

GUIDA AL LABORATORIO 1: ***Variabilità ed incertezza di componenti elettronici e sensori***

Panoramica dell'esercitazione

(si rimanda a ciascuna delle descrizioni estese sotto per maggiori dettagli)

L'esercitazione ha lo scopo di introdurre il concetto di incertezza di misura e di valutarne diversi aspetti, attraverso osservazioni sperimentali, sia in componenti elettronici "standard" (e.g. resistori, fig. 1), che di sensori stampati (e.g. sensore di temperatura, fig. 2).



Fig.1 Resistore

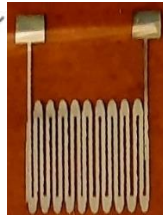


Fig. 2 Sensore di Temperatura

L'attività si articola in tre parti obbligatorie, più una facoltativa se avanza tempo:

PARTE 1: VALUTAZIONE DELLA VARIABILITA' E DELL'INCERTEZZA DI MISURA DELLA RESISTENZA DI UN GRUPPO DI RESISTORI

Misurati i valori di un gruppo di resistori aventi lo stesso valore nominale di resistenza. In questo caso, la misura serve a mettere in evidenza la variabilità dei valori assunti da esemplari diversi di uno stesso componente. Si tratta di una situazione del tutto normale, dovuta a fattori non pienamente controllabili che interessano il processo di fabbricazione dei resistori. Per questa ragione, assieme al valore nominale viene indicata anche una **tolleranza** (solitamente espressa come percentuale del valore nominale) che quantifica la variabilità attesa;

PARTE 2: VALUTAZIONE DELLA RIPRODUCIBILITA' TRAMITE MISURE RIPETUTE DI RESISTENZA DELLO STESSO RESISTORE

Un singolo oggetto viene misurato da più strumenti dello stesso tipo e si procede al confronto tra le indicazioni ottenute. In questo caso, dato che la misurazione è ripetuta sullo stesso oggetto ed in condizioni simili, la variabilità evidenziata si riferisce ai risultati di misura prodotti dai differenti strumenti e da diversi operatori. In questo modo si valuta la riproducibilità delle misure.

PARTE 3: VALUTAZIONE DELLA RIPRODUCIBILITA' TRAMITE MISURE RIPETUTE DI RESISTENZA DI SENSORI STAMPATI NOMINALMENTE UGUALI

Un gruppo di oggetti simili vengono misurati da più strumenti dello stesso tipo e si procede al confronto tra le indicazioni ottenute. In questo caso, dato che la misurazione è ripetuta sullo stesso oggetto ed in condizioni simili, la variabilità evidenziata si riferisce ai risultati di misura prodotti dai differenti strumenti e da diversi operatori. In questo modo si valuta la riproducibilità delle misure.

PARTE 4: (facoltativa, se vi resta tempo): VALUTAZIONE DELLA RIPETIBILITA' E DELLA SENSIBILITA' DI UNA MISURA DI TEMPERATURA CON UN SENSORE RESISTIVO:

Focalizzandosi su un singolo sensore è possibile valutare alcune delle caratteristiche tipiche della caratterizzazione statica. Ripetendo più volte la misura di resistenza a caldo e freddo, si può mettere in evidenza la variabilità dei valori assunti da misure ripetute sullo stesso sensore, nelle stesse condizioni, con lo stesso operatore, ovvero la ripetibilità della misura. Valutando la risposta a diversi gradi di riscaldamento è possibile stimare la sensibilità del sensore.

In tutte le fasi è necessario avere come riferimento due tipi di incertezza:

1) **l'incertezza strumentale** → espressa con la formula vista a lezione $\pm UX = \pm(k1 \cdot |XM| + k2)$

2) **l'incertezza legata al processo di fabbricazione o ad altri contributi con cui le misure vengono eseguite** → esprimibile in forma cumulativa come deviazione standard delle misure eseguite

Dato un valore di resistenza misurato R_M , un modo comune di esprimere il risultato della misura con l'incertezza associata (indicata dal simbolo U) è:

$$R_x = R_M \pm U_R$$

Con questa espressione si intende il valore R_x compreso nell'intervallo $R_M - U_R \leq R_x \leq R_M + U_M$ con un alto livello di confidenza, di modo che se l'incertezza è piccola, il valore attribuibile al resistore è "ragionevolmente prossimo" a quello misurato.

-----**PARTE 1:**-----

VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DELLA MISURA DI RESISTENZA DI UN GRUPPO DI RESISTORI

E' assegnato un gruppo di resistori, tutti con lo stesso valore nominale.
Il valore nominale di un resistore è indicato attraverso un codice a bande colorate. A queste si aggiunge un'ulteriore banda colorata che specifica la tolleranza di fabbricazione, come illustrato in Fig.2 . In pratica una certa variabilità è intrinseca al processo di fabbricazione, ma un progettista può richiedere livelli di tolleranza più o meno restrittivi.

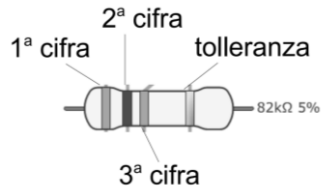


Fig 2: Esempio di indicazione del valore di un resistore tramite codice a bande colorate (nell'ordine: grigio = 8, rosso = 2, arancione = $\times 103$, oro = $\pm 5\%$) – il resistore ha un valore nominale di 82 k Ω con tolleranza del 5%; il suo valore effettivo è compreso tra 77900 Ω e 86100 Ω .

Per chi utilizza un resistore come componente di un circuito, l'informazione sulla tolleranza è necessaria per una adeguata progettazione, che garantisca al circuito il funzionamento desiderato.
Sui resistori utilizzati per questa esercitazione è posta una banda dorata, che indica una tolleranza del 5%. Le misure effettuate su un gruppo di resistori, nominalmente uguali, hanno lo scopo di verificare se i loro valori effettivi rientrano nella fascia di tolleranza dichiarata.
Per questo scopo è logico attendersi che l'incertezza di misura dello strumento utilizzato sia contenuta in un intervallo significativamente più ristretto. Spesso si considera il rapporto tra incertezza e tolleranza (test uncertainty ratio, TUR) e si cerca di limitare l'incertezza a non più di 1/4, ma più preferibilmente 1/10 della tolleranza dichiarata.

Per la misurazione di resistori con tolleranza del 5% si dovrebbe perciò verificare che l'incertezza sia almeno inferiore all'1% del valore misurato, ossia: $U_R \leq 0.01 \cdot R_x$.

Data la limitata variabilità attesa, il valore di U_R si può determinare con buona approssimazione utilizzando l'espressione vista con il valore nominale del resistore, cosicché il calcolo può essere eseguito preventivamente ed una sola volta. A tutte le misure sarà attribuita la stessa incertezza, che è possibile stabilire in anticipo, verificando così l'adeguatezza dello strumento.

Per **eseguire la misura** è sufficiente fissare il resistore da misurare ad una morsettiera e collegarlo con due cavetti agli ingressi dello strumento, che fornisce un'indicazione diretta del valore misurato.



I valori misurati vanno riportati in una tabella e rappresentati graficamente.
Un esempio di risultati è mostrato qui sotto.

LABORATORIO DI STRUMENTAZIONE ELETTRONICA

Variabilità ed incertezza

Gruppo n.: _____ Studenti: _____

misura della resistenza di N = 10 resistori, di uguale valore nominale: 12 Ω

multimetro utilizzato: modello _____ fondo scala strumento: 30 Ω

risoluzione strumento: 10⁻⁴ Ω incertezza valutata: 4.2 mΩ

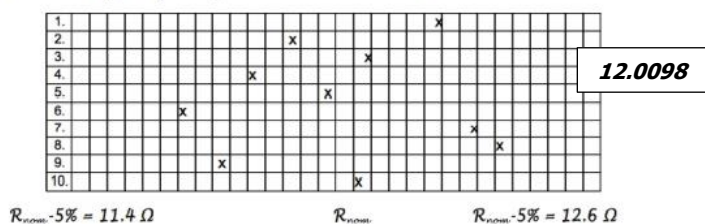
incertezza relativa valutata: 0.035% tolleranza resistori: 5%

misura diretta utilizzando la funzione "RESISTANCE" del multimetro (2-wire)

Misura n.	Valore di resistenza misurato [Ω]
1.	12.2386
2.	11.8951
3.	12.0764
4.	11.8007
5.	11.9802
6.	11.6448
7.	12.3119
8.	12.3637
9.	11.7352
10.	12.0515

media dei valori misurati per N resistori: $R_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$ $R_{avg} = \underline{120.098}$ Ω

Su ciascuna riga del grafico riportare uno dei valori misurati



Esempio di compilazione di relazione sulla prima parte

-----**PARTE 2:**-----

VALUTAZIONE DELLA RIPRODUCIBILITA' TRAMITE MISURE RIPETUTE DI RESISTENZA DI UN RESISTORE CON STRUMENTI DIVERSI.

La seconda parte dell'esercitazione ha lo scopo di verificare il grado di accordo tra le indicazioni date dai diversi strumenti, ossia la **riproducibilità del risultato**. La valutazione verrà svolta ripetendo la misura di resistenza di un singolo resistore utilizzando più strumenti diversi.

Le condizioni nel corso dell'esercitazione non permettono di verificare l'effetto di tutti i fattori che nella pratica potrebbero influire sulla riproducibilità. Si può comunque avere un'idea sulla variabilità attribuibile alla strumentazione e, nel caso, si possono individuare singoli strumenti il cui stato di taratura potrebbe non essere adeguato.

Cosa viene fatto circolare:

- 1) una scatola contenente un resistore
- 2) sul foglio excel condiviso, **nel foglio nominato "RESISTORE"**, che trovate al link disponibile sulla pagina moodle indicare:
 - il numero del banco dove sono state eseguite le misure
 - il modello del multimetro
 - la resistenza misurata
 - l'incertezza strumentale assoluta calcolata

Per **eseguire la misura di resistenza del resistore si procede come nella fase 1**, fissando il resistore da misurare ad una morsettiera e collegandolo con due cavetti agli ingressi dello strumento, che fornisce un'indicazione diretta del valore misurato.

I risultati verranno discussi a inizio della lezione di lunedì 17 ottobre.

-----PARTE 3:-----

**VALUTAZIONE DELLA RIPRODUCIBILITA' TRAMITE MISURE RIPETUTE
DI RESISTENZA DI SENSORI DI TEMPERATURA STAMPATI NOMINALMENTE UGUALI**

La terza parte dell'esercitazione ha lo scopo di verificare il grado di accordo tra le indicazioni date dai diversi strumenti, ossia la **riproducibilità del risultato**, su sensori di temperatura stampati diversi ma nominalmente uguali.

Le condizioni nel corso dell'esercitazione non permettono di verificare l'effetto di tutti i fattori che nella pratica potrebbero influire sulla riproducibilità. Si può comunque avere un'idea sulla variabilità attribuibile alla strumentazione e, nel caso, si possono individuare singoli strumenti il cui stato di taratura potrebbe non essere adeguato.

Ciascun gruppo avrà a disposizione:

- un sensore di temperatura
- uno scaldamani per far variare la temperatura

Cosa fare:

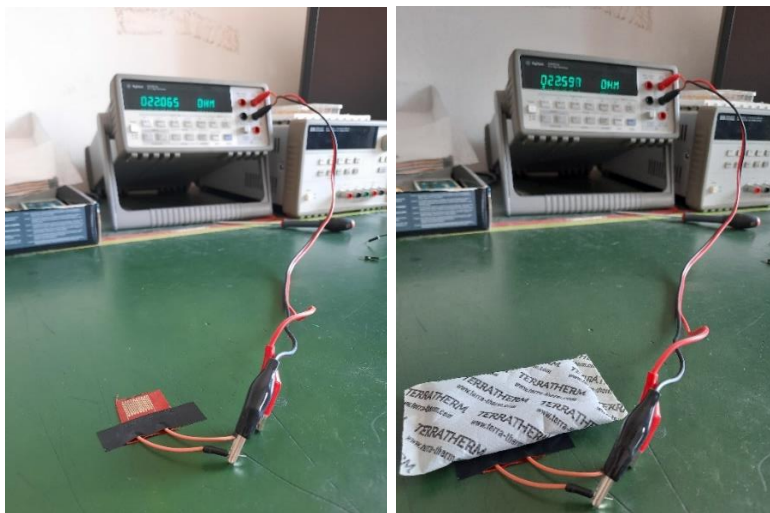
1) Collegare i due fili collegati alle piazzole del sensore con i due cavi in ingresso al multimetro ed eseguire una prima **misura "a freddo"** senza applicare la fonte di calore. (assicurarsi che il fondoscala sia settato in modo ottimale, aspettare che l'indicazione si stabilizzi, e registrare il valore con un numero di cifre dopo la virgola che rimangano ragionevolmente stabili durante la misura).

Per i collegamenti, ove possibile eseguire il contatto tramite la stessa morsettiera utilizzata per le misure dei resistori. In alternativa utilizzare dei cavi che terminino con delle pinzette.



2) Aprire lo scaldamani Terratherm. Massaggiarlo un po' in modo da uniformare i materiali all'interno e attivare il riscaldamento. Attendere qualche minuto in modo che il calore si stabilizzi.

3) Appoggiare lo scaldamani sul sensore di temperatura, attendere 1 minuto e registrare il valore raggiunto con la stessa risoluzione di quello a freddo.



- 2) sul foglio excel condiviso, nel foglio nominato "SENSORE TEMPERATURA", che trovate al link disponibile sulla pagina moodle indicare:
- il numero del banco dove sono state eseguite le misure
 - il modello del multimetro
 - la resistenza misurata a freddo
 - la resistenza misurata a caldo
 - l'incertezza strumentale assoluta calcolata

-----**PARTE 4 (se vi avanza tempo):**-----
VALUTAZIONE DELLA RIPETIBILITA' E DELLA SENSIBILITA' DI UNA MISURA DI TEMPERATURA CON UN SENSORE RESISTIVO

RIPETIBILITA'

Ripetere almeno 5 volte le seguenti misurazioni, con lo stesso setup utilizzato per svolgere la parte 3:

- ➔ Misura dopo 1 minuto con fonte di calore appoggiata
- ➔ Misura dopo 1 minuto senza fonte di calore appoggiata

Raccogliere le misure, calcolarne media, standard deviation e relative standard deviation.

Valutare oltre alle singole misure anche le differenze tra freddo e caldo, e di queste media, standard deviation e relative standard deviation.

Es. di raccolta dati e analisi, tutti espressi in Ohm

	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	media	stdev	RSD
a freddo	22.32	22.41	22.42	22.48	22.5	22.426	0.063119	0.281454
a caldo	22.72	22.77	22.75	22.89	22.93	22.812	0.082559	0.361911
delta	0.4	0.36	0.33	0.41	0.43	0.386	0.036111	9.355166

SENSIBILITA'

- 1) Misurare il valore di resistenza iniziale (potrebbe essere cambiato rispetto al primo misurato durante l'esercitazione).
- 2) Attaccare un termometro accando alla zona sensibile.
- 2) Appoggiare la fonte di calore su sensore e termometro far partire un cronometro.
- 3) Ogni minuto registrare: temperatura del termometro, valore della resistenza.
- 4) Costruire la curva di calibrazione in un grafico che abbia sull'asse delle x la Temperatura e della y la resistenza.
- 5) Provare a convertire il grafico in forma relativa come $((R-R_0)/R_0)*100$
- 6) Calcolare il Temperature Coefficient of Resistance sfruttando la formula $TCR = (R_2 - R_1) / R_1 (T_2 - T_1)$.
- 7) Che relazione c'è tra il grafico del punto 5) e il TCR trovato al punto 6)?

RIPASSO e RICHIAMI UTILI: Incertezza di misura

In questa esercitazione si fa uso di un multimetro (digital multimeter, DMM). Tra le sue funzionalità (descritte a lezione) verrà impiegata la funzione "misura di resistenza a due fili" (two-wire Ω).

Per **calcolare l'incertezza di misura** si deve utilizzare una opportuna regola di calcolo. Come visto a lezione, nonostante non esistano modalità del tutto standardizzate per caratterizzare le prestazioni di un multimetro, le specifiche relative all'incertezza sono date in forma molto simile per tutti i multimetri, anche di costruttori diversi. Di solito l'accuratezza viene dichiarata con riferimento a specificate condizioni di impiego e viene fornita una regola per calcolare l'incertezza assoluta della misura, mediante la relazione vista in aula:

$$\pm U_x = \pm(k_1 \cdot |X_M| + k_2)$$

dove k_1 e k_2 sono valori tabulati nel manuale d'uso dello strumento ed X_M è la generica grandezza misurata.

Tale espressione è la somma di due termini: il primo è proporzionale al valore misurato; il secondo è invece un termine costante. Di conseguenza, k_1 è un fattore adimensionale, di norma espresso in "% del valore misurato". Il termine k_2 , invece, ha la stessa dimensione fisica di X_M e può essere espresso in una delle seguenti due forme, del tutto equivalenti:

- come multiplo intero del peso della cifra meno significativa nell'indicazione numerica presentata dallo strumento: $k_2 = k \cdot \Delta X$;
- come frazione del valore di fondo scala utilizzato: $k_2 = \gamma \cdot X_F S$, dove γ è solitamente dato a sua volta in forma di percentuale, ossia in "% del valore di fondo scala".

Per ciascuna delle grandezze che il multimetro può misurare (per esempio, tensione alternata, corrente continua, resistenza, ecc.) vengono fornite separatamente le indicazioni necessarie per il calcolo di U_x mediante la relazione.

Esempio

Per chiarire l'uso della relazione (4.2) si consideri il seguente esempio.

Si consideri un multimetro predisposto per misurare tensioni continue fino ad un valore di ± 30 V, detto fondo scala (o "portata") dello strumento. Se l'indicatore numerico (display) utilizza sei cifre, ve ne saranno 4 poste alla destra del separatore decimale (può trattarsi spesso di un punto, secondo l'uso anglosassone) e, di conseguenza, la risoluzione ΔV (ossia il peso della cifra meno significativa), risulta di $100 \mu\text{V}$.

Si supponga che, per la misura di tensione continua con la scala scelta, le tabelle relative alle specifiche dello strumento forniscano i seguenti valori:

da cui:

$$k_1 = 0.005\% \quad k_2 = 4 \cdot \Delta V$$

$$U_x = 5 \times 10^{-5} |V_M| + 4 \times 10^{-4} \text{ [Volt]}$$

Se l'indicazione data dallo strumento è: $V_M = -18.6542$ V, l'incertezza corrispondente è:

$$U_x = 5 \times 10^{-5} \cdot 18.6542 + 4 \times 10^{-4} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ [Volt]}$$

Il risultato della misura è dunque:

$$V_M = -18.6542 \text{ V} \pm 1.3 \text{ mV} \text{ o, in forma relativa: } V_M = -18.6542 \text{ V} \pm 7 \times 10^{-5}$$

Per i multimetri di migliori prestazioni, come quelli utilizzati in questa esercitazione, sono solitamente indicati valori di k_1 e k_2 che permettono di calcolare due o tre diversi valori di incertezza.

Questi corrispondono ad altrettante condizioni differenti di riferibilità metrologica:

- entro 24 ore dalla taratura;
- entro 90 giorni dalla taratura;
- **entro un anno dalla taratura.**

La condizione da considerare è l'ultima, che corrisponde all'intervallo di taratura normalmente utilizzato nei laboratori di misura.

Per un laboratorio accreditato questo significa che, con cadenza annuale, lo strumento viene verificato per confronto con una grandezza di riferimento di valore più accurato (ad esempio, un resistore campione da 100Ω , un campione di tensione da 10 V, ecc.) e, se necessario, regolato in modo da assicurare la corrispondenza delle sue indicazioni con il valore della grandezza misurata, entro i limiti di incertezza dichiarati.

Ulteriori specifiche, relative alle condizioni di impiego, individuano i limiti entro i quali è garantita dal costruttore l'incertezza dichiarata. Tipicamente viene indicato l'intervallo di temperature entro cui le prestazioni sono garantite, ma possono aggiungersi anche altre indicazioni, ad esempio relative alle variazioni della tensione di alimentazione dello strumento, all'umidità nell'ambiente di impiego, ecc. Inoltre, possono essere specificati fattori di correzione che permettono di valutare l'incertezza anche in condizioni di impiego caratterizzate da maggiore variabilità rispetto a quelle indicate.

Le condizioni in cui si svolge l'esercitazione permettono di fare riferimento ai valori standard riportati per l'intervallo di taratura di un anno, senza necessità di correzioni. I valori possono essere individuati sulle schede corrispondenti al proprio strumento, presenti su moodle nella sezione dedicata all'esercitazione.

