per cui si va a calcolare nella maggior parte dei casi, dei valori medi di misurazione. Sono molto più pratici quindi le **grandezze stazionarie o tempo invarianti.**

Le grandezze tempo invarianti sono sensibili alla grandezza da misurare, insensibili ad ogni altra entità e trasparenti sul fenomeno in osservazione.

In segnale dobbiamo poi tenere di conto dell'impedenza, ovvero il fattore di carico dello strumento che perturba la catena di misura e ne altera la significatività. Solitamente l'impedenza è molto alta in ingresso a uno strumento e basse in uscita.

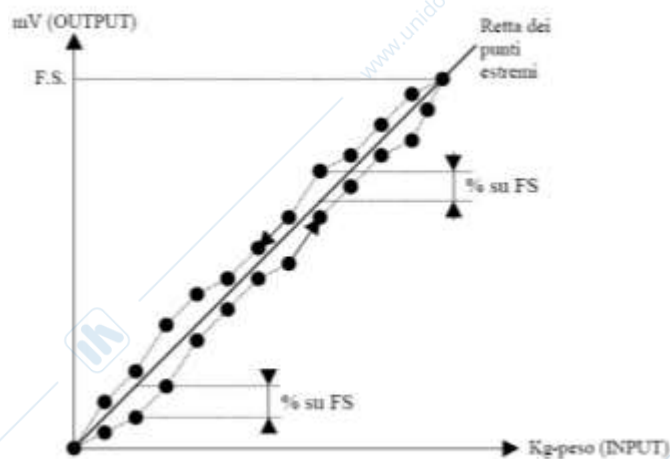
La linearità

Come sappiamo se andiamo a fare una misura di una grandezza fisica, questa nella maggior parte avrà un andamento lineare che ci aspettiamo venga rispettato. Ad esempio, preso un dinamometro, a data la massa andiamo a misurarne il peso in Newton sfruttando la relazione:

$$P = mg$$

Mi aspetterei quindi una linearità dei dati per cui se vado a raddoppiare la massa, raddoppio il peso.

Eppure, se vado a misurare diverse volte quello che vedo è che, anche per valori di x uguali, per cui per la stessa massa, quello che ottengo è la seguente:



La linearità quindi ideale come possiamo vedere non viene assolutamente rispettata e questo è dovuto a diversi fattori ovviamente tra cui l'errore nella misura, la taratura sbagliata e la propagazione dell'errore di misura sulla massa. Supponiamo poi di fare una serie di misurazioni per arrivare ad una valutazione complessiva di g facendo una progressione della massa e poi una regressione.

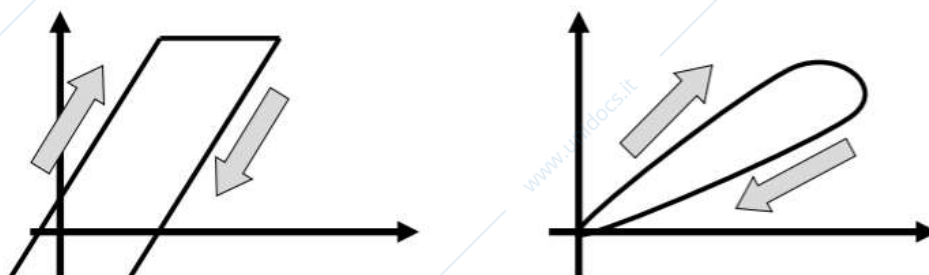
Una relazione presente però come possiamo vedere c'è ovviamente per cui dobbiamo considerare una forma di linearità. **Si definiscano quindi:**

- **linearità dei punti estremi:** è costituita da **due valori** calcolati rispettivamente sulla **successione di ingresso crescente e di uscita decrescente**, ciascuno dei quali rappresenta la massima deviazione percentuale rispetto alla retta passante per i punti estremi.
- **linearità media:** anche questa è costituita da due valori e calcolati rispettivamente sulla **successione di ingresso e di uscita**, ciascuno dei quali rappresenta la deviazione percentuale rispetto alla mediana che costituisce l'asse della fascia rettilinea.
- **linearità ai minimi quadrati:** la linearità ai minimi quadrati prevede di utilizzare la somma dei **quadrati per valutare lo scostamento dal valore ideale e quindi l'errore**, in modo tale da aver solo valori positivi che si possono sommare e dare un'indicazione realistica dell'errore commesso. La linearità ai minimi quadrati **rappresenta quindi una coppia di valori calcolati rispettivamente sulla successione di ingresso crescente e decrescente d'uscita**, come una **max deviazione percentuale rispetto alla retta che minimizza la sommatoria dei quadrati degli scostamenti**.

Le percentuali in questione sono tutte calcolate rispetto al fondo scala (F.S) ovvero il valore massimo registrabile dallo strumento stesso.

Isteresi

Come possiamo vedere anche nelle misurazioni prima effettuate, abbiamo una notevole differenza tra le grandezze in ingresso e in uscita. Questo effetto è dovuto al fatto che abbiamo diversi comportamenti da parte dello strumento, il quale solitamente nelle prime misurazioni deve fare i conti con inerzia, attriti e messa in regime delle componenti (per altre forme di misurazione invece abbiamo da considerare altre caratteristiche come l'energia di primo distacco eccetera). Queste interferenze fanno sì che generalmente la curva di misurazione abbia un andamento del tipo in figura.



Questo comportamento della curva di misura prende il nome di **isteresi**.

Viene quindi misurato un valore di isteresi che indica l'attitudine di un trasduttore a produrre la stessa misurazione sia nel caso che l'ingresso di riferimento sia raggiunto da valori inferiori sia che venga raggiunto da valori superiori.

L'isteresi è quantificata come il valore massimo della differenza tra l'uscita assunta nella fase crescente e l'uscita assunta nella fase decrescente in corrispondenza della stessa grandezza di ingresso.

La deriva

La deriva è un fenomeno per il quale andiamo a misurare la deviazione che abbiamo sulle misurazioni con la stessa variabile in ingresso per cui, inserisco un certo valore x e ottengo la prima volta un valore y , mentre la seconda un valore y' .

La deriva ha poi due classificazioni. Si dice **deriva a 0** quella forma di deriva per cui, anche senza grandezza in ingresso lo strumento legge un valore costante per cui tutte le misure fatte risulteranno sballate di tale valore. Si parla invece di **deriva di sensibilità** se e solo se tra una misurazione e l'altra abbiamo una variazione sensibile di sensibilità. Quest'ultima è ovviamente funzione del tempo.

Ripetibilità

La ripetibilità di una misurazione indica come al variare dell'ingresso possiamo ottenere diversi valori in uscita e quanto è ampia questa variazione in uscita.

Tanto è più piccola la variazione tanto maggiore sarà la ripetibilità di uno strumento. Se la ripetibilità cambia poco o è costante nel tempo, lo strumento si dice stabile.

La ripetibilità ha una formula quindi che ne permette l'espressione:

$$Rip_1 = \frac{misura_{max} - misura_{min}}{F.S.} \%$$

oppure come:

$$Rip_2 = \frac{\text{Massima deviazione} - \text{Valor medio}}{F.S.} \%$$

Una misura ripetibile ovviamente non significa che sia accurata o fedele. Il concetto di **accuratezza** è ben diverso.

L'accuratezza

L'accuratezza di una misurazione indica quanto questa è effettivamente vicina al valore reale. Esprime l'assenza di errori della misura per cui questa è tanto maggiore tanto quanto la media delle misure si avvicina davvero al valore vero della grandezza.

Vedremo meglio poi, ma l'accuratezza viene anche definita dal rapporto tra **errore sistematico e grandezza**.

L'accuratezza si esprime dunque come:

- la percentuale sull'uscita di fondo scala
- la percentuale sulla lettura d'uscita
- il valore assoluto espresso nell'unità di misura dell'ingresso.

Precisione

Il concetto di precisione è qualitativo. Innanzitutto, potremmo partire con il dire che ovviamente, uno strumento per esser preciso deve avere quanto meno le due caratteristiche precedenti per cui essere ripetibile e accurato. Se è ripetibile e accurato allora può essere anche preciso. Il problema adesso risiede nella cosa vado a misurare. Non possiamo infatti considerare uno strumento preciso a prescindere da quello che dobbiamo misurare. Ad esempio, è chiaro che fare una misura con un errore massimo di mezzo metro per un GPS e per un laser da edilizia che misura le dimensioni delle stanze è ben diverso.

Uno strumento quindi si dice preciso se è accurato, ripetibile e se presenta un rapporto % tra l'errore massimo introdotto dallo strumento e la misura del fondo scala, inferiore all'1%.

Per aumentare la precisione di uno strumento purtroppo non possiamo però fare molto se non che intervenire sulla **taratura**, ovvero andiamo ad eseguire una calibrazione dello strumento che ci permetta di **determinare la funzione di trasferimento effettiva**.

La taratura viene effettuata la prima volta in uscita dalla fabbrica e poi ripetuta periodicamente ed obbligatoriamente dai laboratori che eseguono brevetti.

La taratura avviene dando degli **ingressi campione**, ovvero noti e aspettando il tempo necessario alla stabilizzazione posso poi andare a verificare se ottengo il valore che mi aspettavo.

Questa tipologia di taratura si chiama **taratura statica**.

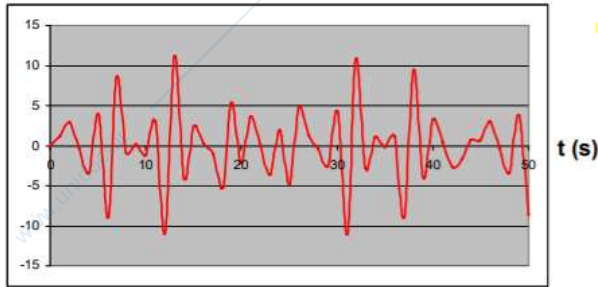
Acquisizione di un segnale variabile nel tempo

Supponiamo di voler misurare una grandezza variabile nel tempo in maniera casuale, ad esempio vorrei valutare la temperatura della stanza durante l'arco di una giornata. Appare chiaro che **eseguire una semplice misurazione e considerare la valida per tutta la giornata non ha molto senso, piuttosto dovremmo eseguire nel corso del tempo più misure** ricavando così un grafico del segnale che riceviamo e definire un andamento di temperatura. La domanda che dobbiamo farci quindi è: **con che intervalli andiamo a misurare la temperatura?**

In funzione di intervallo di tempo tra misurazione e misurazione, dell'accuratezza dello strumento possiamo ottenere dunque un grafico del segnale. Tale grafico ovviamente non sarà nel dominio dei numeri reali in

quanto però le grandezze sono tutte approssimate ad un numero finito di cifre decimali e campionate in momenti diversi, avremo piuttosto una serie di puntini diversi. Possibilmente si ricorda poi che la nostra misurazione deve essere in ogni caso:

- sensibile al segnale
- insensibile alle perturbazioni
- acquisire il segnale senza alterazioni
- prendere un ingresso e restituire un'uscita analogica
- trasparente per il fenomeno in osservazione



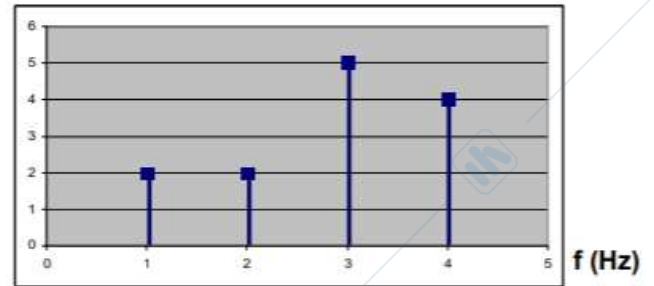
Dominio del tempo

Un segnale quindi che leggo prima nel dominio del tempo, lo vado a leggere adesso nel dominio della frequenza andando a tracciare in funzione di essa di un secondo grafico il valore dell'ampiezza.

Il segnale nel dominio della frequenza è chiamato **spettro di frequenza**.

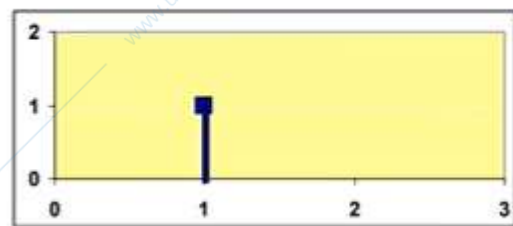
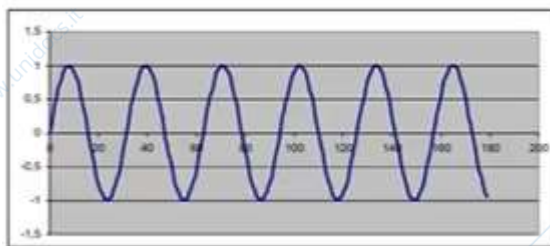
Si evidenzia due casi particolari per cui, una sinusoide avendo sempre stessa ampiezza e stessa frequenza avrà uno spettro del tipo:

Per sapere ogni quanto andare ad eseguire la misurazione però si richiama prima un concetto, la **trasformata di Fourier**. Tale relazione ci consente di approssimare un qualsiasi segnale variabile nel tempo come la sommatoria di una serie di funzioni sinusoidale.



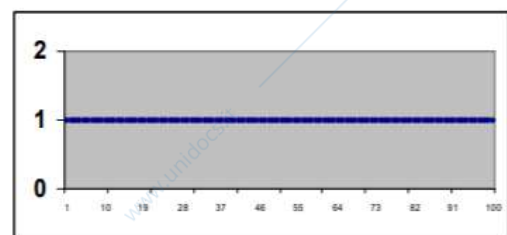
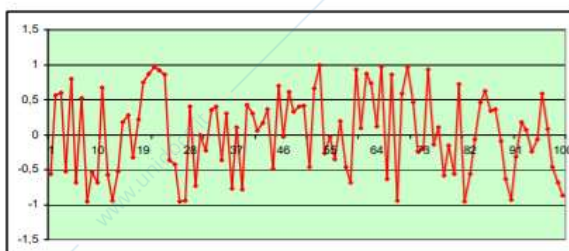
Dominio della frequenza

Sinusoide



Quando invece abbiamo un segnale che presenta a tutte le frequenze possibili, ma ha sempre la stessa ampiezza siamo nel caso di un **rumore bianco**.

Rumore bianco



Un segnale che ha molte frequenze distinte si dice un segnale a banda larga, mentre si dice segnale a banda stretta un segnale con poche variabilità di frequenza.

Per passare da un segnale nel dominio del tempo in uno spettro di segnale abbiamo:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{jk2\pi f_0 t}$$

che riportata in integrale da:

$$\text{Trasformata: } x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

$$\text{Anti trasformata: } x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) e^{+j2\pi f t} df$$

Un segnale, arrivato nel sensore, può essere anche eventualmente filtrato in funzione della frequenza sfruttando due tipologie di filtri, il filtro passa alto e quello passa basso, che vanno rispettivamente a tagliare le tutto il segnale che supera o sta sotto a una determinata frequenza di soglia. Il segnale attraverso un filtro può o essere tagliato di netto o diminuire/ aumentare progressivamente con una pendenza costante .

Risposta di uno strumento

Quando abbiamo a che fare con delle misure dinamiche, oltre alla taratura statica occorre anche una **taratura dinamica** che mi indica il tempo di risposta di uno strumento al fenomeno. La risposta come abbiamo detto, essendo quello che sto studiando un fenomeno transitorio, posso scriverla sia in funzione dell'ampiezza che della frequenza. In funzione della risposta che abbiamo al variare del impulso possiamo definire quindi la **prontezza e la fedeltà di uno strumento**.

Per tarare dinamicamente un accelerometro, ad esempio, per registrarne la prontezza e la fedeltà, sfruttando un martelletto da laboratorio appositamente calibrato proviamo a dare un impulso secco e deciso sfruttando poi il segnale.

Si indica poi con **impulso** un segnale periodico che assume per un istante un certo valore per poi tornare a 0 mentre a contrario dice **segnale a gradino** se cambia valore da 0 a X istantaneamente.

Gradino



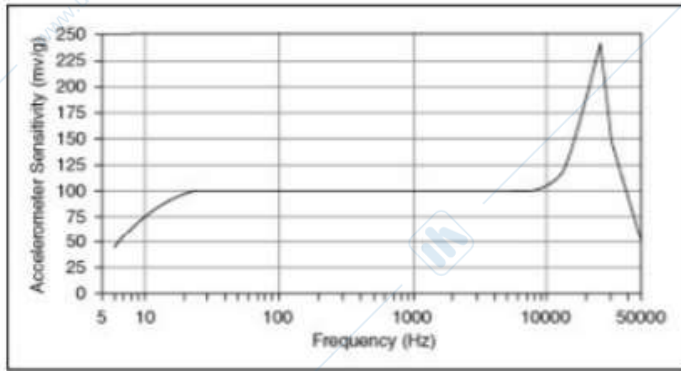
Impulso



Nella taratura dinamica posso utilizzare entrambi per cui definirò una risposta ad impulso e una a gradino.

Il primo lo uso per determinare la prontezza mentre il secondo lo tendo ad usare per vedere

la gamma di frequenze che il mio strumento legge. In realtà la variazione istantanea come sappiamo non esiste per cui avremo delle inclinazioni ad entrambi i tipi di sollecitazione. La sollecitazione a gradino come posso immaginare tenderà ad avere una salita leggermente pendente per poi oscillare un po' prima di stabilizzarsi. Un impulso invece farà una sorta di "spillo" ma ovviamente non può avere un'accelerazione infinita.



Conversione analogico-digitale di un segnale tempo variabile

Un altro aspetto fondamentale di una misurazione è la conversione di un segnale, da analogico a digitale. Un segnale analogico a gli occhi di un software di lettura può anche essere approssimato come continuo, ma per riportarlo in digitale è necessario assolutamente campionarlo. Il campionamento è purtroppo poi l'operazione più difficile da fare in quanto dobbiamo capire ogni

quanto andare a campionare il segnale. Se un segnale fosse lineare ad esempio mi basterebbe avere anche solo due punti, ma se un segnale è estremamente variabile allora siamo in difficoltà. Un altro aspetto importante da considerare è l'uso che vogliamo farne della misurazione in questione. In funzione quindi di questi due aspetti andiamo a valutare il nostro.

La conversione avviene in due step e componenti hardware distinti. Il primo è un campionatore, ovvero uno strumento che dato un segnale analogico lo discretizza nel tempo e li passa al quantizzatore che poi li trasforma in numeri.

Ma come indico la giusta frequenza di campionamento del campionatore? Esiste il così detto teorema del campionamento che dice che, per non perdere informazioni utili al segnale e limitare quelle ridondanti, devo andare a campionare con una frequenza esattamente doppia alla massima frequenza.

Se non rispetto questa legge perdo informazioni utile e questo errore prende il nome di aliasing.

Eseguito il campionamento devo andare ad eseguire la quantizzazione. Per tornare in digitale però devo fare ovviamente una conversione binaria, la cui accuratezza dipende dal numero di bit che ho a disposizione per la rappresentazione. Solitamente il quantizzatore per limitare gli errori va a prendere il range massimo dello strumento e lo divide in livelli di quantizzazione che sono tanti quante le cifre che i bit gli permettano di rappresentare. Ad esempio, un sistema a 8 bit garantirà 256 livelli. Ogni livello avrà quindi a sua volta un range massimo di ampiezza. Il quantizzatore quindi a questo punto osserva in che livello cade la misura campionata e ne valuta la grandezza digitale andando a moltiplicare il range di livello per il numero di livelli stessi. Vediamo comunque come l'operazione porti degli errori, ma se rispettiamo il livello di campionamento e abbiamo un buon numero di bit possiamo minimizzare l'errore.

Scelta di uno strumento

Va da se che uno strumento affinché possa essere ritenuto un buono strumento di misura deve avere delle competenze specifiche ad avere:

- un range di misura adatto
- una compatibilità con la misura che vogliamo eseguire
- facile nell'uso
- maneggevole
- utilizzabile nell'ambiente di misura
- un costo e un' assistenza ridotta

Oltre che a garantire delle prestazioni adeguate in termini di:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • accuratezza • ripetibilità • precisione | <ul style="list-style-type: none"> • soglia • potere risolutivo (risoluzione) • grandezza del fondo scala. |
|---|---|