

## TERMOMETRI A RESISTENZA

Le dizioni di *termometro a resistenza* e *termistore* appaiono, ad un primo esame, sinonimi dal momento che, la prima sta genericamente ad indicare un elemento termometrico basato sulla variazione della resistenza elettrica al variare della temperatura, mentre la seconda, di origine anglosassone (deriva dalla crasi di "Thermal Sensitive Resistor" in "Thermistor") sta ad indicare un elemento sensibile che varia fortemente la propria resistenza elettrica al variare della temperatura. Nella metrologia applicata invece i termini su indicati individuano due differenti categorie di sensori di temperatura. Il principio di misura comune è quello a tutti ben noto della variazione della resistenza elettrica di un materiale al variare della temperatura.

La differenza tra *termometro a resistenza* e *termistore* è praticamente legata al tipo di materiale costituente l'elemento sensibile: un materiale metallico (platino, rame, nichel, ecc.) nel primo caso ed un semiconduttore (ossidi metallici) nel secondo.

Il termometro a resistenza è generalmente costituito da un elemento metallico filiforme avvolto o poggiato su di un supporto isolante (framework), il tutto contenuto in una guaina di protezione dell'elemento sensibile (Fig. V.1). Talvolta per problemi di miniaturizzazione il sensore è ottenuto per deposizione di un film metallico su di un supporto isolante.

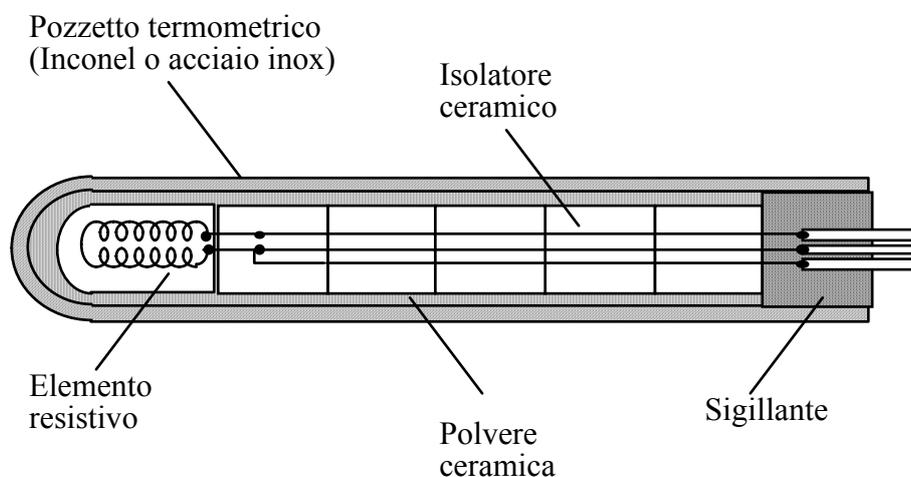


Fig.V.1 Assemblaggio di un termometro a resistenza industriale ad immersione

In particolare i termometri a resistenza, comunemente indicati con la sigla TRP o con quella inglese RTD, adottano di norma come elemento sensibile fili di Platino. Tuttavia esistono sul mercato sensori che impiegano altri metalli quali il palladio, il rame, il nichel, il tungsteno o in casi particolari leghe metalliche.

La scelta del metallo è essenzialmente legata, oltre che alla lavorabilità in fili sottili, alla caratteristica di presentare una legge  $R=R(T)$  lineare almeno in un certo intervallo di temperatura. La legge caratteristica dei termometri a resistenza è pertanto del tipo  $R=R_0(1+\alpha T)$  dove  $R$  rappresenta la resistenza elettrica alla generica temperatura  $T$ ,  $R_0$  la resistenza elettrica alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  ed infine  $\alpha$  il coefficiente di temperatura definito dalla relazione:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{100^\circ\text{C}} \frac{R_{100} - R_0}{R_0} \quad (\text{V.1})$$

Tale coefficiente, che ovviamente è sempre positivo per i metalli, per i metalli normalmente adoperati negli RTD risulta pressoché costante al variare della temperatura, e questo avviene in special modo per il platino in un ampio intervallo (Fig.V.2).

I requisiti che portano a scegliere un materiale per la realizzazione dei termometri a resistenza sono in generale:

- la costanza delle caratteristiche elettriche nel tempo, anche se il materiale è sottoposto a cicli termici variabili;
- la riproducibilità della caratteristica: Resistenza/Temperatura;
- l'elevato valore del coefficiente di temperatura  $\alpha$ , che è indice della sensibilità del termometro.

A questi requisiti rispondono molto bene, come detto, il Platino, il Rame ed il Nichel. In tabella V.1 sono riportate, in termini di campo di applicazione e coefficiente  $\alpha$ , le caratteristiche termometriche di questi metalli.

La denominazione dell'elemento sensibile viene composta utilizzando il simbolo chimico del metallo (i.e. Pt, Cu, Ni) e la resistenza  $R_0$  a  $0^\circ\text{C}$  dell'elemento stesso (i.e. 25, 100,  $1000\Omega$ ) per formare la sigla caratteristica (i.e. Pt100, Ni1000, etc.).

In particolare il platino presenta gli ulteriori vantaggi:

- di essere un metallo nobile poco soggetto a corrosione;
- di essere estremamente duttile e cioè in grado di essere lavorato in fili sottilissimi, senza che nei fili, ottenuti per estrusione, si instaurino stati tensionali che ne influenzino le prestazioni;
- di avere un'elevato punto di fusione;
- di poter essere ottenuto in uno stato purissimo, garantendo così una elevata riproducibilità, fondamentale per un termometro di precisione.

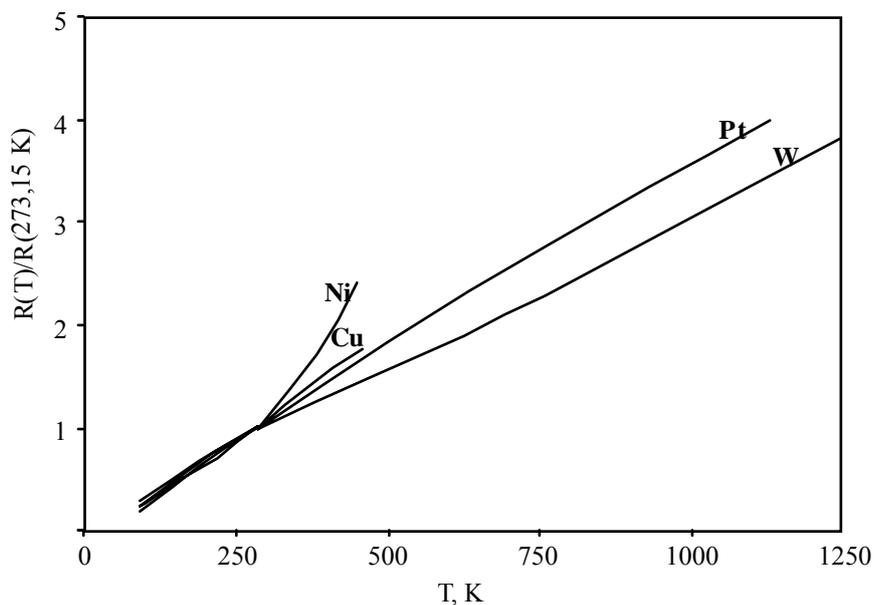


Fig.V.2 Curve caratteristiche dei termometri a resistenza

Tab.V.1 Caratteristiche termometriche dei principali metalli

Metallo	Intervallo di temperatura	$\alpha$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
Pt	-220÷800 $^{\circ}\text{C}$	3,85 $10^{-3}$
Cu	- 50÷150 $^{\circ}\text{C}$	4,26 $10^{-3}$
Ni	- 60÷180 $^{\circ}\text{C}$	6,17 $10^{-3}$

Per queste caratteristiche il termometro a resistenza di platino è alla base della Scala Internazionale delle Temperatura ITS-90, nell'intervallo da 13.8033 K (temperatura del punto triplo dell'idrogeno) a 1234,93 K (temperatura di solidificazione dell'argento).

In applicazioni industriali, il termometro a resistenza di platino, nel campo -220÷700 $^{\circ}\text{C}$ , è quello che da maggiore affidabilità. In particolare è possibile raggiungere un'elevata affidabilità:

$$\pm 0,02 \quad (\text{nel campo } - 50^{\circ}\text{C} \div +150^{\circ}\text{C})$$

$$\pm 0,1^{\circ}\text{C} \quad (\text{nel campo } -200^{\circ}\text{C} \div +500^{\circ}\text{C})$$

Infine in applicazioni di laboratorio è possibile ottenere mediante tali strumenti prestazioni anche migliori (strumenti campione).

### 5.3 Fattori di affidabilità per un termometro a resistenza

In tabella V.2 sono riportati i risultati ottenuti da un'indagine condotta su diversi tipi di termometri a resistenza di platino commercialmente disponibili che permettono una valutazione quantitativa dell'influenza dei vari fattori sulle prestazioni metrologiche dei termometri a resistenza.

I fattori di affidabilità possono essere riassunti in:

- resistenza dei fili di collegamento;
- autoriscaldamento;
- f.e.m. termiche nei collegamenti;
- resistenza di isolamento;
- deriva della caratteristica;
- tempo di risposta;
- profondità di immersione (fattore comune a tutti i metodi di misura per contatto se usati nella misura di fluidi).

Tab.V.2 Prove su 66 termometri a resistenza Pt100

Collegamento	a 4 fili
Numero costruttori	5
Tipo	Pt 100
Deriva Massima (6000 h a 660° C)	1°C
Variazione massima (1000 cicli 250-650C°)	$R_0 \pm 0.1; = \pm 0,4\%$
Costanti di tempo	2÷8 s
Resistenza d'isolamento	70MΩ (a 25°C) 0,5MΩ (a 660°C)

### Resistenza dei fili

La misura della resistenza dell'elemento sensibile viene effettuata utilizzando opportuni fili di collegamento del termometro a resistenza vera e propria al sistema di misura o di trasduzione. Questo inevitabilmente crea l'inconveniente che la resistenza della linea di connessione viene a trovarsi in serie a quella dell'elemento sensibile, senza che sia possibile valutare separatamente i due contributi. Problema che potrebbe apparire irrilevante nel caso che si conosca a priori la resistenza dei fili di collegamento e si possa quindi correggere il valore misurato della resistenza. Nella pratica, però, l'incertezza con cui è possibile valutare a priori la resistenza dei collegamenti non sempre risulta trascurabile. Ciò a causa della variabilità della resistività dei materiali, dell'incertezza sulla lunghezza dei fili, e soprattutto a causa dei possibili ed inevitabili gradienti termici che si possono instaurare lungo i fili di collegamento quando

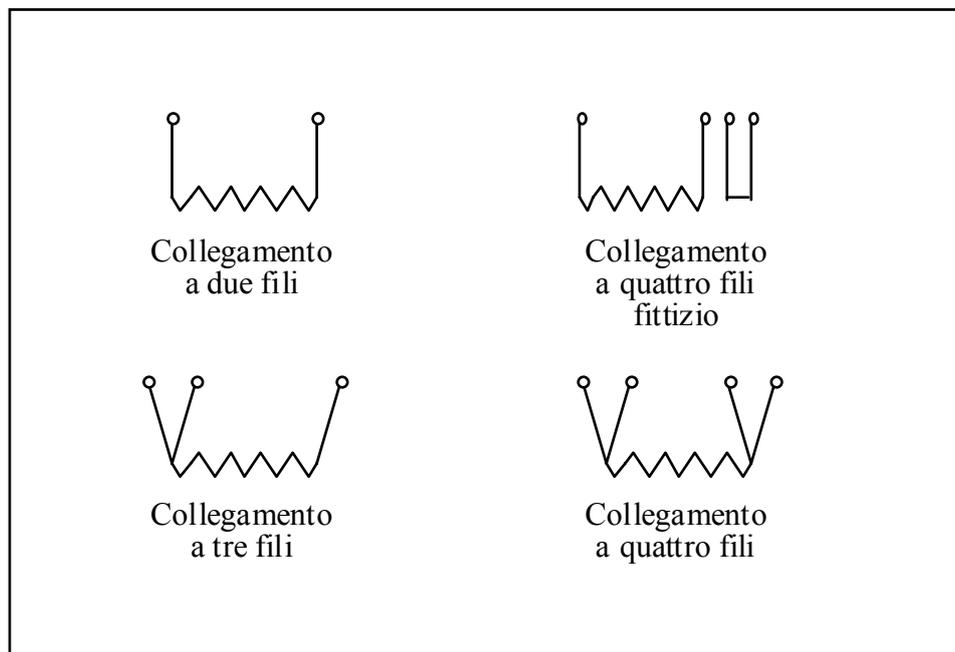


Fig.V.3 Collegamenti elettrici.

questi sono di elevata lunghezza come spesso capita in applicazioni industriali. Per comprendere meglio l'influenza della linea di connessione sulla misura si pensi che la resistività del platino è circa pari a  $0,10 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , pertanto un collegamento di lunghezza 1m

e di diametro pari a 0,2 mm presenta una resistenza totale dei soli fili circa pari a  $2 \cdot 3,18 \Omega$ ; considerando inoltre un gradiente costante lungo il filo da 200°C a 500°C il valore della resistenza diventa circa il doppio. Trascurare tale resistenza comporterebbe rispettivamente un errore di circa 20°C e 40°C per un termometro a resistenza Pt100.

Pertanto è necessario rendere indipendente la misura dalla linea di connessione. Questo si ottiene con collegamenti del tipo "dummy" o del tipo a 3 ed a 4 fili (Fig.V.3). In particolare, quest'ultimo è il più consigliato dal momento che ogni possibile errore dovuto alla linea di connessione è del tutto eliminato (vedi par.5.4).

### Autoriscaldamento

L'incertezza dovuta all'autoriscaldamento è connessa alla inevitabile presenza di corrente elettrica che attraversa il termometro durante la misura, cioè dalla generazione interna  $RI^2$  che si verifica nell'elemento sensibile e dal modo con cui tale calore viene dissipato. La misura di resistenza avviene alla temperatura del sensore e non a quella del mezzo di cui si vuole effettuare la misura, per cui bisogna fare ogni possibile sforzo per far coincidere le due temperature. E' comunque estremamente difficile calcolare a priori l'aumento di temperatura dovuto all'autoriscaldamento. Si può, ad esempio, effettuare una doppia misura con correnti diverse ed estrapolare i risultati a corrente nulla, tenendo conto che l'effetto varia con il quadrato della corrente. Nella pratica, il costruttore fornisce indicazioni del coefficiente di autoriscaldamento nelle due condizioni estreme d'aria ferma e di acqua in moto turbolento con sensore ortogonale al flusso (in cross-flow), dalle quali è possibile estrapolare il dato valido per le condizioni di prova. Ad esempio nelle prove sui termometri riportati in tabella V.2 l'errore di autoriscaldamento è risultato pari a 0,11°C per una corrente di misura di 5mA in acqua in quiete e 0,35°C per una corrente di 10 mA.

### F.e.m. nei collegamenti

L'incertezza dovuta alle forze elettromotrici termiche che si generano ai capi dell'elemento sensibile dei TRP, per la presenza di giunti di materiali diversi, tipo Pt-Cu, è facilmente determinabile con sistemi di alimentazione che permettono l'inversione del verso della corrente nell'elemento sensibile. Facendo infatti la media fra le due letture (con versi opposti) è possibile eliminare l'influenza di tali f.e.m.. Ovviamente l'ideale sarebbe alimentare i TRP in corrente alternata. Nei casi in cui quanto su esposto è impossibile, bisogna misurare il valore di tali f.e.m. a freddo ed estrapolarne i valori alle temperature di esercizio. Se, comunque, all'interno della guaina di protezione le saldature ai capi dell'elemento sensibile sono state realizzate in maniera tale da risultare in una posizione che ne garantisce la isotermità i valori probabili delle f.e.m. saranno  $<10\mu\text{V}$ , che ad esempio in un sensore tipo Pt 100 a  $650^\circ\text{C}$  corrisponderebbe ad un errore di  $0,03^\circ\text{C}$ , del tutto trascurabile.

### Resistenza di isolamento

Un altro importante fattore di affidabilità dei termometri a resistenza è la cosiddetta resistenza di isolamento. Infatti, se per qualche ragione si verifica una perdita di isolamento elettrico tra il filo sensibile e la guaina esterna od il supporto isolante del termometro a resistenza, ciò provoca formazione di uno shunt parallelo alla resistenza del termometro (elemento sensibile) e di conseguenza un errore di valutazione della resistenza del TRP. Ad esempio, una resistenza d'isolamento di  $2.8\text{M}\Omega$  posta in parallelo ad una Pt 100 a  $650^\circ\text{C}$  provoca un errore di  $0,1^\circ\text{C}$ . Se la resistenza d'isolamento è presente nel termometro durante la taratura, l'errore è compensato, tranne nel caso in cui la taratura viene effettuata ad una sola temperatura e la resistenza d'isolamento non è stabile e varia con la temperatura (Tab. V.2).

E' molto difficile valutare la resistenza di isolamento senza materialmente sezionare il termometro, distruggendolo quindi completamente; la valutazione viene di solito effettuata in maniera grossolana, misurando la resistenza di isolamento tra i terminali del filo metallico in uscita dal termometro ed un punto (di solito la punta) della guaina esterna. Il valore misurato

nel modo descritto, senza dubbio varia al variare della temperatura in quanto varia la resistenza del supporto isolante su cui il filo metallico sensibile è avvolto o poggiato, e, a differenza di quanto avviene per il filo sensibile, la resistenza del supporto diminuisce all'aumentare della temperatura.

#### *Deriva dalla caratteristica*

Tale incertezza è ovviamente ineliminabile ed è legata alle caratteristiche dell'elemento sensibile. Normalmente valori di possibile deriva sono valutabili dalle dichiarazioni dei costruttori. Nelle prove su citate si è verificato, ad esempio, una deriva di 1°C per termometri Pt 100 sottoposti per 6000 h a 660°C.

#### *Tempo di risposta*

Questo fattore è uno dei punti deboli dei termometri a resistenza, che, per la loro stessa struttura, di fili tesi su supporti isolanti e poi inguainati (vedi fig. V.1), presentano tempi di risposta di solito abbastanza elevati rispetto agli altri misuratori di tipo elettrico, normalmente più piccoli e compatti. Ad esempio, nelle prove riportate, i valori delle costanti di tempo (tempo di risposta al 63.2%) per un'immersione da bagno di acqua e ghiaccio ad uno di acqua in moto con velocità di 0.9 m/s sono dell'ordine dei secondi, in particolare da 2 a 8 secondi. Valori questi che, ricordando le definizioni, portano a tempi di risposta dell'ordine delle decine di secondi.

#### *Profondità di immersione*

La profondità di immersione è l'altezza minima di immersione di un termometro in un bagno affinché la misura non risenta del valore della temperatura dell'ambiente. Infatti, a causa delle perdite termiche lungo lo stelo, il termometro, se non è ben costruito, può non raggiungere mai la temperatura di misura. I valori della profondità ottimale di immersione di ciascun termometro vengono di solito forniti dai costruttori.

Bisogna infine sottolineare che le norme internazionali, sia per il caso di strumenti campione a resistenza di platino (Scala Internazionale delle Temperature ITS '90), sia per il caso di termometri a resistenza di tipo industriale con purezza inferiore ed  $\alpha = 0,00385$ , forniscono raccomandazioni per limitare l'influenza di tutti i fattori di affidabilità tramite rapporti e criteri di valutazione e/o di misura.

#### **5.4 Ponti per termometri a resistenza**

La misura della resistenza dell'elemento sensibile che costituisce il termometro può essere effettuata in diversi modi a seconda della precisione richiesta. Per misure di laboratorio sono solitamente utilizzati metodi di zero (di ponte e di opposizione), mentre per misure di minore precisione vengono utilizzati trasmettitori, multimetri o SAD (sistemi di acquisizione dati) basati generalmente su metodi volt-amperometrici o di confronto.

In particolare, nel caso di misure di laboratorio, i metodi più diffusi sono quelli a ponte (ponte di Siemens, ponte di Muller e ponte di Smith) e quello potenziometrico (fig.V.4). I metodi a ponte praticamente sono sostanzialmente riconducibili a ponti di Wheatstone con particolari rapporti dei lati. In particolare il ponte di Smith é un doppio ponte di Kelvin con rapporto dei lati 100:1.

Il ponte di Siemens é la versione più semplice ed utilizzata dei metodi a ponte infatti, essendo il rapporto tra i lati del ponte fisso (pari ad 1) risulta necessaria per la misura una sola operazione di bilanciamento in serie (S).

Il ponte di Mueller ha, come il ponte di Siemens, un rapporto dei lati pari a 1, ma a differenza di quest'ultimo ha un bilanciamento in parallelo ( $S_3$ ) più indicato per misure di piccole variazioni di resistenza, ed un ulteriore bilanciamento differenziale in serie ( $S_1$  ed  $S_2$ ). Tale ponte si presenta inoltre notevolmente stabile grazie all'uso di decadi con resistori di basso valore ( $10 \Omega$ ), il che però comporta una notevole influenza delle resistenze dei contatti.

In entrambi i casi é possibile compensare la resistenza dei fili di collegamento e dei contatti collegando il termometro a resistenza in modo tale che le resistenze dei fili opposti si compensino mutuamente (vedi figura V.5). L'eventuale differenza tra la resistenza dei fili può essere in ogni caso compensata, nel caso di un termometro a resistenza a quattro fili, invertendo la connessione dei terminali al ponte e mediando le due letture ottenute.

Il ponte di Smith (tipo III) é caratterizzato, come detto, un elevato valore del rapporto tra i lati (100:1). Una tale configurazione se da un lato presenta l'indubbio vantaggio di rendere minima l'influenza delle resistenze di contatto, per contro risulta meno stabile utilizzando resistenze di elevato valore. Problema che viene in parte risolto tramite l'impiego di particolari tecniche di avvolgimento delle decadi.

I metodi di confronto potenziometrici, infine, sono del tutto indipendenti dalle resistenze dei contatti. La misura viene effettuata collegando i collegamenti amperometrici del termometro a resistenza al potenziometro e facendovi circolare una corrente costante; la caduta di tensione rilevata ai morsetti dei collegamenti voltmetrici é del tutto indipendente dalla resistenza dei collegamenti se la misura di tensione viene effettuata con un metodo ad opposizione.

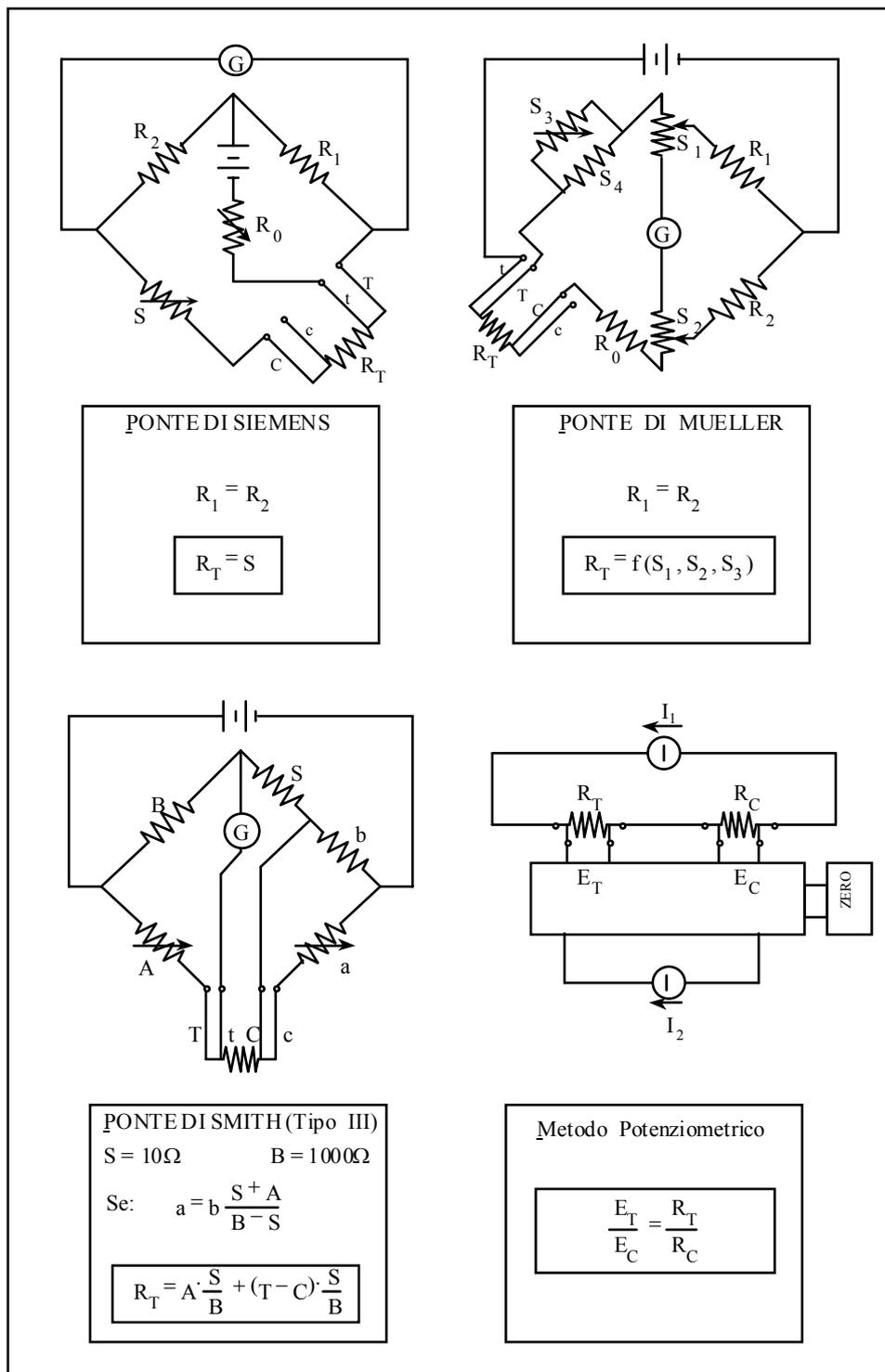


Fig.V.4 Metodi di misura della resistenza