



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Determinazione del coefficiente di temperatura di resistori campione nel range 1 ohm - 100 Mohm

*Original*

Determinazione del coefficiente di temperatura di resistori campione nel range 1 ohm - 100 Mohm / RONCAGLIONE TET, Luca; Lanzillotti, Marco; Francese, Claudio; Capra, PIER PAOLO; Galliana, Flavio. - (2021), pp. 1-19.

*Availability:*

This version is available at: 11696/71690 since: 2021-10-28T16:15:13Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

*L. Roncaglione Tet, M. Lanzillotti,  
C. Francese, P. P. Capra, F. Galliana*

**Determinazione del coefficiente di temperatura di resistori campione  
nel range 1 ohm – 100 Mohm**

R.T. 34/2021

Ottobre 2021

## Rapporto Tecnico

### **Abstract (it)**

Nel campo delle misure di resistenza elettrica, il mantenimento e la disseminazione della riferibilità metrologica è realizzata per mezzo di resistori campione progettati per risentire in misura minima di tutti i parametri di influenza. Tra questi parametri figura la temperatura, che agisce trasversalmente in modo pervasivo e significativo. In questo RT 10 campioni di resistenza disponibili commercialmente sono stati caratterizzati termicamente secondo tecniche dettagliatamente descritte. Il processo di caratterizzazione rivela elementi utili sia per il calcolo delle incertezze di taratura e d'uso, sia per operare delle correzioni.

### **Abstract (en)**

In the field of electrical resistance measurement, the metrological traceability and dissemination is achieved by means of standard resistors designed to minimize, as much as possible, the effect of the influence quantities. Among these quantities, the temperature acts transversally in a pervasive and significant way. In our study, 10 commercially available standard resistors were thermally characterized, according to the techniques that we described in detail. The characterization data reveal useful information, for both uncertainty budget computations and measurement results correction.

## **Introduzione**

Uno dei principali requisiti di un campione materiale consiste nella stabilità dell'intensità della grandezza che mantiene, sia nel tempo (a breve e lungo termine) sia rispetto alla variazione dei parametri di influenza. Le caratteristiche costruttive e di progettazione tengono conto di questi requisiti e adottano tecnologie e materiali in grado di minimizzare tutte le variazioni possibili. I nuovi campioni materiali, di praticamente tutte le grandezze, con le tecnologie attuali, presentano caratteristiche eccellenti in materia di stabilità, ma possono ulteriormente essere migliorate con delle compensazioni matematiche una volta che sia nota con precisione le dipendenze dalle grandezze di influenza.

Una grandezza che in ambito metrologico risulta particolarmente pervasiva è la temperatura, che condiziona sia i campioni materiali sia il funzionamento delle apparecchiature di misura.

Nel campo delle misure di precisione di resistenza elettrica l'effetto della temperatura, per variazioni di circa 1 °C comporta delle variazioni di resistenza dello stesso ordine di grandezze dell'incertezza di misura, dunque non è proprio possibile operare in questo campo senza l'uso di accorgimenti efficaci. Esempio significativo dell'effetto significativo della temperatura in applicazioni ad altissima precisione per la resistenza elettrica sono riportati in [1, 2].

Gli accorgimenti e le tecniche più utilizzate consistono nell'impiego di ambienti dove i parametri ambientali sono controllati e misurati continuamente, ma anche l'adozione di dispositivi di contenimento dei campioni materiali con la possibilità di condizionare finemente la temperatura. In tali ambienti è possibile operare a temperature prossime a quelle ambiente, ossia a 23,0 °C con una stabilità che può arrivare a circa 0,001 °C

In questo rapporto tecnico viene descritto l'uso di queste tecniche per la determinazione del coefficiente di temperatura di campioni di resistenza elettrica nel campo di valori compreso tra 1 ohm e 100 Mohm.

## **Metodo di misura dei resistori nel campo 1 ohm – 19 kohm**

Negli anni sessanta è stato progettato il primo ponte a comparatore di corrente [3], che sostituisce tecniche più semplici per la misura di resistori elettrici. Le tecniche più semplici sono la misura voltamperometrica semplice, che utilizza un generatore di corrente continua e un voltmetro, oppure un metodo potenziometrico, nel quale si confrontano due resistori collegati in serie ed attraversati dalla stessa corrente continua. Queste tecniche consentono una misura veloce e diretta, ma sono poco accurate. Risultati migliori si ottengono con la seconda tecnica, ma l'accuratezza peggiora quando il rapporto tra i resistori a confronto differisce da 1:1.

Il ponte a comparatore di corrente (Direct Current Comparator o DCC) effettua una misura di confronto tra due resistori con una tecnica che in passato è stata considerata rivoluzionaria, ed è schematizzata in Fig 1

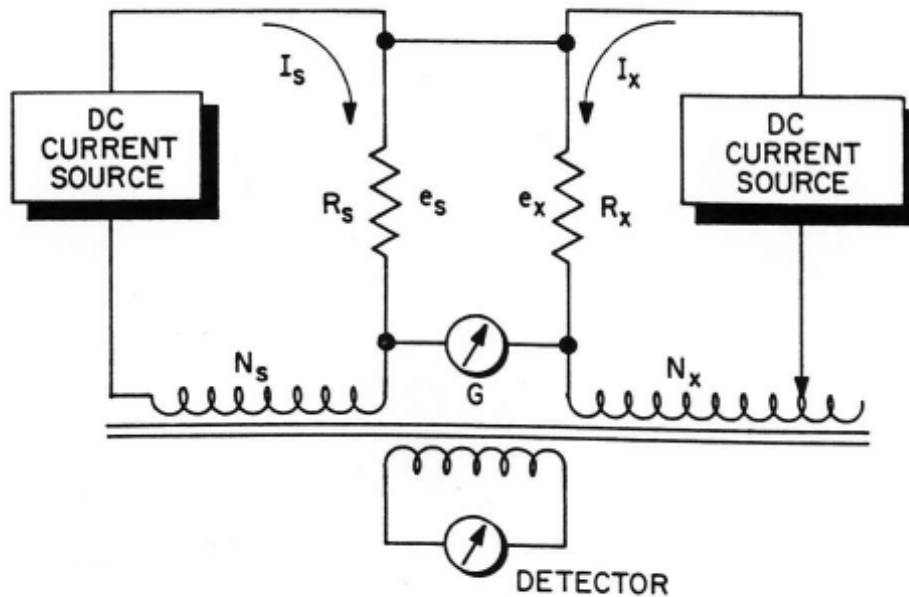


Fig. 1 – Schema elettrico di principio di un Ponte a Comparatore di Corrente. Nello schema I due resistori  $R_s$  e  $R_x$  sono confrontati e il risultato della misura è il valore del rapporto tra I valori di resistenza.

Questa figura mostra una versione semplificata del ponte. I resistori a confronto  $R_s$  e  $R_x$ , sono inseriti in due differenti rami del ponte, ciascuno connesso in serie con un generatore di corrente e un avvolgimento ( $N_x$  o  $N_s$ ). La differenza di tensione viene misurata mediante il rilevatore di zero  $G$ . Il ponte imposta sia il valore delle correnti nei due rami, sia il numero degli avvolgimenti del comparatore. Quando sia il valore  $G$ , sia il flusso magnetico (Detector) sono nulli il ponte è bilanciato e in questa condizione particolare valgono le relazioni:

$$\begin{aligned} V_s &= V_x \\ R_s \cdot I_s &= R_x \cdot I_x \\ \frac{I_s}{I_x} &= \frac{R_x}{R_s} \end{aligned} \quad (1)$$

e:

$$\begin{aligned} I_s \cdot N_s &= I_x \cdot N_x \\ \frac{I_s}{I_x} &= \frac{N_x}{N_s} \end{aligned} \quad (2)$$

Combinando (1) e (2) si ottiene facilmente che:

$$\begin{aligned} \frac{I_s}{I_x} &= \frac{R_x}{R_s} = \frac{N_x}{N_s} \\ R_x &= \frac{N_x}{N_s} \cdot R_s \end{aligned} \quad (3)$$

L'eq. 3 mostra che il valore di  $R_x$  è uguale al rapporto degli avvolgimenti moltiplicato per il valore del resistore di riferimento.

Il vantaggio di questo sistema di misura, rispetto al più semplice metodo voltamperometrico diretto è facilmente intuibile: la linearità e accuratezza del DCC dipendono solo da un rapporto di avvolgimenti. Inoltre la precisione iniziale è permanente [3-8], si conserva nel tempo e normalmente non richiede ri-calibrazioni. Nella realtà il circuito del comparatore di corrente dispone di un avvolgimento ulteriore per regolare esattamente il flusso e bilanciare il ponte.

Il ponte descritto opera misure di rapporto al massimo della sensibilità nel campo compreso tra 1:1 e 1:13, con accuratezze migliori di  $1 \cdot 10^{-7}$  e correnti fino a 150 mA. Il range operativo risulta quindi da 1 ohm fino a 100 kohm. Con l'impiego di un generatore di tensione ausiliario lo strumento può arrivare a misure di  $1 \text{ G}\Omega$  [4, 5].

### **Metodo di misura dei resistori nel campo 100 kohm – 10 Mohm**

Il range di misura compreso tra 100 kohm e 10 Mohm risulta essere coperto con precisione mediante misure di confronto, in rapporto 1:1, con resistori campioni tarati e utilizzando, come strumento compratore, un multimetro a  $8^{1/2}$  cifre. L'elevata stabilità a breve, sia dei multimetri, sia dei resistori campione, unita all'elevata linearità dei moderni multimetri (prossima a  $1 \cdot 10^{-7}$ ) [6] sono tutti fattori che rendono il metodo per sostituzione particolarmente adatto per le misure in oggetto.

Durante le fasi di misura i resistori sono tutti posizionati all'interno di un bagno in aria Kambic mod. 190, con una stabilità termica di  $0.0005 \text{ }^\circ\text{C}$  nel breve termine.

Le procedure di taratura (o di caratterizzazione termica) prevedono una serie di misure sul resistore di riferimento, una serie sul resistore in taratura e un'ultima serie sul resistore di riferimento. Il valore del resistore in taratura si deduce dalla XXX

$$R_x = \frac{L_x}{L_s} \cdot R_s \quad (\text{XXX})$$

Dove:

- $R_x$  è il valore di resistenza del resistore in taratura
- $R_s$  è il valore di taratura del resistore di riferimento
- $L_x, L_s$  sono la media delle misure di resistenza effettuate con il DMM sui resistori a confronto.

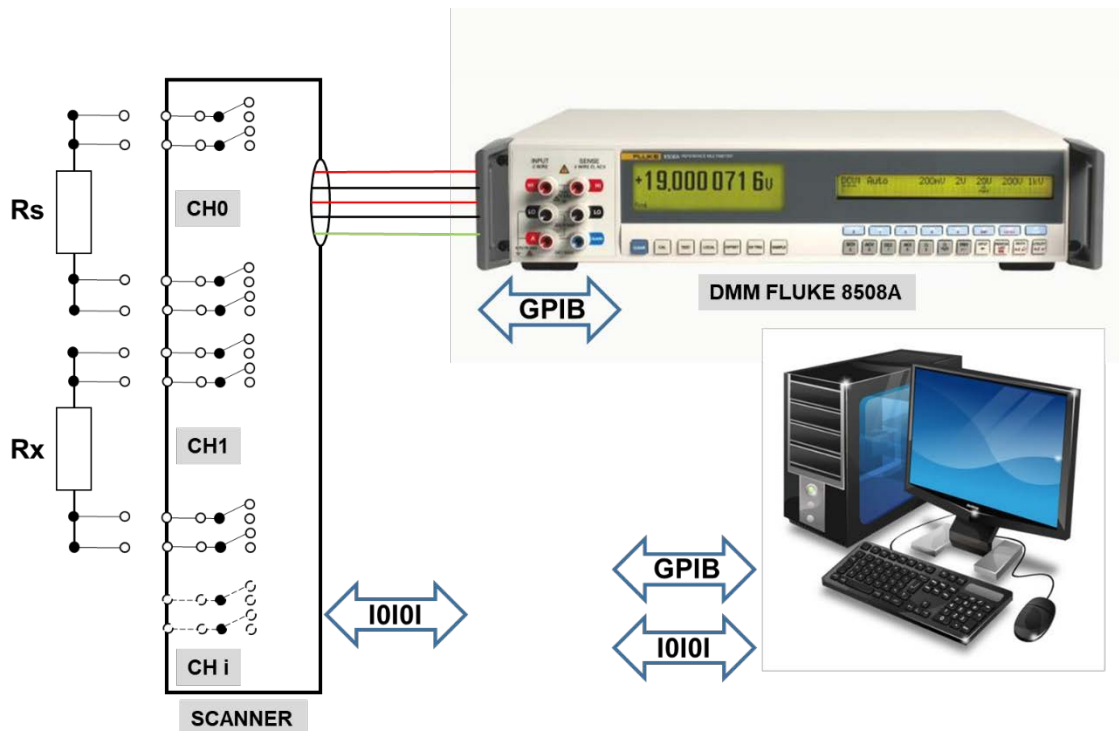


Fig. 2 – Sistema di misura per sostituzione con scanner rotativo a 4 vie e 6 sezioni. Lo scanner è controllato mediante un sistema embedded connesso a un pc mediante una porta USB. Lo scanner può essere azionato anche manualmente. Il microprocessore è collegato a un sensore combinato, posto in prossimità dei resistori in taratura, in grado di acquisire la temperatura ambiente e l'umidità.

### Metodo di misura dei resistori nel campo > 100 Mohm

Le misure di caratterizzazione termica e le tarature di resistori aventi un valore nominale superiore a 10 Mohm richiedono, per le procedure tecniche INRIM, il circuito di Fig. 3. Il resistore in taratura ( $R_x$ ) è collegato in serie a un resistore campione, di valore inferiore, normalmente compreso tra 100 kohm e 10 Mohm. La serie così ottenuta, che forma un divisore di tensione, è collegata a un generatore di tensione continua di elevata stabilità, in grado di erogare tensioni negative e positive. Un multimetro di precisione misura sia la tensione totale ai capi del partitore ( $V_{out}$ ), sia la tensione ai capi del resistore di riferimento ( $V_s$ ). Il valore della resistenza  $R_x$  si ottiene dall'equazione del partitore di tensione [1] [5, 7].

$$R_x = R_{x\pm} = \frac{V_x}{I_x} = (V_{out} - V_s) \frac{R_s}{V_s} = R_s \left( \frac{V_{out}}{V_s} - 1 \right) \quad [1]$$

Il valore della resistenza  $R_x$  si ottiene dalle medie dei valori misurati alimentando il partitore con tensioni positive e negative. Il motivo dell'inversione della polarità della tensione è legato alla presenza di tensioni di natura termoelettrica, che in questo caso costituiscono una fonte diretta di incertezza. Mantenendo il più possibile stabile in temperatura tutti i punti del circuito di misura gli effetti delle tensioni termoelettriche vengono minimizzati considerando la media delle misure effettuate nelle due polarità.

Il circuito è completato da un divisore di tensione ausiliario collegato al generatore di tensione. L'impostazione del rapporto di divisione è tale da essere il più vicino possibile a quello costituito dai resistori a confronto, in modo da erogare una tensione di guardia

prossima a quella del punto di contatto tra i resistori. Applicando tale tensione ai contenitori dei resistori in misura si riesce a minimizzare le correnti di fuga dalle parti del circuito che risultano ad impedenza più alta. La regolazione della tensione di guardia è effettuata una volta per tutte prima dell'inizio della taratura utilizzando un detector ( D ) collegato con indicato in figura. Al termine della regolazione della tensione di guardia il detector viene rimosso dal circuito.

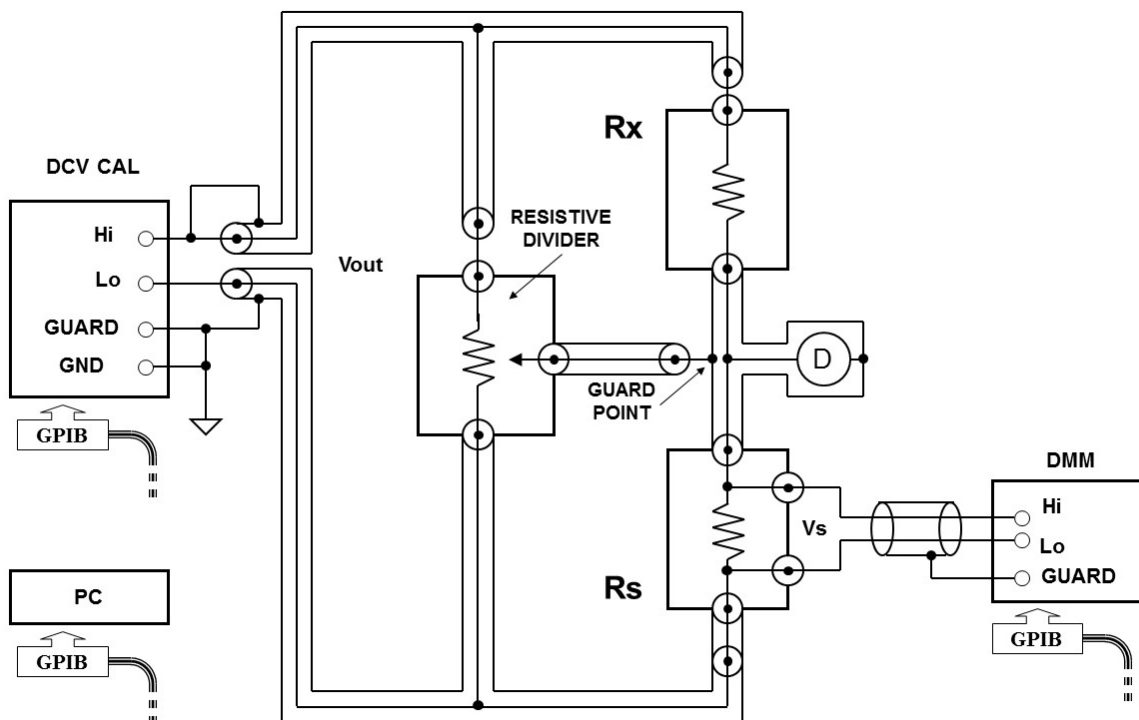


Fig. 3 - Schema del circuito utilizzato per la taratura di resistori nel campo di valori compreso tra 100 Mohm e 1 Tohm.

### Misura del coefficiente di temperatura

Le misure dei coefficienti di temperatura (CT) sono state condotte con i metodi di misura precedentemente esposti mantenendo i resistori all'interno di due contenitori termostatici con la possibilità di controllare ed impostare la temperatura. La figura 4 mostra un gruppo di resistori disposti all'interno di uno dei contenitori termostatici utilizzati e connessi, tramite cavi e collegamenti a basso rumore termico, allo scanner e quindi al ponte a comparatore di corrente. In un bagno termostatico di tipo diverso, non visibile in figura, sono invece conservati i resistori campione che rimangono, costantemente alla temperatura di  $23,000 \pm 0,0002$  °C.

La temperatura dell'ambiente che mantiene i resistori è costantemente misurato mediante un termometro al Platino tipo PT 100 regolarmente tarato, la misura di temperatura viene effettuata a due valori di corrente (1 mA e 1,41 mA) mediante il ponte a comparatore di corrente utilizzando un resistore da 100 ohm come riferimento.

Il procedimento di misura adottato per la determinazione dei CT prevede:



1. Impostazione della temperatura del contenitore a 23 °C e condizionamento di 24 ore dei resistori;
2. Misura iniziale della resistenza di tutti i campioni a 23 °C;
3. Diminuzione della temperatura a 21 °C e condizionamento termico per 48 ore;
4. Misura della resistenza di tutti i campioni a 21 °C;
5. Aumento della temperatura a 25 °C e condizionamento termico per 48 ore;
6. Misura della resistenza di tutti i campioni a 25 °C;
7. Diminuzione della temperatura a 23 °C e condizionamento termico per 24 ore;
8. Misura finale della resistenza di tutti i campioni a 23 °C;

La prima misura, eseguita a 23 ° viene confrontata con la misura dell'ultima taratura registrata per verificare la stabilità a lungo termine. Invece il confronto eseguito tra le due misure effettuate a 23 °C (la prima e l'ultima misura), viene utilizzato per una verifica del completo esaurimento di tutti i transistori termici e per scongiurare eventuali effetti isteretici permanenti.



*Fig. 4 – A sinistra si osserva uno dei due bagni Kambic utilizzati per il condizionamento termico. I resistori vengono portati alla temperatura di misura e misurati in seguito all'esaurimento dei transistori termici. A destra si osserva un particolare delle connessioni dei resistori nel campo compreso tra 1 e 19 kohm. Per tali resistori sono state utilizzate delle connessioni a basso rumore termico, costituite da cavi argentati e isolati in teflon con capicorda a forcilla in rame elettrolitico puro crimpate.*

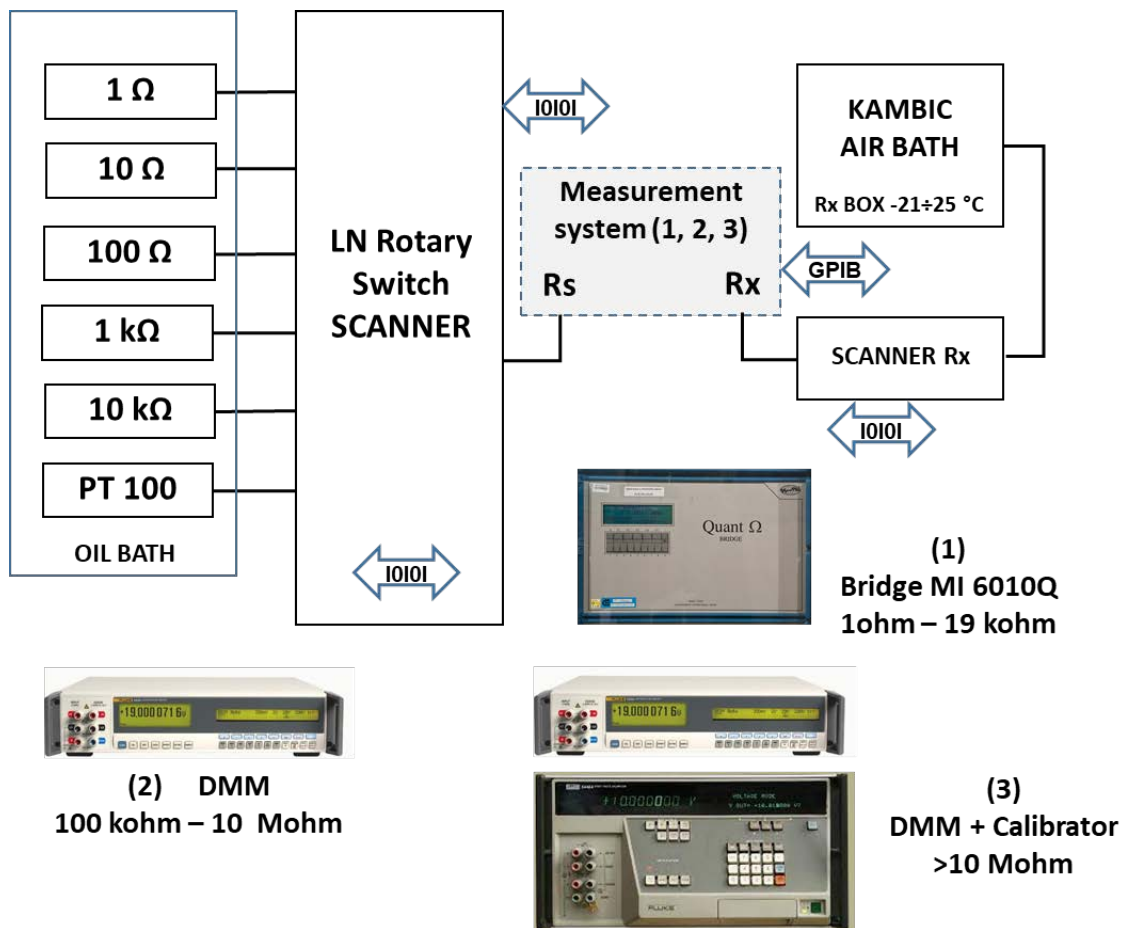


Fig. 5 – Schema a blocchi delle tre stazioni di misura (in figura (1), (2) e (3)) utilizzate per la caratterizzazione termica dei resistori aventi valori nominali compresi tra 1 ohm e 100 Mohm. Nel campo di valori tra 1 e 19 kohm le misure sono effettuate per confronto con campioni materiali di uguale valore nominale e un ponte a comparatore di corrente MI 6010Q. Nel campo di valori compreso tra 100 kohm e 10 Mohm le misure si eseguono sempre per confronto, ma utilizzando un multimetro

## Risultati

I resistori aventi il valore nominale 1 ohm e 10 kohm sono analizzati in dettaglio in quanto vengono utilizzati per le operazioni di taratura automatica della strumentazione dotata della funzione artifac calibration. Si riporta, nella tabella 1, il valore delle misure e le equazioni dell'andamento della resistenza in funzione della temperatura di tutti i resistori caratterizzati.

### Resistore da 1 ohm

Il resistore da 1 ohm mostra una variazione di resistenza monotona con la temperatura, approssimabile ad un andamento lineare con un coefficiente di temperatura, valutato a 23 °C, inferiore a  $3 \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ . I dati acquisiti sono riportati nella tabella 1.

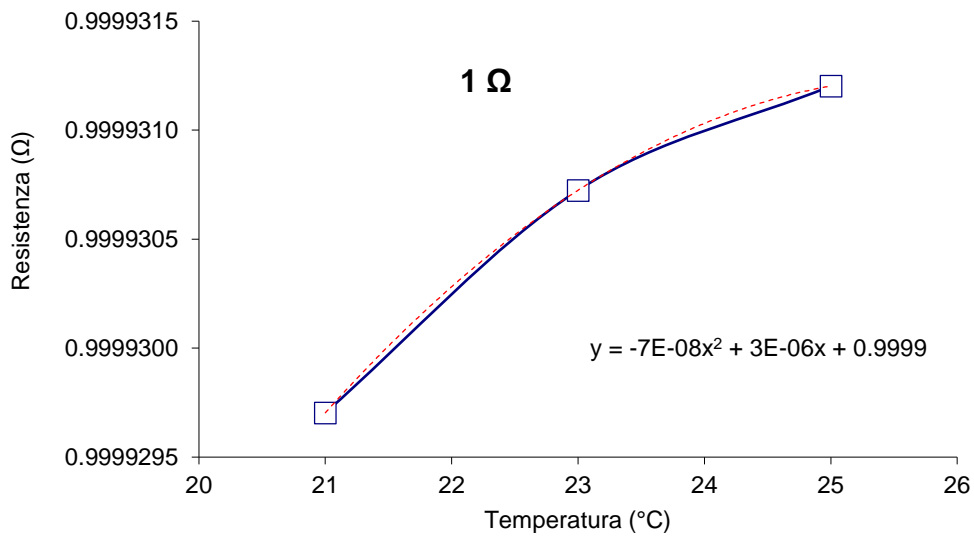


Fig. 6 – Grafico riportante la variazione della resistenza in funzione della temperatura, nell'intervallo 21- 25 °C, di un resistore FLUKE 742 da 1 ohm.

La differenza tra la prima misura a 23 °C e l'ultima è dell'ordine di  $6.4 \cdot 10^{-8}$ , variazione che conferma la totale assenza di effetti che possono aver modificato, in modo permanente, le caratteristiche del resistore.

### Resistore da 10 kohm

Il resistore da 10 kohm mostra una variazione di resistenza monotona, nell'intervallo considerato, con un andamento asimmetrico rispetto al valore di temperatura centrale (23,0 °C). La variazione nel tratto 21-23 °C appare più marcata rispetto a quanto risulti nell'intervallo successivo, ma in termini assoluti il cambiamento è dell'ordine di un valore  $> 1$  ppm / °C.

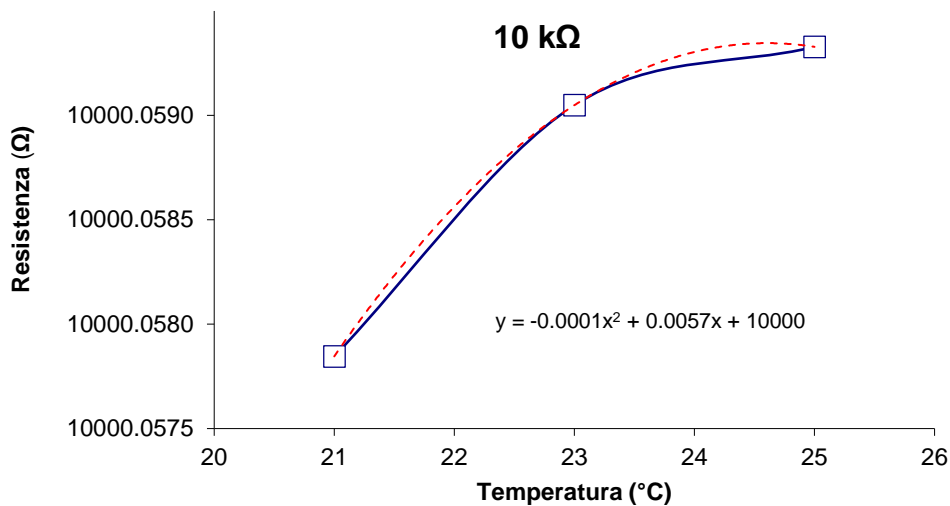


Fig. 7 – Grafico riportante la variazione della resistenza in funzione della temperatura, nell'intervallo 21- 25 °C, di un resistore FLUKE 742 da 10 kohm.

### Durata del transitorio termico

Nell'ambito della caratterizzazione termica di un resistore risulta anche interessante valutare il tempo di stabilizzazione in seguito ad una sollecitazione termica. A tale proposito, il resistore da 1 ohm, in equilibrio termico con l'ambiente a 23 °C (all'interno del contenitore termostatico) è stato misurato in seguito ad una sollecitazione termica di due gradi. Il grafico di Fig 8 riporta tale andamento, dove si evince che il resistore richiede meno di due ore per la completa stabilizzazione. Nella pratica i tempi di stabilizzazione termica sono più lunghi in modo da assicurare l'esaurimento dei fenomeni transitori per qualsiasi resistore ad eccezione dei campioni IET (ex ESI) mod. SR 104 che richiedono, a causa dell'elevato isolamento termico, anche 48 ore.

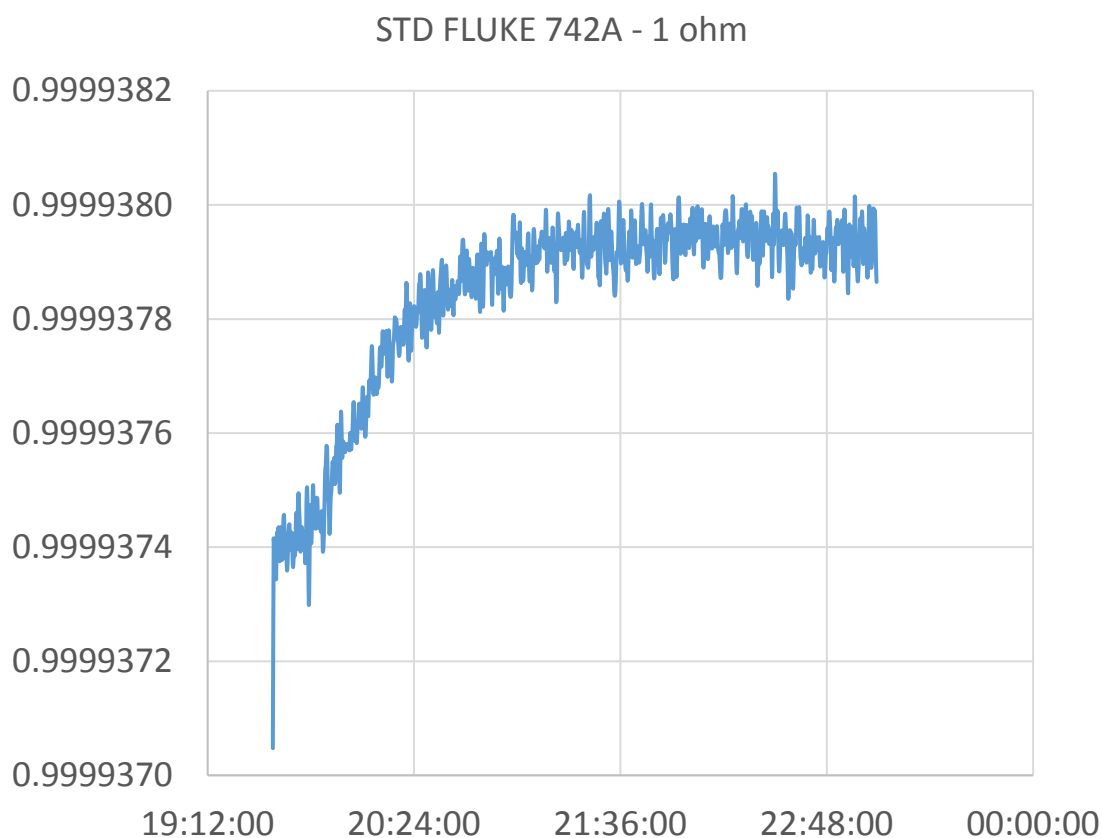


Fig. 8 – Grafico riportante la variazione della resistenza in funzione del tempo in seguito alla variazione di temperatura di 2 °C di un resistore FLUKE 742 da 1 ohm.

### Caratterizzazione termica - Risultati

La Tabella 1 riporta, per ogni resistore sottoposto al processo di caratterizzazione termica, tutti i valori medi di resistenza in corrispondenza dei valori di temperatura e le equazioni dedotte dai dati. L'andamento grafico del comportamento dei resistori è visibile nella serie di grafici che seguono la tabella.

Tab. 1 – Valori di resistenza misurati in corrispondenza delle diverse temperature ed equazione del comportamento della resistenza in funzione della temperatura.

1 ohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	0.9999297	0.064	1
	23	0.9999307		1
	25	0.9999312		1
	23	0.9999307		1
Equazione: $y = -0.0000000678x^2 + 0.0000034953x + 0.9998862$				

1.9 ohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	1.90004292	-0.024	
	23	1.90004325		
	25	1.90004295		
	23	1.90004330		
Equazione: $y = -0.0000000794x^2 + 0.0000036616x + 1.90000105$				

10 ohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	10.0002123	-0.013	1
	23	10.0002118		1
	25	10.0002072		1
	23	10.0002119		1
Equazione: $y = -0.000000512x^2 + 0.00002227x + 9.9999705$				

100 ohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	100.002257	-0.005	1
	23	100.002288		1
	25	100.002288		1
	23	100.002288		1
Equazione: $y = -0.00000377x^2 + 0.0001811x + 100.0001166$				

1 kohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	1000.01775	0.009	1
	23	1000.01785		1
	25	1000.01771		1
	23	1000.01784		1
Equazione: $y = -0.000029x^2 + 0.001313x + 1000.002872$				

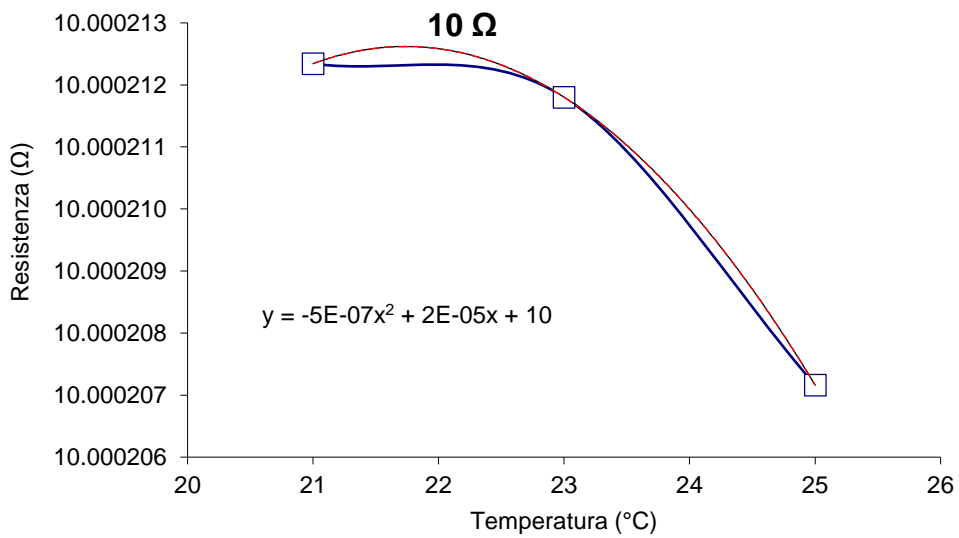
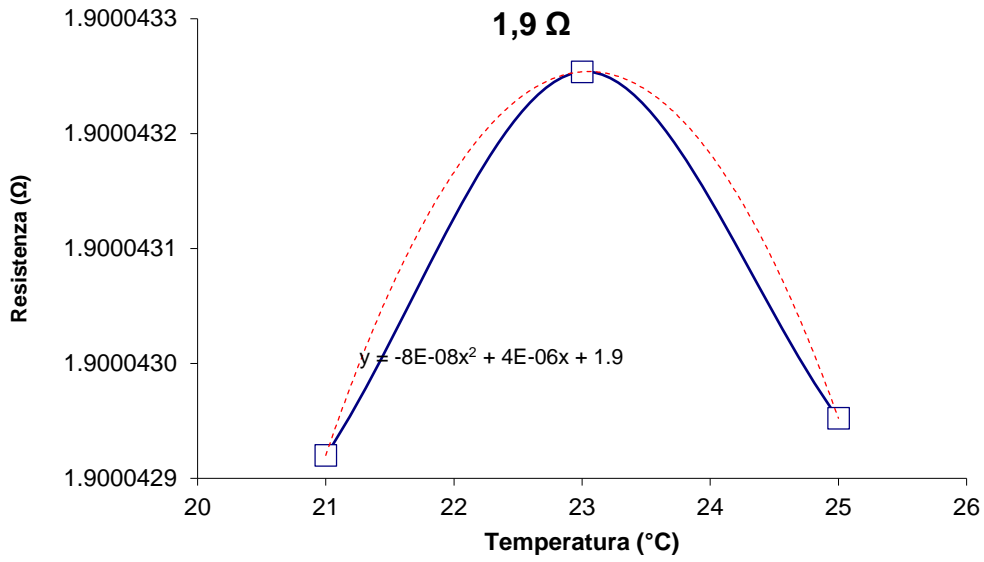
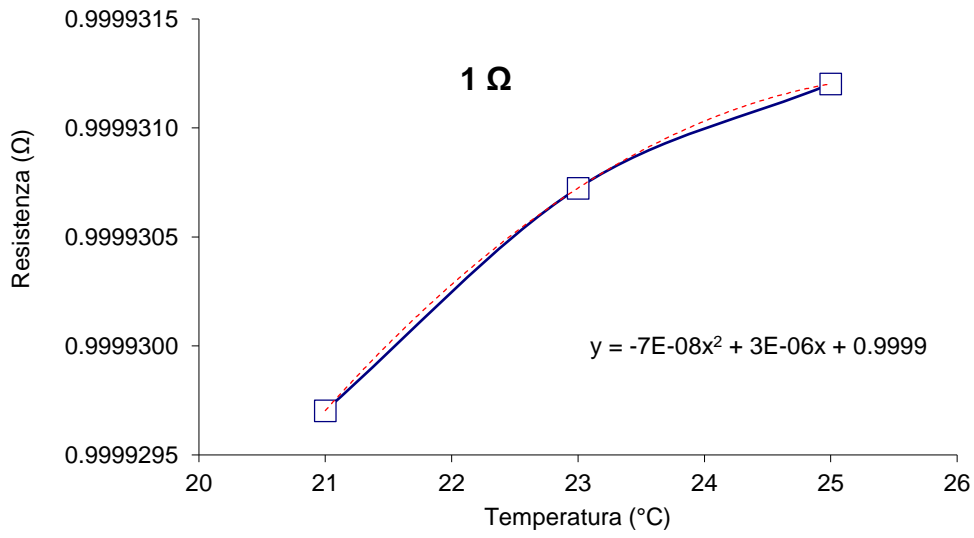
10 kohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	10000.0578	0.005	1
	23	10000.0590		1
	25	10000.0593		1
	23	10000.0590		1
Equazione: $y = -0.00012x^2 + 0.00568x + 9999.98946$				

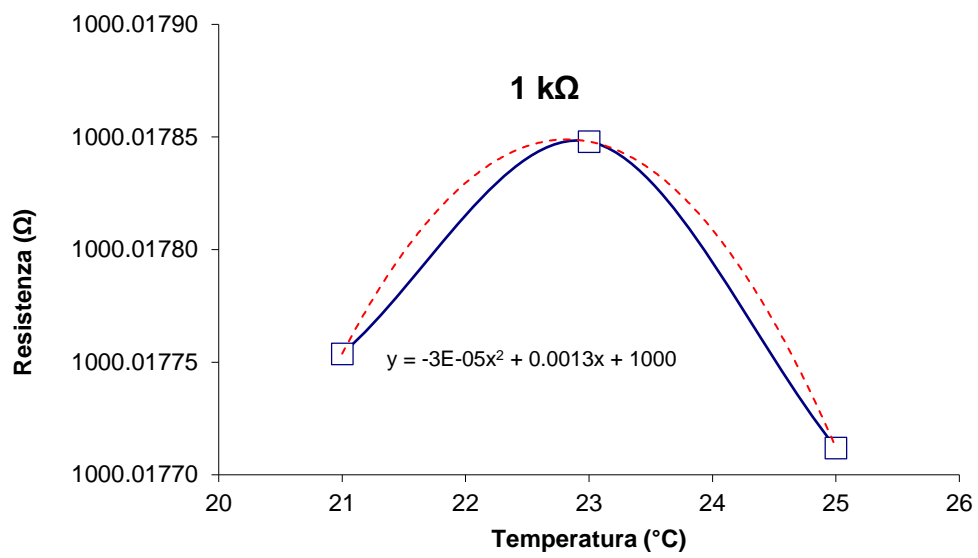
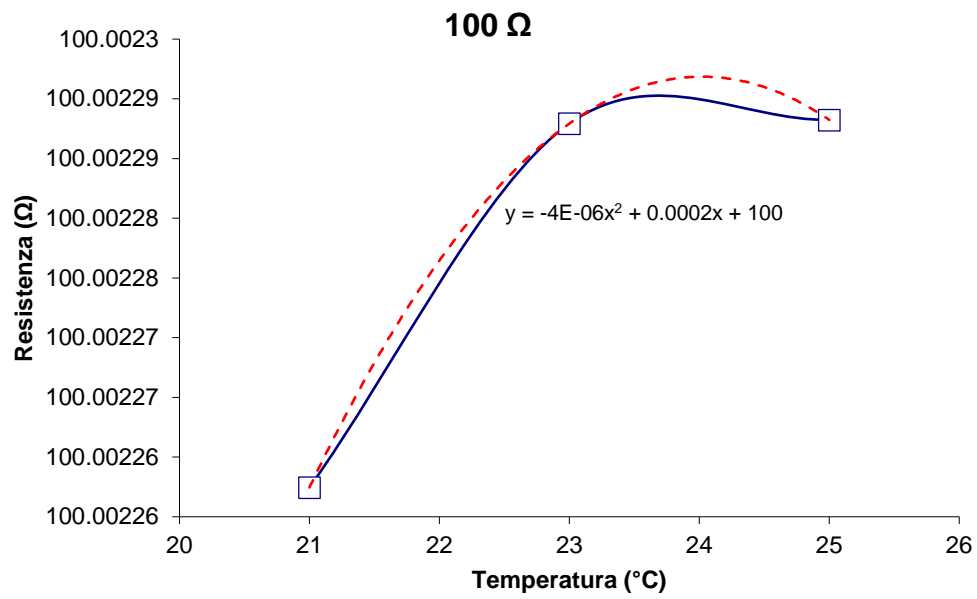
19 kohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	19000.6631560	-0.032	1
	23	19000.7376340		1
	25	19000.6631360		1
	23	19000.7382465		1
Equazione: $y = -0.01862x^2 + 0.85661x + 18990.88671$				

100 kohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	99999.753		2
	23	100000.362	-	2
	25	100000.362		2
Equazione: $y = -0.07624x^2 + 3.65908x + 99956.53$				

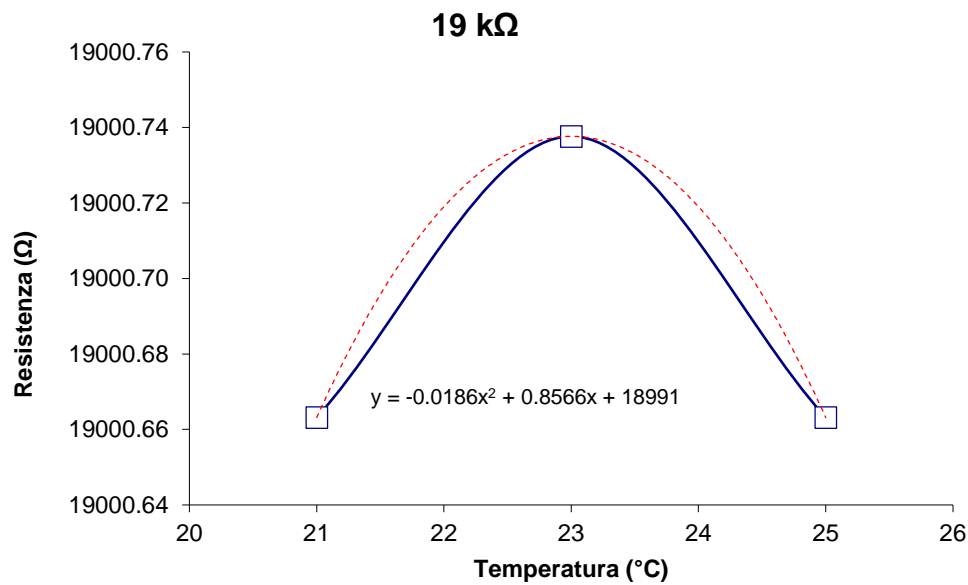
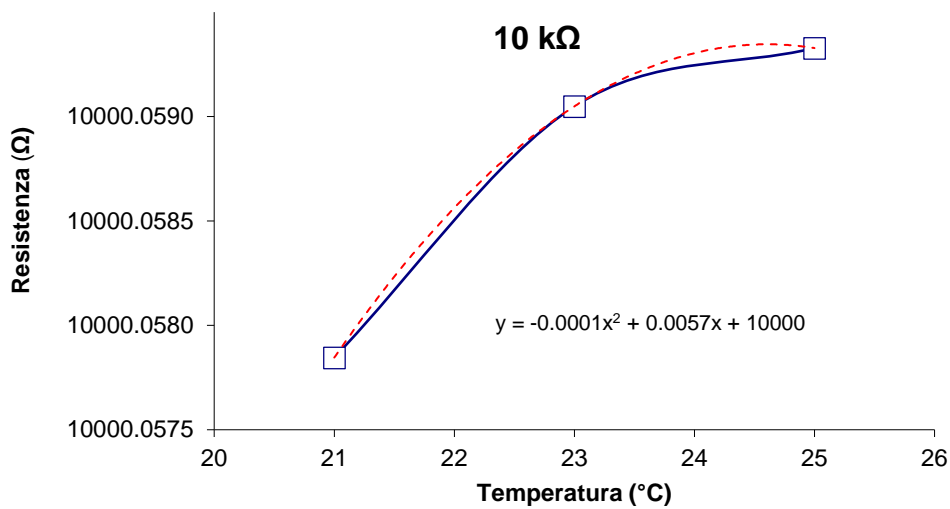
1 Mohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	1000020.090		3
	23	1000022.981	-	3
	25	1000020.818		3
Equazione: $y = -0.6318x^2 + 29.2442x + 999684.5787$				

10 Mohm	T (°C)	Rx (ohm)	Delta (Ts - Te) (ppm)	U (uohm/ohm)
	21	10000087.098		4
	23	10000098.403	-	4
	25	10000109.888		4
Equazione: $y = 2.24658E-02x^2 + 4.66412E+00x + 9.99998E+06$				



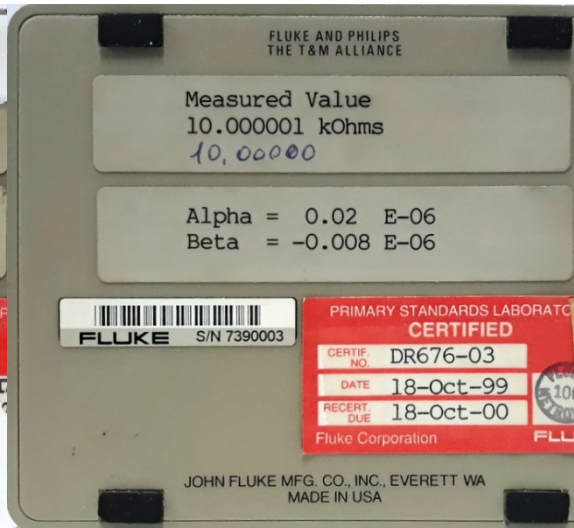
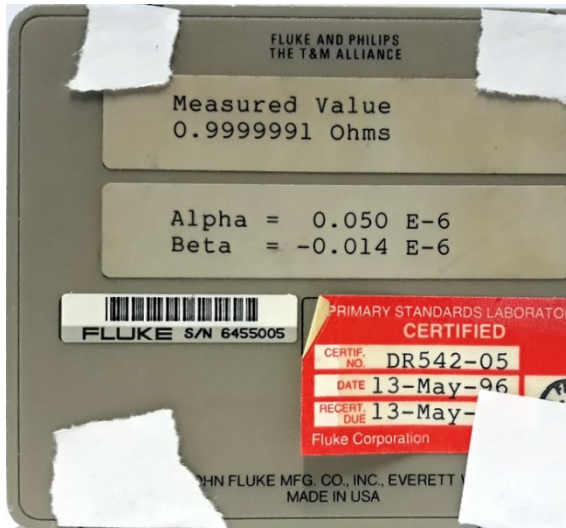
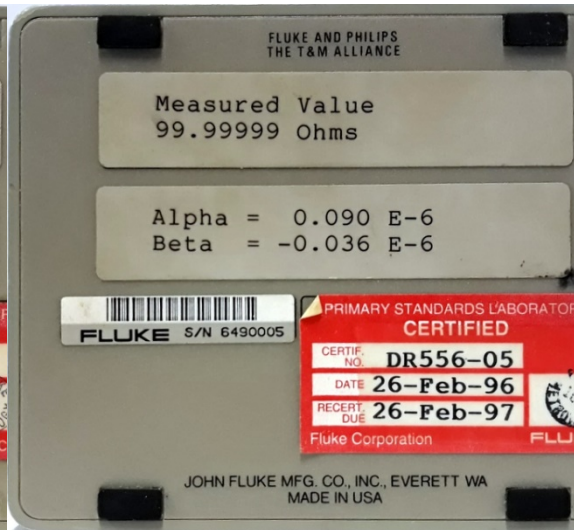
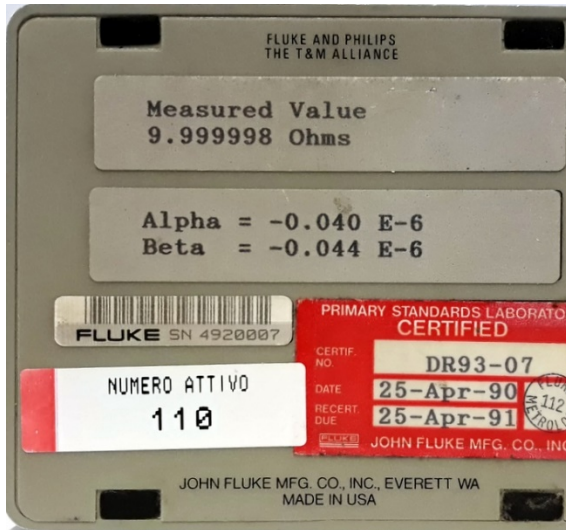
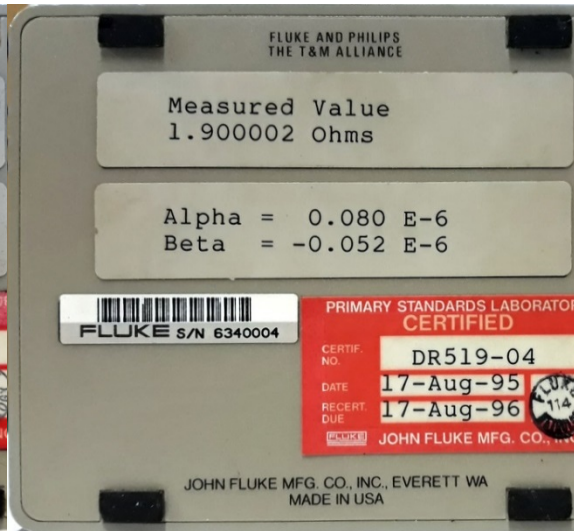
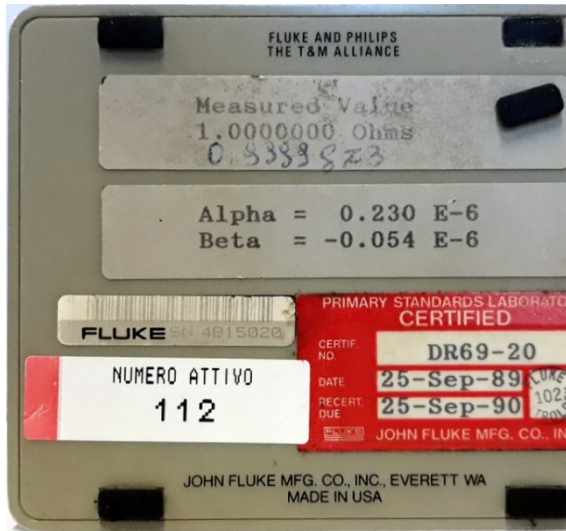






### Dati di targa dei resistori caratterizzati

Il campione FLUKE mod 742-XXX riporta, in modo completo, una serie di valori misurati al completamento delle operazioni di assemblaggio. Il valore di resistenza iniziale e i due coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  sono tra i parametri esposti. Si riporta di seguito la foto con i dati di targa di tutti i resistori caratterizzati.





## Conclusioni

Il rapporto tecnico descrive il processo di caratterizzazione termica e i relativi dati ottenuti, di 10 resistori campione di tipo commerciale, prodotti dalla FLUKE. Tutti i campioni oggetto di studio hanno manifestato eccellenti caratteristiche termiche e sono da ritenere particolarmente adatti all'utilizzo come riferimenti mobili. Il processo di

caratterizzazione termica è stato eseguito nell'intorno della temperatura di riferimento, che per i laboratori elettrici è di 23 °C, con un'estensione di 4 °C.

## Bibliografia

- [1] G. Boella and G. Marullo Reedtz, Change of the Working Temperature of the IEN Primary Group of Standard Resistors, *IEEE Trans. Instrum. Meas* 46 (2), pp. 311-313.
- [2] H. Leontiew and P. Warnecke, "Non-reversible behavior of precision standard resistors due to temporary changes in their maintenance temperature," *PTB Mitteilungen*, vol. 102, pp. 289–290, 1992.
- [3] M. P. Mac Martin and N. L. Kusters, "A direct current comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-15, pp. 212-220, Dec. 1966.
- [4] N. L. Kusters and M. Macmartin, A Direct Current Comparator Bridge for High Resistance Measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas* IM22 (4), pp. 382-386, 1973.
- [5] F. Galliana and G. Boella, The electrical DC Resistance scale from 100 kΩ to 1 TΩ at IEN, *IEEE Trans. Instrum. Meas* 49 (5), pp. 382-386, 2000.
- [6] I. Giem, Sub-ppm linearity testing of a DMM using a Josephson junction array, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 40 (2), (1991) 329–332.
- [7] F. Galliana, P.P. Capra, E. Gasparotto, Evaluation of two different methods to calibrate ultra-high value resistors at INRIM", *IEEE Trans. Instrum Meas.*, Vol. 60 no.6, pp.965–970. 2011;