

SCHEDA DESCRITTIVA PROVA DI LABORATORIO:

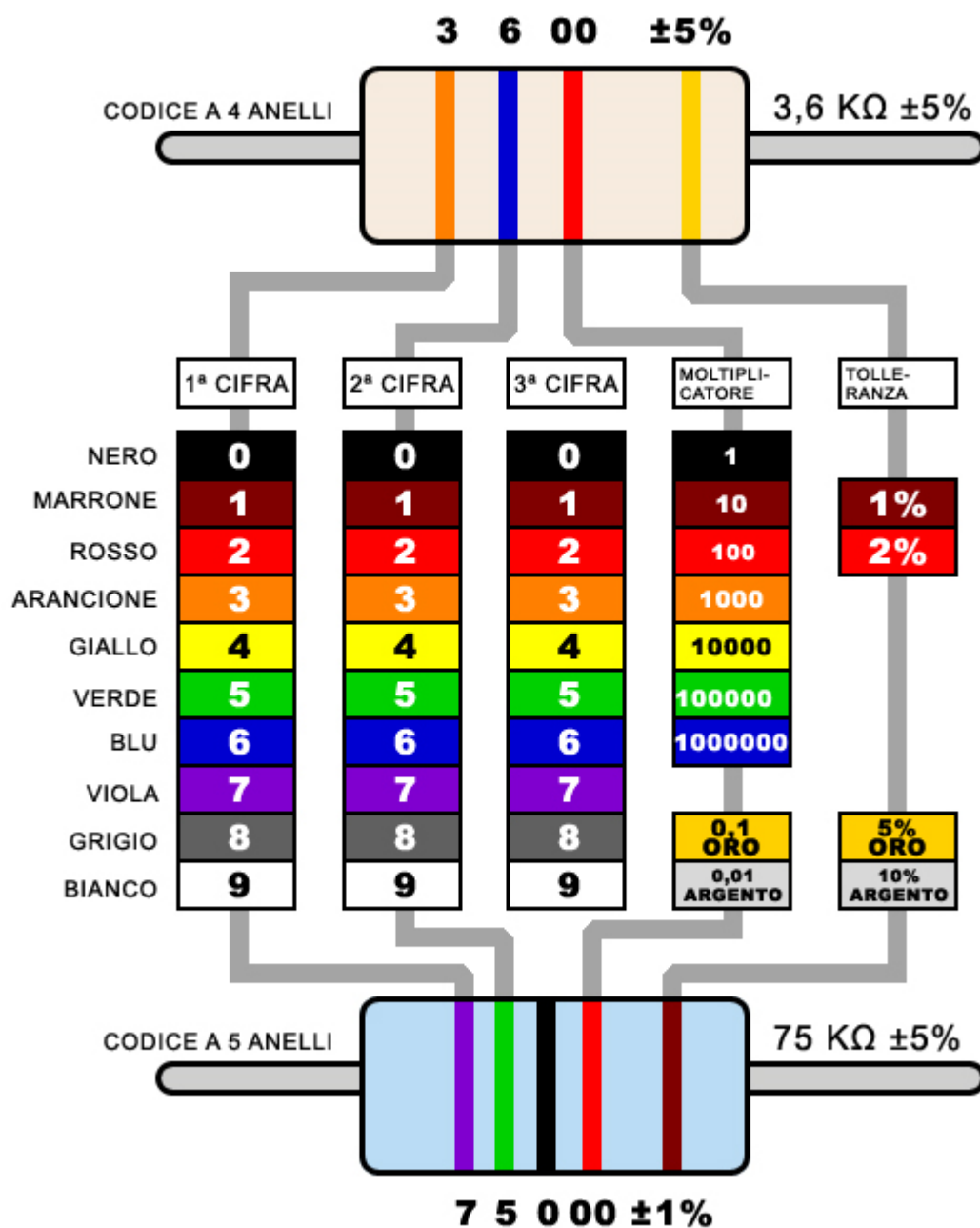
MISURE DI RESISTENZA ED IMPEDENZA CON DMM E LCR

1.1 Introduzione

Questa prima esperienza di laboratorio ha come fine quello di prendere confidenza con l'uso di strumentazione di misura di base, con le corrette procedure di misura e, con la valutazione della relativa incertezza, nel caso di misure di resistenza ed impedenza. Come ben noto dalla teoria, il risultato di una misura si discosta sempre dal valore assunto in quel determinato stato dal misurando, a causa degli effetti dovuti a vari errori. Questi scostamenti rientrano tutti in un intervallo delimitato del valore dell'incertezza.

Il risultato delle misure pertanto sarà completato con il relativo valore dell'incertezza associata. Questa incertezza sarà derivata da valutazioni di tipo A o di tipo B e dipenderà dalla modalità di esecuzione (misura diretta o indiretta). Nella misura diretta, l'incertezza valutata di tipo B, si può valutare a partire dalle specifiche che il costruttore mette a disposizione per lo strumento. Ricordiamo che per misure indirette, si può ricorrere all'incertezza combinata e alla teoria della propagazione, così come visto nella relativa parte teorica del corso.

Prima di entrare nei dettagli operativi delle prove di laboratorio, di seguito sono fornite alcune informazioni utili per la definizione del valore nominale di una resistenza tramite il codice a colori presente sulla superficie dei resistori commerciali. Lo schema di riferimento per identificare il valore della resistenza è il seguente:



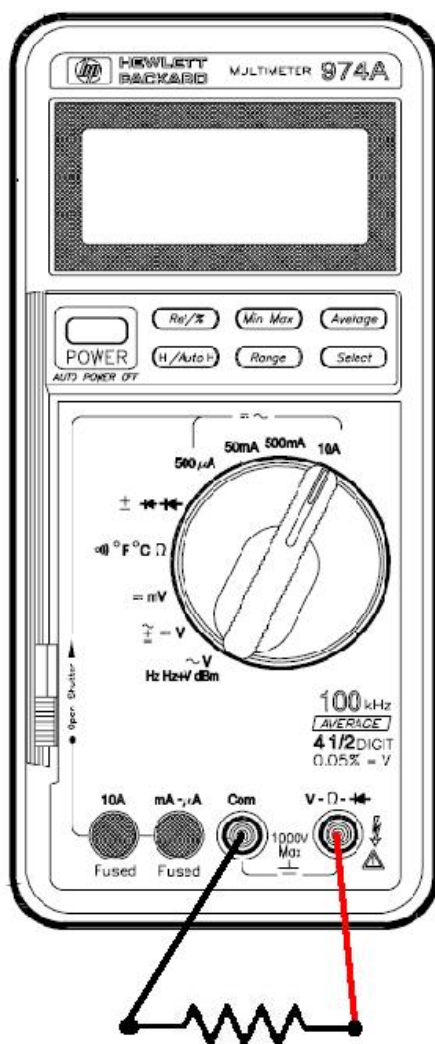
L'immagine che segue, a titolo di esempio, mostra una resistenza di 1KΩ con il ±5% di incertezza sul valore nominale.



1.2 MISURE DI RESISTENZE CON MULTIMETRO PORTATILE

Lo scopo dell'esercitazione è quella di effettuare misure di resistenze per mezzo di un multimetro portatile e di valutare l'incertezza di tali misure facendo uso delle specifiche del costruttore, cioè eseguendo valutazioni dell'incertezza di tipo B.

Lo schema illustrativo dello strumento di misura è il seguente:



Gli strumenti adoperati sono i seguenti:

- multimetro Hewlett Packard 974A (oppure Keysight U1253B)¹;

¹ Durante l'esercitazione può essere stato fornito il multimetro HP 974A oppure il Keysight U1253B: i due multimetri sono simili, ma come descritto nel seguito, a seconda di quale strumento è stato utilizzato, bisogna far riferimento alle corrispondenti specifiche per il calcolo dell'incertezza di misura.

- cavetti di connessione;
- resistore con valore nominale pari a $(10^3 \pm 50)m\Omega$;

Il multimetro Hp 974A possiede un display a 4 ½ cifre che rappresenta uno strumento dotato di 4+1 cifre, dove però una è destinata a rappresentare il segno ed eventualmente il valore della cifra più significativa del valore misurato. Per il calcolo della resistenza con valore nominale (ovvero il valore della resistenza dichiarato dal costruttore) pari a $(10^3 \pm 50)m\Omega$, abbiamo impostato per mezzo del tasto “RANGE” (quindi grazie alla presenza del “blocco di condizionamento” del multimetro) il valore di fondo scala, cioè il limite superiore che può essere “misurato” dal multimetro, pari a 500Ω e dato che lo strumento ha un campo di misura pari a 1/50000 del valore di fondo scala esso ha un passo di quantizzazione “Q” pari a :

$$Q = \frac{V_{FS}}{50000} = \frac{500}{50000} = 10m\Omega$$

con un incertezza di quantizzazione pari a:

$$U_q = \frac{Q}{2} = 5m\Omega$$

Il passo di quantizzazione si può anche ricavare dalla definizione di risoluzione dello strumento.

Infatti, la risoluzione dello strumento rappresenta la più piccola variazione, nel valore della grandezza da misurare, che causa una variazione percettibile dell’indicazione in uscita sullo strumento.

Per un dispositivo con indicazione digitale, tale quantità coincide con la variazione di una unità per la cifra meno significativa .

Dato che il multimetro Hp 974A può visualizzare al massimo 49999 conteggi ed è predisposto sulla portata di 500Ω , la massima indicazione possibile è di $499,99\Omega$.

Pertanto la minima quantità che può essere visualizzata e che corrisponde al cambiamento dell’LSB è di $0.01\Omega = 10m\Omega$.

Potremo dire che lo strumento consente di apprezzare una parte su 50000.

L'incertezza del dispositivo è data da una formula binomia composta da una parte proporzionale alla lettura e da un'altra pari a un numero fisso di LSB, quindi proporzionale alla portata.

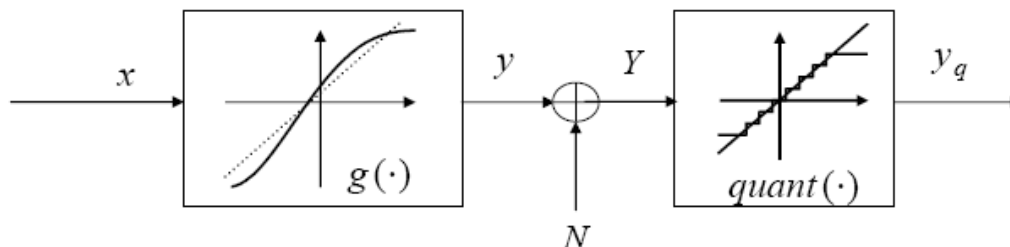
Le specifiche del costruttore dello strumento, per misure di resistenze, sono le seguenti:

Specifiche di incertezza per misure di resistenza col multimetro Hp 974A

Range	Resolution	Accuracy	Test Current	Max Open Circuit Voltage
500 Ω	10 m Ω	$\pm (0.06\% + 2)^1$	< 800 μ A	< 5.5 V
5.0 k Ω	100 m Ω			
50 k Ω	1 Ω		< 80 μ A	< 2.2 V
500 k Ω	10 Ω	$\pm (0.5\% + 1)$	< 15 μ A	
5.0 M Ω	100 Ω		< 1.5 μ A	
50 M Ω	1 k Ω	$\pm (1.0\% + 2)$	< 150 nA	

Avendo impostato un valore di fondo scala pari a 500 Ω possiamo notare dalla precedente tabella un'incertezza pari a $\pm(0,06\% + 2)$, dove il primo termine è proporzionale alla lettura e il secondo alla portata.

Si noti che per misure di ampiezza è possibile definire un modello semplificato di uno strumento per misure statiche, del tipo:



Dove possiamo definire un errore totale sulla misure del tipo :

$$E_t(x) = y_q - x = \Delta Gx + O + \text{inl}(x) + e_q(g(x)) + N = E_s(x) + E_c$$

↑
errore di
guadagno

↑
errore di
offset

↑
errore di
linearità

↑
errore di
quantizzazione

↑
rumore

Maggiorando il precedente errore otterremo la seguente incertezza totale su una misura diretta :

$$|E_t| = |y_q - x| = |\Delta Gx + O + inl(x) + e_q(g(x))| \leq$$

$$\leq |\Delta Gx| + |O| + |inl(x)| + |e_q(g(x))| \leq$$

$$\leq U_G |x| + U_O + U_{inl} + U_q \cong$$

$$\cong U_G |y_q| + U_O + U_{inl} + U_q = U_{tot}$$

Dove la prima maggiorazione è dovuta alla disuguaglianza triangolare, mentre la seconda alla disuguaglianza errore-incertezza.

Attribuendo l'incertezza della lettura all'incertezza di guadagno U_G , e l'incertezza di portata all'incertezza di offset e di quantizzazione, rispettivamente indicate con U_O e U_q , e ipotizzando di conglobare l'incertezza di non linearità integrale nell'incertezza di portata, posso scrivere le due incertezze nel modo seguente:

$$\begin{cases} |\Delta G \cdot y_q| \leq U_G |y_q| \text{ con } U_G = 0,06\% \\ |O + inl(x) + e_q(x)| \leq U_{O+inl+q} \text{ con } U_{O+inl+q} = 2LSB \end{cases}$$

Quindi:

$$\begin{aligned} U(R) &= U_G \cdot \text{ValoreLetto} + U_{O+inl+q} \cdot \text{PassoDiQuantizzazione} = \\ &= 0,06\% \cdot 1,16\Omega + 2 \cdot 0,01\Omega = \\ &= (0,696 + 20)m\Omega = \\ &= 0,03\Omega \end{aligned}$$

Sapendo che la resistenza misurata col multimetro è pari a , si può esprimere il risultato come:

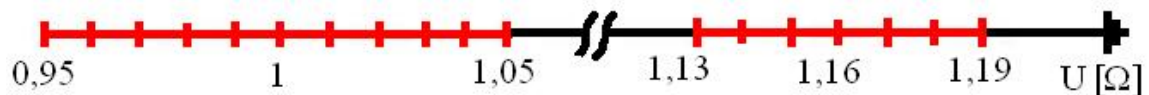
$$\begin{aligned} R_{MISURATA} &= (1,16 \pm 0,03)\Omega \\ \text{con } range(R) &= [1,13\Omega \div 1,19\Omega] \end{aligned}$$

Si noti che nel conglobare l'errore di non linearità integrale nel secondo termine dell'incertezza fornita dal costruttore (cioè quella proporzionale alla portata), rende tale termine non un puro errore di offset, avendo inglobato anche l'errore di

quantizzazione. Quindi, nel caso di differenza di misure non possiamo sottrarre l'errore di offset.

1.3 Osservazioni

Usando una resistenza con valore nominale di $(10^3 \pm 50)m\Omega$, per mezzo di un multimetro portatile, si determina una stima del valore del misurando pari a $[1,16 \pm 0,03]\Omega$. Graficando i due range di valori che possono essere “ragionevolmente attribuiti al misurando” si osserva due range di valori non coincidono.



Quindi la misura effettuata con il multimetro portatile fornisce una stima non corretta, in quanto essa comprende errori di tipo casuale per il fatto di aver eseguito una singola misura invece di mediare su più valori letti. Inoltre, lo strumento non permette una compensazione dell'effetto degli errori sistematici, non predisponendo di funzioni di calibrazione. Infine, non si è tenuto conto degli errori dovuti alle resistenze di contatto tra cavi, puntali e resistore. Il contributo di tutti questi effetti inficia sul risultato finale della misura.

Volendo quantificare l'accuratezza della misura, assumiamo come valore “vero” del misurando il valore nominale della resistenza. Facendo questa assunzione si può ottenere una stima dell'errore sistematico dato dalla differenza tra il risultato della misura e il valore nominale del misurando:

$$E_s = 1,16 - 1,00 = 0,16\Omega$$

L'accuratezza relativa “ a ” di una misura può essere espressa in funzione di tale errore stimato in errore relativo mediante la seguente espressione:

$$a = 1 - \left| \frac{E_s}{R_{NOMINALE}} \right| = 84\%$$

NOTA BENE:

Durante l'esperienza di laboratorio, potrebbe essere stato fornito il multimetro Keysight U1253B (al posto del Hp 974A). Anche in questo caso, si tratta di un multimetro digitale a 4 ½ digit, con 50000 counts; pertanto, le considerazioni fatte per il multimetro Hp 974A restano valide anche per il Keysight U1253B.

Ciò che cambia sono le specifiche di incertezza dello strumento: nel caso in cui le misure siano state eseguite con il multimetro Keysight U1253B, per il calcolo dell'incertezza di misura, ci si deve riferire alla tabella che segue.

Specifiche di incertezza per misure di resistenza col multimetro Keysight U1253B

Table 7-1 DC accuracy ± (% of reading + number of LSD) (continued)

Function	Range ^[a]	Resolution	Test Current or Burden Voltage	Accuracy
Resistance ^{[6][7]}	500.00 Ω ^[3]	0.01 Ω	1.04 mA	0.05 + 10
	5.0000 kΩ ^[3]	0.0001 kΩ	416 µA	0.05 + 5
	50.000 kΩ	0.001 kΩ	41.2 µA	0.05 + 5
	500.00 kΩ	0.01 kΩ	4.12 µA	0.05 + 5
	5.0000 MΩ	0.0001 MΩ	375 nA // 10 MΩ	0.15 + 5
	50.000 MΩ ^[4]	0.001 MΩ	187 nA // 10 MΩ	1.00 + 5
	500.00 MΩ ^[4]	0.01 MΩ	187 nA // 10 MΩ	3.00+5 < 200 M 8.00+5 > 200 M
	500.00 nS ^[5]	0.01 nS	187 nA	1+10

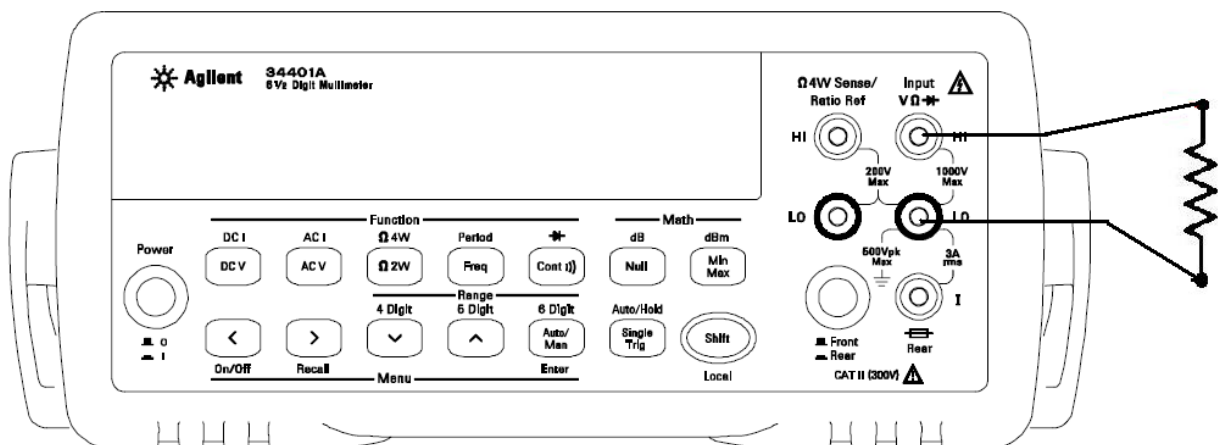
Notes for resistance specifications:

- a** 2% over-range on all ranges except DC 1000 V range.
- 3** The accuracy of 500 Ω and 5 kΩ is specified after applying the Null function, which is used to subtract the test lead resistance and the thermal effect.
- 4** For the range of 50 MΩ/500 MΩ, the relative humidity is specified for < 60%.
- 5** The accuracy is specified for < 50 nS, after applying the Null function with open test lead.
- 6** These specifications are defined for 2-wire ohms using Math Null. Without Math Null, add 0.2 Ω additional error.
- 7** Maximum open voltage: <+ 4.2 V.

1.4 MISURE DI RESISTENZA CON MULTIMETRO DA BANCO A 2 E A 4 MORSETTI

Lo scopo dell'esercitazione è quella di effettuare misure di resistenze per mezzo di un multimetro da banco a due e a quattro morsetti e di valutare l'incertezza di tali misure facendo uso sempre di valutazioni dell'incertezza di tipo B.

Il disegno illustrativo del set-up di misura è il seguente:



Gli strumenti adoperati sono i seguenti:

- multimetro Hp Hewlett Packard 34401A;
- cavetti di connessione;
- resistore con valore nominale pari a $(10^3 \pm 50)m\Omega$;

Il multimetro HP34401A possiede un display a 6 ½ cifre.

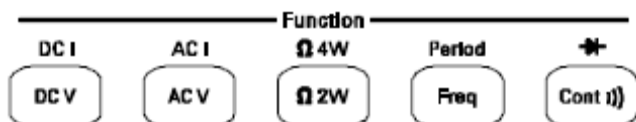
Per il calcolo della resistenza di valore nominale pari a $(10^3 \pm 50)m\Omega$, si imposta la portata dello strumento a 100,0000 Ω , lo strumento a 6 ½ cifre ha un campo di misura pari a 1/1000000 del valore di fondo scala e quindi il passo di quantizzazione “Q” risulta :

$$Q = \frac{V_{FS}}{CM} = \frac{100}{10^6} = 0.0001\Omega$$

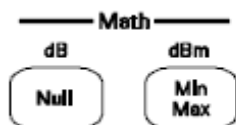
con un incertezza di quantizzazione pari a :

$$U_q = \frac{Q}{2} = 0,00005\Omega$$

La prima parte dell'esercitazione inizia impostando la funzione di misura di resistenza a due morsetti, per mezzo del comando “Ω2W” presente nel pannello frontale del multimetro;



Dopodiché si effettua un'operazione di taratura del multimetro per ridurre gli effetti degli errori sistematici. A tal fine, si cortocircuitano i due morsetti e si imposta la funzione “NULL” del pannello frontale del multimetro.



Infatti, se la resistenza da misurare è molto piccola, come in questo caso, è possibile che la resistenza presente nei cavi sia confrontabile alla resistenza di interesse. Il risultato della misura non sarà quindi affetto dal contributo della resistenza dei cavi :

$$\textbf{RISULTATO} = \textit{Valore letto} - \textit{Valore NULL};$$

Le specifiche del manuale, per misure di resistenze, sono le seguenti:

Accuracy Specifications \pm (% of reading + % of range) [1]						
Function	Range [3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour [2] 23°C \pm 1°C	90 Day 23°C \pm 5°C	1 Year 23°C \pm 5°C	Temperature Coefficient /°C 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001
Resistance [4]	100.0000 Ω	1 mA	0.0030 + 0.0030	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 k Ω	1 mA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 k Ω	100 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 k Ω	10 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 M Ω	5 μ A	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 M Ω	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 M Ω	500 nA 10 M Ω	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
DC Current	10.00000 mA	< 0.1 V	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.01 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	< 1 V	0.05 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
	3.000000 A	< 2 V	0.10 + 0.020	0.120 + 0.020	0.120 + 0.020	0.005 + 0.0020
Continuity	1000.0 Ω	1 mA	0.002 + 0.030	0.008 + 0.030	0.010 + 0.030	0.001 + 0.002
Diode Test [12]	1.0000 V	1 mA	0.002 + 0.010	0.008 + 0.020	0.010 + 0.020	0.001 + 0.002
DC:DC Ratio	100 mV to 1000 V		(Input Accuracy) + (Reference Accuracy)			
			Input Accuracy = accuracy specification for the HI-LO input signal. Reference Accuracy = accuracy specification for the HI-LO reference input signal.			

Transfer Accuracy (typical)

Avendo impostato un valore di fondo scala pari a 100,0000 Ω , in un ambiente di lavoro con una temperatura pari a (23 \pm 5)°C, si fa riferimento alla specifica di incertezza riportata: $\pm(0,010\%+0,004\%)$, dove il primo termine è proporzionale alla lettura e il secondo alla portata.

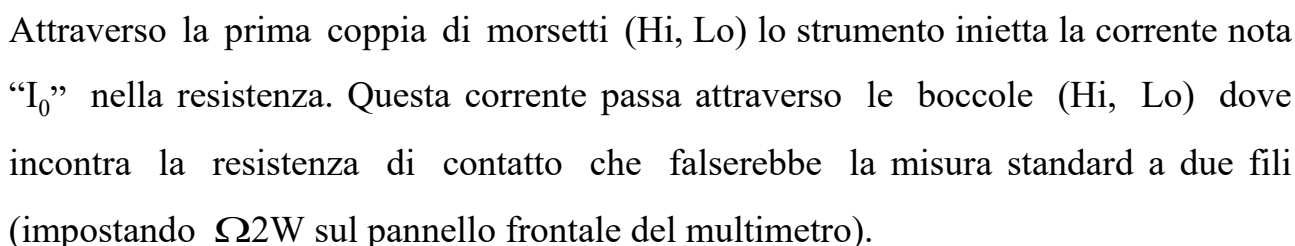
Dal modello definito nel precedente paragrafo per misure di ampiezza possiamo attribuire al primo termine l'incertezza di guadagno U_G , e al secondo l'incertezza di offset e di quantizzazione, rispettivamente indicate con U_O e U_q , conglobando l'incertezza di non linearità integrale:

$$\begin{cases} |\Delta G \cdot y_q| \leq U_G |y_q| \text{ con } U_G = 0,01\% \\ |O + inl(x) + e_q(x)| \leq U_{O+inl+q} \text{ con } U_{O+inl+q} = 0,004\% \end{cases}$$

Quindi:

Sapendo che la resistenza misurata col multimetro è pari a 1,056 Ω il risultato della misura si esprime come:

Per le resistenze di valore più basso, i multimetri digitali dispongono spesso di un sistema a quattro morsetti (metodo Kelvin):



12

Analogamente al caso precedente, si effettua l'operazione di NULL, misurando un valore di resistenza pari a $R=1,012\ \Omega$; come si può notare, tale valore, risulta essere più accurato del caso di multimetro a due morsetti. Dal precedente modello per il calcolo di incertezza si ottiene:

$$\begin{cases} |\Delta G \cdot y_q| \leq U_G |y_q| \text{ con } U_G = 0,01\% \\ |O + \text{inl}(x) + e_q(x)| \leq U_{O + \text{inl} + q} \text{ con } U_{O + \text{inl} + q} = 0,004\% \end{cases}$$

Quindi:

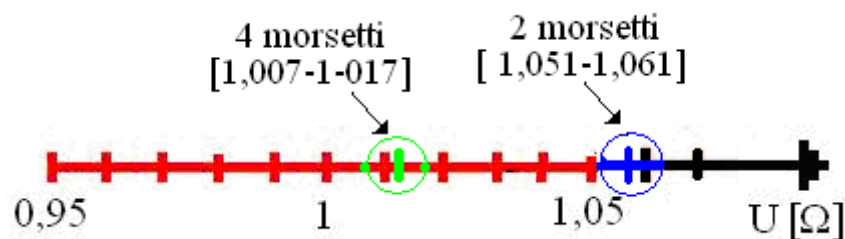
$$\begin{aligned} U(R) &= U_G \cdot \text{ValoreLetto} + U_{O + \text{inl} + q} \cdot \text{Portata} = \\ &= 0,01\% \cdot 1,012\Omega + 0,004\% \cdot 100 = 0,005\ \Omega \end{aligned}$$

Notiamo che l'incertezza in questo caso non è cambiata, ma il valore di resistenza trovato risulta essere più vicino al valore nominale della resistenza di prova.

$$R = (+1,012 \pm 0,005)\Omega$$

1.5 Osservazioni

Dai precedenti risultati possiamo notare che per mezzo del multimetro da banco a 6 ½ cifre si ottiene una stima più accurata del misurando, rispetto alla misura col multimetro portatile descritto in sezione 1.1. Questi miglioramenti vanno ricondotti alla possibilità dello strumento di minimizzare gli errori sistematici per mezzo di funzioni appropriate. In conclusione, usando una resistenza con valore nominale di $(10^3 \pm 50)m\Omega$, per mezzo del multimetro da banco, si ottiene una stima del valore del misurando pari a $R = (+1,056 \pm 0,005)\Omega$ nel caso di misura a due morsetti e di $R = (+1,012 \pm 0,005)\Omega$ nel caso di misura a quattro morsetti. Graficando i due range di valori che possono essere “ragionevolmente attribuiti al misurando” si nota che, l'incertezza della misura a 4 morsetti è contenuta nel range fornito dal costruttore, al contrario di quella relativa al caso di misura a due morsetti.



Quindi, quantunque sia sempre presente contributo degli errori aleatori dovuti all'effettuazione di singole misure, nel caso di misura di piccola resistenza col metodo dei 4 morsetti, come atteso, si ottiene una misura più accurata, in quanto si è compensato l'effetto delle resistenze di contatto.

Volendo quantificare l'accuratezza delle due misure, si considerano le stime degli errori sistematici:

$$E_s = 1,056 - 1 = 0,056\Omega \text{ (DUE MORSETTI)}$$

$$E_s = 1,012 - 1 = 0,012\Omega \text{ (QUATTRO MORSETTI)}$$

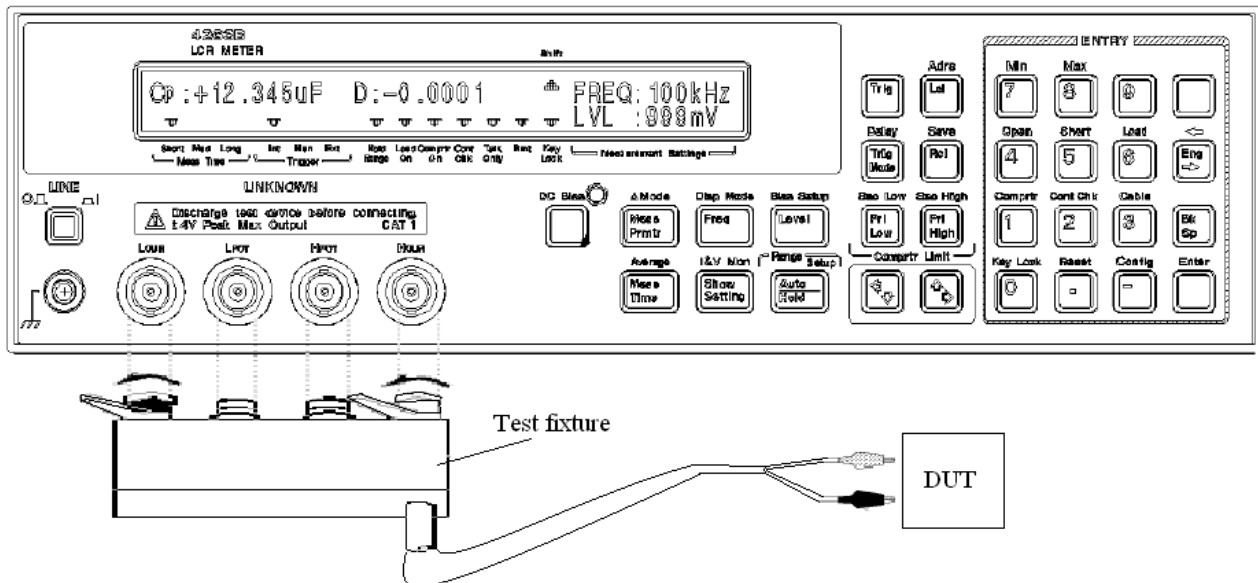
Tali stime portano a valori di accuratezza relativa pari al 94 % ed al 98 %, rispettivamente per misura a due ed a quattro morsetti.

Si noti, infine, che entrambe le misure sono, ovviamente, più accurate rispetto alla misura eseguita con il multimetro portatile Hp 974A.

1.6 MISURE DI IMPEDENZA CON LCR-METER

Lo scopo dell'esercitazione è quello di effettuare misure di impedenze per mezzo dell'LCR-meter e di valutare l'incertezza di tali misure facendo uso, al solito, delle specifiche del costruttore.

Lo schema del set-up di misura è:



Gli strumenti adoperati sono i seguenti:

- AGILENT LCR-meter 4263B;
- Kelvin clip leads di lunghezza pari a 1m;
- Test fixture
- Resistenza con valore nominale pari a $(1000 \pm 50)m\Omega$;
- Capacità con valore nominale pari a $(6800 \pm 340)pF$;

Gli LCR meter permettono di determinare i parametri induttanza, capacità, resistenza, fattore di qualità e coefficiente di perdita di induttori, condensatori e resistori in accordo con prefissati schemi elettrici equivalenti.

La sollecitazione elettrica all'impedenza sotto test avviene tramite tensioni e correnti basse con il livello del segnale di test che può essere variato dall'operatore da qualche mV a 1 V efficaci.

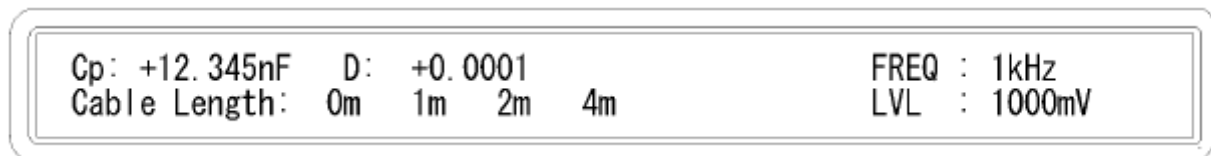
Il tempo che intercorre tra una misura e quella ripetuta è dell'ordine della decina

di millisecondi, e varia in funzione dell'incertezza richiesta, tanto minore è l'incertezza, tanto maggiore dovrà essere il tempo necessario alla misurazione. Un esempio di valore possibile sono 25 ms (short). Lo strumento permette di eseguire, quindi, misure mediate in diversi archi temporali: short, medium, long.

L'esercitazione inizia con l'operazione di "reset" dello strumento e collegando il test fixture al pannello frontale come illustrato nello schema.

Dopodiché si esegue la procedura di calibrazione dello strumento al fine di minimizzare l'effetto degli errori sistematici.

Per evitare gli effetti parassiti introdotti dalla presenza del cavo (qualora presente) si imposta sul display la lunghezza corrispondente, dal seguente comando:



Dopodiché si effettua la procedura di calibrazione tramite il comando OPEN/SHORT dello strumento impostando la frequenza massima a cui sarà eseguita la prova (100 kHz). Tale operazione, dovrebbe comunque essere eseguita, a rigore, per ogni valore di frequenza a cui si effettuano le prove.

L'effettuazione delle misure preliminari di calibrazione avviene, quindi in condizione di circuito aperto e di circuito chiuso. Lo strumento, tramite queste due misure, compensa automaticamente gli effetti parassiti dalla misura di impedenza.

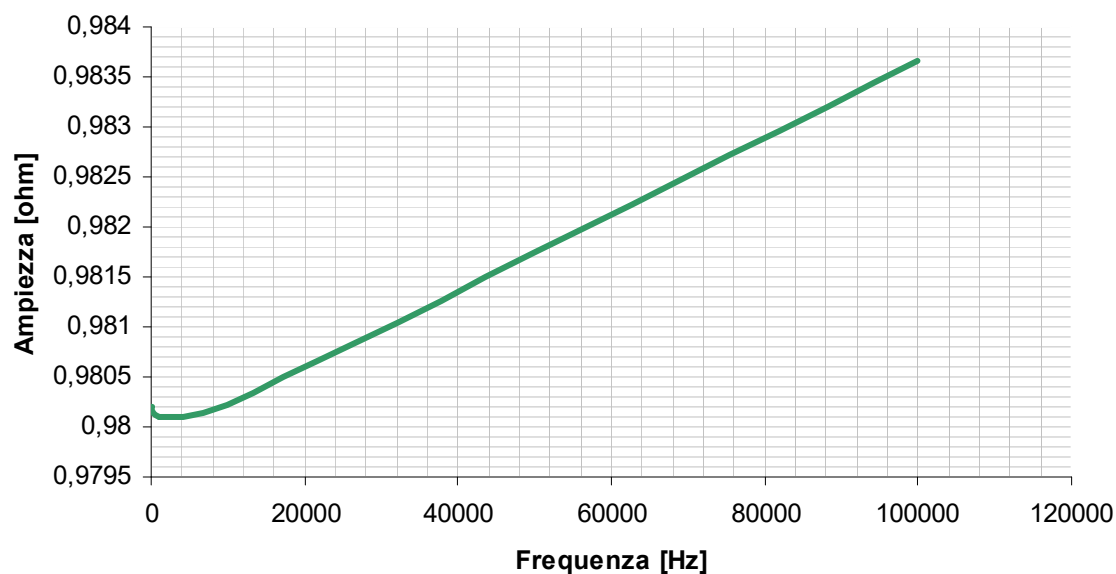
Dopo l'operazione di calibrazione, si imposta la frequenza ed il livello del segnale di test rispettivamente a 100KHz e 1V, misurando i valori di resistenza e di reattanza del DUT (che in questo caso è la resistenza di valore $(1000 \pm 50)m\Omega$). La misura prosegue quindi impostando i vari valori di frequenza. Di seguito sono riportati i risultati:

Frequenza [Hz]	Resistenza [mΩ]	Reattanza [mΩ]
100.000	982,4	- 49,8
10.000	980,2	- 4,7
1.000	980,1	- 0,5
120	980,2	- 0,2
100	980,2	- 0,2

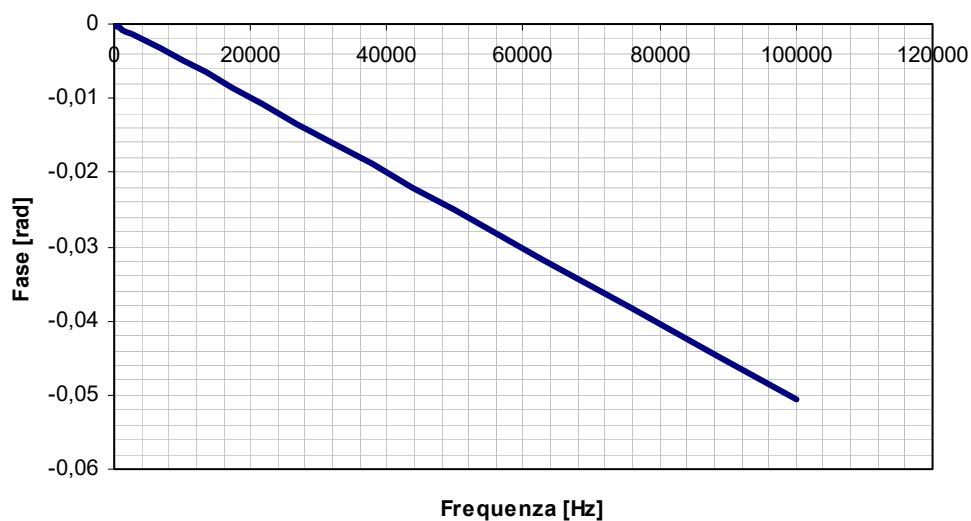
Si noti che queste misure sono state eseguite con un numero di medie pari a 8, al fine di ridurre l'effetto degli errori casuali.

Se rappresentiamo le precedenti misure in modulo e fase avremo i seguenti grafici:

$|Z|$



Fase



Dai precedenti due grafici si nota che alle alte frequenze prevalgono gli effetti parassiti del resistore, che tendono ad aumentare il valore nominale del resistore.

Il circuito equivalente, infatti, prevede una induttanza in serie alla resistenza ed una capacità in parallelo alla serie RL. I valori delle impedenze parassite dipendono dalla tecnica costruttiva.

Alle basse frequenze l'effetto della capacità e dell'induttanza possono essere trascurate in quanto la capacità si comporta come un circuito aperto e l'induttanza come un cortocircuito. Aumentando la frequenza, la capacità tende a diminuire il valore dell'impedenza mentre l'induttore tende ad aumentarlo, finché alla frequenza $1/\sqrt{2\pi LC}$ la coppia LC entra in risonanza compensandosi a vicenda.

Per il calcolo dell'incertezza delle misure di resistenza e reattanza riportate nella precedente tabella, dobbiamo fare riferimento alle specifiche del costruttore.

Per il calcolo dell'incertezza dobbiamo applicare le seguenti formule, riportate sul manuale. N.B.: i valori di A e B riportati nel manuale sono in %

$$A_e = A + \frac{BCZ_x}{|Z_s|} + \frac{D}{|Z_x|} + \frac{|Z_x|}{E} \quad \text{con } |Z_x| > 100\Omega$$

$$A_e = A + \frac{BCZ_s}{|Z_x|} + \frac{D}{|Z_x|} + \frac{|Z_x|}{E} \quad \text{con } |Z_x| \leq 100\Omega$$

dove Z_x è il valore misurato dell'impedenza, per cui, consultando le tabelle di incertezza fornite dal costruttore, avremo:

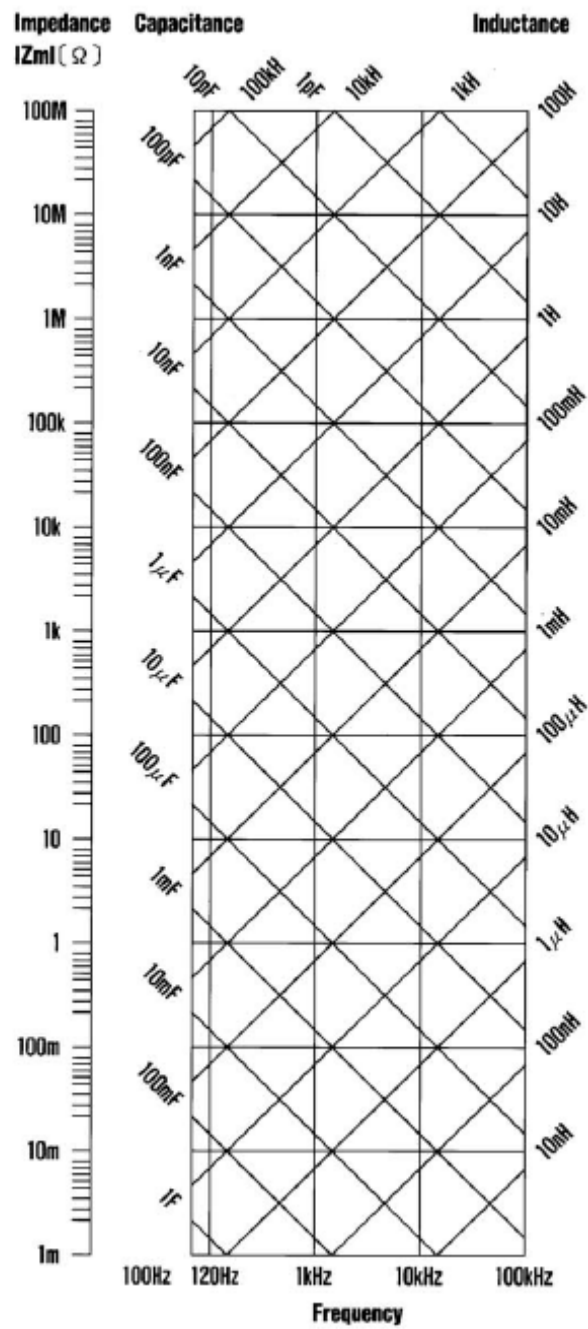
Frequenza [Hz]	A	B	C	D [Ω]	E [KΩ]	Z_s [Ω]	Z_x [Ω]	$u_{ Z }$ [%]
100.000	0,0097	0,0011	1	0,75	280	1	0,9824	1,8
10.000	0,004	0,0003	1	0,075	2800	1	0,9802	0,6
1.000	0,004	0,0003	1	0,0165	28000	1	0,9801	0,5
120	0,005	0,0009	1	0,01	280000	1	0,9802	0,7
100	0,005	0,0009	1	0,01	280000	1	0,9802	0,7

Nella seconda parte dell'esercitazione abbiamo eseguito misure di capacità avvalendosi dello schema equivalente resistenza di perdita dovuta all'isolamento del dielettrico in parallelo al condensatore ideale.

I valori di capacità parallelo e di resistenza parallelo sono riportati nella seguente tabella:

Frequenza [Hz]	C _p [nF]	R _p [MΩ]
100	6,72	141,89
120	6,71	133,04
1000	6,70	5,74
10000	6,64	0,26
100000	6,52	0,02

Per il calcolo dell'incertezza, si applicano le formule sopra riportate, dove $|Z_x|$ è il valore dell'impedenza Z ottenuta convertendo il valore della capacità parallelo (C_P) per mezzo del seguente diagramma di conversione:



Si ottiene:

Frequenza [Hz]	A	B	C	D [Ω]	E [K Ω]	Zs [Ω]	$ Z_X $ (valore di Cp convertito) [Ω]	u_{CP} [%]
100	0,0048	0,00055	1	0,01	280000	100000	300000	0,65
120	0,0048	0,00055	1	0,01	280000	100000	100000	0,54
1.000	0,0011	0,0002	1	0,0165	28000	10000	30000	0,18

10.000	0,001 6	0,0002	1	0,075	2800	1000	3000	0,23
100.000	0,011 2	0,0011	1	0,75	280	100	300	1,46

L'incertezza della resistenza parallelo, invece, si calcola come :

$$U_{R_p} = \pm \frac{RP_x \times D_e}{D_x \mp D_e}$$

dove RP_x indica il valore misurato della resistenza parallelo in Ω , D_e è l'incertezza di D , mentre D_x è il valore misurato di D .

L'incertezza del fattore di dissipazione, D_e , si calcola come:

$$D_e = \pm \frac{A_e}{100}$$

Se il valore misurato di D risulta ad essere maggiore di 0,1 , allora bisogna moltiplicare D_e per $(1+D_x)$. L'incertezza sulla resistenza parallelo si applica solo quando il valore misurato di D è minore di 0,1.

Nella seguente tabella è riassunto quanto detto precedentemente:

RP_x [k Ω]	D_e	D_x	u_{RP} [%]
141890	0,0058	0,0016	0,75
133040	0,0058	0,0014	0,79
5740	0,0026	0,0041	0,23
260	0,0028	0,0091	0,16
20	0,0152	0,0137	0,46