

TUTTO_MISURE

LA RIVISTA DELLE MISURE E DEL CONTROLLO QUALITÀ

Periodico fondato da Sergio Sartori, organo ufficiale dell'associazione "GMEE" e di "Metrologia & Qualità"

ANNO XXVII

NO. 03

2026

Misure e Testing

Strumenti di crescita e progresso

EDITORIALE

LA CONTINUITÀ DEL RIGORE METROLOGICO

Il valore della riferibilità nell'evoluzione delle misure

IL TEMA

LE ORIGINI DELLA DOSIMETRIA

Il ruolo dell'istituto di Fisica di Milano

ALTRI TEMI

Oltre i Large Language Model

Misura dell'attività radioattiva tramite il metodo Triple-to-Double-Coincidence Ratio

Avionica e sistemi di bordo

Qualità della potenza e metrologia per le reti elettriche

MISURE IN ACUSTICA

La tecnica statistica "bootstrap" applicata alla misura della sonorità ambientale

TESTING E DINTORNI

Prove di immunità: il sistema di diagnostica è immune?

TECNOLOGIE IN CAMPO

Quando misure e test fanno la differenza: casi applicativi e soluzioni di successo

E ANCORA:

Regole decisionali e incertezza: ISO 17025 e ISO 15189 a confronto nel laboratorio di prova e nel laboratorio medico

Dal test al dataset: misure per batterie e supercondensatori affidabili

Asimov e l'IA

Sulle norme armonizzate

La metrologia nella società della comunicazione

La riferibilità del Marchese del Grillo

e tanto altro...

In foto: Generatore ad alta tensione



tuttomisure.org



Rubrica a cura di ¹Domenico Russo - drusso@unisa.it ed ²Elia Bonacina - elia.bonacina@tuttomisure.org

QUANDO MISURE E TEST FANNO LA DIFFERENZA: CASI APPLICATIVI E SOLUZIONI DI SUCCESSO

- La misurazione e l'incertezza di misura
- Serie MXO: acquisizione ad alte prestazioni e multi-canale nei test di potenza con Chroma ATS 8000
- Il controllo qualità entra in produzione
- Sensori radar WIKA: una soluzione affidabile e flessibile per la misura di livello industriale



TECHNOLOGIES IN ACTION

The section "Technologies in action" presents a number of recent case studies and applications of industries, research institutions and suppliers in the metrology sector, gaining profit from the latest innovation in measuring instruments and systems.

mo nel seguito, risulta convenientemente espresso da un valore numerico, da una incertezza e dalle corrispondenti unità di misura.

Sebbene il verbo "misurare" possa acquisire significati anche molto diversi a seconda della disciplina che lo utilizza, tuttavia nell'ambiente tecnico e delle scienze naturali la misura di una grandezza fisica è un processo concettualmente ben definito che consiste

RIASSUNTO

La rubrica «Technologies in campo» presenta casi studio e applicazioni concrete di aziende, istituzioni e fornitori del settore, mostrando come la moderna strumentazione di misura possa generare valore aggiunto e vantaggi competitivi.

LA MISURAZIONE E L'INCERTEZZA DI MISURA

Misurare significa conoscere. Già da sola, questa affermazione è in grado di far intuire appieno l'importanza che i vari processi di misura hanno avuto, hanno e sempre avranno in vari campi dell'attività umana.

Tutte le persone coinvolte in attività scientifiche certamente hanno ben presente il ruolo fondamentale che all'attività sperimentale, e quindi alla misura, viene attribuito nella moderna ricerca scientifica, in virtù del pensiero galileiano.

Meno noto, anche se per questo non meno importante, è l'impatto che le operazioni e attività connesse con le misure rivestono nei processi industriali, sia nelle attività progettuali, sia in quelle produttive, soprattutto quando esse siano improntate a moderni criteri di controllo di qualità.

Per "misura" si intendono spesso indifferentemente due concetti distinti:

- il *procedimento di misura o misurazione* che porta all'assegnazione di un valore a una grandezza fisica, detta misurando. Il valore assegnato al misurando viene detto risultato della misura. La maggior parte dei procedimenti di misura si basa su un confronto rispetto a un valore di riferimento della grandezza stessa, del quale si possono generare direttamente multipli e sottomultipli.
- il *risultato stesso della misurazione* che, come vedre-

nel confronto di due quantità appartenenti a grandezze della stessa specie (omogenee). Il numero che stabilisce in che rapporto una quantità incognita stia rispetto ad un'altra, che opera in questo caso come riferimento (o si collochi rispetto a una scala), esprime il risultato della misura stessa. L'operazione che porta a questo risultato è detta misurazione.



¹ AcousticLab—Start up innovativa, Spin Off dell'Università di Salerno | ² IIS "A.Badoni" Lecco e ITS Meccatronica Lombardia

LA MISURAZIONE NON È UNA SCIENZA ESATTA (discussione qualitativa sull'incertezza di misura)

Una grandezza fisica può essere determinata soltanto a un livello finito di incertezza. Tale incertezza quantifica l'imprecisione della nostra determinazione. Restando nell'ambito della fisica classica, quando si effettuano delle misure ci si trova in presenza di una grande quantità di contributi diversi di "errore" o, con linguaggio moderno, di "incertezza", che possono essere ridotti ma non del tutto eliminati.

Possiamo indicare le seguenti principali cause di incertezza:

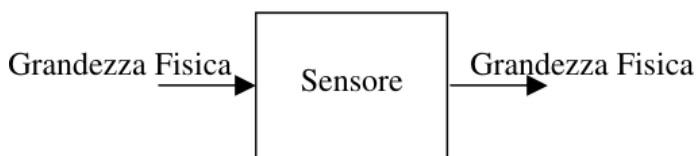
- **i riferimenti** rispetto ai quali si eseguono le misure hanno una loro imprecisione intrinseca. Le unità fondamentali di qualsivoglia sistema di misura vengono realizzate con un'incertezza valutata attraverso la stima dello scarto (scostamento) tra la definizione dell'unità (riferimento ideale) e la sua specifica concreta realizzazione. Inoltre, in un tempo definito, tale scarto non si mantiene inalterato (stabilità).
- la conoscenza della **relazione tra misurando e sistema di misura** in genere incompleta. Nelle misure dirette, a causa dell'accoppiamento tra fenomeno fisico in esame e strumento di misura: poiché i parametri di sistema e strumento sono noti con un certo livello di imprecisione, dopo le correzioni rimarrà un'incertezza residua dovuta all'inserzione dello strumento, senza contare l'incertezza propria dello strumento stesso. Nelle misure indirette, cioè quelle in cui da un insieme di misure diverse si elabora il valore di una nuova grandezza, la conoscenza incompleta riguarda anche l'adeguatezza del modello. Rientrano in questa casistica quasi tutte le leggi fisiche e, in particolare, molte relazioni che derivano dall'esame di circuiti elettrici: un esempio la determinazione della tensione V ai capi di un conduttore di resistenza R attraversato da una corrente I .
- la **risoluzione dei sistemi di rivelazione**, cioè la capacità di distinguere stati vicini del misurando, limitata dalle fluttuazioni naturali (*rumore*), che impediscono un'amplificazione arbitraria della scala dello strumento. Con la strumentazione elettronica, e in particolare con le tecniche digitali di acquisizione ed elaborazione dei segnali, l'errore di quantizzazione dei convertitori analogico-digitali è diventato il limite insuperabile di risoluzione, almeno per ogni singola misura: a tutta una fascia di possibili valori viene assegnato un unico valore numerico. Un'analogia approssimazione, di natura parzialmente soggettiva, avviene del resto anche con gli strumenti analogici, dove è l'occhio dello sperimentatore ad assegnare un limite alla risoluzione dello strumento.
- gli strumenti utilizzati hanno generalmente subito una **taratura** per confronto con strumenti di migliori

qualità. Le caratteristiche di funzionamento di questi ultimi, attraverso una catena ininterrotta di confronti, sono messe in relazione alla relativa unità fondamentale o a un insieme di unità fondamentali. Tuttavia, ogni passo di questa catena di confronti, essendo esso stesso un procedimento di misura vero e proprio, trasferisce la realizzazione dell'unità con un incremento di incertezza. Solo quando sia stata eseguita una taratura specifica, sarà possibile utilizzare lo strumento al meglio delle sue possibilità.

- le misure avvengono in condizioni di non perfetta definizione, stabilità e **controllo dei parametri ambientali** (*grandezze di influenza*) quali temperatura, umidità, pressione, vibrazioni, campi magnetici e presenza di distorsioni o non-linearità indesiderate. Anche gli strumenti di misura, con i loro riferimenti interni, sono sensibili alle grandezze d'influenza. Nelle condizioni normali d'impiego per la strumentazione elettronica in un laboratorio, la temperatura è spesso la grandezza ambientale più importante, ma in siti non protetti anche i campi elettrici e magnetici possono avere effetti rilevanti. La compatibilità elettromagnetica, affrontata in Elettech, è la disciplina che si occupa di questo tipo di problemi, che riguardano non solo gli strumenti di misura ma tutte le apparecchiature funzionanti su principi elettrici (*elettrodomestici, apparecchiature medicali, dispositivi ferroviari, apparecchiature radio, etc.*). Vi si ovvia mediante una curata realizzazione dello strumento, con scelte circuitali e componentistiche speciali, compensazioni per variazioni termiche e opportune schermature per i disturbi elettromagnetici.
- soprattutto con la strumentazione tradizionale o durante l'allestimento di un sistema di misura, il tecnico formato costituisce un rivelatore estremamente utile, molto sensibile e tuttavia con alcune serie di limitazioni: i principali **errori dovuti all'interazione con lo strumento** sono quelli di parallasse, di interpolazione e di media.

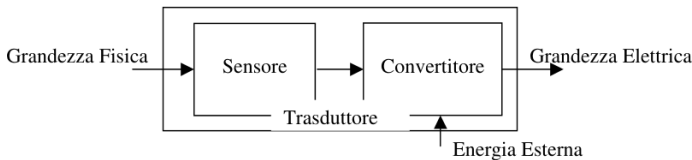
SENSORI, TRASDUTTORI E CARATTERISTICHE METROLOGICHE

I dispositivi in grado di rilevare le grandezze fisiche da controllare sono detti sensori o trasduttori. Si definisce sensore un dispositivo sensitivo in grado di rilevare le variazioni di una grandezza fisica (temperatura, umidità, pressione, luminosità, velocità di rotazione, etc.) e di fornire in uscita un'altra grandezza fisica (resistenza, capacità, etc.) senza utilizzo di fonti di energia esterna,



laddove siano sensori passivi.

Un controllo di processo è costituito normalmente da circuiti elettrici che non possono utilizzare direttamente la grandezza fisica presente all'uscita del sensore: in molte applicazioni è necessario trasformarla in una grandezza di natura elettrica, generalmente una tensione o una corrente. Il sensore e il convertitore formano nel loro insieme un trasduttore che trasforma la grandezza fisica in ingresso in energia elettrica utilizzabile in uscita.



Ai fini della valutazione dell'incertezza, le caratteristiche metrologiche più rilevanti di sensori e trasduttori sono:

- **stabilità:** esprime la capacità di mantenere la linearità, nelle diverse condizioni di lavoro e nel tempo.
- **sensibilità:** rappresenta il rapporto tra la variazione della grandezza d'uscita e quella d'ingresso che la provoca.
- **potere risolutivo:** è la minima variazione della grandezza d'ingresso, apprezzabile all'uscita.
- **ripetibilità:** costituisce la capacità del trasduttore di fornire la medesima uscita, se gli vengono applicate all'ingresso grandezze eguali in tempi diversi.
- **isteresi:** rappresenta la diversa risposta fornita dal trasduttore allorché subisce variazioni della grandezza fisica d'ingresso di eguale entità ma di verso opposto.

TEORIA DEL CALCOLO DELL'INCERTEZZA DI MISURA

Misurare significa confrontare una grandezza con un'unità di misura utilizzando uno o più strumenti. Ma per quanto essi siano perfezionati, il risultato della misura è sempre accompagnato da un certo errore. Questi errori si chiamano casuali perché variano in modo imprevedibile da una misura all'altra, influenzano il risultato sia per eccesso che per difetto e dipendono da piccoli cambiamenti delle condizioni in cui si esegue l'esperimento. Altri errori sono detti sistematici in quanto avvengono sempre in un senso: possono essere individuati e corretti, anche se è impossibile eliminarli completamente.

Siccome tutte le misure sono inevitabilmente accompagnate da errori, non ha senso chiedersi qual è il valore esatto di una misura. Vale la pena invece ricercare il valore più attendibile, cioè quello che ha la maggiore probabilità di avvicinarsi al valore che si misurerebbe con strumenti molto più precisi. Esiste una teoria ma-

tematica, la teoria degli errori di osservazione, che dimostra che il valore più attendibile si ottiene facendo la media dei risultati delle misure.

Supponiamo che, misurando cinque volte la durata di dieci oscillazioni del pendolo, si siano ottenuti i seguenti valori (in secondi): 24,56; 24,85; 24,45; 24,51 e 24,63. Il valore più attendibile della durata è dato dalla media:

$$t = \frac{24,56 + 24,85 + 24,45 + 24,51 + 24,63}{5} = 24,60 \text{ s}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Il risultato di una misura va sempre dato insieme con l'errore che lo accompagna. Un modo semplice, anche se un po' grossolano, di valutare l'errore consiste nel calcolare l'*errore massimo* o *assoluto* e_m : la differenza tra il valore più grande e quello più piccolo delle misure, divisa per due. Nell'esempio precedente:

$$e_m = \frac{24,85 - 24,45}{2} = 0,2 \text{ s} \Rightarrow t = (24,6 \pm 0,2) \text{ s}$$

Dividendo l'errore massimo per il valore medio si ottiene l'*errore relativo*:

$$e_r = \frac{e_m}{\bar{x}} = \frac{0,2}{24,60} = 8 \times 10^{-3} (= 0,8\%)$$

I 5 PASSI FONDAMENTALI PER IL CALCOLO DELL'INCERTEZZA DI MISURA

L'incertezza che si attribuisce al risultato di una misurazione può avere diverse cause, in relazione al misurando, al sistema di misura e alla procedura utilizzata. Le cause principali che di volta in volta devono essere approfondite sono: l'incertezza causata dallo strumento di misura (derive, risoluzione, parallasse, etc.), l'incertezza dei riferimenti utilizzati per le tarature, l'incertezza causata dalle operazioni di misura (approssimazioni, algoritmi matematici, etc.), l'incertezza causata da fattori umani, l'incertezza causata da fattori ambientali e le variazioni del misurando in occasione di misure ripetute anche se apparentemente identiche.

La misura è composta dall'*incertezza* da cui si pensa possa essere affetta la stima del misurando e dal *livello di fiducia* che si ha nella stima che è fatta sull'incertezza.

1) Equazione del processo di misura

Il misurando Y è determinato da n grandezze, e ogni contributo x_i è caratterizzato da un'incertezza $u(x_i)$:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Esempio: se applichiamo una differenza di potenziale V ai terminali di un resistore (a resistenza variabile con la temperatura) con una resistenza R_0 alla temperatura t_0 ed un coefficiente lineare di dipendenza dalla temperatura b , la potenza dissipata P (il misurando) alla temperatura t dipende dalle grandezze V, R_0, b, t secondo la legge:

$$P = f(V, R_0, b, t) = \frac{V^2}{R_0} [1 + b(t - t_0)]$$

2) Classificazione dei contributi dell'incertezza di misura

Incetenza di tipo A: metodo di valutazione basato sull'analisi statistica di serie di misure.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k} \Rightarrow u^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \Rightarrow u^2(\bar{x}_i) = \frac{u^2(x_i)}{n}$$

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2}$$

Un contributo di incertezza ottenuto da una valutazione di tipo A è rappresentato da una deviazione standard campionaria.

Incetenza di tipo B: metodo di valutazione basato su metodi diversi dall'analisi statistica. *Esempio:* quando prendiamo il contributo da un certificato di taratura di un campione primario, fidandoci dei calcoli che chi ha redatto il certificato ha eseguito, si deve prestare attenzione ad utilizzare l'incertezza composta e depurare il fattore di correzione: se sul certificato è riportata l'incertezza estesa (come normalmente accade) questa va divisa per il fattore di copertura k . Un contributo di tipo B è rappresentato da una quantità u_i , considerata come approssimazione della corrispondente deviazione standard.

...a questo punto si riportano tutti i contributi in tabella...

3) Come combinare fra di loro i contributi per calcolare l'incertezza composta

L'incertezza di misura composta $u_c(y)$ è la radice qua-

drata della varianza stimata $u_c^2(y)$ ottenuta con questa formula (serie di Taylor del primo ordine dell'equazione di misura $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i x_j)$$

La derivata parziale di $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ rispetto alle X_i è chiamata coefficiente di sensibilità; $u(x_i x_j)$ è la covarianza associata a x_i e x_j . Queta è la legge di propagazione dell'incertezza (o *legge di propagazione degli errori*).

4) Incertezza estesa (utilizzata per ragioni commerciali, industriali e normative)

L'incertezza U definisce un intervallo, intorno al risultato della misura y , che possa ragionevolmente contenere il valore vero del misurando Y . Si ottiene moltiplicando $u_c(y)$ per un fattore di copertura k :

$$U = k u_c(y), Y = y \pm U$$

Il fattore di copertura k viene scelto sulla base del livello di confidenza richiesto e tipicamente assume un valore di $2 \div 3$.

Esempi di alcuni tipi di distribuzione:

1. Quando si trattano dati come l'incertezza di taratura di uno strumento, è valida la *distribuzione normale*. La probabilità che una misura cada in un dato intervallo tra $\mu - s$ e $\mu + s$ è:

$$P(\mu - s < x \leq \mu + s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \int_{\mu-s}^{\mu+s} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2s^2}} dx$$

$k = 1$ livello di fiducia del 68%

$k = 1,64$ livello di fiducia del 90%

$k = 1,96$ livello di fiducia del 95%

$k = 2$ livello di fiducia del 95,45%

$k = 3$ livello di fiducia del 99,7%

La statistica fornisce così un criterio per considerare non attendibili, e quindi da scartare, quei risultati che presentano una deviazione superiore a $\pm 3s$: essi,

	Somma di grandezze X_i moltiplicate per costanti a_i	Prodotto delle X_i elevate a potenza e moltiplicate per la costante A
Equazione di misura	$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$	$Y = A X_1^a X_2^b \dots X_n^p$
Misura	$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$	$y = A x_1^a x_2^b \dots x_n^p$
Incetenza composta	$u_c^2(y) = a_1^2 u^2(x_1) + a_2^2 u^2(x_2) + \dots + a_n^2 u^2(x_n)$	$u_{c,r}^2(y) = a^2 u_r^2(x_1) + b^2 u_r^2(x_2) + \dots + a_n^2 u^2(x_n)$

dove $u_r(x_i) = u(x_i)/|x_i|$ è l'incertezza standard relativa e $u_{c,r}(y) = u_c(y)/|y|$ è l'incertezza standard relativa composta di y .

THE SECOND

The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s⁻¹.

THE METRE

The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m s⁻¹, where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$.

THE KILOGRAM

The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be 6.626 070 15 × 10⁻³⁴ when expressed in the unit J s, which is equal to kg m² s⁻¹, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{Cs}$.

THE AMPERE

The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be 1.602 176 634 × 10⁻¹⁹ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.

THE KELVIN

The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be 1.380 649 × 10⁻²³ when expressed in the unit J K⁻¹, which is equal to kg m² s⁻² K⁻¹, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

THE MOLE

The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly 6.022 140 76 × 10²³ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A , when expressed in the unit mol⁻¹ and is called the Avogadro number. The amount of substance, symbol n, of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

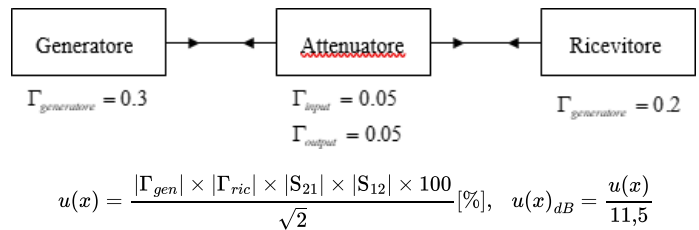
THE CANDELA

The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540 × 10¹² Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit lm W⁻¹, which is equal to cd sr W⁻¹, or cd sr kg⁻¹ m² s³, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

pesate successive abbiamo trovato una media pari a 200,02152g e un'incertezza standard composta $u_c = 0,35$ mg; $U = k u_c = 0,00070$ g con fattore di copertura $k = 2$ (livello di confidenza di circa il 95,45 %):

$$M = (200,02152 \pm 0,00070) \text{ g}$$

2. Calcolo di incertezza per i dispositivi a radio-frequenza. Nelle catene di acquisizione e distribuzione di segnali RF la misura dovrebbe essere eseguita utilizzando solo linee adattate, dove esiste solo il segnale incidente e l'impedenza caratteristica Z_0 si mantiene costante. In realtà tali linee presentano sempre una differenza di impedenza tra i diversi elementi del banco di misura, generando l'incertezza di disadattamento (o di mismatch), con distribuzione a "U":



Senza attenuatore ($S_{12} = S_{21} = 1$):

$$u(x) = \frac{|0,3| \times |0,2| \times |1| \times |1| \times 100}{\sqrt{2}} = 4,24\%, \quad u(x)_{dB} = 0,37 \text{ dB}$$

Introducendo l'attenuatore (attenuazione misurata = -20,2 dB, quindi $S_{12} = S_{21} 0,098$):

$$u(x)_{gen-att} = 1,06\%, \quad u(x)_{att-ric} = 0,71\%, \quad u(x)_{gen-ric} = 0,041\%,$$

$$u_{cmismatch} = \sqrt{1,06^2 + 0,71^2 + 0,041^2} = 1,28\%, \quad u_{cmismatch} = 0,11 \text{ dB}$$

3. Influenza della temperatura sulla misura:

$$u_{temperatura} = \frac{1}{23} \sqrt{\frac{1}{3} \times \text{Incertezza}_{temperatura}^2 \times (\text{Media}^2 + \text{Scarto}^2)}$$

dove 1/3 serve per calcolare il risultato in dB e 1/3 indica una distribuzione rettangolare o uniforme.

4. Metodo di scrittura dell'incertezza della strumentazione: **analogica:** % della lettura + % del fondo scala; **digitale:** % della lettura + n° delle cifre digitali.

5. Metodo delle 12 misure: nei processi di misura nelle prove di laboratorio, per valutare correttamente la stima dello scarto sperimentale di tipo A

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n \left(x_{i,k} - \bar{x}_i \right)^2}$$

con ogni probabilità, sono imputabili ad un errore sistematico non rilevato dall'operatore. L'incertezza relativa estesa di una misura y è $U_r = U/|y|$.

2. Se si hanno a disposizione i dati di incertezza di uno strumento, è valida la *distribuzione rettangolare o uniforme*

$$x_i = \frac{1}{2} (a_+ + a_-) \Rightarrow u^2(x_i) = \frac{1}{12} (a_+ - a_-)^2 = \frac{(2a)^2}{12} = \frac{a^2}{3}$$

dove a_+ e a_- sono rispettivamente il limite superiore ed inferiore di una misura (con $|a_+| = |a_-|$).

3. Nel caso di valori con dati più probabili al centro dell'intervallo che agli estremi, è valida la distribuzione *triangolare*: $u^2(x_i) = a^2/6$, dove $2a$ è la larghezza della base della distribuzione.

4. Nel caso in cui la grandezza in esame, come ad esempio l'incertezza di disaccoppiamento tra circuiti, abbia valori più probabili agli estremi dell'intervallo che al centro, è valida la *distribuzione a "U"*: $u^2(x_i) = a^2/2$.

5. Infine, per valori distribuiti in modo *trapezoidale*: $u^2(x_i) = (1 + \beta^2) a^2/6$ dove $\beta = |a_+ - a_-| / (a_+ + a_-)$.

5) Risultato

Come riportare l'incertezza di misura nel certificato: $x = x_m \pm U[\text{unità di misura}]$.

Esempi:

1. Misura di un campione M di massa 200 grammi. Con

(avendo isolato tutti i contributi di tipo B), è necessario che v sia il più grande possibile. In generale si considerano sufficienti 12 misure ripetute (*metodo delle 12 misure*). In una formulazione esatta occorre associare allo scarto tipo il *numero di gradi di libertà* $v = n - 1 = 12 - 1 = 11$; nel caso di incertezze di tipo B esso è invece pari a ∞ .

LA PRATICA DI UN LABORATORIO NELL'INDUSTRIA: L'INCERTEZZA COME RISORSA

Tutto quanto descritto fin qui potrebbe suggerire che l'incertezza di misura sia un onere: un margine da dichiarare in fondo al certificato, il prezzo da pagare alla rigore. L'esperienza di un laboratorio che vive dentro un gruppo industriale — che progetta, prova e produce elettronica sotto lo stesso tetto — insegna l'opposto: **il budget di incertezza è una risorsa preziosa, e chi impara a usarlo lo trasforma in margine di progetto, in rischio governato e in resa di produzione.**

La differenza è di postura. Un laboratorio di prova consegna un verdetto accompagnato da un $\pm U$ un laboratorio integrato nel ciclo di vita del prodotto fa lavorare quel $\pm U$ dalla prima scelta di progetto fino all'ultimo collaudo di serie. È una convinzione che poggia su quattro pratiche, come un tavolo su quattro gambe.

Le fasi di applicazione. Prima di entrare nel merito delle quattro pratiche conviene precisare dove questo patrimonio di competenze metrologiche entra in gioco. Le fasi sono tre e vengono attraversate in modo sinergico: le *prove di laboratorio*, la *validazione* e il *collaudo*. La specificità dell'approccio risiede nell'interconnessione diretta fra questi tre momenti. L'incertezza di misura non è un dato formale da inserire a fine rapporto, ma uno strumento attivo: il budget di incertezza quantificato durante le prove di laboratorio e la validazione iniziale — legata alla sicurezza o alla compatibilità elettromagnetica — retroagisce fin da subito sul flusso di sviluppo, e diventa un supporto decisionale già nella progettazione precoce. Lo stesso strumento si trasforma poi nella base scientifica per ingegnerizzare il collaudo di serie: consente di stabilire bande di guardia precise e consapevoli sui banchi di test di fine linea, ottimizzando la resa produttiva e azzerando sia i falsi scarti in fabbrica sia i rischi di falsi positivi sul mercato.

1) L'incertezza è un input di progetto, non un output di prova

Nella liturgia classica l'incertezza compare alla fine: si esegue la prova, si calcola il budget, si scrive il certificato. Nella pratica di sviluppo prodotto il flusso va invertito: il budget di incertezza entra nella fase di design, quando le decisioni costano ancora poco.

L'esempio più chiaro viene dalla compatibilità elettromagnetica. Una campagna di pre-compliance in camera semianecoica, su un prototipo, non produce un "passa/non passa": produce un margine quantificato rispetto ai limiti normativi, con il suo livello di fiducia. E qui il budget di incertezza cambia il significato dei numeri: un'emissione che giace 6 dB sotto il limite, misurata con una catena la cui incertezza estesa vale alcuni dB, non ha un margine di 6 dB — ha un margine vero molto più sottile, che va difeso in fase di progetto. È questa consapevolezza, non la speranza, a guidare le scelte di filtraggio, di layout e di schermatura prima dell'industrializzazione, quando modificare uno stadio di alimentazione costa ore di progettazione e non un re-spin di produzione. In termini formali, l'equazione del processo di misura $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ viene usata al contrario: dai contributi di incertezza si dimensiona il margine di progetto, non si giudica soltanto il risultato. Il laboratorio, in questo schema, smette di essere il giudice di ultima istanza e diventa uno strumento di progettazione.

Dal dato di prova alla scelta di progetto. Da questa postura nasce un valore che eccede la semplice verifica. Superata la logica del laboratorio come "ente di verifica", i risultati delle misure si traducono in un servizio consulenziale ad alto impatto tecnologico: quando l'analisi dell'incertezza o le prove evidenziano criticità prestazionali o margini di sicurezza ridotti, il team di laboratorio affianca i progettisti del cliente per guidarne le scelte di ottimizzazione del prodotto.

L'esempio concreto è l'ingegnerizzazione e il perfezionamento dei sistemi di filtraggio, sia per la compatibilità elettromagnetica sia per l'integrità del segnale: interpretando i dati di prova è possibile indirizzare il cliente verso la scelta dei componenti più idonei, la corretta topologia dei filtri o il layout ottimale del PCB. È un approccio al tempo stesso preventivo e correttivo, che accelera il time-to-market dei prodotti, riduce i costi di riprogettazione e mette in sicurezza il superamento dei test di certificazione.

2) La regola decisionale è gestione del rischio, non formalità

Che cosa si dichiara quando una misura cade a ridosso di un limite di norma? È il punto esatto in cui l'incertezza smette di essere statistica e diventa responsabilità. La ISO/IEC 17025:2017 impone ai laboratori accreditati di concordare con il cliente una regola decisionale che tenga conto dell'incertezza nel giudizio di conformità. Il minimo è applicarla; la pratica matura è farne uno strumento di scelta consapevole.

Si consideri un limite normativo pari a 100, un risultato di misura pari a 98 e un'incertezza estesa pari a 4: il valore vero del misurando può trovarsi, con il livello di

fiducia scelto, tanto sotto quanto sopra il limite. Dichiarare la conformità “perché $98 < 100$ ” significa trasferire silenziosamente al cliente un rischio che non ha scelto. La pratica corretta è opposta e trasparente: costruire bande di guardia alternative e quantificare, con gli strumenti del JCGM 106 richiamato in bibliografia, il rischio di falso positivo e di falso negativo associato a ciascuna. A quel punto la decisione torna dove deve stare, ovvero al cliente, che è l'unico a conoscere il costo di un richiamo dal campo e quello di uno scarto in produzione, e che può collocare la propria soglia di accettazione con cognizione di causa. Il laboratorio non vende un timbro, vende la mappa del rischio.

Il cuore tecnologico del laboratorio. Perché una regola decisionale sia credibile, però, servono strumenti all'altezza. Tradurre la teoria dell'incertezza in un vantaggio competitivo industriale richiede una dotazione che copra l'intero spettro delle prove di emissione e immunità in conformità ai rigorosi standard internazionali; e il calcolo e la gestione rigorosa dell'incertezza di misura costituiscono, a loro volta, il pilastro fondamentale per soddisfare i requisiti della norma ISO/IEC 17025, garantendo e mantenendo l'accreditamento rilasciato dall'ente internazionale PJLA (*Perry Johnson Laboratory Accreditation*). Le punte di diamante sono le seguenti:

misure di disturbi condotti: ricevitori di misura *Rohde & Schwarz* (modelli *ESCI 7* ed *ESR26*), accoppiati a camere schermate e reti LISN, quantificano i disturbi condotti con precisione;

camera semi-anecoica: un ambiente controllato *Albatross Projects* (3mSAC), equipaggiato con antenne a banda larga *Schwarzbeck* ed *EMCO*, essenziale per isolare e analizzare le emissioni irradiate fino a 6 GHz con minimi margini di incertezza;

generatori di transitori: per le prove di immunità condotta il laboratorio schiera sistemi compatti di ultima generazione *Ametek CTS / EM Test* (tra cui *NetWave 20-400* e *Compact NX5*), capaci di simulare con precisione burst, surge ad alta energia, buchi di tensione e variazioni di rete sia monofase sia trifase;

scariche elettrostatiche: un generatore *EM Test* (*ESD NX 30.1*) verifica la robustezza dei dispositivi simulando picchi di corrente fulminei, con tempi di salita nell'ordine dei nanosecondi;

amplificazione RF di potenza: *Prana* e *Rohde & Schwarz* alimentano antenne log-periodiche e a horn *Schwarzbeck*, garantendo l'intensità di campo necessaria ai test di immunità radiata in ambito industriale, medicale e ferroviario;

camera climatica per prove ambientali: un sistema *CTS* (modello *C-40/600*) sottopone i dispositivi a stress termici e di umidità controllati, garantendo la stabilità e la ripetibilità delle condizioni di prova per la validazione dell'affidabilità del prodotto;

prove di vibrazione meccanica: una tavola vibrante (*shaker LDS V730-355*), pilotata da un amplificatore di potenza *LDS DPA10K* e gestita da un controllore elettronico *Dactron Laser*. La catena di misura è completata da accelerometri *Dytran* (serie 3055), impiegati sia per l'anello di controllo della tavola sia per il monitoraggio multicanale dell'E.U.T. (Equipment Under Test), ad assicurare la massima accuratezza nella quantificazione dei profili di accelerazione applicati;

sicurezza elettrica e fine linea: sistemi dedicati *GW Instek*, fra cui il tester *GPT-9603* per la misura della resistenza di isolamento e della rigidità dielettrica AC/DC e il *GCT-9040* per la verifica della resistenza e continuità del conduttore di terra. La validazione elettrica e termica è supportata da wattmetri digitali *Yokogawa WT110*, termocoppie e registratori ibridi multicanale *Yokogawa SmartDAQ+*, fondamentali per monitorare assorbimenti, correnti di dispersione e profili termici in piena sicurezza.

È questo parco strumenti a rendere praticabile la regola decisionale di “*simple acceptance*” del documento ILAC-G8, con un livello di confidenza del 95,45% ($k = 2$) in piena conformità ai criteri ISO/IEC 17025 e PJLA. Non si tratta soltanto di eseguire misure: è la condizione materiale perché quella mappa del rischio sia disegnata su basi difendibili e internazionalmente riconosciute.

3) Il budget di incertezza è vivo

La catena ininterrotta di confronti che lega ogni strumento ai campioni primari — descritta nella parte teorica — ha un punto debole: nel modello classico viene verificata soltanto alle scadenze di taratura. Che cosa garantisce che la catena di misura sia rimasta quella dichiarata tra una taratura e l'altra? La risposta è la conferma metrologica in continuo: campioni di controllo misurati sistematicamente all'inizio delle sessioni di prova, carte di controllo che tracciano la deriva della catena nel tempo, verifiche incrociate tra setup indipendenti quando la stessa grandezza può essere misurata per due vie. Il beneficio è duplice. Il primo è preventivo: una deriva anomala si intercetta quando è ancora un segnale nelle carte di controllo, non quando è diventata una non conformità. Il secondo è economico, e chi ha vissuto un fuori taratura lo conosce bene: uno strumento trovato fuori tolleranza alla verifica periodica obbliga a riesaminare retroattivamente tutte le prove emesse da quella catena dall'ultima conferma valida, il che comporta settimane o mesi di rapporti da rivalutare. La sorveglianza continua riduce quella finestra di esposizione da mesi a giorni.

L'incertezza dichiarata nel certificato, così, non è un valore calcolato una volta: è un valore dimostrato ogni giorno.

4) Dall'incertezza di laboratorio ai limiti di collaudo di serie

L'ultima pratica è quella che soltanto un laboratorio interno a chi produce può compiere fino in fondo, ed è il punto in cui la metrologia diventa, letteralmente, economia industriale.

Ogni scheda elettronica che esce da una linea di produzione attraversa sistemi di collaudo — test in-circuit, test funzionali — che confrontano grandezze misurate con limiti di accettazione. Anche quei banchi sono strumenti di misura e anche le loro misure hanno un'incertezza. Se i limiti di collaudo vengono fissati ignorandola, gli esiti sono due, entrambi costosi: limiti troppo stretti generano falsi scarti che erodono la resa produttiva buttando via schede buone, mentre limiti troppo larghi lasciano passare falsi buoni che torneranno dal campo, al prezzo più alto possibile. Quando chi progetta i sistemi di collaudo lavora con gli stessi budget di incertezza valutati in laboratorio di qualifica, i limiti di serie possono essere derivati con bande di guardia coerenti con la capacità di misura reale del banco e il rapporto tra incertezza del banco e tolleranza del parametro diventa un criterio di progetto del collaudo stesso, non una scoperta a posteriori. È la chiusura del cerchio: la stessa grandezza metrologica che in laboratorio qualifica il prodotto, in produzione ne protegge la resa e nel post-vendita ne riduce i ritorni.

Quattro gambe, un tavolo

Le quattro pratiche si tengono a vicenda: il margine di progetto ha senso solo se la regola decisionale è esplicita, la regola decisionale è credibile solo se il budget che la sostiene è dimostrato in continuo e tutto l'edificio produce valore solo se arriva fino ai limiti di collaudo di serie. Sopra le quattro gambe sta il piano del tavolo, che è la tesi di questo articolo: l'incertezza di misura non è il limite della conoscenza, è la forma più onesta che la conoscenza assume quando deve sostenere decisioni. Saperla calcolare è scienza, saperla usare è industria.

UN KNOW-HOW INTEGRATO DI GRUPPO

Resta una domanda legittima: competenze di questo tipo appartengono al laboratorio che le esercita o al gruppo industriale che lo contiene? La risposta è la seconda, ed è corretto presentarle come parte del know-how integrato del Gruppo Elemaster, perché l'intero processo si fonda su una collaborazione diretta e bidirezionale fra le realtà aziendali del Gruppo.

All'interno di questo sistema Eletech opera come la mente ingegneristica: progettazione hardware e software, gestione dei laboratori di prova, costruzione dei banchi di collaudo personalizzati. Elemaster, d'altro canto, traduce quell'ingegneria in realtà industriale, occupandosi della produzione dei circuiti stampati e dell'integrazione dei sistemi complessi. È questa verticalizzazione a consentire che le competenze metrologiche e l'analisi dell'incertezza sviluppate in laboratorio da Eletech si riflettano immediatamente sulle linee produttive di Elemaster, garantendo al cliente un controllo totale della qualità, dal primo prototipo fino al prodotto di serie.

LETTURE SPECIFICHE CONSIGLiate

- EA-4/02 M: 2022 – *European Accreditation – Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration.*
- UNI CEI 70099:2008 – *International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM).*
- JCGM 100:2008 – *Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement.*
- JCGM 101:2008 – *Evaluation of measurement data. Supplement 1 to the GUM. Propagation of distributions using a Monte Carlo method.*
- JCGM 106:2012 – BIPM – *Evaluation of measurement data. The role of measurement uncertainty in conformity assessment.*
- *Fondamenti della misurazione* – Progetto Leonardo – Politecnico di Milano – Elio Bava, Roberto Ottoboni, Cesare Svelto.