

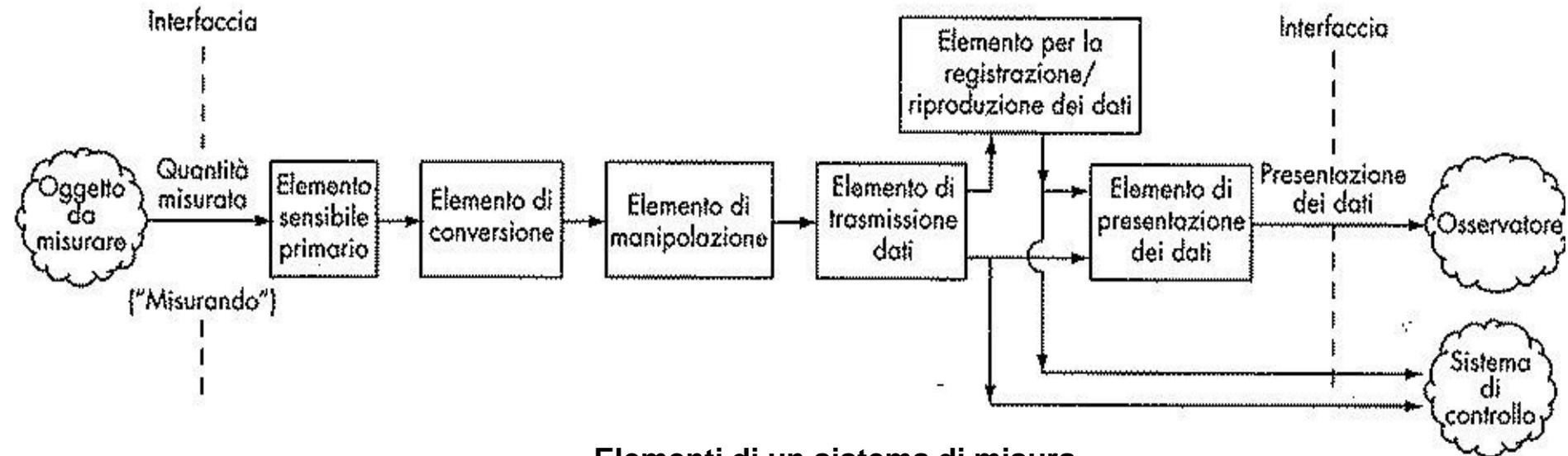
## *Misure di temperatura*

- Versione: **2.00.10**
- Ultimo aggiornamento: **Ott 2020**
- Realizzato da: DE LUCIA/C.P. Mengoni
- Originale C.Cinelli/De Lucia
- Riferimenti **CORSO MISURE E COLLAUDI (Prof. DE LUCIA)**
  - ⇒ “Theory and design for mechanical measurements”, R.S. Figliola, D.E. Beasley, John Wiley & Sons, 1991
  - ⇒ “Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements”, R.P. Benedict, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1984
  - ⇒ “Fluid Mechanics Measurements”, R.J. Goldstein, Hemisphere publishing corporation, 1983
  - ⇒ “Strumenti e metodi di misura”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
  - ⇒ “Measurement System - Application and design”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
  - ⇒ “Measurements techniques in fluid dynamics – An Introduction”, Annual Lecture series, Von Karman Institute for Fluid Dynamics

# Misure

Tipologie di applicazioni per le misure:

1. Monitoraggio di operazioni e processi  
Il sistema di misura viene utilizzato per tenere sotto controllo qualche grandezza
2. Controllo di operazioni e processi  
Sistema di controllo in retroazione (feedback)
3. Analisi per mezzo dell'ingegneria sperimentale



Elementi di un sistema di misura

## **Misure**

Per valutare le prestazioni di una macchina o di un impianto le variabili fondamentali da misurare risultano:

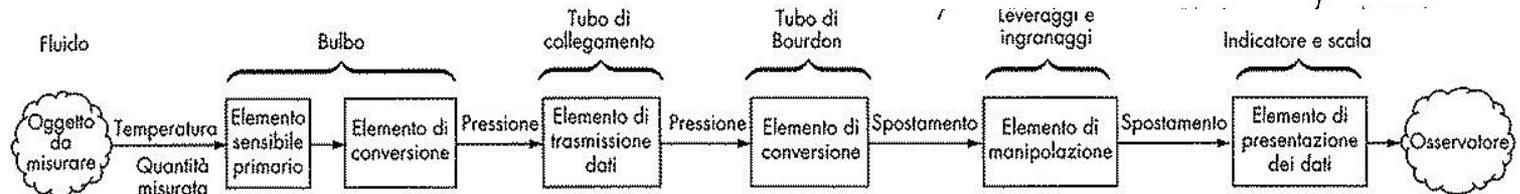
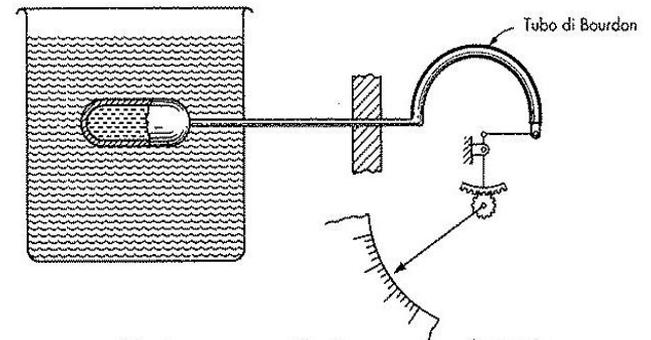
- portata
- pressione
- temperatura
- velocità
- coppia
- Varie/eventuali: titolo, umidità relativa, composizione della miscela.....

Nel momento in cui ci si trovi di fronte alla necessità di scegliere un sensore per una specifica applicazione occorrerà valutare le sue prestazioni in termini di:

- Range;
- Sensibilità;
- Accuratezza;
- Linearità;
- Costo;
- Stabilità;
- Risposta in frequenza;
- Resistenza all'influenza dell'ambiente sulla misura (aggressività chimica, vibrazioni meccaniche, urti, disturbi elettromagnetici, rumore, ecc..).

## Misura della temperatura

- La misura di temperatura è tra le misure più comuni nell'automazione e risulta fondamentale in tutte le macchine di interesse tecnico.
- Tutti i processi di generazione e trasformazione di energia producono infatti calore; la temperatura è pertanto un elemento che spesso condiziona in modo significativo il funzionamento di un processo o di una
- Esistono vari tipi di termometri, i più comuni sono quelli basati sulla dilatazione di un liquido (mercurio od alcool) entro un capillare, o quelli (industriali) a dilatazione metallica.

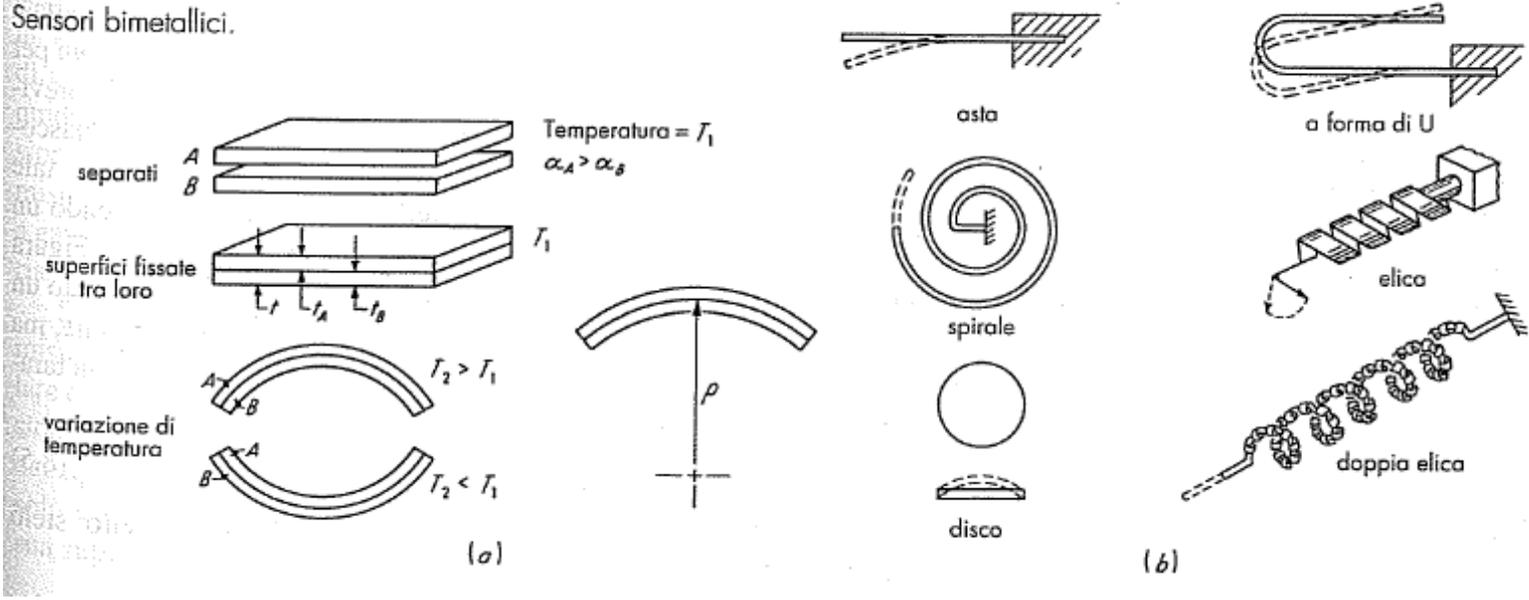


Fra i sensori di temperatura più comuni, intendendo per tali i dispositivi adatti a convertire la temperatura in un segnale di tensione elettrica, ricordiamo :

- Termocoppie
- Termoresistenze
- Termistori

# Termometri

FIGURA 8.3  
Sensori bimetallici.



## EFFETTO SEEBECK

è un effetto termoelettrico che fu scoperto accidentalmente dal fisico estone Thomas Johann Seebeck nel 1821 che notò la presenza di una differenza di potenziale ai capi di una barra metallica sottoposta ad un gradiente di temperatura. L'effetto più noto è quello PELTIER mentre l'effetto SEEBECK è praticamente l'opposto dell'effetto Peltier

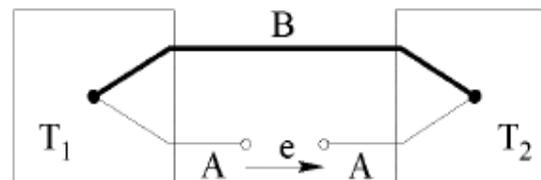
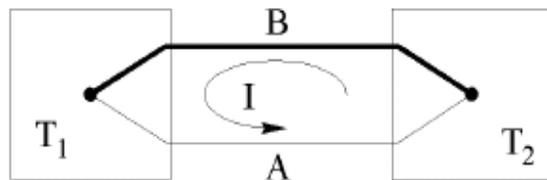
L'effetto «Termoelettrico» comporta quindi che in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori, una differenza di temperatura genera un passaggio di corrente (elettricità).

Seebeck osservò inoltre che l'ago di una bussola subiva una deflessione in prossimità di un anello costituito da due metalli differenti con le due zone di giunzione poste a differenti temperature. In questo caso è dovuto al fatto che i due metalli generano potenziali elettrici differenti nelle due regioni a differente temperatura dando origine ad un flusso di corrente che un campo magnetico.

Il valore della differenza di potenziale generata per effetto Seebeck è dell'ordine di alcuni  $\mu\text{V}$  per kelvin di differenza.

L'effetto Seebeck è dovuto a due effetti: trasporto di carica per diffusione e resistenza al moto fononico.

L'effetto Seebeck continua ad esistere sia nel caso di due elementi metallici di natura diversa sia con un solo tipo di metallo.



**TRASPORTO FONONICO:** I fononi non si trovano sempre in equilibrio termico locale; si muovono seguendo il gradiente termico. Perdono energia interagendo con gli elettroni (o altri portatori) ed imperfezioni reticolari. Se l'interazione fonone-elettrone è predominante, i fononi tendono a spingere gli elettroni verso una parte del materiale, perdendo energia nel processo. Questo contribuisce al campo elettrico già presente. Questo contributo è maggiormente importante nella regione di temperatura dove lo scattering fonone-elettrone è predominante

## EFFETTO SEEBECK 02

la tensione risultante è data da:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

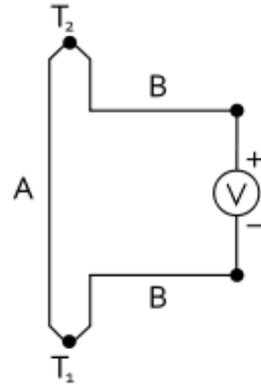
dove:  $S_A$  e  $S_B$  sono i coefficienti di Seebeck (o potere termoelettrico) relativi ai due metalli A e B,  $T_1$  e  $T_2$  sono le temperature delle due giunzioni.

I coefficienti di Seebeck sono non lineari e dipendono sia dai materiali che dalla loro temperatura assoluta nonché dalla loro struttura molecolare. Qualora i coefficienti si possano ritenere costanti nell'intervallo di temperatura considerato, la formula precedente può essere così approssimata:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1)$$

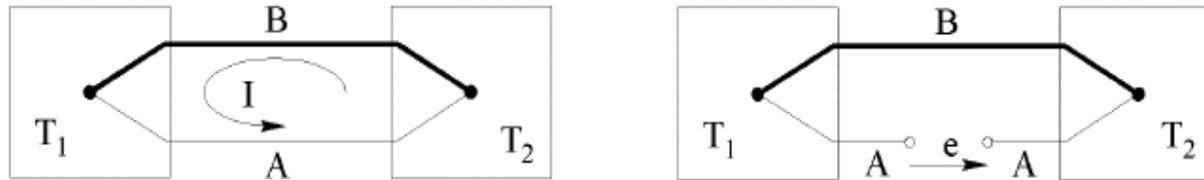
Ne consegue che l'effetto Seebeck può essere sfruttato per misurare differenze di temperatura come differenze di potenziale generata in un circuito costituito da fili di materiale diverso:

il dispositivo risultante prende il nome di termocoppia.



## Termocoppie

- Le termocoppie sono *trasduttori attivi*, in quanto generano spontaneamente una tensione per effetto termoelettrico (*effetto Seebeck*). In un circuito formato da due metalli diversi A e B, le cui giunzioni si trovano temperature diverse  $T_1$  e  $T_2$ , si instaura infatti la circolazione di una corrente.



- Se il circuito viene aperto, si manifesta pertanto ai suoi capi una differenza di potenziale e che dipenderà dalla differenza di temperatura delle giunzioni secondo la legge con ( $T_1 > T_2$ ):

$$e = \alpha_{AB} \cdot (T_1 - T_2)$$

Il coefficiente di Seebeck

$$\alpha_{AB} = \frac{d\pi_{AB}}{dT} + (\tau_A - \tau_B)$$

Coefficient  
e di Peltier

Coefficiente  
di Thompson

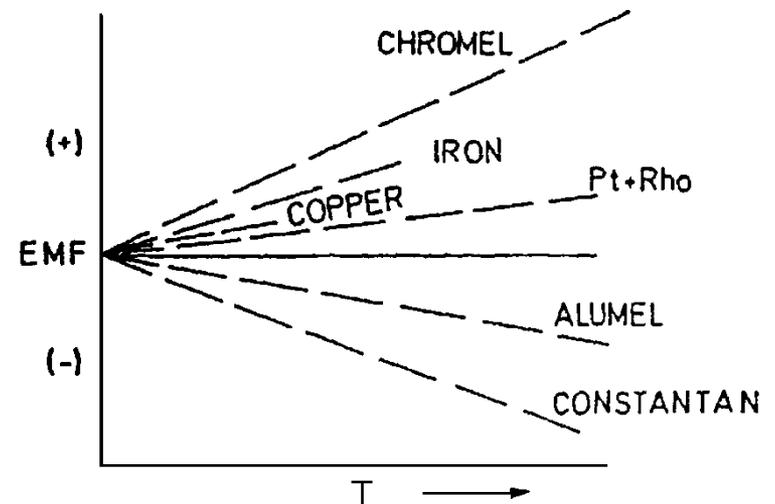
- Il coefficiente di Seebeck,  $\alpha_{AB}$ , dipende dai due metalli e, in realtà, non è costante ma risulta a sua volta funzione della temperatura.
- Solo per piccole variazioni di temperatura, perciò, la tensione di Seebeck dipenderà linearmente dalla temperatura stessa. Generalmente la dipendenza sarà infatti non lineare e la linearizzazione potrà essere effettuata mediante tabelle o polinomi interpolanti il cui ordine dipende dalla nonlinearità e quindi anche dal range di temperatura utilizzato.

## Termocoppie

- Una termocoppia è costituita da due fili metallici diversi, saldati assieme in due punti (*giunzioni*) e posti a diversa temperatura: una delle due temperature costituirà il *measured medium*, ossia la quantità da misurare, mentre l'altra dovrà essere presa come riferimento. La giunzione alla temperatura incognita viene definita *giunzione calda*, mentre quella alla temperatura di riferimento viene definita *giunzione fredda*.
- L'accoppiamento dei due metalli sarà effettuato in base alla classificazione dei materiali in termini di *polarità termoelettrica*: un materiale viene infatti detto "positivo" se la f.e.m. indotta cresce con la temperatura, negativo nel caso opposto.



Caratteristica statica di una termocoppia

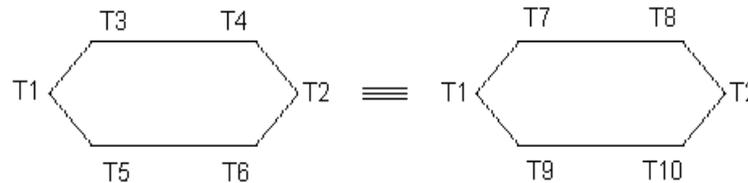


Polarità termoelettrica per vari materiali

# Termocoppie

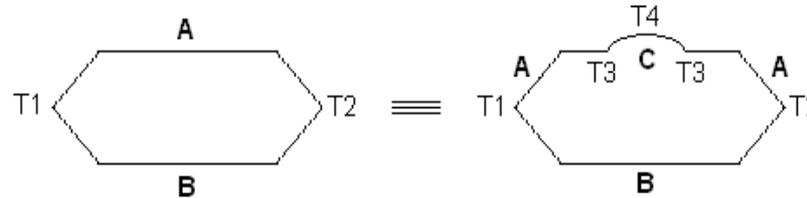
➤ **Legge I (Legge delle temperature intermedie)**

La f.e.m. per effetto termico di una termocoppia con giunti alle temperature T1 e T2 risulta totalmente indipendente da qualsiasi temperatura intermedia, ovunque localizzata nel circuito, a patto che i materiali siano omogenei.



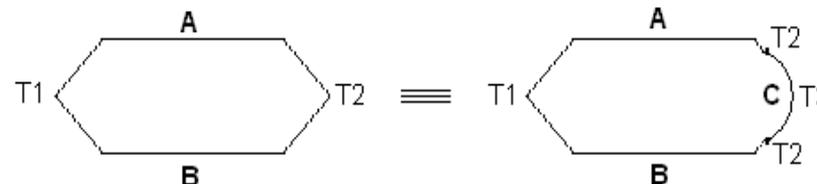
➤ **Legge II**

Se un terzo metallo omogeneo C è inserito dentro A o B, fin tanto che le nuove termogiunzioni sono alla stessa temperatura, la f.e.m. del circuito risulta invariata, indipendentemente dalle temperature intermedie del tratto C.



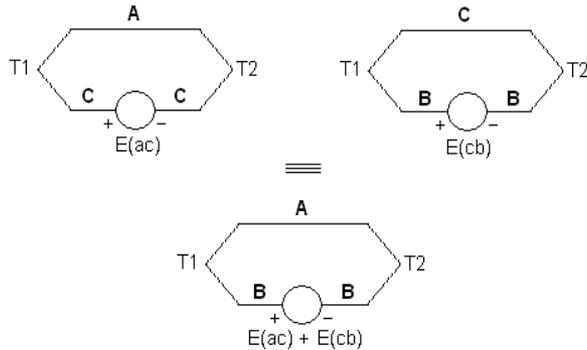
➤ **Legge III**

Se il metallo C è inserito in A e B da una delle due giunzioni, qualsiasi temperatura intermedia del tratto C è irrilevante.

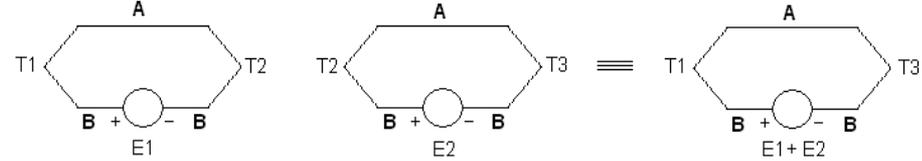


# Termocoppie

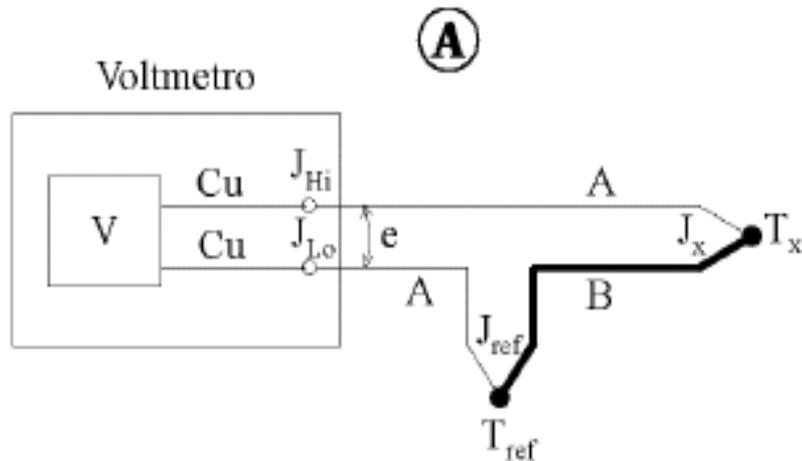
## ➤ Legge IV



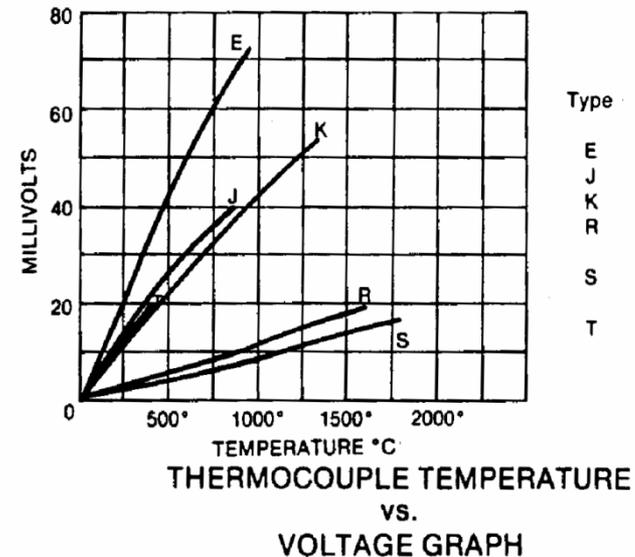
## ➤ Legge V



➤ La forza elettromotrice é molto piccola (da 10 a 40  $\mu\text{V}$  circa per grado centigrado, a seconda della coppia di metalli utilizzati).



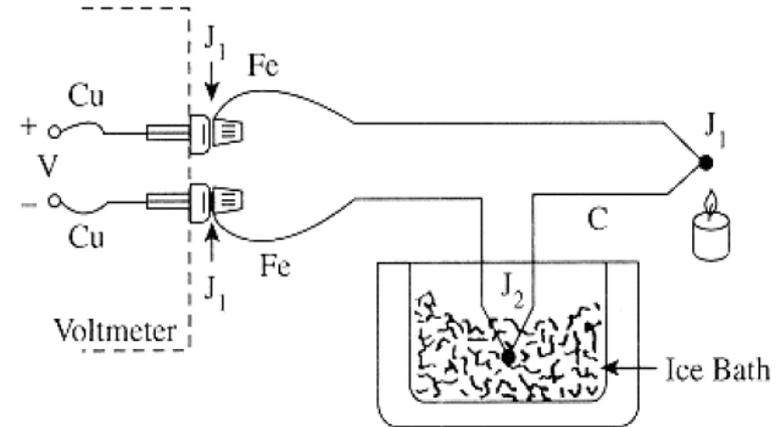
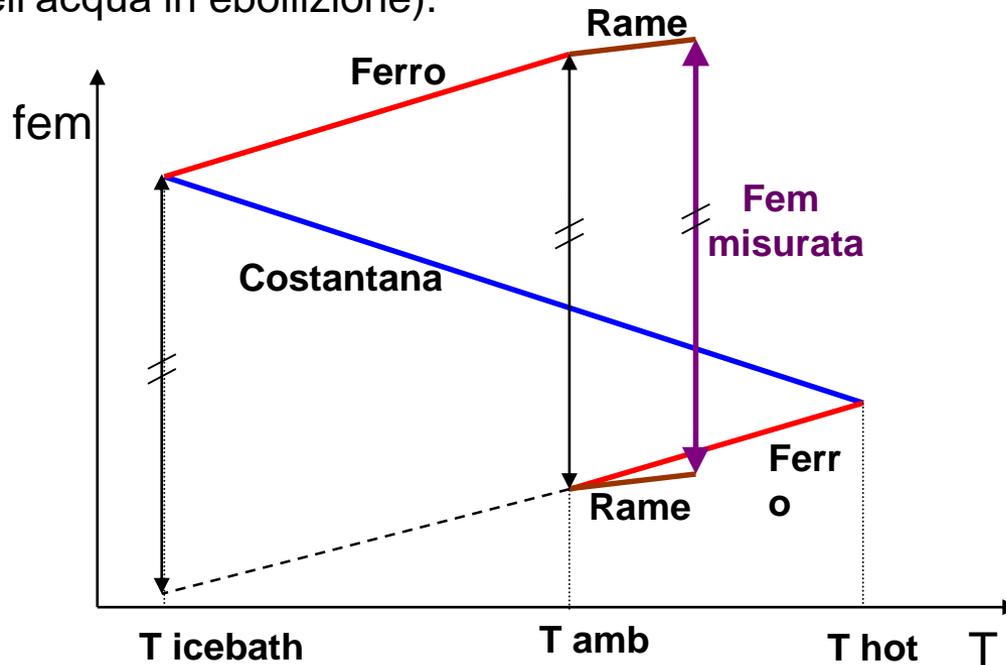
Misura della tensione termoelettrica



# Termocoppie

## ➤ Giunto freddo

Per poter determinare il valore assoluto della temperatura al “giunto caldo”, occorrerà determinare il valore assoluto della temperatura al “giunto freddo”. Occorre utilizzare un giunto di riferimento a temperatura nota. (Una  $T$  riproducibile e nota, può essere quella del ghiaccio fondente, o dell’acqua in ebollizione).

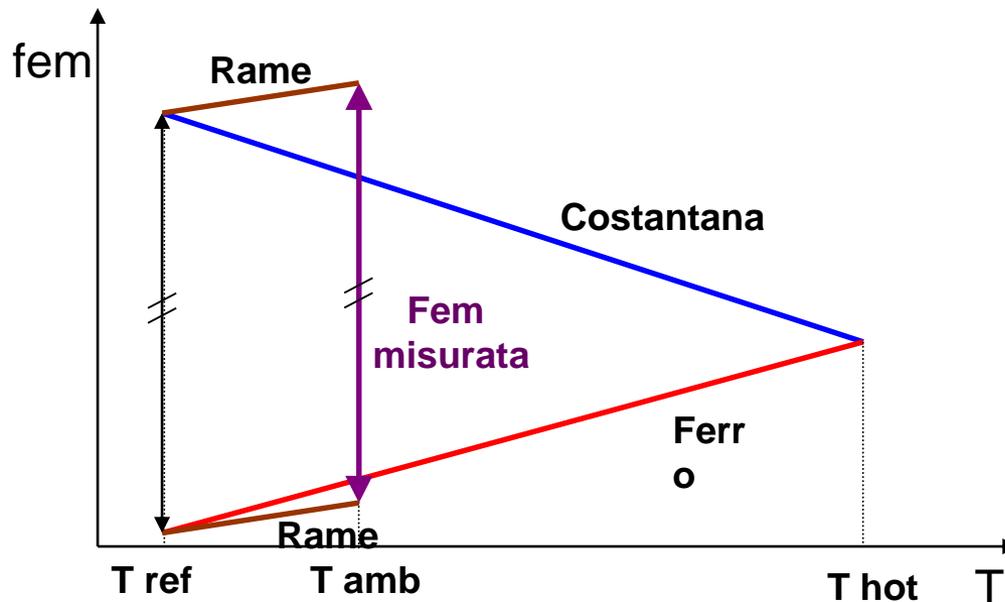
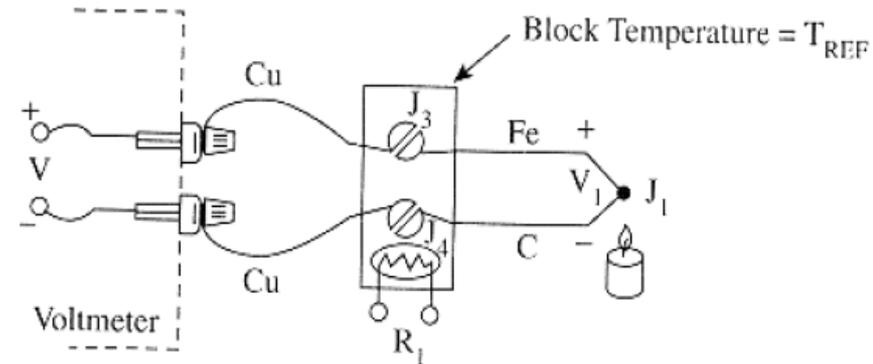


La tensione misurata ai morsetti è uguale alla tensione che si avrebbe misurando il  $\Delta V$  tra la temperatura incognita e quella del ghiaccio fondente.

## Termocoppie

### ➤ Giunto isoterma

Soluzione sicuramente più pratica è quella di rimpiazzare il giunto di riferimento col ghiaccio fondente (o simili) con un *blocco isoterma* a temperatura nota, misurata in qualche modo (chiaramente NON con un'altra termocoppia).



La tensione misurata ai morsetti è uguale alla tensione che si avrebbe misurando il  $\Delta V$  tra la temperatura incognita e quella del giunto di riferimento.

## Termocoppie

Le termocoppie di tipo industriale sono sonde preassemblate con i due fili all'interno di una guaina metallica di elevata resistenza, riempita di un opportuno isolante (spesso ossido di magnesio); esistono varie alternative per la realizzazione della giunzione:

- **Giunzione esposta.** Caratterizzato da un ridottissimo tempo di risposta in quanto lo stesso è a diretto contatto con l'ambiente in cui si deve misurare la temperatura; questa soluzione minimizza l'inerzia termica, consentendo di realizzare sensori miniaturizzati. Risulta molto più fragile e poco adatta per applicazioni industriali e in ambienti corrosivi.
- **Giunzione protetta con ponte termico sulla guaina.** In questo tipo di realizzazione il giunto di misura è parte integrante della guaina di protezione e di conseguenza il tempo di risposta è abbastanza ridotto. Rispetto al caso con giunto caldo isolato l'inerzia termica è notevolmente diminuita, ma lo stesso avviene per l'immunità a disturbi di tipo elettrico.
- **Giunzione protetta elettricamente isolata.** Il giunto caldo è completamente isolato dalla guaina di protezione. Tale soluzione protegge efficacemente la giunzione e minimizza la possibilità di trasmissione di f.e.m. spuri (ad esempio per difetti di terra sull'impianto). Ha il difetto di avere un'elevata inerzia termica a parità di dimensioni della sonda.



**Giunto caldo esposto**



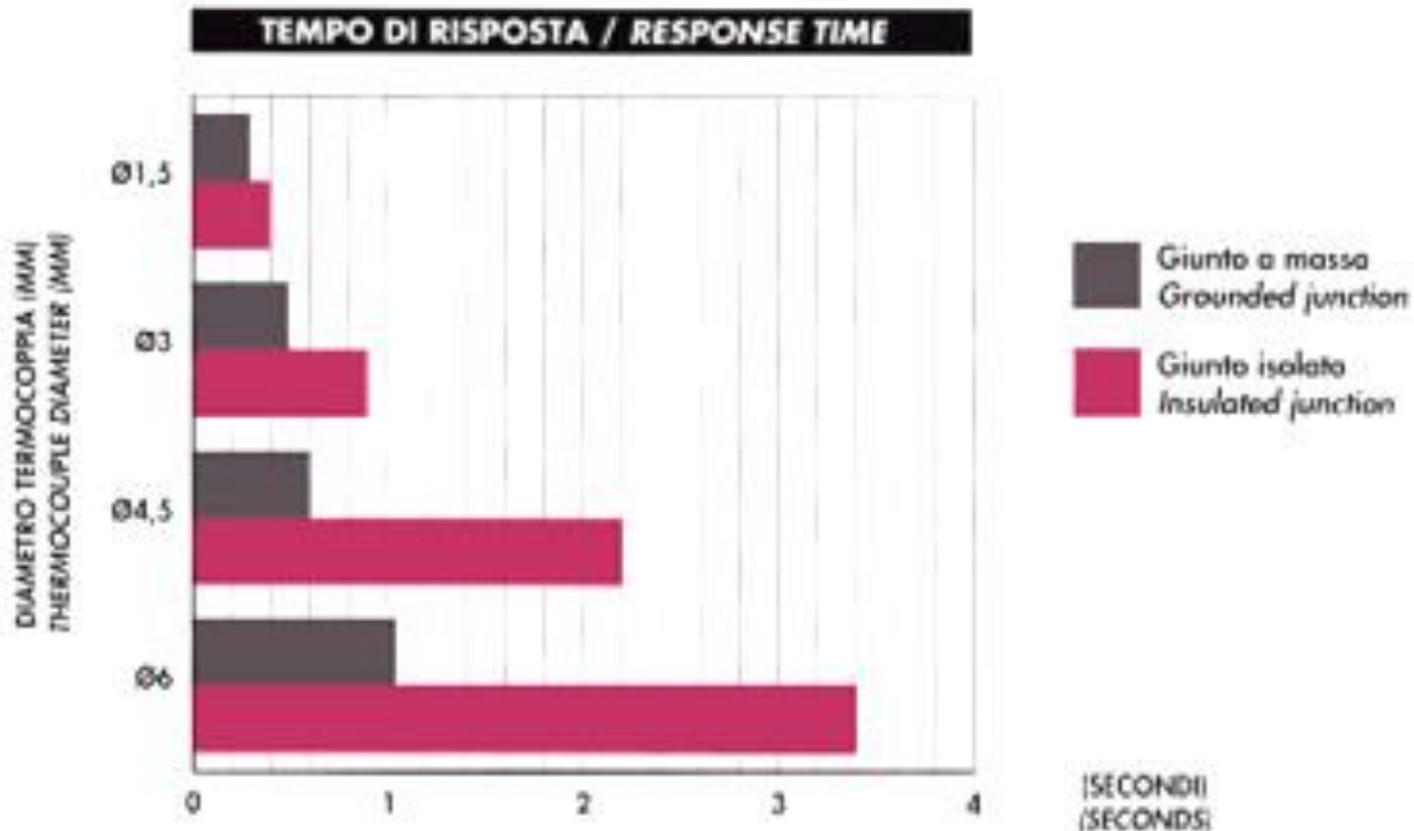
**Giunto caldo a massa**



**Giunto caldo isolato**

## Termocoppie

Il grafico seguente mostra il tempo necessario ad una termocoppia con isolamento minerale per il raggiungere il 63,2% del salto termico misurato in acqua con velocità di 0,4m/s



## Termocoppie

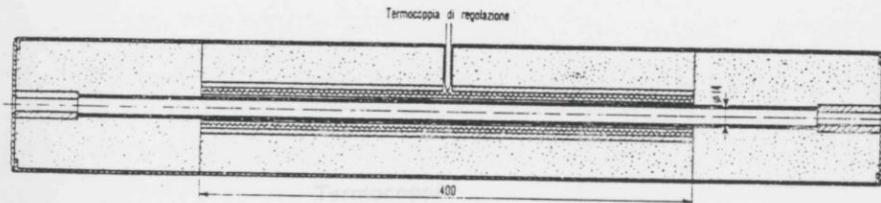
Tipo		Limiti di temperatura (°C)	Descrizione
Simbolo	Materiali		
S	Pt10%Rh - Pt	-50 / 1760	Termocoppia a base di metalli nobili ( Platino e Rodio ) permette di ottenere misure molto precise. Particolarmente resistente alle alte temperature viene solitamente usata in atmosfere ossidanti. Poco raccomandata in atmosfere riducenti o che contengano vapori di metallo.
R	Pt13%Rh - Pt	-50 / 1760	Come la termocoppia tipo "S" ma con percentuali diverse dei due metalli.
B	Pt30%Rh - Pt6%Rh	0 / 1820	Termocoppia a base di metalli nobili che grazie alla maggiore quantità di Rodio rispetto ai tipi "S" e "R" la rendono più resistente alle alte temperature ed agli stress meccanici.
E	Cr - Co	-270 / 1000	Termocoppia con alto potere termoelettrico che unisce il polo positivo della termocoppia tipo "K" e il polo negativo della termocoppia tipo "J". Particolarmente indicata in atmosfere ossidanti.
J	Fe - Co	-210 / 1200	Termocoppia formata dal polo positivo in ferro e da quello negativo in constantana ( lega a base di rame e nichel ). Indicata per misure di medie temperature in atmosfere riducenti e con presenza di idrogeno e carbone. La presenza del ferro ne pregiudica il buon funzionamento in atmosfere ossidanti.
K	Cr - Al	-270 / 1370	Termocoppia a base di leghe contenenti nichel adatta per misure di alte temperature in atmosfere ossidanti . Non utilizzabile in atmosfere riducenti.
T	Cu - Co	-270 / 400	Termocoppia che permette accurate misure a bassa temperatura in atmosfere ossidanti e riducenti.
N	Nicrosil - Nisil	-270 / 400 (1) 0 / 1300 (2)	Termocoppia per alte temperature simile alla tipo "K" ma con minor isteresi
W3	W3%Re- W25%Re	0 / 2310	Termocoppia per altissime temperature composta da un polo positivo di Tungsteno contenente in 3% di Renio e da un polo negativo di Tungsteno contenente il 25% di Renio. Particolarmente resistente in atmosfere riducenti e in presenza di idrogeno o di altro gas inerte. Non può essere usata in aria o in atmosfere ossidanti.
W5	W5%Re - W26%Re	0 / 2310	Termocoppia molto simile alla W3 ma con una percentuale di Renio maggiore che ne aumenta la resistenza meccanica. Altre caratteristiche identiche alla termocoppia tipo W3

# TARATURE (UNI 4768)

## 3. Esecuzione della taratura

3.1. La taratura delle termocoppie secondo il metodo di confronto si esegue adoperando un forno orizzontale a resistenza elettrica. Il diametro interno del forno deve essere compreso fra 10 e 20 mm e la lunghezza non deve essere minore di 600 mm. Un forno particolarmente raccomandato è quello rappresentato schematicamente in figura.

Dimensioni in mm



5. La misurazione della forza elettromotrice delle termocoppie deve essere eseguita in condizioni statiche, cioè di regime del forno, ad ogni temperatura scelta per il controllo; dopo che il forno è stato portato alla temperatura di misurazione, si deve attendere che sia stato raggiunto il regime termico, verificato mediante la ripetibilità dei risultati.
6. È consigliabile eseguire il controllo della termocoppia ad almeno tre temperature del campo che interessa, o meglio ogni 50 °C. Il numero delle determinazioni ed i corrispondenti valori della temperatura da controllare devono essere concordati tra il committente e il fornitore della termocoppia o il laboratorio che esegue la taratura, in relazione all'uso al quale la termocoppia è destinata.

## Tolleranze

Se la relazione forza elettromotrice-temperatura stabilita con il metodo qui descritto soddisfa le tolleranze indicate nel prospetto seguente, si considerano valide le tavole di conversione indicate dal fornitore.

Tipo di termocoppia tarata	Tolleranze		
	fino a 400 °C	oltre 400 °C fino a 1 000 °C	oltre 1 000 °C
Campione secondario (vedere punto 2.2.)	± 0,5 °C	± 0,7 °C	± 1,5 °C
Normale (vedere punto 3.3.)	± 1,5 °C	± 2,5 °C	± 5 °C

## IDENTIFICAZIONE TERMOCOPPIE

Tipo di termocoppia	Materiale del tipo di termocoppia
S	Platino — 10% Rodio vs. Platino
R	Platino — 13% Rodio vs. Platino
B	Platino — 30% Rodio vs. Platino - 6% Rodio
J	Ferro vs. Rame-Nichel
T	Rame vs. Rame-Nichel
K	Nichel — 10% Cromo vs. Nichel - 6% Alluminio
E	Nichel — 10% Cromo vs. Rame-Nichel

## Limiti di Temperatura di ESERCIZIO

Tipo di termocoppia	Diametro dei fili in mm				
	3,2	1,6	0,8	0,5	0,3
Limite massimo di temperatura °C					
S				1 450	
R				1 450	
B				1 700	
J	750	590	480	370	370
T		350	260	200	200
K	1 250	1 090	980	970	870
E	900	650	540	430	430

## Polinomio interpolante TIPO K

Relazione forza elettromotrice – temperatura della termocoppia tipo K (Nichel-10% Cromo vs. Nichel-5% Alluminio)

La relazione  $E = f(t)$  riportata nel prospetto seguente è espressa dai polinomi seguenti:

Campo di temperatura

-270 a 0 °C

Polinomio

$$E = \sum_{i=0}^{10} d_i t^i \quad [\mu V]$$

dove:

$$\begin{aligned} d_0 &= 0 \\ d_1 &= 3,947\,543 \times 10^1 \\ d_2 &= 2,746\,525 \times 10^{-2} \\ d_3 &= -1,656\,541 \times 10^{-4} \\ d_4 &= -1,519\,091 \times 10^{-6} \\ d_5 &= -2,458\,167 \times 10^{-8} \\ d_6 &= -2,475\,792 \times 10^{-10} \\ d_7 &= -1,558\,528 \times 10^{-12} \\ d_8 &= -5,972\,992 \times 10^{-15} \\ d_9 &= -1,268\,880 \times 10^{-17} \\ d_{10} &= -1,138\,280 \times 10^{-20} \end{aligned}$$

0 a 1372 °C

$$E = \sum_{i=0}^8 d_i t^i + 125 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-127}{65} \right)^2 \right] \quad [\mu V]$$

dove:

$$\begin{aligned} d_0 &= -1,853\,306 \times 10^1 \\ d_1 &= 3,891\,834 \times 10^1 \\ d_2 &= 1,664\,515 \times 10^{-2} \\ d_3 &= -7,870\,237 \times 10^{-5} \\ d_4 &= 2,283\,579 \times 10^{-7} \\ d_5 &= -3,570\,023 \times 10^{-10} \\ d_6 &= 2,993\,291 \times 10^{-13} \\ d_7 &= -1,284\,985 \times 10^{-16} \\ d_8 &= 2,223\,997 \times 10^{-20} \end{aligned}$$



# TENSIONE vs. TEMPERATURA TIPO K

Prospetto VIII - Relazione  $E = f(t)$  per termocoppia tipo K (giunto di riferimento a 0 °C)

Temperatura °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-270	-6,458									
-260	-6,441	-6,444	-6,446	-6,448	-6,450	-6,452	-6,453	-6,455	-6,456	-6,457
-250	-6,404	-6,408	-6,413	-6,417	-6,421	-6,425	-6,429	-6,432	-6,435	-6,438
-240	-6,344	-6,351	-6,358	-6,364	-6,371	-6,377	-6,382	-6,388	-6,394	-6,399
-230	-6,262	-6,271	-6,280	-6,289	-6,297	-6,306	-6,314	-6,322	-6,329	-6,337
-220	-6,158	-6,170	-6,181	-6,192	-6,202	-6,213	-6,223	-6,233	-6,243	-6,253
-210	-6,035	-6,048	-6,061	-6,074	-6,087	-6,099	-6,111	-6,123	-6,135	-6,147
-200	-5,891	-5,907	-5,922	-5,936	-5,951	-5,965	-5,980	-5,994	-6,007	-6,021
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,796	-5,813	-5,829	-5,845	-5,860	-5,876
-180	-5,550	-5,569	-5,587	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5,712
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,414	-5,434	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,249	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333
-150	-4,912	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,051	-5,074	-5,097	-5,119
-140	-4,669	-4,694	-4,719	-4,743	-4,768	-4,792	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889
-130	-4,410	-4,437	-4,463	-4,489	-4,515	-4,541	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644
-120	-4,138	-4,166	-4,193	-4,221	-4,248	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384
-110	-3,852	-3,881	-3,910	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,053	-4,082	-4,110
-100	-3,553	-3,584	-3,614	-3,644	-3,674	-3,704	-3,734	-3,764	-3,793	-3,823
-90	-3,242	-3,274	-3,305	-3,337	-3,368	-3,399	-3,430	-3,461	-3,492	-3,523
-80	-2,920	-2,953	-2,985	-3,018	-3,050	-3,082	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211
-70	-2,586	-2,620	-2,654	-2,687	-2,721	-2,754	-2,787	-2,821	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,277	-2,312	-2,347	-2,381	-2,414	-2,448	-2,481	-2,515	-2,548
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,102	-2,137	-2,172	-2,207
-40	-1,527	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853
-30	-1,156	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,415	-1,451	-1,489
-20	-0,777	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,716	0,756
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,001	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,775	1,816	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,216	8,256	8,296	8,336	8,376	8,416	8,456	8,497
210	8,537	8,577	8,616	8,656	8,696	8,736	8,776	8,816	8,856	8,896
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,584	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111

(seguito del prospetto VIII)

Temperatura °C	f.e.m. mV									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,545	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,707	13,748	13,790	13,832
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510
380	15,552	15,594	15,636	15,678	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895
460	19,038	19,080	19,123	19,165	19,208	19,250	19,293	19,335	19,378	19,420
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,044	20,086	20,129	20,172
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582
570	23,624	23,667	23,710	23,752	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,799	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674		

## TOLLERANZE TERMOCOPPIE

Tipo di termocoppia	Campo °C	G I*	G II*
R ed S	0 a 1 450	±0,6 °C oppure ±0,1%***	±1,5 °C oppure ±0,25%
B	800 a 1 700	—	±0,5%
J	0 a 750	±1,1 °C oppure ±0,4%	±2,2 °C oppure ±0,75%
T	0 a 350	±0,5 °C oppure ±0,4%	± 1 °C oppure ±0,75%
T**	- 200 a 0	—	± 1 °C oppure ±1,5 %
E	0 a 900	±1 °C oppure ±0,4%	±1,7 °C oppure ±0,5 %
E**	- 200 a 0	—	±1,7 °C oppure ±1,5 %
K	0 a 1 250	±1,1 °C oppure ±0,4%	±2,2 °C oppure ±0,75%
K**	- 200 a 0	—	±2,2 °C oppure ± 2%

\* Vale il limite maggiore tra i due in opzione. Per esempio:  
Per la termocoppia tipo K tolleranza G II, a 200 °C la tolleranza percentuale ±0,75% equivale a ±1,5 °C. Vale pertanto il limite di ±2,2 °C. A 600 °C, invece, la tolleranza percentuale equivale a ±4,5 °C ed è pertanto questo il limite da utilizzare.

\*\* Tolleranze ottenibili su richiesta. Le termocoppie che soddisfano i limiti per temperature maggiori di 0 °C non necessariamente soddisfano i limiti per il campo sotto 0 °C.

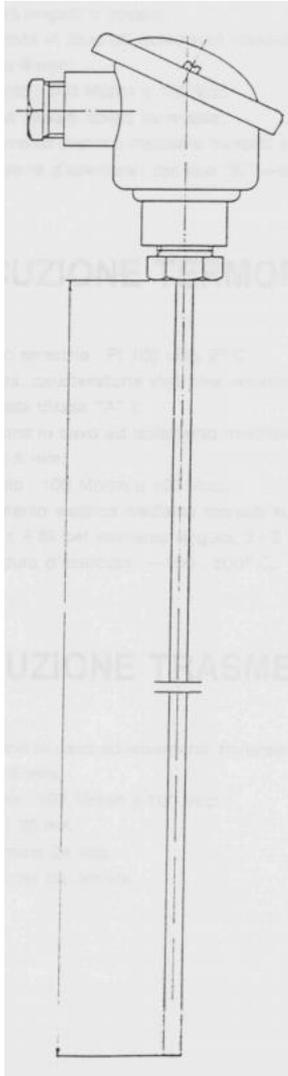
\*\*\* Valida nel campo 0 a 1 100 °C.

**G I (Tolleranze Speciali)**  
**G II (Tolleranze NORMALI)**

## Tolleranze cavi di ESTENSIONE

Cavi di estensione				Cavi di estensione sostitutivi		
Tipo	Campo di temperatura °C	G I °C	G II °C	Tipo	Campo di temperatura °C	Tolleranza °C
TX	-60 a 95	± 0,4	± 0,8	WX	25 a 205	± 3,3
JX	-20 a 205	± 1,1	± 2,2	SX	25 a 205	± 6,7
KX	-20 a 205	—	± 2,2			
EX	-20 a 205	—	± 1,6			

# Codici COLORE per CAVI COMPENSATI-Termocoppie



TIPO DI TERMOCOPIA	CAVIO COMPENSATO	Codice colori nazionali per cavi di estensione o compensati						
		CODICE COLORI INTERNAZIONALI DA IEC 584.3:1989	CODICE COLORI PER IMPIANTI A SICUREZZA INTRINSECA IEC 584.3:1989	INGLESE BS 1843 	AMERICANO ANSI/MC96.1 	TEDESCO DIN 43714 	FRANCESE NFC 42324 	GIAPPONESE JIS C 1610-1981 
K Ch / Al	KX							
	WX							
	VX							
T Cu / Co	TX							
J Fe / Co	JX							
E Ch / Co	EX							
N Ni Cr Si / Ni Si	NX							
R Pt / Pt 13% Rh	RX							
S Pt / Pt 10% Rh	SX							
B Pt 6% Rh / Pt 30% Rh	BX							



## Potenziali cause di errore con termocoppie

Le possibilità di errori nelle misure di temperature con termocoppie é frequente, a causa principalmente delle forze elettromotrici molto deboli che devono essere misurate. I disturbi più frequenti sono dovuti a:

- Collegamento della termocoppia con lo strumento di misura con un cavo non adatto. Tutti i collegamenti tra le termocoppie e gli strumenti di misura devono essere effettuati con cavi compensati adatti, infatti esistono cavi compensati per ogni tipo di termocoppia, la scelta del tipo di isolante e delle dimensioni dipendono unicamente dalle condizioni di utilizzo.
- Inversioni di polarità nei vari collegamenti. Tutti i cavi di compensazione e/o di estensione per termocoppie hanno una colorazione che identifica sia il tipo di termocoppia che la sua polarità, E' tuttavia buona norma, nei collegamenti tra le termocoppie e gli strumenti di misura, fare meno giunzioni possibili e comunque usare appositi dispositivi con contatti compensati che impediscono anche le inversioni di polarità.
- Carenze di terra elettrica nel circuito. Per risolvere tale problema conviene mettere a terra la guaina con un dispersore di terra separato rispetto all'impianto (terra di strumentazione), utilizzando un cavo schermato per il segnale.
- Disomogeneità di composizione nel cavo della termocoppia, associate ad attraversamento di zone a diverso gradiente di temperatura per i due metalli della coppia. Per tale motivo si utilizzano sempre fili doppi, rinunciando a fare effettuare percorsi diversi ai fili di metalli diversi.
- "Estensimetria" dei cavi, legata ad un loro ancoraggio non perfetto ed al loro allungamento dinamico per effetto delle vibrazioni.
- Decalibrazione progressiva a seguito di fenomeni di ossidazione. Alcune coppie (ad esempio quelle in metalli nobili), pur se adatte ad alte temperature, soffrono di questo problema se utilizzate in ambienti ossidanti (ad esempio nei sistemi di combustione).
- Disturbi elettrici nel sistema di misura.

## Termometri a resistenza

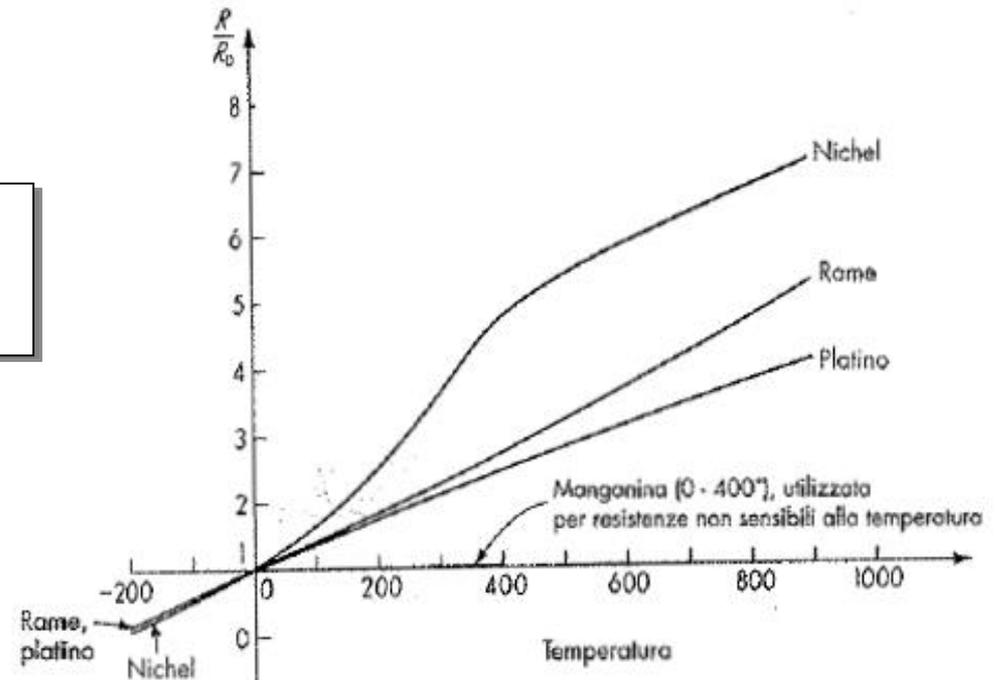
La resistenza elettrica di un materiale varia con la temperatura.

➤ I materiali che possono essere utilizzati sono:

- ⇒ conduttori (metalli) e si parla di **termoresistenze** o **RTD** (*resistance temperature detector*)
- ⇒ semiconduttori e si parla di **termistori**.

Le termoresistenze sono sensori costituiti da un filamento di un unico metallo (tipicamente il Platino o il Nichel), la cui resistenza elettrica è funzione della temperatura a cui si trova il filamento stesso

$$R = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n)$$

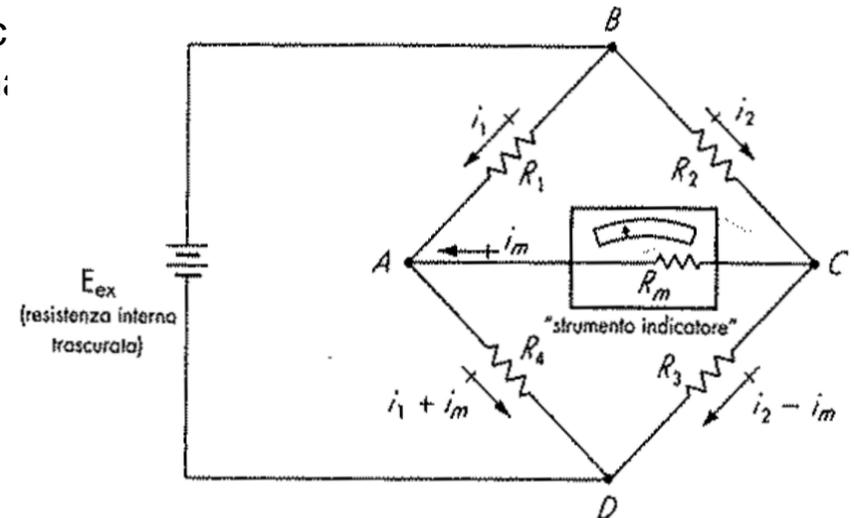


## Termoresistenze (RTD)

- Gli elementi sensibili sono costituiti da un gran numero di forme differenti. Per misure di temperature di fluidi gli avvolgimenti del filo che costituisce la resistenza possono essere incapsulati in un bulbo di acciaio per proteggerli da liquidi o gas corrosivi.
- Sonde di tipo aperto espongono gli avvolgimenti della resistenza direttamente al fluido e producono una risposta più veloce.
- Sono disponibili avvolgimenti a griglia piatta per misurare la temperatura superficiale dei solidi.
- Le termoresistenze sono sensori passivi e vanno alimentati.
- Si utilizza un circuito a ponte di Wheatstone
  - ⇒ uno o più lati del ponte è costituito da un trasduttore resistivo, le resistenze sono regolate in modo tale che il ponte sia bilanciato. Il valore di una delle resistenze genera una

Metodo a deflessione: la lettura della tensione dà un'indicazione della variazione di resistenza e quindi di temperatura.

Metodo ad azzeramento: una delle resistenze può essere regolata manualmente finché il ponte non viene bilanciato.

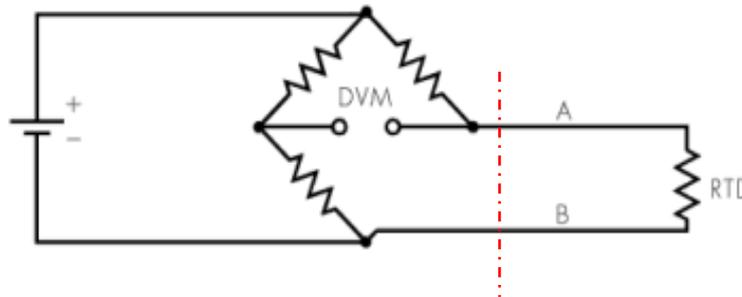


## Metodi di misura con i termometri a resistenza

Esistono diversi metodi di collegamento dei termometri a resistenza con gli apparecchi di misura; la scelta di utilizzo di un metodo rispetto ad un altro dipende essenzialmente dalla precisione nella misura che si vuole ottenere:

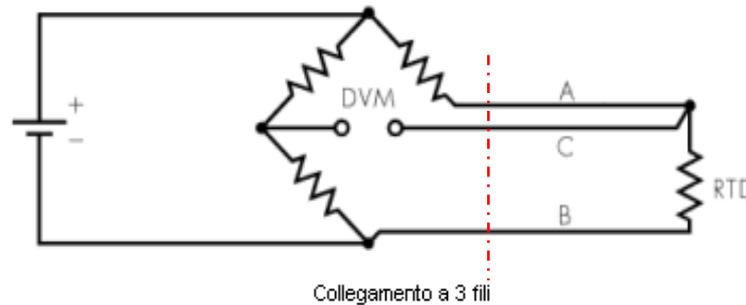
- a) **A 2 fili**
- b) **A 3 fili**
- c) **A 4 fili voltamperometrica**

a) La tecnica **a due fili** è la meno precisa e viene utilizzata solo nei casi in cui il collegamento della termoresistenza viene effettuato con fili di lunghezza ridotta e con bassa resistività; infatti esaminando il circuito elettrico equivalente, si nota come la resistenza elettrica misurata sia la somma di quella dell'elemento sensibile (e quindi dipendente dalla temperatura che si sta misurando) e della resistenza dei conduttori utilizzati per il collegamento. L'errore introdotto con questo tipo di misura non è costante ma dipende dalla temperatura.

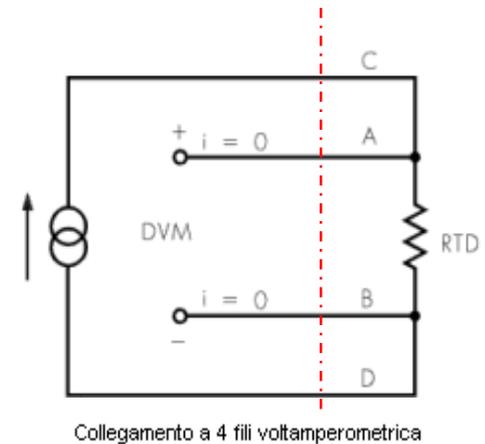


## Metodi di misura con i termometri a resistenza

b) Grazie alla buona precisione ottenibile nella misura, la tecnica **a tre fili** è la più utilizzata in campo industriale. Con questa tecnica di misura infatti vengono eliminati gli errori provocati dalla resistenza dei conduttori impiegati per il collegamento della termoresistenza; infatti all'uscita del ponte di misura è presente una tensione dipendente unicamente dalla variazione della resistenza del termometro a resistenza e quindi dalla sola temperatura.



c) La tecnica **a quattro fili volt-amperometrica** fornisce la migliore precisione possibile in senso assoluto (due fili portano l'alimentazione a corrente costante alla resistenza, sulla quale mediante gli altri due fili viene misurata la caduta di tensione); poco utilizzata nel campo industriale, viene utilizzata quasi esclusivamente nelle applicazioni di laboratorio. Dal circuito elettrico equivalente si nota come la tensione rilevata sia unicamente dipendente dalla resistenza del termoelemento; la precisione nella misura dipende esclusivamente dalla stabilità della corrente di misura e dalla precisione della lettura della tensione ai capi del termoelemento.



## Principali cause di errore nelle misure con termoresistenze

La misura della temperatura con le termoresistenze è abbastanza semplice da eseguire, tuttavia è opportuno fare attenzione ad alcuni accorgimenti in modo da ovviare ad eventuali errori nella misura. Le principali cause di errore che si introducono nella misura della temperatura con le termoresistenze sono tre:

- **Errore dovuto all'auto riscaldamento dell'elemento sensibile**
- **Errore dovuto allo scarso isolamento elettrico dell'elemento sensibile**
- **Errore dovuto alla non sufficiente profondità di immersione dell'elemento sensibile.**

**L'auto riscaldamento** dell'elemento sensibile si ha, in fase di misura, quando questo viene attraversato da una corrente troppo elevata che, per l'effetto Joule, ne fa aumentare la temperatura (un elemento di platino da 450  $\Omega$  percorso da 25 mA presenta un errore di auto riscaldamento di 0.1°C).

Questo innalzamento della temperatura è dipendente sia dal tipo di elemento sensibile utilizzato che dalle condizioni di misura; la stessa termoresistenza, a parità di temperatura, si auto riscalderà meno se viene posta in acqua piuttosto che in aria; questo è dovuto al fatto che l'acqua ha un coefficiente di dissipazione più elevato rispetto all'aria.

Per ovviare la problema dell'auto riscaldamento si può usare un'eccitazione a impulsi non simmetrici in modo da mantenere il valore di rms basso rispetto al valore di picco.

## ***Misura della temperatura***

### **Principali cause di errore nelle misure con termoresistenze**

Per una buona misura con le termoresistenze è molto importante che **l'isolamento elettrico** tra i conduttori e la guaina esterna sia adeguatamente elevato soprattutto alle alte temperature. La resistenza di isolamento può essere vista come una resistenza elettrica posta in parallelo a quelle dell'elemento sensibile, risulta quindi evidente come, a temperatura costante, nel caso in cui l'isolamento elettrico diminuisca, anche la tensione rilevata ai capi dell'elemento sensibile diminuirà introducendo quindi un errore nella misura. L'abbassamento della resistenza di isolamento può verificarsi per l'utilizzo della sonda con temperature troppo elevate, in presenza di forti vibrazioni o per l'influenza di agenti fisici o chimici.

Particolarmente importante è anche la **profondità di immersione** dell'elemento sensibile; questa, a differenza che per le termocoppie la cui misura può considerarsi puntiforme, se non è adeguata, può arrecare errori nella misura anche nell'ordine parecchi gradi °C. Questo è dovuto al fatto che la guaina, solitamente metallica, con cui viene protetto l'elemento sensibile dissipa calore in maniera proporzionale alla differenza di temperatura presente tra la zona calda e quella fredda; si è quindi in presenza di un **gradiente termico** su parte della lunghezza della guaina. La profondità di immersione dovrà quindi essere sufficiente per fare in modo che l'elemento sensibile posto all'interno della guaina, non sia sottoposto a questo gradiente termico. Tale profondità minima dipenderà sia dalle condizioni fisiche di misura che dalle dimensioni della termoresistenza (lunghezza dell'elemento ecc. ).

## ACCURATEZZE RTD

### Classi di tolleranza per le termocoppie Secondo IEC 584-2 1982

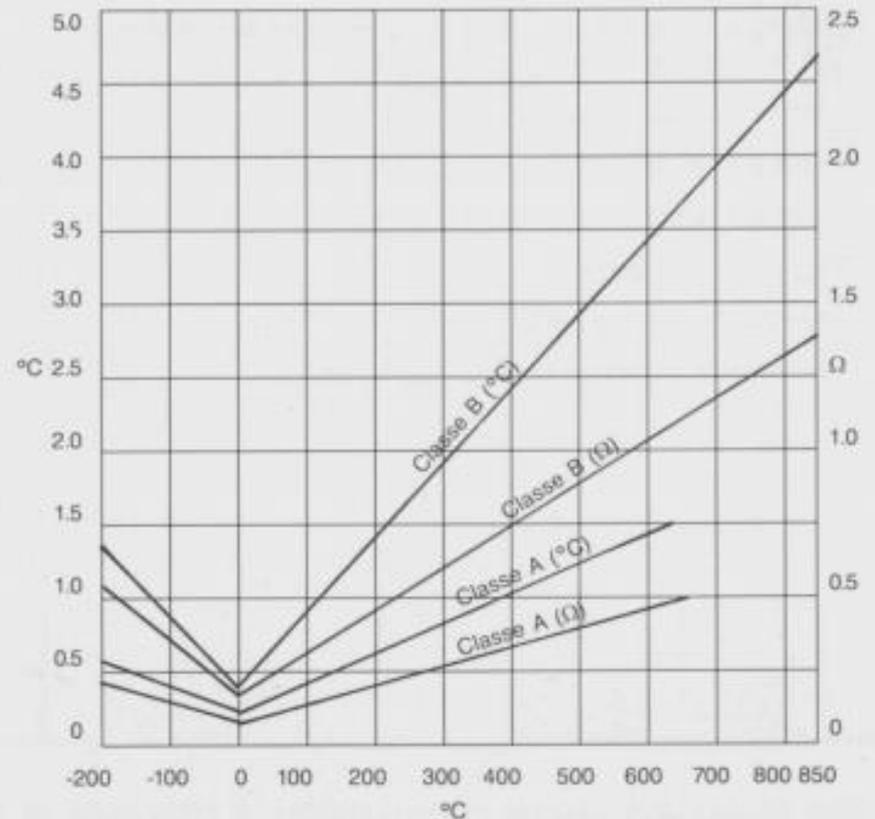
Classe di tolleranza	1 (SPECIALE)	2 (NORMALE)
Valori di tolleranza ( $\pm$ )	0.5°C (–40°C to 125°C) 0.004·[t] (t>125°C)	1°C (–40°C to 133°C) 0.0075·[t] (t>133°C)
<i>Limiti di temperatura per la validità delle tolleranze</i>		
Tipo T	–40°C to 350°C	–40°C to 350°C
Valori di tolleranza ( $\pm$ )	1.5°C (–40°C to 375°C) 0.004·[t] (t>375°C)	2.5°C (–40°C to 333°C) 0.0075·[t] (t>333°C)
<i>Limiti di temperatura per la validità delle tolleranze</i>		
Tipo E	–40°C to 800°C	–40°C to 900°C
Tipo J	–40°C to 750°C	–40°C to 750°C
Tipo K or N	–40°C to 1000°C	–40°C to 1200°C
Valori di tolleranza ( $\pm$ )	1°C (0°C to 1100°C) [1 + 0.003 (T-100)]°C (t > 1100°C)	1.5°C (–40°C to 600°C) 0.0075·[t] (t > 600°C)
<i>Limiti di temperatura per la validità delle tolleranze</i>		
Tipo R or S	0°C to 1600°C	0°C to 1600°C
Tipo B	—	600°C to 1700°C

## RTD - Tolleranze (2)

# Classi di tolleranza per i termometri a resistenza (termoresistenze)

Platino 100 Ohm a 0°C (Alfa: 0,00385) secondo IEC 751-1983 o DIN 43760

Temperatura (°C)	Tolleranza			
	Classe A		Classe B	
	(± °C)	(± Ω)	(± °C)	(± Ω)
-200	0.55	0.24	1.3	0.56
-100	0.35	0.14	0.8	0.32
0	0.15	0.06	0.3	0.12
100	0.35	0.13	0.8	0.30
200	0.55	0.20	1.3	0.48
300	0.75	0.27	1.8	0.64
400	0.95	0.33	2.3	0.79
500	1.15	0.38	2.8	0.93
600	1.35	0.43	3.3	1.06
650	1.45	0.46	3.6	1.13
700	—	—	3.8	1.17
800	—	—	4.3	1.28
850	—	—	4.6	1.34



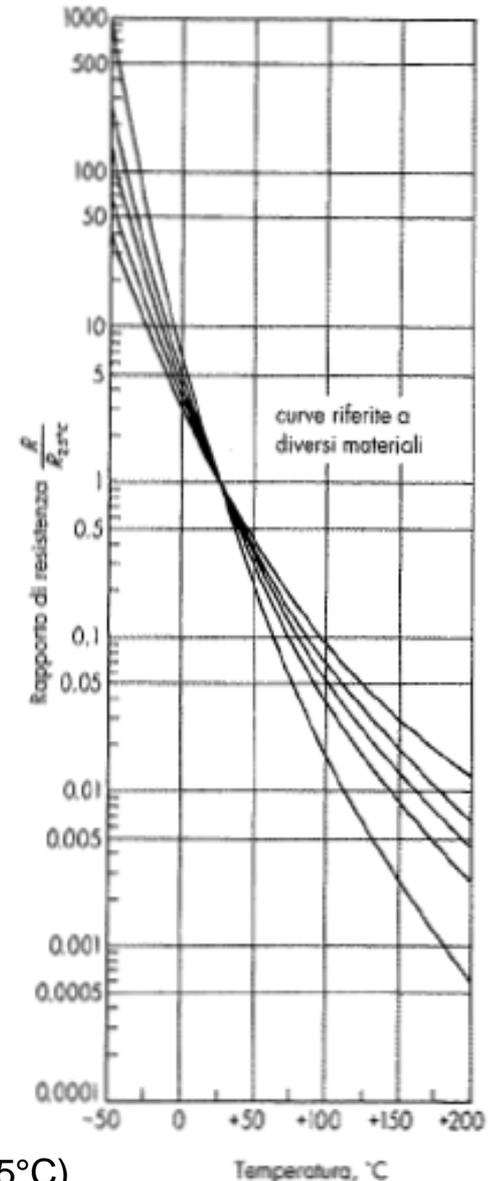
## Termistori

- Un caso particolare di sensori a resistenza sono i cosiddetti "termistori", in cui l'elemento di misura è costituito da particolari sostanze (**semiconduttori**) la cui resistenza elettrica varia con la temperatura, seguendo leggi specifiche per ciascun tipo di termistore.
- Confrontati con i sensori del tipo a conduttore, che hanno un coefficiente di temperatura piccolo e positivo, i termistori hanno un **coefficiente di temperatura assai elevato e negativo**.
- I primi erano fatti in manganese o ossidi di cobalto sminuzzati, mescolati con un legante, pressati e sinterizzati.
- I tipi di termistore esistenti sono centinaia ed è dunque praticamente impossibile farne una casistica di utile impiego.
- Sono in genere di rapida risposta e con elevata precisione, poco stabili nel tempo, delicati e con dimensioni minime limitate.
- Campo di funzionamento da -200°C a +1000°C (il singolo termistore non copre tutto il campo, solo poco più di un centinaio di gradi).
- Spesso i termistori sono utilizzati per realizzare, a basso costo, sistemi di termostatazione di precisione (ad esempio, per misurare la temperatura dei giunti freddi per termocoppie).
- La relazione resistenza/temperatura che li caratterizza è del tipo:

$$R = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$$

$R_0$ : resistenza alla temperatura  $T_0$   
 $T_0$ : T di riferimento, in genere 298K (25°C)

Docenti: M. De Lucia-D. Vangi



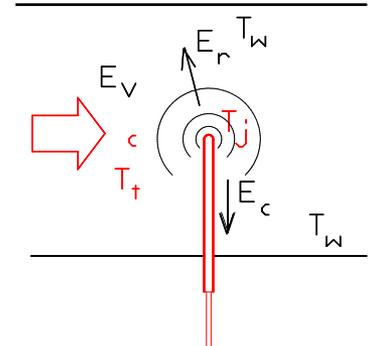
## Confronto tra le caratteristiche di diversi sensori di temperatura di uso

	Termocoppie	RTD	Termistori
Pro	<p>autoeccitante semplice robusto poco costoso ampio range temp.</p>	<p>molto stabile molto accurato molto lineare</p>	<p>molto sensibile veloce molto accurato</p>
Contro	<p>non lineare bassa tensione di usc. serve una temp. di rif. bassa sensitività</p>	<p>costoso serve rif. di corrente autoriscaldamento</p>	<p>non lineare range limitato di T serve rifer. di corrente autoriscaldamento</p>

## Errori

Indipendentemente dal tipo di sensore utilizzato tutte le volte che vogliamo misurare la temperatura stazionaria di un fluido si sommano sostanzialmente tre tipologie di errore:

1. Conduzione del sensore verso pareti o superfici fredde.
2. Irraggiamento verso pareti calde o fredde (non in equilibrio termico col sensore (si ricorre a sonde schermate).
3. Incompleto recupero dell'energia cinetica.



### Errori di conduzione

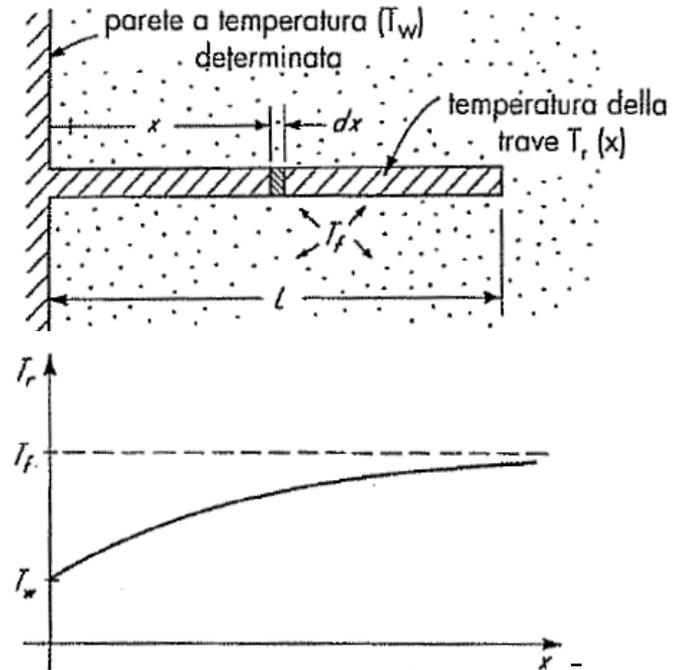
Supponendo che la temperatura della sbarra  $T_r$  sia funzione solo di  $x$  e che il fluido con temperatura  $T_f$  costante e uniforme scambi calore per convezione con la sbarra l'equazione che lega lo scambio termico sarà:

$$\frac{d^2 T_r}{dx^2} - \frac{hC}{kA} T_r = -\frac{hC}{kA} T_f$$

$h$ : coeff. di scambio convettivo  
 $C$ : circonferenza della sbarra  
 $k$ : conducibilità termica della sbarra  
 $A$ : area della sezione

$$T_r - T_f = \frac{T_w - T_f}{\cosh \sqrt{\frac{hC}{kA}} L}$$

L'errore sulla temperatura risulta:

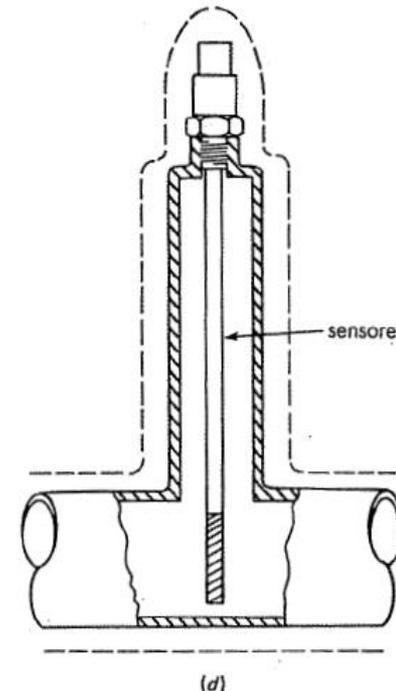
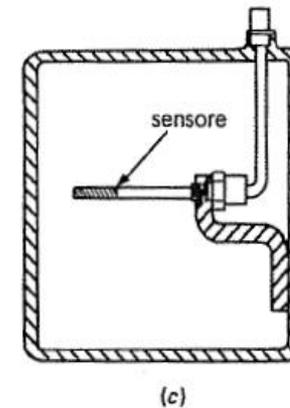
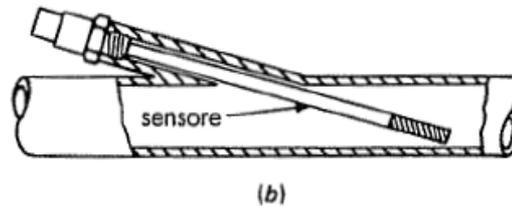
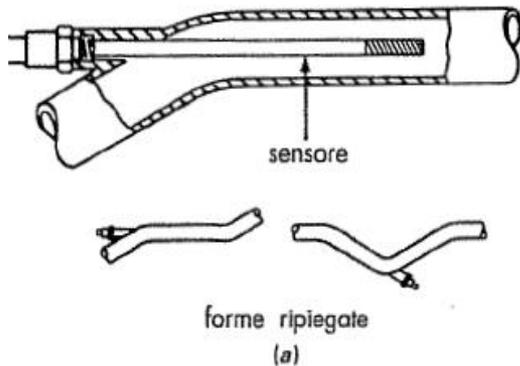


## Errori di conduzione

L'errore commesso può essere ridotto se:

- $T_w \sim T_f$ 
  - controllo della T di parete
- L grande
  - Sonda immersa il più possibile nel fluido (fig. a-b)
- h grande
  - Velocità elevate
- k piccolo
  - Supporto sonda realizzato in materiale isolante (fig. c)
- C/A grande
  - r piccolo (se la sonda è a sezione circolare)

$$T_r - T_f = \frac{T_w - T_f}{\cosh \sqrt{\frac{hC}{kA}} L}$$



## Errori per irraggiamento

HP: si considera solo lo scambio termico per **irraggiamento tra pareti e sonda** e si trascura l'irraggiamento proprio del gas e l'assorbimento da parte dello stesso gas alla radiazione che lo attraversa.

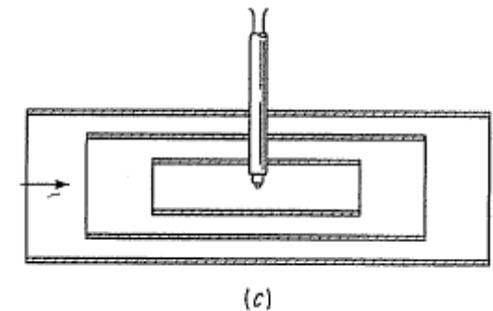
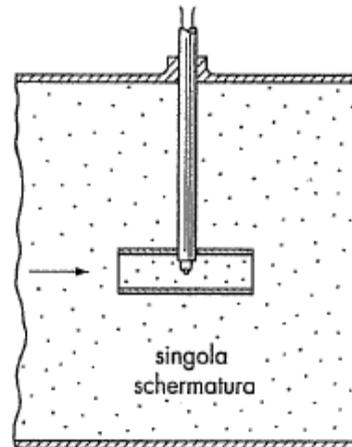
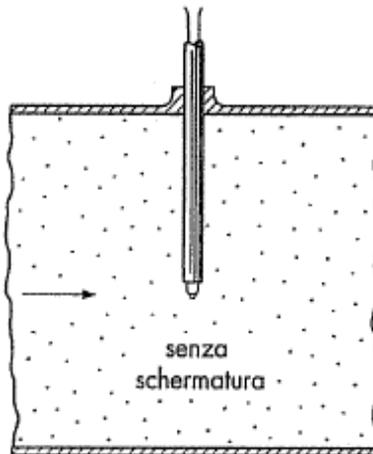
- Con queste ipotesi in assenza di schermi antiradiativi:

$$E_{RNon} = \sigma \varepsilon (T_j^4 - T_w^4) / h_c$$

con  $\sigma$  costante di Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon$  emissività della parete,  $T_j$  temperatura della giunzione (incognita),  $T_w$  temperatura della parete (se la giunzione irraggia verso più pareti devono essere valutati gli errori separatamente per ogni componente di irraggiamento in base all'angolo solido),  $h_c$  coefficiente di convezione (stimabile a seconda della geometria: filo trasversale o parallelo al flusso).

- In presenza di  $n$  schermi (fig. c), l'errore di irraggiamento si riduce secondo la formula:

$$E_R = E_{RNoS} / (ns + 1)$$



## Effetti della velocità

Nel caso della misura della **temperatura totale**, sarebbe necessario raggiungere rapidamente, nei pressi del sensore, velocità nulla per avere il completo recupero dell'energia cinetica ( $T_0 = T + \frac{1}{2}c^2/c_p$  per un gas).

Ciò formerebbe nelle vicinanze del sensore una zona dove la trasmissione del calore attraverso il gas si effettuerebbe con il meccanismo della conduzione, notoriamente poco efficiente nei gas.

In tale situazione, è molto difficile ottenere l'equilibrio termico desiderato tra flusso e sensore, in quanto, come abbiamo precedentemente visto, esistono meccanismi preferenziali di scambio termico per conduzione (attraverso l'asta della sonda, costituita da materiale strutturale a conducibilità più elevata) e di irraggiamento dal sensore verso pareti sensibilmente più fredde (fino a 600°C nelle turbine a gas) o verso zone più calde (irraggiamento verso la fiamma proveniente dalla camera di combustione).

### Errore dovuto all'incompleto recupero di energia cinetica

$$E_v = (1 - \alpha) \cdot c^2 / (2 c_p)$$

Dove

- c la velocità del flusso
- $\alpha$  il coefficiente di recupero ( $\alpha = 0,68$  per filo normale al flusso; 0,86 per filo parallelo)
- $c_p$  il calore specifico a pressione costante.

## Errori

- Da quanto visto la soluzione ottimale risulta quindi l'accettazione di un compromesso, ovvero la rinuncia al recupero totale dell'energia cinetica, ai fini della creazione intorno al sensore di un ambiente a velocità bassa ma controllata che consenta un efficiente scambio di calore tra flusso e sensore.
- Ciò si ottiene con l'adozione di sonde schermate, nelle quali lo schermo ha la doppia funzione di effettuare un controllo di velocità (e di garantire una buona insensibilità angolare) e di ridurre l'irraggiamento dal sensore verso le pareti.
  - ⇒ Per tale ultimo fine, lo schermo deve avere un rapporto  $L/D$  (riferendosi alla lunghezza  $L$  a partire dal sensore) dell'ordine di 7 - 10.
- E' inoltre opportuno ricorrere a sensori molto piccoli (fino a 0.5 mm di diametro; purtroppo la diminuzione di diametro ha riflessi negativi sulla durata dei sensori, che nelle zone ad alta temperatura può essere anche inferiore alle 1000 ore), che consentono sia di ridurre l'irraggiamento, sia di minimizzare l'errore per conduzione verso la parete (è sufficiente in genere far fuoriuscire il sensore circa 10 diametri dalla parete dello schermo), ed anche di conseguire buone prestazioni nel senso delle misure dinamiche.
- Problemi simili vengono incontrati invece in zone di bassa velocità (ad esempio per la misura della temperatura dei gas nel diffusore allo scarico della turbina, importante per le applicazioni in ciclo combinato o cogenerative); in questo caso, si ricorre a volte all'aspirazione di flusso attraverso la sonda schermata, al fine di creare intorno al sensore velocità dell'ordine di 30 - 40 m/s adatte per conseguire un buon scambio termico convettivo.



GRAZIE  
per  
L'ATTENZIONE

