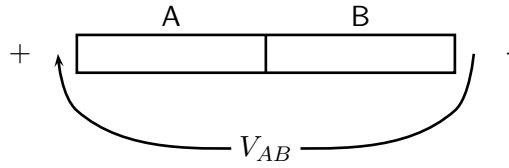
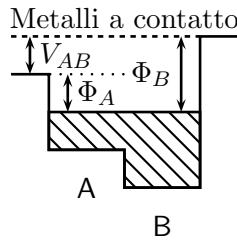
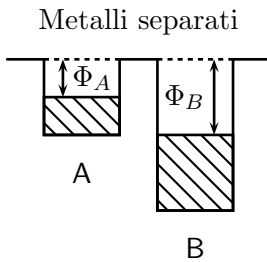


# Termocoppie

## Differenza di potenziale di contatto tra metalli



Livelli energetici:



$$V_{AB} = -\frac{\Phi_A - \Phi_B}{q}$$

Ma le funzioni lavoro  $\Phi$  dipendono dalla temperatura:

$$\Phi_A = \Phi_A(T) \quad \Phi_B = \Phi_B(T)$$

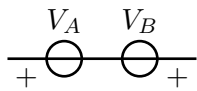
se si ha

$$\frac{d\Phi_A}{dT} \neq \frac{d\Phi_B}{dT}$$

allora

$$V_{AB} = V_{AB}(T)$$

Si trova:



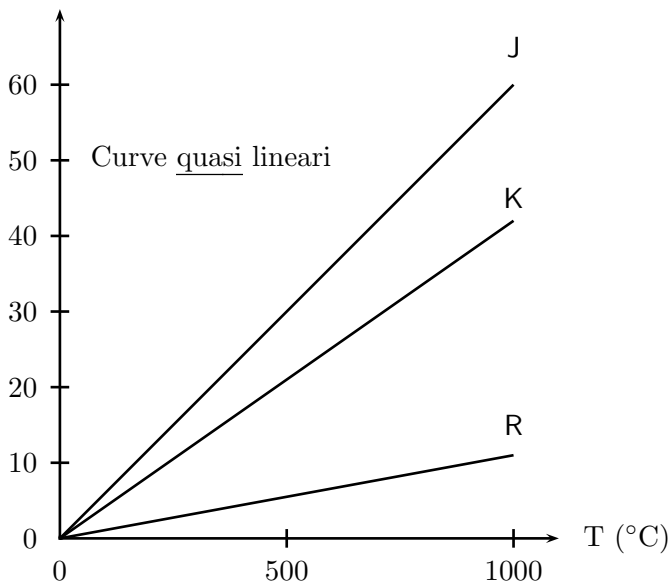
$$V_A = \frac{-\Phi_A}{q} \quad V_B = \frac{-\Phi_B}{q}$$

Quindi la sensibilità è

$$\frac{dV_{AB}}{dT} = \frac{dV_A}{dT} - \frac{dV_B}{dT}$$

ed è compresa tra  $5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  e  $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

$V_{AB}$  (mV)

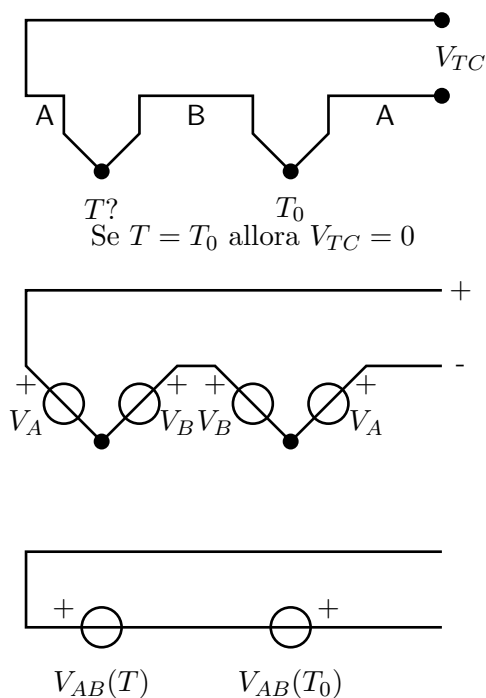


Tipo J: Fe-Cu/Ni  $\rightarrow 60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Tipo K: Chromel-Alumel  $\rightarrow 42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Tipo R: Pt-Pt/Rh  $\rightarrow 11 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

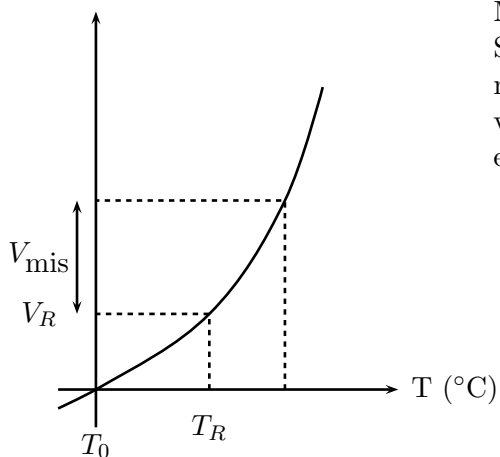
Misura con giunzione di riferimento:



Le termocoppie vanno bene ad alte temperature, ma non a temperature criogeniche, alle quali la sensibilità è molto bassa.

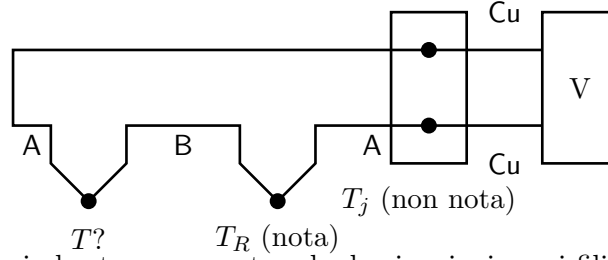
Curva di taratura:

$$V_{TC} = V_{AB}(T) - V_{AB}(T_0)$$



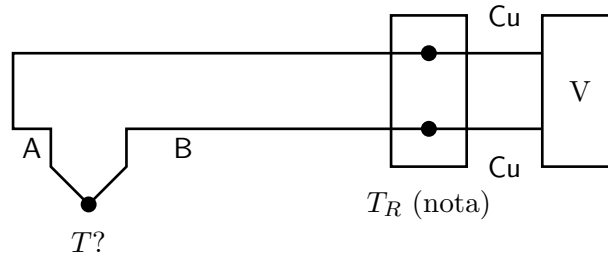
Misura con  $T_R \neq T_0$  ma nota.  
Si usa un termometro ausiliario per misurare  $T_R$ , che varia in un intervallo limitato (ad esempio  $T_R$  può essere la temperatura ambiente).

## Giunzioni allo strumento



È necessario che  $T_j$  sia la stessa per entrambe le giunzioni con i fili di rame.

Alternativamente si può usare come riferimento la temperatura delle giunzioni con i fili di rame:



Ci sono vari modi di ragionare:

- Prima tutte le giunzioni si trovano a  $T_R$  (quindi  $V_{\text{mis}} = 0$ ), poi la giunzione A-B si porta a T (provocando una  $V_{\text{mis}} \neq 0$ );
- Schema classico con  $T_j = T_R$  e poi cambio della posizione nel circuito in cui viene inserito il tratto in Cu.

Termometri elettronici con:

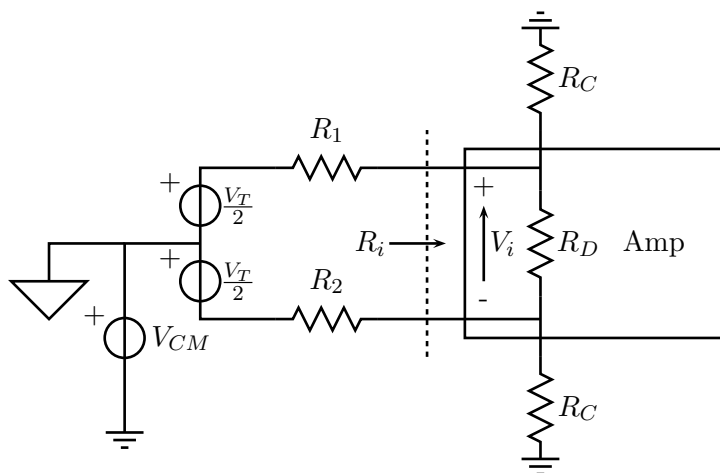
- ingresso con  $T_R$  misurata
- tabella con  $V_R$  in funzione di  $T_R$
- conversione AD della tensione e correzione

I tempi di risposta delle termocoppie a variazioni a gradino della temperatura dipendono dal modo in cui le termocoppie sono costruite, con o senza isolamento elettrico. Possono variare tra qualche millisecondo e qualche secondo.

## Termocoppie a distanza dall'elettronica

Si verificano i problemi usuali dei sensori collegati a distanza dall'elettronica: differenza tra i potenziali di massa, accoppiamento di disturbi, ecc. . . Inoltre ci sono problemi tipici delle termocoppie.

- Sono necessari fili di estensione composti dagli stessi materiali della termocoppia per arrivare nella zona a  $T_R$ ;
- Per il collegamento si possono usare anche fili di altri materiali, detti compatibili con la termocoppia, cioè che si comportano come i fili della termocoppia in un campo di temperature limitato, ma sufficiente a includere le temperature a cui sono esposti i fili di collegamento;
- I due fili di collegamento sono di metalli diversi, quindi hanno diversa resistenza;
- I fili sono in generale sottili, quindi hanno alta resistenza. Perciò vanno considerate resistenze elevate, anche di qualche centinaio di ohm.



consideriamo  $R_C \gg R_D$  e  $R_1 \neq R_2$  (dell'ordine dei 100  $\Omega$ )

a) Resistenza differenziale di ingresso  $R_D$  necessaria

La resistenza di ingresso vale  $R_i \simeq R_D / 2R_C \simeq R_D$ . Sappiamo che  $V_T \simeq K_T(T - T_R)$ . Se ammetto un errore massimo in temperatura  $\Delta T_{max}$ , l'errore massimo in tensione è  $\Delta V_{max} = K_T \Delta T_{max}$

$$\Delta V = V_T - V_i = V_T \frac{R_1 + R_2}{R_D + R_1 + R_2} \simeq V_T \frac{R_1 + R_2}{R_D}$$

Detta  $V_T$  la tensione corrispondente alla temperatura  $T$  si ha

$$\frac{\Delta V}{V_T} \simeq \frac{\Delta T}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_D}$$

ci serve quindi

$$\frac{R_1 + R_2}{R_D} \leq \frac{\Delta T_{max}}{T}$$

$$R_D \geq \frac{T}{\Delta T_{max}} (R_1 + R_2)$$

Quindi, se  $R_1 + R_2 \leq 1 \text{ k}\Omega$  e  $\frac{T}{\Delta T_{max}} \leq 10^3$ , è sufficiente avere  $R_D > 1 \text{ M}\Omega$  per poterne trascurare l'effetto sulla misura.

b) CMRR minimo necessario

Occorre che:

$$\frac{V_{CM}}{CMRR} \leq \Delta V_{max}$$

quindi serve:

$$CMRR \geq \frac{V_{CM}}{\Delta V_{max}}$$

Volendo

$$\Delta T_{max} = 0,1 \div 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e noto

$$K_T = 5 \div 100 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

sapendo che

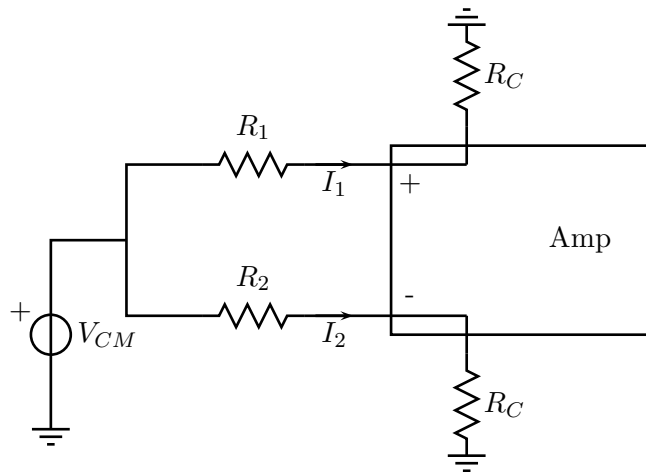
$$\Delta V_{max} = K_T \Delta T_{max}$$

si ha

$$\Delta V_{max} = 0,5 \div 100 \text{ } \mu\text{V}$$

Tipicamente  $V_{CM} = 10 \text{ V}$ , quindi risulta  $CMRR_{\min} = 2 \cdot 10^7 \div 10^5$  che corrispondono a  $143 \div 100 \text{ dB}$

c) Resistenze tra ingresso e massa  $R_C$  necessarie



$R_1 - R_2$  è dell'ordine delle centinaia di ohm.

$I_1 \simeq I_2 = I = \frac{V_{CM}}{R_C}$ , ma  $R_1 \neq R_2$ .

Quindi si ha un segnale differenziale  $\Delta V_{iCM} = V_+ - V_-$  indotto da  $V_{CM}$ :

$$V_+ = V_{CM} - I_1 R_1 \quad V_- = V_{CM} - I_2 R_2$$

perciò

$$\Delta V_{iCM} = I(R_1 - R_2) = \frac{V_{CM}}{R_C}(R_1 - R_2)$$

Ponendo

$$R_1 = R_S \quad R_2 = R_S + \Delta R_S$$

si trova

$$CMRR = \frac{V_{CM}}{\Delta V_{iCM}} = \frac{R_C}{R_1 - R_2} = \frac{R_C}{\Delta R_S} = \frac{R_C}{R_S} \frac{R_S}{\Delta R_S}$$

ovvero:

$$\Delta V_{iCM} = V_{CM} \frac{R_1 - R_2}{R_C} \leq \Delta V_{\max}$$

$$R_C > \frac{V_{CM}}{\Delta V_{\max}}(R_1 - R_2) = \frac{V_{CM}}{\Delta V_{\max}} \Delta R_S$$

Tipicamente si ha

$$V_{CM} = 10 \text{ V} \quad \Delta V_{\max} = 1 \div 100 \text{ } \mu\text{V} \quad \Delta R_S = \text{qualche centinaio di ohm}$$

si trova quindi

$$R_{C_{\min}} = 10 \text{ M}\Omega \div \text{qualche migliaio di megaohm}$$

## Rumore nelle misure con termocoppie

- Rumore del sensore + rumore del preamplificatore
  - Sensore: resistenza  $R_s$  ha rumore termico (Johnson)  $S_T = 4kTR_s$ . Per esempio, se  $T = 300$  K:
 
$$R_s = 1 \text{ k}\Omega \rightarrow \sqrt{S_T} = 4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

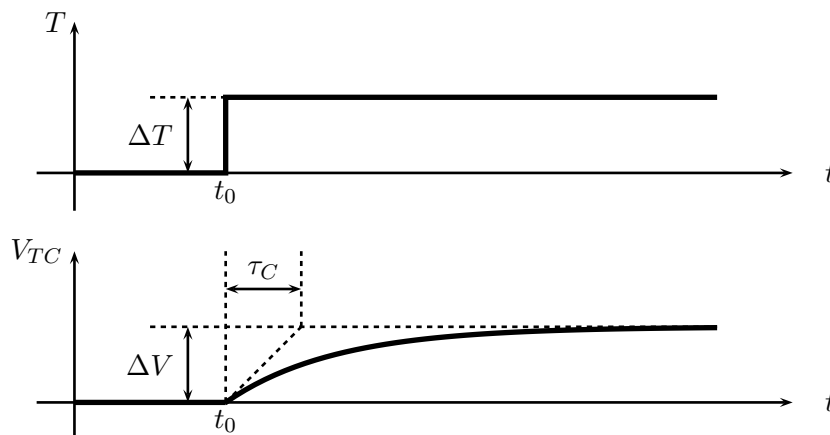
$$R_s = 100 \text{ }\Omega \rightarrow \sqrt{S_T} = 1,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$
  - Preamplificatore: lo vedremo in seguito, attenzione anche alla componente con spettro  $1/f$

## Altre cause di errore nelle misure con termocoppie

- Attenzione alla temperatura di riferimento  $T_R$ : un errore nella sua valutazione si ripercuote sulla misura di  $T$ ;
- Se  $T_R$  è costante gli errori su  $T_R$  si ripercuotono sui valori assoluti di  $T$ , ma non sulla misura di variazioni di  $T$ ;
- Se  $T_R$  non è costante gli errori su  $T_R$  si ripercuotono anche sulla misura delle variazioni di  $T$ .

## Risposta temporale della termocoppia (funzione di trasferimento)

- Il transitorio di risposta della tensione a una variazione brusca della temperatura è dominato dal transitorio termico della termocoppia, cioè da come la temperatura della giunzione varia nel tempo.
- Normalmente è una risposta da integratore approssimato, con valore della costante di tempo  $\tau_C$  lunga rispetto ai tempi dell'elettronica:



$$\Delta V = K_T \Delta T \quad V_{TC}(t) = \Delta V \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_C}} \right)$$

A seconda di come è costruita e montata la termocoppia (tipo di involucro, massa della termocoppia, tipo di contatto termico, ecc...) si hanno diversi valori di  $\tau_C$ , da millisecondi a secondi;

- In termini di funzione di trasferimento, la risposta è di tipo passabasso, per lo più a un polo semplice, cioè del tipo:

$$\frac{V_{TC}}{T} = \frac{K_T}{1 + s\tau_C}$$