

Capitolo 1

Premessa: definizioni metrologiche preliminari

1.1 Storia della normativa

Nel 1993 7 organizzazioni internazionali (BIPM *Bureau International des Poids et Mesures*, IEC *International Electrotechnical Commission*, IFCC *International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, ISO *International Organization for Standardization*, IUPAC *International Union of Pure and Applied Chemistry*, IUPAP *International Union of Pure and Applied Physics*, OIML *International Organization of Legal Metrology*) preparano la prima versione della GUM *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* [1] e del VIM *International Vocabulary of basic and general terms in Metrology* [3] e nel Supplemento1 [2].

Nel 1997 queste 7 organizzazioni assieme all'ILAC *International Laboratory Accreditation Cooperation* formano il JCGM *Joint Committee for Guides in Metrology*. Il JCGM ha due gruppi di lavoro *Working Groups*, il WG1 e il WG2. Il primo si occupa dell'espressione dell'incertezza di misura e della normativa riguardante questo tema, mentre il WG2 si occupa dell'aggiornamento delle modifiche da apportare al VIM.

Dal 1993 si lavora alle stesure di supplementi a questi due documenti cardine della metrologia. Nel 1995 viene ristampata la GUM con correzioni editoriali e solo il 15 gennaio 2008 viene pubblicato il Supplemento 1-2008 alla GUM [2]. Ancora in corso di revisione la nuova versione della GUM.

Il Supplemento 1 contiene un nuovo, ma già contemplato nella GUM, modo di propagare l'incertezza di misura attraverso modelli funzionali di una o più variabili. In particolare, alla *Legge di Propagazione delle Incertezze Standard* (GUM) si sostituisce, quando non valgono le ipotesi di base a quella legge, la *legge di propagazione delle distribuzioni di probabilità*. Vedremo più avanti nel dettaglio questi concetti.

Come per altre normative nel campo della metrologia, esse si basano sull'imperativo che quando si fornisce il risultato di una misurazione si deve quantificare questo in modo da essere in grado di valutare la qualità del risultato stesso. Quando si effettua una misurazione sia chi la effettua sia chi la utilizza debbono essere d'accordo sulla qualità del processo di misurazione effettuato e sul risultato. Per fare questo, la rappresentazione del risultato deve seguire dei criteri universalmente accettati, sia per quanto riguarda la terminologia usata e quindi la sua definizione, sia nelle modalità operative con cui si sono effettuate le misure.

Quindi, nel VIM sono riportate le definizioni di tutti i termini metrologici necessari per

la caratterizzazione metrologica degli strumenti di misura e dei risultati della misurazione stessa, mentre la GUM contiene le linee guida per una corretta rappresentazione del risultato della misurazione e dell'incertezza di misura ad esso associata. Prima di entrare però nel merito di queste definizioni, è necessario fare una premessa riguardante la differenza fra la teoria della misurazione e il processo di misurazione vero e proprio. A questo punto ci stiamo mettendo nell'ottica in cui è il fenomeno che evolve a motivare intrinsecamente la misurazione e i suoi valori. Dall'altra parte c'è l'operatore che effettua la misura, sia esso umano o macchina. Detto operatore si deve interfacciare con il fenomeno che evolve e lo deve fare mediante appunto un'interfaccia rappresentata da una catena di misura che tipicamente ha un occhio sensibile al fenomeno stesso (il sensore). A questo punto, nel momento in cui c'è questo interfacciamento fra un mondo che evolve con continuità e in libertà (il fenomeno) e lo strumento di misura, limitato sia nelle modalità di funzionamento che nella capacità di interagire con il fenomeno, allora si rende necessaria una formalizzazione del processo di misura e delle sue caratteristiche, sia nel senso di caratterizzare le capacità dello strumento, sia nel caratterizzarne l'efficacia una volta che esso ha compiuto la misura. Questa premessa ci dice che comunque la necessità di stabilire definizioni, oltre a fornire un vocabolario unico che permetta il dialogo univoco fra scienziati nei confronti delle stesse caratteristiche e degli stessi risultati, è necessario per poter formalizzare l'interfacciamento fra fenomeno in evoluzione e operatore finale che ne effettua la misura. Quindi occorre sempre distinguere fra la modellizzazione di un certo processo e l'evoluzione spontanea del fenomeno perché una cosa è la teoria che si sceglie per costruire il modello, che può essere scelta fra alcune possibili anche alla luce delle informazioni disponibili in un certo contesto, e una cosa è l'univoca evoluzione del fenomeno che nulla ha a che vedere con la sua misurazione se non in una fase appunto di interfacciamento. È altresì vero che se non esistesse nessun processo di misurazione in grado di estrarre alcune informazioni da un certo fenomeno in evoluzione allora quella informazione non sarebbe conoscibile e dal punto di vista dell'operatore non esisterebbe, ma non sicuramente dal punto di vista del fenomeno.

A questo punto sappiamo che le definizioni metrologiche che forniremo rappresentano una formalizzazione del processo di misurazione a prescindere dal comportamento della grandezza misurata, ma viste dal punto di vista dell'operatore. Anche la definizione di quantità che rappresenta la prima definizione del VIM sembra voler dare un nome al fenomeno studiato, rappresentandone alcune proprietà, aspetti, etc. Partiamo dunque con le seguenti definizioni.

1.2 Definizioni metrologiche di base

Definizione 1.2.1 (Quantità). La quantità è una proprietà di un fenomeno, di un corpo o di una sostanza alla quale può essere associato un valore. Esempi di quantità sono lunghezza, energia, carica elettrica, resistenza elettrica, temperatura, etc.

Una volta definito il nome degli oggetti che osserveremo, dobbiamo definire il processo di misurazione. Dunque si hanno le seguenti definizioni.

Definizione 1.2.2 (Misurazione). La misurazione è quell'insieme di operazioni necessarie (solitamente processo che opera in modo sperimentale) per associare un valore ad una quantità che descrive una proprietà di un certo fenomeno, sia esso di natura fisica, chimica o altro.

Definizione 1.2.3 (Misurando). Un misurando è una quantità che si vuole misurare

Come detto in precedenza se un fenomeno evolve l'unico modo per accorgersi è interfacciarsi con il fenomeno in evoluzione, senza peraltro interferire con esso in modo significativo,

tale cioè da non modificarne l'evoluzione durante tale interfacciamento. Quello cioè che si deve fare è scegliere un *principio di misurazione*.

Definizione 1.2.4 (Principio di Misurazione). Un principio di misurazione è il fenomeno alla base del processo di misurazione.

Come esempi si hanno l'effetto termoelettrico per la misura di temperatura o anche l'effetto Joule, ma possono essere anche di natura chimica, biologica o altro.

Se dunque la misurazione è un processo, esso è costituito da una *procedura di misurazione*.

Definizione 1.2.5 (Procedura di Misurazione). Una procedura di misurazione è una serie di operazioni o passi la cui sequenza è descritta nel dettaglio.

Ovviamente sequenze diverse con passi diversi rappresentano procedure di misurazione diverse.

Prende invece il nome di *metodo di misurazione*.

Definizione 1.2.6 (Metodo di Misurazione). Un metodo di misurazione è la descrizione generale della sequenza logica, in cui si evidenziano solo le tecniche generali di misurazione.

I metodi si differenziano per tipologia di interfacciamento con il misurando. In questo senso si individuano *metodi diretti* o *indiretti*, se la misurazione avviene per interfacciamento diretto con il misurando o sfruttando una relazione funzionale fra il misurando stesso e una serie di misurandi diversi che sono misurati direttamente. A questo punto si può capire come se sfruttasse due principi di misurazione diversi per la misura di temperatura, ad esempio uso un Resistance Temperature Detector (RTD) e una termocoppia la procedura di misurazione sarà diversa di certo, ma il metodo sarà sempre comunque di tipo indiretto. Si parla poi anche di *metodi di misurazione per confronto, per zero, differenziali*. Pensiamo ad esempio ad una bilancia a due piatti. In tal caso si fa una misura di zero, perché la misura si ottiene una volta che lo strumento fornisce uno zero in uscita. Se invece pensiamo alla misura di lunghezza per confronto con un certo numero di campioni di lunghezza di varie lunghezze, allora essa è una misura per confronto.

Un'altra classificazione possibile dei metodi di misurazione riguarda il numero di misurazioni che è possibile effettuare per un dato misurando. Si avranno perciò metodi a *lettura singola* e metodi a *lettura ripetuta*. Verranno prese in esame più avanti queste classi, quando ci occuperemo della valutazione dell'incertezza di misura, ma per ora possiamo accennare al fatto che ovviamente nella modalità a lettura singola abbiamo a disposizione un solo valore numerico da associare al nostro misurando. In tal caso quindi, o sfruttiamo delle informazioni a priori sul misurando e sulla eventuale dispersione dei valori ad esso attribuibili, oppure abbiamo indiscussamente pochissime informazioni per dedurre la bontà e la qualità della misurazione effettuata. Pensiamo ad esempio alla misurazione della temperatura di un oggetto utilizzando un termometro che viene posto vicino ad un'altra sorgente di calore non caratterizzata. La nostra misura T sarà errata di una quantità rispetto alla temperatura dell'oggetto incognita e dovuta alla sorgente di calore (che qui agisce come grandezza di influenza).

Nella modalità a misure ripetute quello che si aggiunge è la possibilità di acquisire il valore da attribuire al misurando in modalità ripetuta in condizioni *nominalmente uguali* ossia in condizioni tali che il misurando sia stabile, l'operatore sia lo stesso, lo strumento sia lo stesso, le grandezze di influenza siano controllate e i tempi che intercorrono far due misure ripetute siano molto più piccoli dei tempi caratteristici del fenomeno che si sta studiando. In tal caso, ad esempio, se acquisisco 1000 misure, potrà capitare che un piccolo numero sia errato per influenza non prevista di una sorgente di calore, ma saranno facilmente individuate

o manualmente o da appositi metodi matematici (vedi stimatori robusti più avanti). Le restanti misure affidabili potranno essere utilizzate per estrarre un valore più fedele del risultato finale della misurazione e per caratterizzarne la bontà, che chiameremo *incertezza*. Diverso è il concetto di *tolleranza* con la quale indichiamo semplicemente il caso peggiore, ossia l'intervallo dei valori compresi fra il più piccolo e il più grande. Un esempio per capire questo concetto necessita dell'uso dell'istogramma, che poi analizzeremo più avanti.

Date comunque N misure, l'istogramma consiste nella costruzione di un diagramma a barre in cui ogni barra ha l'ascissa corrispondente alle misure e l'ordinata pari al numero di volte che la data misura compare nell'intero set di N misure. A questo punto, anche se la tolleranza potrà essere sempre la stessa (valore minimo e massimo fissati) sarà diverso trovarsi nelle situazioni mostrate in figura 1.1.

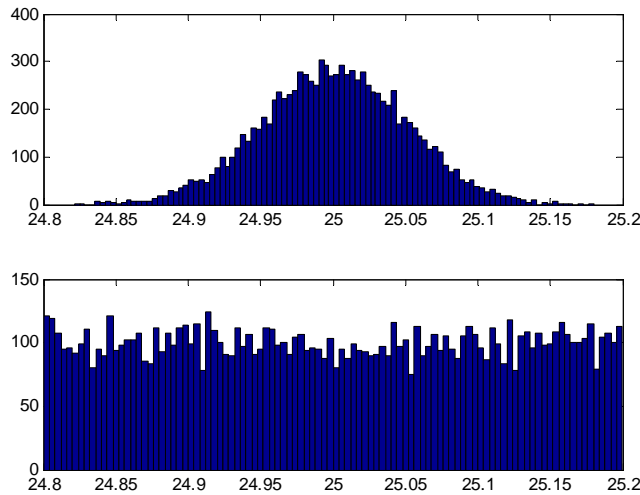


Figura 1.1: Diversi istogrammi possibili per diverse misurazioni dello stesso misurando con stessa tolleranza.

Dato che abbiamo introdotto il concetto di campione di riferimento dobbiamo considerare la questione degli *standard di misura* e del loro utilizzo nei processi di misurazione. Innanzitutto si ha

Definizione 1.2.7 (Standard di Misura). Uno standard di misura è la realizzazione della definizione di una certa quantità, dotato di un'incertezza di misura e di un valore nominale.

Esempi di standard di misura sono un resistore standard da $100\ \Omega$, uno standard di tensione da $1\ \text{V}$, $1\ \text{Kg}$ di massa standard. Lo standard di misura può essere un sistema di misura, un materiale di riferimento, un materiale di misura e tipicamente viene usato per attribuire valori ad altre quantità da misurare ad esempio per confronto. Gli standard di misura di possono classificare in *primari* e *secondari*. Gli *standard primari* permettono la definizione di una quantità senza l'utilizzo di relazioni con altri standard di misura, quindi né il loro valore nominale né la loro incertezza vi dipendono. Gli *standard secondari* a questo punto sono quegli standard di misura che sono stati calibrati o realizzati con misura per confronto con standard primari. All'interno degli standard di misura ci soffermiamo sui *materiali di riferimento* e sui *valori delle quantità di riferimento*. I *materiali di riferimento* sono materiali considerati abbastanza stabili e omogenei rispetto alle quantità che si vogliono misurare da poter essere usati o per la calibrazione di sistemi di misura o strumenti o per

misurare altre quantità. Per quanto riguarda invece le *quantità di riferimento* si considerano tali le quantità la cui incertezza è talmente bassa da poter essere utilizzati per la misura per confronto di altre quantità dello stesso tipo. In tale contesto, l'utilizzo di uno stesso standard di riferimento per la misura di più quantità introduce la cosiddetta correlazione fra le misure ottenute delle diverse quantità e questo dovrà essere considerato nella propagazione dell'incertezza di misura. A questo punto possiamo definire il risultato del processo di misurazione.

Definizione 1.2.8 (Risultato della Misurazione). Il risultato della misurazione è il set di valori ragionevolmente attribuibili al misurando usualmente definiti mediante *un valore singolo* (valore medio di tanti valori, valore nominale, etc.), e da un termine di incertezza, detta *incertezza di misura*, che caratterizza l'ampiezza dell'intervallo.

Quindi a questo punto occorre definire *l'incertezza di misura* per poter caratterizzare completamente il risultato finale della misurazione.

La parola incertezza significa dubbio e pertanto incertezza di misura nella sua accezione più ampia significa dubbio circa la validità del risultato di una misurazione. Formalmente si ha (GUM)

Definizione 1.2.9 (Incertezza di Misura). Parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando.

La precedente definizione è di tipo operativo perchè incentrata sul risultato della misurazione e sull'incertezza valutata. È possibile dare altre definizioni, come

- una valutazione quantitativa dell'errore possibile nel valore stimato del misurando, rappresentato dal risultato di una misurazione,
- una stima che caratterizza il campo dei valori entro cui giace il valore vero di un misurando.

Queste ultime due definizioni però prendono in considerazione delle conoscenze *intrinsecamente inconoscibili* come l'errore e il valore vero. *...Incertezza di misura è pertanto un'espressione del fatto che, per un dato misurando e per un dato risultato della sua misurazione, non vi è un solo valore, ma un'infinità di valori dispersi intorno al risultato che sono compatibili con tutte le osservazioni, i dati e la conoscenza del mondo fisico, e che possono essere attribuiti al misurando con vari gradi di plausibilità....* Per quanto riguarda i metodi per il calcolo dell'incertezza rimandiamo al Capitolo 2.

Ancora citando la GUM si trova anche "...tale incertezza deve essere rappresentata mediante un intervallo, detto *intervallo di confidenza* nel quale il risultato della misurazione ricada con un elevato *livello di confidenza*".

All'interno della prima definizione si celano due importanti conseguenze. La prima ha a che fare con il fatto osservabile sperimentalmente che effettuando una misurazione un certo numero di volte, sotto condizioni di ripetibilità, il risultato non sarà sempre un unico valore, ma un set di valori sparpagliati in un certo intervallo. Per questo motivo, caratterizzare il risultato di una misurazione vuol dire affermare che ci si aspetta che una ulteriore misura effettuata cadrà in un certo intervallo predetto con un certo livello di confidenza (o probabilità). Quali sono le motivazioni di questo sparpagliamento? Esistono diverse fonti di incertezza in un processo di misurazione di una certa quantità. Di seguito ne enumeriamo alcune legate al misurando.

- la non perfetta conoscenza del misurando;

- la non perfetta aderenza della quantità scelta per rappresentarlo;
- lo stato del misurando non è perfettamente stabile, ma in maniera imprevedibile (random) esso modifica leggermente il suo stato (e quindi si modifica leggermente il valore attribuito alla quantità misurata).

Ma esistono anche cause di incertezza dovute all'ambiente esterno al misurando in cui si sta effettuando la misurazione, alla modalità con cui si effettua, alla strumentazione utilizzata, all'operatore finale, etc. Definiamo come *grandezze di influenza*

Definizione 1.2.10 (Grandezza di Influenza). Una grandezza diversa dal misurando che altera il risultato della misurazione (spesso la temperatura, l'umidità, la pressione, agenti inquinanti di origine chimica, etc.).

Allora anche l'imprevedibile variazione di quest'ultime può rappresentare fonte di incertezza.

Se poi pensiamo al metodo di misurazione (VIM) allora se esso è di tipo diretto o indiretto, esisteranno fonti di *incertezza nel confronto* o nella *condizione di zero* (per quanto riguarda i metodi diretti) oppure nel *modello scelto per misurare una quantità in maniera indiretta* e quindi ad esempio eventuali *approssimazioni presenti nel modello stesso*, nella *imperfetta realizzazione di costanti o parametri nel modello* (ad esempio l'uso di costanti irrazionali come pi greco o numero di nepero).

Infine per quanto riguarda la strumentazione utilizzata, ci sarà da tenere in conto *l'incertezza strumentale* e *l'incertezza di lettura*, dovute allo strumento e quindi al suo funzionamento (presenza di rumore elettronico o altro) e del dispositivo di visualizzazione (display, quindi diversa a seconda di display digitali o analogici, ossia a variazione continua di indice, come negli strumenti ad ago, bilancia, etc.). Consideriamo il seguente esempio.

Esempio 1.2.1. Consideriamo uno strumento di acquisizione di immagini basato su CCD (Charged Coupled Device). In questo caso il numero di fotoni incidenti sull'elemento fotosensibile (un semiconduttore in questo caso) non è sempre uguale a sé stesso, ma anzi è rappresentabile mediante una variabile aleatoria (v.a.), quindi analogamente lo è la corrente che viene generata e il valore di luminanza associato ad un certo pixel. Questo è certamente uno dei fattori che contribuiscono all'incertezza totale di quel pixel, come anche eventuali vibrazioni sia della fotocamera digitale sia dell'oggetto illuminato, come la risoluzione spaziale e quella in ampiezza (ossia la quantizzazione del processo di digitalizzazione). Tutti questi fattori sono possibili cause di incertezza per il valore di luminanza del pixel e devono essere caratterizzate in modo da sapere in quale range è ragionevole attendersi il valore predetto.

Questa caratterizzazione della dispersione ragionevolmente attribuibile al risultato della misurazione assume ancora più importanza quando si deve poi utilizzare detto risultato all'interno di un processo più complesso di processamento che coinvolga poi altre quantità misurate. Si parla infatti in tal caso di *propagazione dell'incertezza* perché per caratterizzare il risultato finale della processamento occorre nuovamente caratterizzarne la dispersione ragionevolmente attribuibile che sarà dovuta fra l'altro alla propagazione delle dispersioni delle quantità coinvolte. Per di più può accadere che dette quantità coinvolte non siano indipendenti, nel senso che i processi di misurazione effettuati per stabilirne il valore (e l'intervallo) non erano indipendenti, ma dipendenti, seppur parzialmente da stesse fonti di incertezza.

Un classico esempio di correlazione totale si ha quando la misurazione avviene mediante *confronto diretto* con un *campione di riferimento resistivo*, pensiamo ad esempio alla misurazione di due resistenze elettriche mediante confronto con uno stesso campione di riferimento. È ovvio che l'incertezza del campione, ossia il termine di incertezza che gli è stato attribuito

mediante un processo di taratura (vedi Capitolo 4), dal confronto con campioni di riferimento di più alto livello (di incertezza inferiore), si propagherà sulle misure dei due resistori, oltre ai contributi eventualmente aggiunti per effetto del metodo di misurazione e di come esso venga implementato nella pratica. Ma c'è di più in questo esempio (GUM) in quanto occorre osservare che nel momento in cui il campione di riferimento dovesse subire una qualche modifica, per effetto ad esempio di grandezze di influenza o di altri fenomeni in grado di degradarne le caratteristiche, seppur in maniera accettabile, tale da non rendere necessaria la sua sostituzione, allora entrambe le incertezze associate ai due resistori ne risentirebbero in maniera identica e del tutto dipendente. Pensiamo invece che se si usassero due campioni di riferimento uno per la misura di un resistore e un altro per la misura dell'altro resistore, allora anche se le caratteristiche di un campione dovessero modificarsi, e quelle dell'altro no, questo influenzerebbe solo la misurazione di uno dei due resistori, ma non dell'altro. Per questo si parla di correlazione totale nel primo caso e di scorrelazione nel secondo caso. Questo concetto verrà ripreso più avanti nel Capitolo 2. Per completare la caratterizzazione della procedura di misurazione consideriamo i due concetti di *ripetibilità* e *riproducibilità* che saranno poi necessari per entrare nel dettaglio della rappresentazione dell'incertezza di misura.

Definizione 1.2.11 (Condizioni di Ripetibilità). Per condizioni di ripetibilità di misurazione si intende una condizione di misura in cui si mantengono fissi l'operatore, il sistema di misura, la stessa procedura di misurazione, e le stesse condizioni operative e si effettuano misure ripetute in un intervallo temporale piccolo.

Lo sparpagliamento dei risultati della misurazione in condizioni di ripetibilità fornisce la *ripetibilità della misurazione*. Diverse sono le condizioni di riproducibilità di misurazione.

Definizione 1.2.12 (Condizioni di Riproducibilità). Per condizioni di riproducibilità di misurazione si intende il caso in cui si possono cambiare le condizioni di misura, fra cui il principio di misurazione, il metodo di misurazione, l'osservatore, lo strumento, il luogo, i campioni di riferimento, le condizioni operative, l'intervallo temporale.

Il grado di concordanza fra le misure dello stesso misurando effettuate in tali condizioni fornisce l'indice di riproducibilità della misurazione. Questo secondo indice è molto importante in quanto permette di quantificare vari fenomeni quali ad esempio *il drift* di uno strumento¹, o semplicemente di valutare la qualità del processo di misurazione di uno stesso misurando cambiando le parti in gioco.

Ora che abbiamo fornito le principali definizioni metrologiche riguardanti l'operazione di misurazione e la rappresentazione del risultato finale della stessa, dobbiamo necessariamente confrontare la definizione di incertezza con quella di errore. Per fare questo ci riferiamo al VIM.

Innanzitutto dobbiamo introdurre il concetto di *valore vero*.

Definizione 1.2.13 (Valore Vero). Il valore vero rappresenta il risultato della misurazione che si avrebbe in condizioni ideali e se si potessero effettuare infinite misure ripetute, in assenza di *errori sistematici*.

Detto valore non viene considerato nella GUM in quanto esso è per sua natura inconoscibile, quindi di nessuna utilità per la caratterizzazione di un sistema di misura e di una misurazione.

¹Ricordando che per drift si intende quell'insieme di fenomeni a variazione lenta, rispetto alle variazioni delle grandezze in gioco (grandezze d'influenza e misurando), che non è descrivibile statisticamente come il rumore. Riprenderemo questo concetto nel Capitolo 4

Definizione 1.2.14 (Errore Totale). Per errore si intende la differenza fra il valore assunto dalla quantità da misurare e il valore vero di questa.

Per definizione di valore vero anche l'errore è in conoscibile esattamente, ma si può anch'esso stimare. Solitamente a seconda delle cause e delle caratteristiche dell'errore si possono individuare due categorie di errori: *errori casuali* e *errori sistematici*. I primi sono dovuti a variazioni casuali del misurando o delle grandezze di influenza e sono tipicamente diminuiti mediante un procedimento di media su misure ripetute, perché l'errore casuale ha media nulla. Formalizzando, si ha

Definizione 1.2.15 (Errore Casuale). La v.a. che descrive l'errore casuale (o random) è data dalla differenza fra la singola misura e la media di infinite misure ottenute sotto condizioni di ripetibilità (che come sappiamo dalla teoria della probabilità tende al valore atteso o valore vero).

Definizione 1.2.16 (Errore Sistemico). La differenza fra il contributo di errore totale e l'errore random è detto errore sistematico. Esso è spesso detto anche polarizzazione o distorsione, perché ha un carattere deterministico e dipende in maniera diretta o indiretta dal misurando stesso. Questo tipo di errore deve essere corretto mediante un fattore di correzione che deve essere almeno stimato.

A questo punto siamo finalmente in grado di precisare la sostanziale differenza fra errore e incertezza. Innanzitutto possiamo dire che mentre l'incertezza di misura è una caratteristica che tende a diminuire nel momento in cui si possono effettuare un numero elevato di misure, questo non è vero sicuramente per gli errori almeno per quelli sistematici che permangono anche se le misure effettuate sono in numero crescente. Facciamo un esempio. Supponiamo di effettuare una misura e supponiamo che detta misura è affetta da un errore a carattere sistematico. Detta misura sarà affetta da un'incertezza, dovuta a molteplici fattori. Supponiamo ora di dover correggere l'errore sistematico. Dato che esso non è conoscibile in modo esatto ci sarà un contributo di incertezza aggiunta dovuto alla non perfetta conoscenza del fattore di correzione. Alla fine il contributo di incertezza finale della misura sarà aumentato per effetto della non totale correzione dell'errore sistematico.

Gli errori sistematici (anche effetti sistematici nella GUM) sono sicuramente fonte di "errore di stima" dell'incertezza di misura. È per questo che nella GUM è raccomandato di correggere tutti gli effetti sistematici prima di procedere alla valutazione dell'incertezza di misura. Nella pratica però può risultare non conveniente correggere gli effetti sistematici, per motivi di costo, motivi operativi o perché addirittura non si conosce completamente l'entità dell'errore. Vengono descritte quindi in letteratura tecniche alternative di rappresentazione dell'incertezza di misura in grado di incorporare gli effetti sistematici non corretti, ad esempio considerando al posto di un solo valore nominale M_0 , un set di valori nominali $[M_{0_{\min}}, M_{0_{\max}}]$ ognuno con un termine di incertezza associato.

A conclusione di questo capitolo esaminiamo due concetti che verranno poi ripresi nel Capitolo 4, ma che, essendo strettamente legati al concetto di valore vero e a quello di incertezza, è opportuno introdurre fin d'ora. Si tratta dei concetti di *accuratezza* e di *precisione*.

Definizione 1.2.17 (Accuratezza). Per accuratezza si intende lo scostamento dei risultati di una misurazione dal valore vero.

Se un sistema di misura è accurato quindi i risultati di misure ripetute devono trovarsi nell'intorno del valore vero. Questa definizione però risulta inapplicabile se il valore vero non si conosce, ma è anche vero che se in una situazione si sa con notevole precisione dove deve risiedere il valore vero (una sua stima) si possono ad esempio confrontare due sistemi

di misura in base alla loro accuratezza. L'accuratezza è strettamente legata al concetto di errore come vedremo a breve, ma del tutto scollegato da quello di *precisione*.

Definizione 1.2.18 (Precisione). La precisione della misurazione fornisce una misura della vicinanza fra i risultati di una misurazione, ottenuti in determinate condizioni operative fra cui quella di misure ripetute.

È ovvio che tale caratteristica è strettamente legata al concetto di incertezza e da essa si genera. Spesso infatti la precisione viene quantificata mediante la deviazione standard delle misure ottenute². Le due caratteristiche infatti possono essere migliorate agendo in modo completamente diverso. L'accuratezza, essendo legata agli errori sarà migliorata se si ridurrà l'effetto degli errori, siano essi sistematici siano essi casuali. Questo però non è legato necessariamente alla precisione che si riferisce più allo sparpagliamento di misure ripetute e quindi alla loro deviazione standard, che è invece fortemente legata all'incertezza e a tutte le cause di essa (imperfetta definizione del misurando, grandezze di influenza, incertezza dello strumento, uso di costanti non esatte, uso di modelli non esatti, etc.). Dunque l'intima differenza fra accuratezza e precisione risiede nell'intima differenza fra incertezza ed errore. Consideriamo la figura 1.2. Supponiamo che in essa siano riportati i risultati di

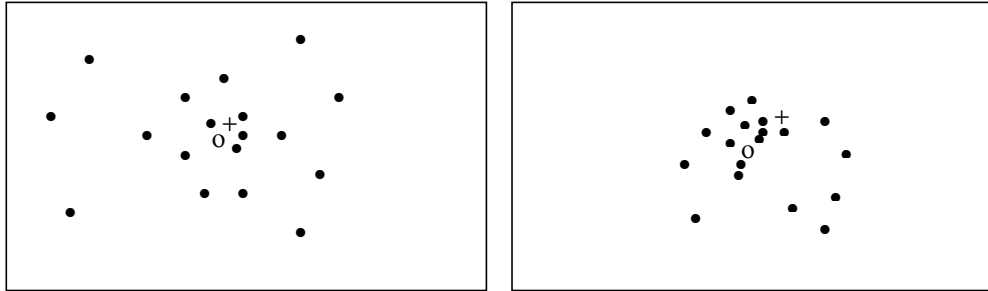


Figura 1.2: Differenza fra accuratezza e precisione.

un procedimento di letture ripetute effettuate con due strumenti diversi sotto ipotesi di ripetibilità. Con la croce indichiamo il valore vero (o una sua stima) della misurazione mentre con il pallino vuoto riportiamo la media dei valori. Lo strumento a sinistra è uno strumento più accurato, in quanto il valore vero e la media dei valori sono molto vicini, ma è poco preciso perché la deviazione standard delle misure è alta. Lo strumento di destra è meno accurato in quanto la media delle misure è più lontana dal valore vero, probabilmente per effetto di un errore sistematico presente, ma la dispersione delle misure è minore quindi lo strumento è più preciso. Se si correggesse l'errore sistematico presente nel risultato dello strumento di destra, allora il risultato ottenuto sarebbe di più alta qualità, da un punto di vista metrologico, essendo comunque più preciso.

²Ricordiamo fin d'ora che per deviazione standard di un set di misure x_1, \dots, x_N aventi media $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N$ è data dalla radice quadrata della varianza empirica $s_x^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)$

Bibliografia

- [1] *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. 1995-01-01. 105 pp., iso guide 98:1995 edition, 2005.
- [2] Evaluation of measurement data – supplement 1 to the “guide to the expression of uncertainty in measurement” – propagation of distributions using a monte carlo method. Technical report, 2008. http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf.20080623.
- [3] International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (vim). Technical report, 2008. http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008_E.pdf.