

**Teoria delle misure e degli errori  
(cenni)**

## Termini metrologici

I termini metrologici sono concetti che esprimono le caratteristiche di una misura e che sono oggetto di standard internazionali specifici (es: glossario ISO raccomandato dal BIPM nella pubblicazione *Guide to the expression of uncertainty in measurement*).

La loro conoscenza è necessaria per interpretare:

1. la documentazione degli strumenti
2. I certificati di calibrazione

## Termini metrologici fondamentali

**unità di misura:** grandezza fisica cui si attribuisce convenzionalmente il valore di 1 ed alla quale si riferiscono tutte le altre grandezze dello stesso tipo

**unità di misura meteorologiche** (guida Wmo n.8)-> sono unità del S.I. -> calorie e mm di Hg sono da bandire !

- pressione atmosferica: hPa
- umidità relativa: %
- evaporazione: mm
- irradianza  $W/m^2$
- velocità del vento: m/s o nodi
- nuvolosità: 8<sup>i</sup> o 10<sup>i</sup> di cielo coperto;
- temperatura: °C
- precipitazioni: mm;
- visibilità: m oppure km;
- durata del soleggiamento: ore;
- direzione vento: gradi da nord

**misura di riferimento:** misura svolta con la più avanzata tecnologia disponibile. Il suo risultato é considerato la migliore approssimazione del valore vero.

## **Strumenti di riferimento**

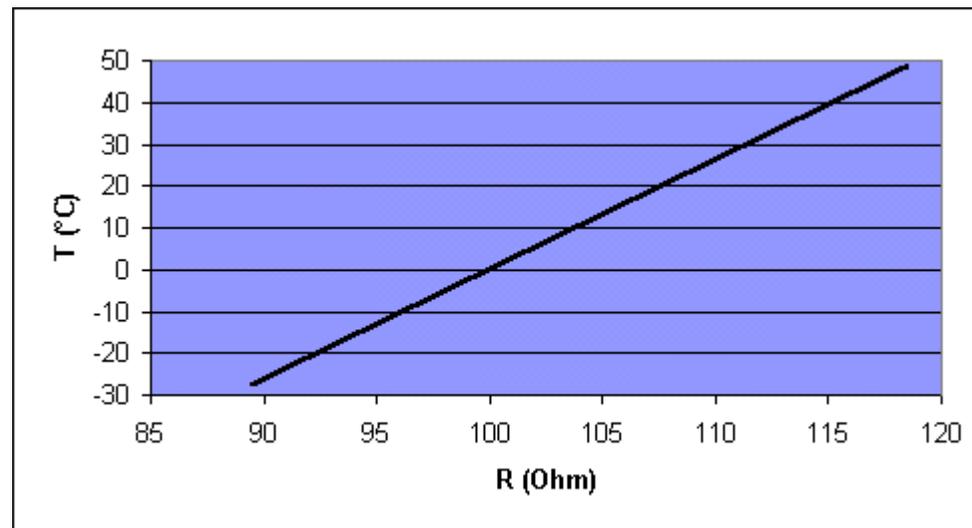
Presso un servizio sono gli strumenti utilizzati per calibrare la strumentazione ordinaria -> es:

- barometro a mercurio
- psicrometro di Assmann

## Significato di misura

Misura = risultato numerico della misurazione ed è la relazione matematica esistente fra la grandezza fisica in misura (misurando) e l'unità di riferimento.

*Esempio riferito a termoresistenze al platino (PT100) per misure di temperatura: nei conduttori la relazione fra temperatura e resistenza è:  
 $T = (R_T - R_0) / a * R_0$  ove  $R_0$  = resistenza a  $0^\circ\text{C}$  (per una PT100 sarà  $R_0 = 100 \text{ Ohm}$ ),  $R_T$  = resistenza alla temperatura  $T$  incognita,  $a$  = coeff. di temperatura (per una PT100  $a = 0.0038$ ) -> a livello grafico:*



## Misura e errore

La misura intende avvicinarsi al valore vero, **valore ideale** che la variabile misurata assumerebbe se fossero eliminate tutte le fonti di errore

## L'errore: definizione

Nel linguaggio comune:

errore=sbaglio, svista

Nel linguaggio della scienza: errore = incertezza

Tutte le misure sono soggette a incertezze (errori) -> principio di indeterminazione di Eisenberg (\*)

Dalle misure le incertezze si propagano nei calcoli e danno luogo a risultati finali affetti da incertezze (es. ET0)

(\*) la contemporanea conoscenza di posizione e momento di una particella comporta una incertezza e il prodotto fra incertezza nella conoscenza della posizione e incertezza nella conoscenza del momento è costante (dell'ordine della costante  $h$  di Plank) -> meglio si conosce la posizione e peggio si conosce il momento.

## **Conseguenze della definizione**

Se gli errori non sono sbagli non è possibile evitarli anche agendo con molta cura -> è possibile solo

- assicurarsi che siano ragionevolmente piccoli

- ottenere una stima realistica della loro dimensione

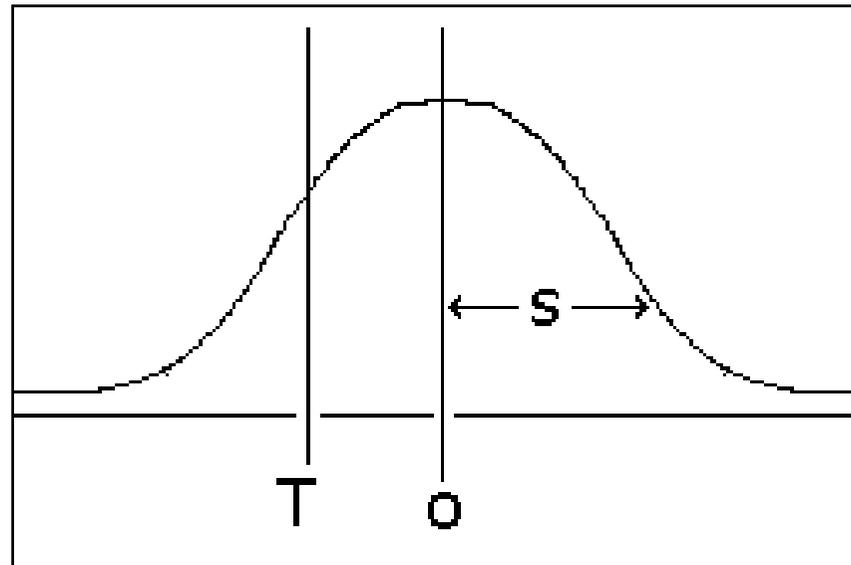
In ciò ci aiuta la la statistica.

## Tipi di errori

Fra gli errori rientrano anzitutto gli errori di sistema (o errori sistematici) e cioè quelli che si ripresentano sistematicamente. A nulla serve ripetere molte volte le misure elaborando statisticamente i risultati (a ogni ripetizione della misura nelle stesse condizioni gli errori sistematici si riproducono uguali). Abbiamo poi gli errori casuali e cioè errori che non si riproducono nello stesso modo ad ogni ripetizione della misura. Per tale tipo di errori le incertezze di misura possono essere ridotte ripetendo più volte le misure ed elaborando i risultati con metodi statistici.

## Errori: esempio con un singolo strumento

Svolgiamo  $n$  misure dello stesso valore standard di una variabile con lo stesso strumento (es: termometro) e nelle stesse condizioni (es: camera termostatica). La distribuzione é di tipo gaussiano.

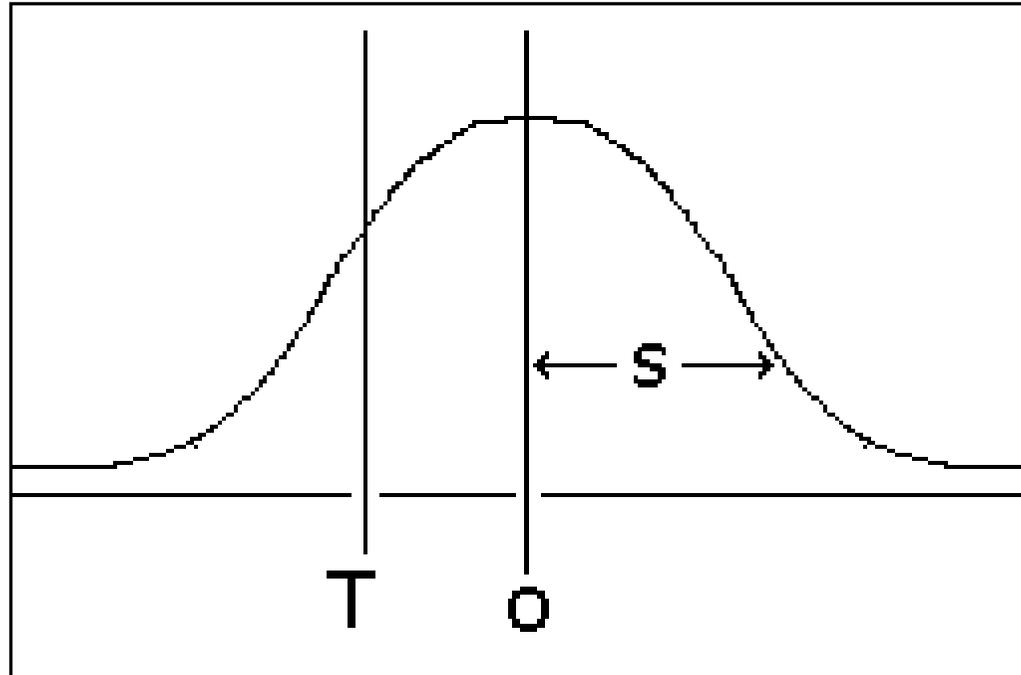


$o$  = media delle  $n$  misure effettuate  $T$  = valore vero;  $s$  = deviazione standard delle  $n$  misure effettuate. →

**errore casuale =  $s$**  (precisione)

**errore sistematico =  $o - T$**  (accuratezza)

## Precisione e accuratezza



Errore casuale = legato alla dimensione della deviazione standard  $s$  ->

se  $s$  é piccola le osservazioni sono riproducibili entro ristretti limiti statistici e dunque "precise" se invece é grande le osservazioni sono riproducibili entro ampi limiti statistici e dunque non precise o incerte.

## Esempi di errore sistematico

*1. gli strumenti di remote sensing montati sui satelliti possono andare in deriva; la correzione si effettua per comparazione con misure di strumenti standard sistemati a bordo oppure di strumenti di riferimento al suolo*

*2. relazione fra velocità del vento e sottostima della precipitazione misurato con pluviometro a doppia bascula con bocca tarata (fonte: CNR GNDCI – Manuale di riferimento per la misura al suolo delle grandezze indrometeorologiche)*

Velocità del vento (km/h)	Sottostima della misura (%)
0	0
10	8
20	21
30	32
40	41
60	47
80	50

## **Accuratezza/errore sistematico**

NB: l'accuratezza ha un costo -> non è necessario che gli errori siano estremamente piccoli; basta che siano ragionevolmente piccoli ->

Ragionevolmente=compatibilmente con il risultato che ci si prefigge -> standard WMO distinti per branca di applicazione della meteorologia.

## requisiti di accuratezza

per misure meteorologiche di superficie per scopi di meteorologia sinottica  
(fonte guida WMO n.8, table 2)

grandezza	accuratezza
Copertura nuvolosa	+/- 1/10
Altezza base nubi	+/- 10 m fino a 100 m; +/- 10% oltre
Direzione del movimento delle nubi	+/- 10°
Pressione atmosferica – valore attuale	+/- 0.1 hPa
Pressione atmosferica – tendenza	+/- 0.2 hPa
Temperatura	+/- 0.1 °C
Umidità relativa	+/- 5% fino al 50%; +/- 2% oltre
Vento direzione	+/- 5°
Vento velocità	+/- 0.5 m/s fino a 5 m/s; +/- 10% oltre
Precipitazione	+/- 0.2 mm fino a 10 mm; +/- 2% oltre
Altezza della neve	+/- 1 cm fino a 20 cm ; +/- 5% oltre
Evaporimetria Pan (*)	+/- 0.1 mm fino a 10 mm; +/- 2% oltre
Eliofania (*)	+/- 0.1 ora di sole
Radiazione solare (*)	+/- 1 MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
Radiazione netta (+)	+/- 0.4 MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> fino a 8 MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> +/- 5% MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> oltre
Visibilità	+/- 10%
Onde periodo (-)	+/- 0.5 secondi
Onde altezza (-)	+/- 10%

(\*) requisiti per la climatologia (quelli per meteorologia sinottica non sono specificati)

(+) requisiti per l'idrologia (quelli per meteorologia sinottica e climatologia non sono specificati)

(-)requisiti previsti per la meteorologia marittima

## **Importanza dell'analisi degli errori**

- per il controllo di qualità (nei processi industriali, nei servizi)
- per le analisi di fault tolerance di apparati, procedure, ecc.  
(es: individuazione della possibilità di guasto di un sistema radar legata alla conoscenza di tutta una serie di dati per ognuno dei quali occorre sia noto il livello di incertezza).

## **Analisi statistica degli errori casuali**

Per valutare l'attendibilità di una misura: ripeterla più volte e esaminare statisticamente i diversi valori ottenuti.

In particolare:

- errori casuali: si rilevano replicando più volte le misure
- errori sistematici: si rilevano solo confrontando le misure con quelle di strumenti campione.

Dopo aver identificato un errore sistematico si potrà correggerlo agendo sui dati ovvero cambiando lo strumento comprandone uno migliore.

*Esempio del righello:*

*-errori casuali = errori che derivano ad esempio dalla necessità di interpolare i valori che cadono fra le tacche della scala*

*-errori sistematici = errori che derivano ad esempio da una deformazione esistente nel righello (se il righello è allungato sottostimiamo sempre, viceversa se è accorciato sottostimiamo sempre)*

## **Esempio di un termometro ventilato artificialmente**

-> l'errore casuale può derivare ad esempio da effetti di turbolenza sulla massa d'aria di cui si sta misurando la temperatura

-> l'errore sistematico può derivare dalla rottura della ventola.

Valutazione degli errori casuali per un termometro a PT100:

supponiamo di effettuare una serie di misure in ghiaccio fondente (temperatura = 0°C).

Otterremo: 0.1, 0.2, -0.7, 0.2, 0.3, .....

## Esempio di un termometro ventilato artificialmente

Se raccogliamo alcune centinaia di tali misure potremo osservare che esse si distribuiscono attorno alla media seguendo una gaussiana (distribuzione normale), che presenta le seguenti caratteristiche:

-media ( $m$ ) = moda

-deviazione standard = radice quadrata della sommatoria dei quadrati degli scarti dalla media divisa per i gradi di libertà ( $N-1$ ).

-fra  $m-1$  dev\_st e  $m+1$  dev\_st sono compresi il 68% dei valori

-fra  $m-2$  dev\_st e  $m+2$  dev\_st sono compresi il 95.4% dei valori.

-fra  $m-3$  dev\_st e  $m+3$  dev\_st sono compresi il 99.7% dei valori.

Pertanto deviazione standard = buona misura di incertezza della mia misura.

## **Errori sistematici**

Non esiste una teoria che ci dica cosa fare con gli errori sistematici. Unica cosa da fare è ridurli fino a divenire molto inferiori rispetto al livello di accuratezza richiesto.

## **RISOLUZIONE/SENSIBILITÀ**

minima variazione nella variabile fisica che causa una variazione nella risposta del sistema di misura. Pertanto esprime la capacità di uno strumento di distinguere fra due valori vicini ma diversi del misurando.

## **TEMPO DI RISPOSTA (PRONTEZZA)**

tempo che occorre dopo una certa variazione  $A$  nella variabile misurata perché la lettura dello strumento mostri una variazione corrispondente alla variazione  $A$  occorsa. Di solito fra le caratteristiche strumentali viene indicato il tempo occorrente perché lo strumento segnali il 90 o il 95% della variazione.

## LINEARITA'

In genere nel range di misura preso in considerazione (es -20/+50°C per la temperatura dell'aria) il segnale U dato in uscita dal sensore (meccanico (forza, ecc.) o elettrico (resistenza, tensione, capacità, ecc.)) dovrebbe variare linearmente in rapporto alla variabile fisica considerata. Se così non è occorre conoscere la legge di variazione in modo da procedere alla linearizzazione del segnale.

*esempi:*

✓ la termocoppia di tipo T (rame/costantana) usata per misure di temperatura nei piranometri produce in uscita una ddp che viene linearizzata per mezzo della equazione quadratica  $ddp = a + b \cdot T + c \cdot T^2$  ove  $a, b, c$  sono  $-0.09, 38.7$  e  $0.041$

✓ la termoresistenza al platino Pt100 usata per la misura delle temperature dell'aria produce in uscita una resistenza che varia in modo pressoché lineare nel range  $-20/+50^\circ\text{C}$ . La resistenza è infatti di 100 Ohm e cresce di 0.385 Ohm /°C per arrivare a 138.5 Ohm a 100°C].

## **ALTRI TERMINI METROLOGICI**

**Risoluzione/sensibilità:** È la minima quantità che si riesce a distinguere da 0 con l'apparato in uso. Perché uno strumento sia molto sensibile non occorre che sia né accurato né stabile

**isteresi:** differenza nelle letture dipendente dal fatto che il valore misurato sia raggiunto dal basso o dall'alto. Può essere causata ad esempio da frizione meccanica, effetti magnetici, deformazione elastica o effetti termici.

**correzione:** valore da aggiungere al risultato di una misura per depurarla da un errore sistematico noto ed ottenere una più esatta approssimazione del valore vero.

**errore di parallasse:** tipico di strumenti a lettura manuale, si produce quando l'indice di uno strumento è distante dalla scala e la linea di visuale dell'osservatore non è perpendicolare alla scala stessa.