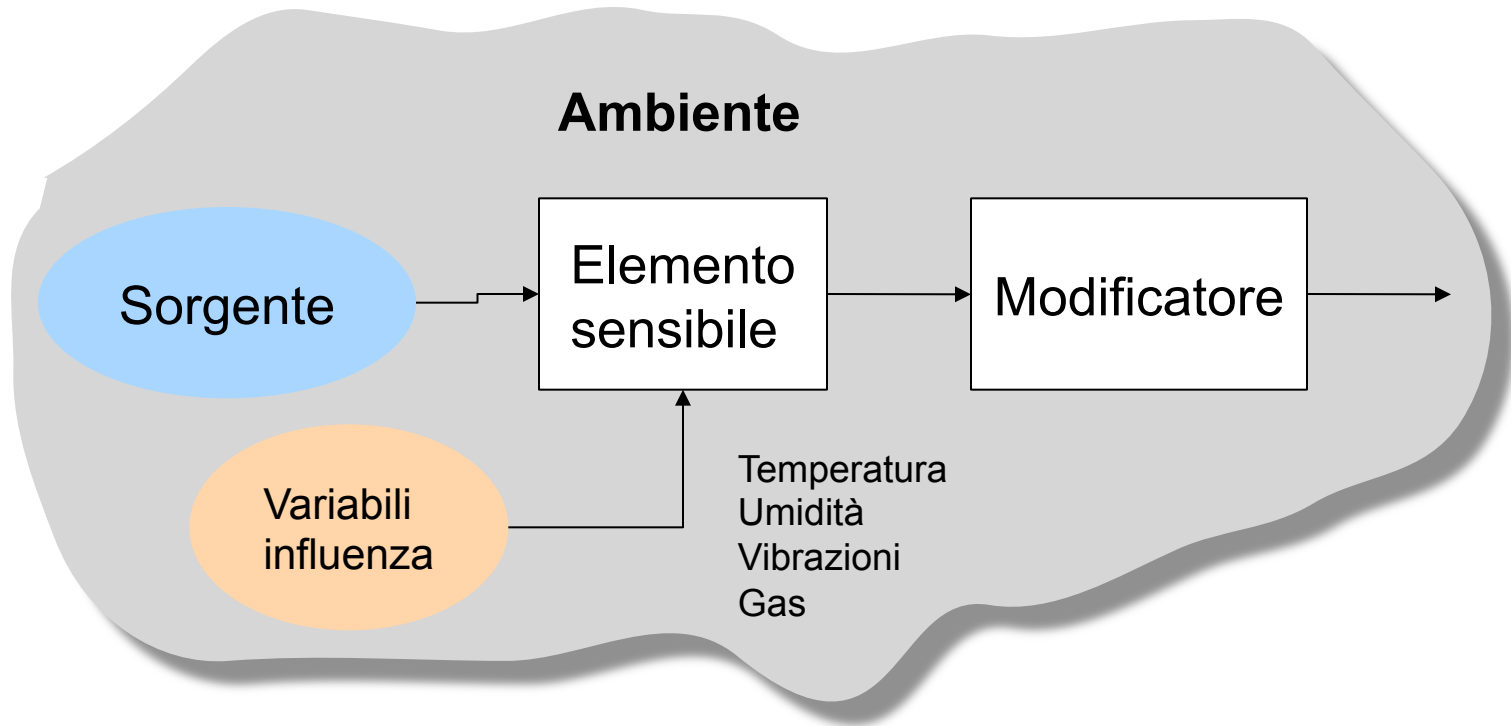


# **Sensori Fisici**

[nicola.carbonaro@centropiaggio.unipi.it](mailto:nicola.carbonaro@centropiaggio.unipi.it)

# Sensori FISICI per misure biomediche

Un sensore è quella parte della catena di misura che converte il misurando in un segnale elettrico.



Tipologie: deformazione, forza, spostamento, accelerazione, velocità, temperatura, flusso termico, flusso di fluidi.....

# Misure di temperatura

- In campo biomedico la temperatura ricopre un ruolo molto importante poiché essa rappresenta un fattore condizionante e spesso perturbante lo stato di salute o di benessere di un soggetto.
  - La sua misura, quindi, viene utilizzata sia per scopi diagnostici che di semplice monitoraggio
  - In generale possiamo affermare che la temperatura è una grandezza fisica, che, a differenza per esempio della lunghezza la cui determinazione è diretta, viene misurata o rilevata attraverso la manifestazione di un suo effetto
    - Esempio: la dilatazione di un solido o di un liquido (classico termometro a mercurio)

# Misure di temperatura

- Le applicazioni cliniche della termometria possono essere classificate in tre tipi:
  - **Temperatura interna del corpo**
    - La misura con sensori a contatto è il più comune e diffuso metodo di rilevazione.
  - **Temperatura superficiale del corpo**
    - Anche in questo caso la conoscenza della temperatura può rappresentare un importante strumento diagnostico. Viene misurata sia con tecniche a contatto diretto che per via radiativa.
  - **Temperatura sanguigna**
    - La temperatura del sangue è abbastanza vicina a quella interna e generalmente è misurata con tecniche di cateterismo intravascolare.

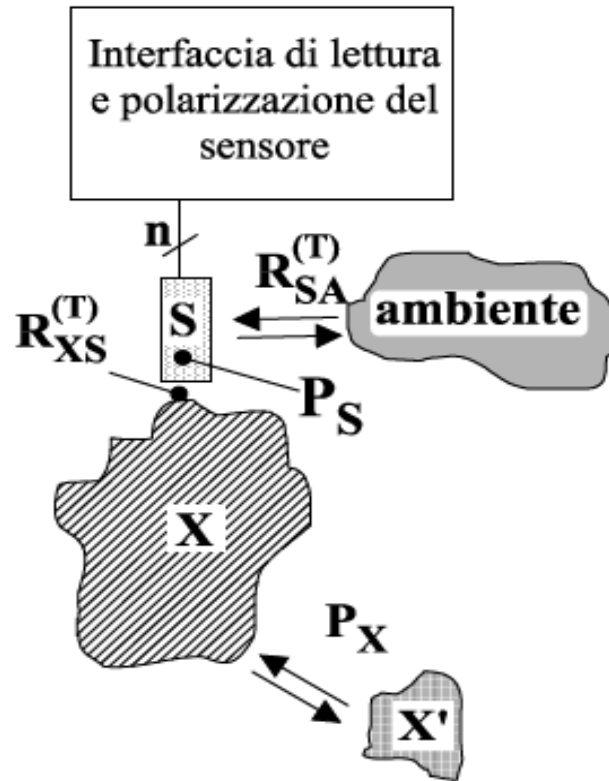
# Misure di temperatura

- **Obiettivo:** misurare la temperatura di un corpo in contatto col sensore
- Tutti i sensori di temperatura, a prescindere dal meccanismo di trasduzione, presentano alcune caratteristiche comuni che influiscono sulle prestazioni del sensore stesso in termini sia di precisione sia di velocità di risposta.
- Queste caratteristiche sono legate al fatto che un sensore di temperatura consta sempre di un elemento sensibile che, per effettuare la misura, deve essere messo in contatto con il corpo (che indicheremo con  $X$ ) di cui si vuole valutare la temperatura (che indicheremo con  $T_x$ ).

# Misure di temperatura

## ▪ Caratteristiche **ideali**

- Il sensore raggiunge immediatamente la stessa temperatura del corpo in misura
- La temperatura del corpo non viene modificata dal contatto con il sensore



**Obiettivo**

$$T_s \approx T_x$$

**Errore misura**

$$e = (T_s - T_x)$$

- Con X' si rappresenta il possibile scambio di calore del corpo X, in genere non isolato, con sistemi fisici in grado di produrre o assorbire calore

# Misure di temperatura

## ■ Caratteristiche **reali**

- Il sensore ha una capacità termica  $C_s$  non nulla. Questo comporta che il sensore, per raggiungere l'equilibrio termico con X deve **assorbire** o **cedere** calore ad X, tendendo a modificare la temperatura  $T_x$
- La resistenza termica tra sensore e corpo ( $R_{XS}^T$ ) non è zero: questo implica che l'equilibrio termico tra il sensore e X necessita di un tempo non nullo per instaurarsi.
- La resistenza termica tra il sensore e l'ambiente ( $R_{XA}^T$ ) non è infinita; ciò ha come conseguenza che attraverso il sensore passa calore dall'ambiente al corpo X, e questo ne modifica ancora la temperatura. Inoltre questo flusso di calore passa attraverso la ( $R_{XS}^T$ ) causando un salto di temperatura tra il sensore ed X, introducendo quindi un errore nella misura
- Il funzionamento del sensore stesso può implicare uno sviluppo di calore che si riverserà in X producendo una differenza di temperatura tra il sensore e il corpo stesso. Essendo generalmente:  $R_{XS}^T \ll R_{SA}^T$

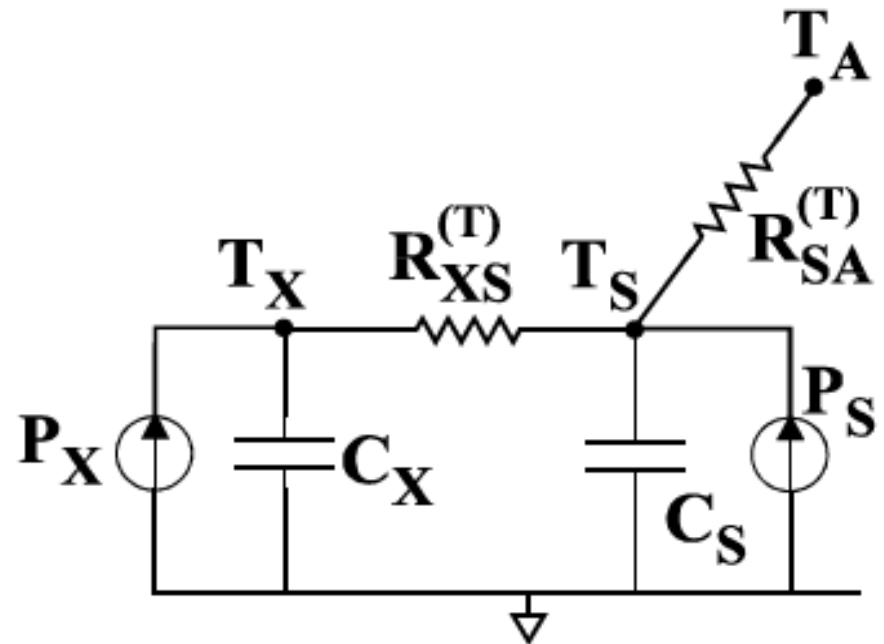
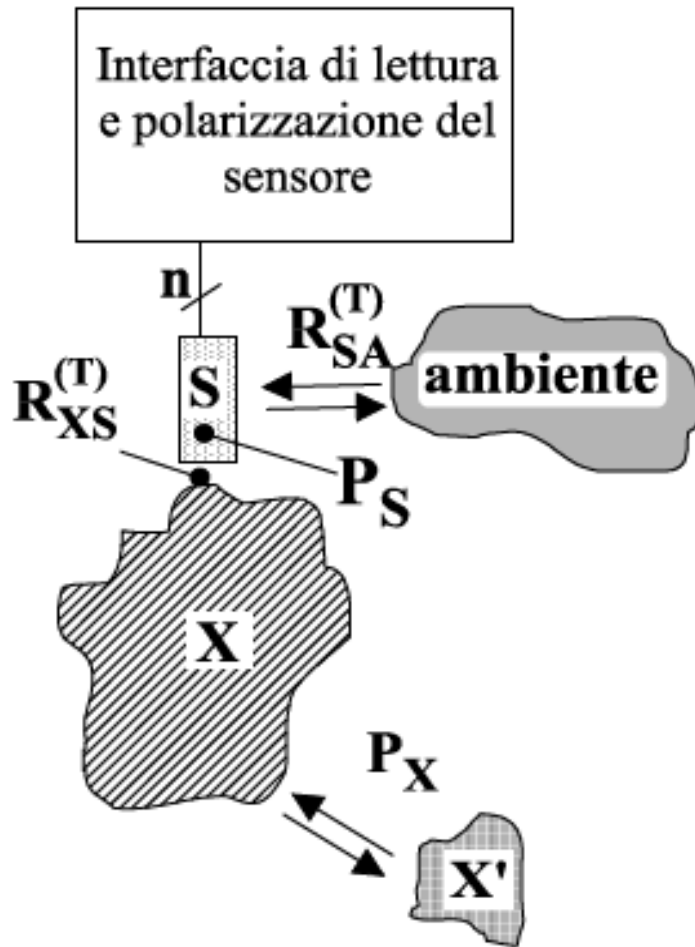
# Analogia elettro-termica

- Il flusso di calore  $P$  (Watt) può essere rappresentato da un generatore di corrente elettrica
- Le temperature  $T$  nei vari punti hanno un equivalente nella tensione elettrica (Celsius °C o Kelvin K)
- La resistenza termica  $R^T$  (°C/W) è equivalente alla resistenza elettrica
- La capacità  $C^T$  termica può essere rappresentata da una capacità elettrica (nel modello si usa la sua reattanza espressa anch'essa in °C/W)
- Si può quindi ricavare un'equazione formalmente uguale alla legge di Ohm

$$\begin{array}{ccc} \Delta T = R^T P & & \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \Delta V = R I & & \end{array}$$

# Misure di temperatura

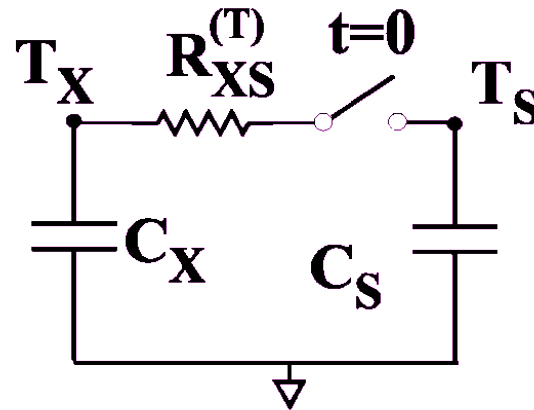
Equivalente elettrico del sistema di misura e delle sue grandezze di influenza



# Misure di temperatura

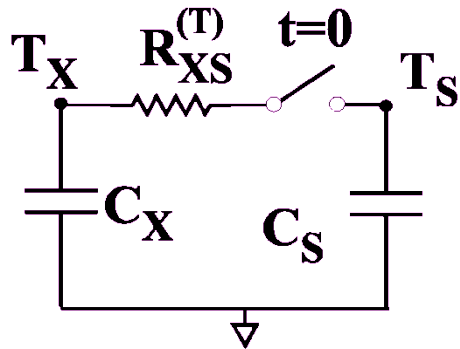
Per comprendere il ruolo dei vari elementi dello schema circuitale precedente, si fa riferimento ad alcuni schemi semplificati.

**Caso 1:** Mettiamo in evidenza il ruolo delle capacità termiche, consideriamo isolati sia il sensore che il corpo  $X$ , giungendo allo schema di figura (a).



# Misure di temperatura

La chiusura del tasto T simboleggia l'istante in cui X e S vengono messi a contatto per effettuare la misura. La risoluzione del circuito dà come risultato, per la temperatura  $T_s$ :



$$T_s = T_s(0) + (T_f - T_s(0))(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$T_s = T_f + (T_s(0) - T_f)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_f = \frac{C_S T_s(0) + C_X T_X(0)}{C_X + C_S}$$

$$\tau = R_{XS}^T C_{serie}$$

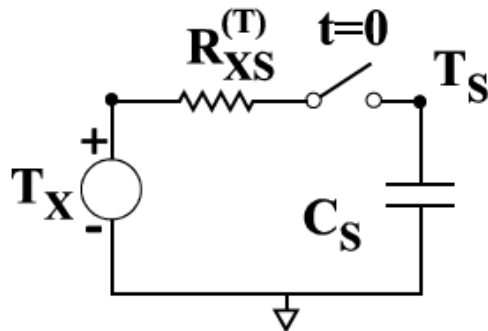
$$C_{serie} = \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_X} \right)^{-1}$$

# Misure di temperatura

- Risposta esponenziale (sistema primo ordine)
- Equilibrio:  $T_x$  e  $T_s$  sono uguali e pari al valore  $T_f$ , ma sono diversi dalla quantità che volevamo misurare  $T_x(0)$
- Errore:  $T_f - T_x(0)$ 
  - diminuisce al diminuire di  $C_s$
  - Se il sensore ha capacità termica trascurabile rispetto al corpo  $T_f$  approssima  $T_x(0)$
  - Per basse capacità termiche del sensore diminuisce il tempo di risposta.
- Per ottenere una bassa capacità termica del sensore
  - Miniaturizzazione del sensore

# Misure di temperatura

**Caso 2:** Tx imposta da meccanismi esterni, non perturbabile dal sensore. Sensore isolato che non produce calore



$$T_s = T_f + (T_s(0) - T_f) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_f = T_X(0)$$

$$\tau = R_{XS}^T C_S$$

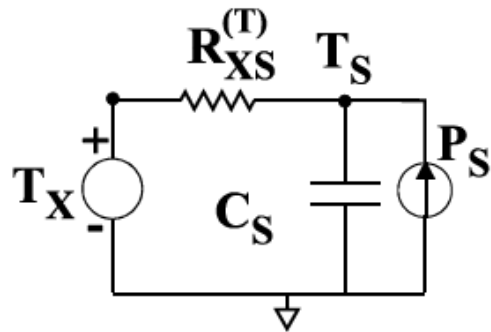
Errore a regime nullo  
Velocità risposta  
determinata da  $C_S$

Comportamento d a  
filtro passa basso  
rispetto alle variazioni  
di  $T_X$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{XS}^T C_S}$$

# Misure di temperatura

**Caso 3:**  $T_x$  imposta da meccanismi esterni. Il sensore produce calore (auto-riscaldamento)



$$T_s = T_f + (T_s(0) - T_f) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_f = T_x(0) + R_{XS}^T P_s$$

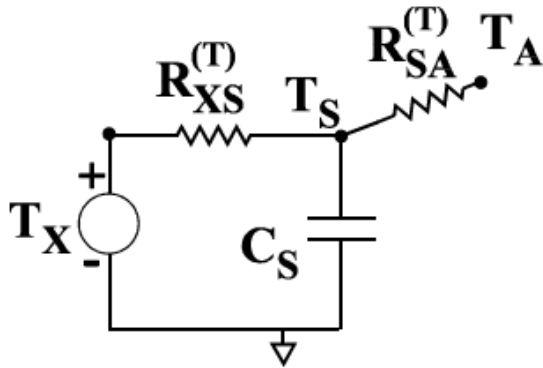
$$\tau = R_{XS}^T C_S$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{XS}^T C_S}$$

Errore a regime non nullo  
Minimizzazione resistenza termica

# Misure di temperatura

**Caso 4:**  $T_x$  imposta da meccanismi esterni. Il sensore non produce calore ma non è isolato dall'ambiente (cause: segnale prelevato attraverso conduttori elettrici che sono ottimi conduttori di calore)



$$T_f = T_x + (T_A - T_x) \left( 1 + \frac{R_{SA}^T}{R_{XS}^T} \right)^{-1}$$

Errore a regime non nullo

Minimizzazione resistenza termica tra sensore e corpo,  
massimizzazione resistenza termica tra sensore ed ambiente

# Misure di temperatura

I casi esposti hanno permesso di evidenziare che sarebbe opportuno avere piccoli valori di  $C_s$ ,  $R_{XS}^T$  e alti valori di  $R_{XA}^T$ .

- $C_s$  si opera miniaturizzando il sensore, quindi scelta opportuna del sensore
- $R_{XS}^T$  dipende dal contatto termico tra sensore e corpo
  - Sia X un un gas, un liquido o un solido, si tende a massimizzare l'area di contatto
- $R_{XA}^T$  ridurre il più possibile il diametro ed aumentare la lunghezza dei fili di collegamento tra sensore e circuiteria. Ulteriore vantaggio nella scelta dei conduttori presenti nei fili → materiali a minor conducibilità termica

# Sensori resistivi

- Sensore resistivo: La resistenza elettrica varia in funzione del misurando
- Il misurando (temperatura, deformazione) può far variare conduttore le seguenti grandezze:
  - Proprietà fisiche
  - Dimensioni geometriche
- Esempi: termo-resistenze, estensimetri (strain gauges)

# Trasduttori termoresistivi

- I trasduttori termoresistivi sfruttano la proprietà di alcuni metalli e semiconduttori di cambiare la loro resistenza con la temperatura. Tale dipendenza è descritta da opportune equazioni che introducono un coefficiente termico della resistenza caratteristico del tipo di metallo o semiconduttore utilizzato

$$TCR(T_0) = \frac{1}{R(T_0)} \frac{dR}{dT}(T_0)$$

- Materiali: metalli, miscele di ossidi metallici compressi (sinterizzati), cristalli di semiconduttori drogati
- Il TCR dipende dalla temperatura, dalle caratteristiche del materiale utilizzato e non dalla geometria del resistore

$$R(T) = R(T_0) \left( 1 + \alpha(T - T_0) + \alpha_1(T - T_0)^2 + \dots \right)$$

$$R(T) \approx R(T_0) (1 + \alpha(T - T_0)) = R(T_0) (1 + TCR(T - T_0))$$

# Proprietà fisiche materiali termoresistivi

- I principali vantaggi di questi tipi di trasduttori risiedono nella loro semplicità, buona sensibilità, alta ripetibilità ed accuratezza (soprattutto per il platino) e basso costo (rame e nickel)
- Il platino offre le prestazioni migliori, ma è il più costoso;
- il più economico è il rame, ma presenta gli inconvenienti di avere bassa resistività, facile corrodibilità ed un certo livello di tossicità.

Materiale	Resistività ( $\mu\Omega$ cm)	Coeff. termico x 100 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	Errore di linearità (%)	Campo d'uso ( $^{\circ}\text{C}$ )
Rame	1,7	0,4	0	-200 +260
Platino	10,8	0,38	0,12	-260 +850
Nichel	7	0,6	1,6	-80 +300
Nichel-Ferro	20	0,5	1,2	-200 +230
Silicio (drogato)	$1,4 \cdot 10^6$	0,7	-	-
Termistori	$10^9$	-4	-	-25 +200

# Trasduttori termoresistivi

I sensori resistivi di temperatura più comuni sono:

- Sensori a filo o film metallico
  - RTD: resistive temperature detectors
  - Costituiti da un filo o film metallico la cui resistenza ha variazioni lineari con la temperatura
- Termistori
  - Termistor  $\rightarrow$  *temperature e resistor*
    - trasduttore elettrico che sfrutta le proprietà dei semiconduttori

# Sensori di temperatura resistivi RTD

- Si tratta di un trasduttore elettrico che sfrutta la proprietà dei metalli di variare la conducibilità elettrica con la temperatura.
- I termoresistori o RTD (Resistance Temperature Detectors) usano in genere come materiale il platino, proprio per le sue caratteristiche di lunga durata, stabilità e riproducibilità.
- In generale la resistenza di un metallo è una funzione complessa della temperatura anche se per la maggior parte di essi lo sviluppo in serie di potenze produce buoni risultati.
- Nel caso del platino l'equazione utilizzata è quella di Callendar-van Dusen

$$R = R_o \left[ 1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3 \right]$$

- con A, B e C costanti e dipendenti dalle proprietà del metallo utilizzato per realizzare il sensore

# Sensori di temperatura resistivi RTD

- Ogni metallo ha una resistività specifica  $\rho$  che varia con la temperatura

$$\rho(T) = \rho_0 \left( 1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 \right)$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono determinate sperimentalmente

$\rho_0$  è la resistività misurata alla temperatura di riferimento  $T_0$   
(solitamente  $T_0 = 0$  °C)

- Per piccole variazioni di temperatura,  $\beta$  e  $\gamma$  sono trascurabili
- La resistenza di un filo metallico risulta:

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{A}$$

$L$  = lunghezza del filo metallico

$A$  = area della sezione

- Esempio (platino, Pt100):

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$\text{Sensitività: } \frac{\Delta R}{\Delta T} = \rho_0 \alpha \frac{L}{A} = 0.392 \Omega / ^\circ C$$

# Sensori di temperatura resistivi RTD

Il TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) di una termoresistenza RTD indica la variazione media per grado centigrado del valore della resistenza fra gli 0 °C e i 100 °C. Può essere espresso con la formula:

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100}$$

Il TCR viene indicato con  $\alpha$  perché coincide col coefficiente  $\alpha$  dell'equazione lineare che esprime R in funzione della temperatura negli RTD. Un maggiore valore di TCR indica una maggiore sensibilità dovuta ad una più grande purezza del platino usato.

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$TCR = \alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} (T_0)$$

# Trasduttori termoresistivi

- Sensori a filo o film metallico

- RTD: resistive temperature detectors

- Costituiti da un filo o film metallico la cui resistenza ha variazioni lineari con la temperatura

- Platino:  $TCR = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

- Elevata stabilità chimica, stabilità temporale della risposta

- Costi relativamente alti

- Altri materiali: nickel, ferro-nickel

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$TCR = \alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} (T_0)$$

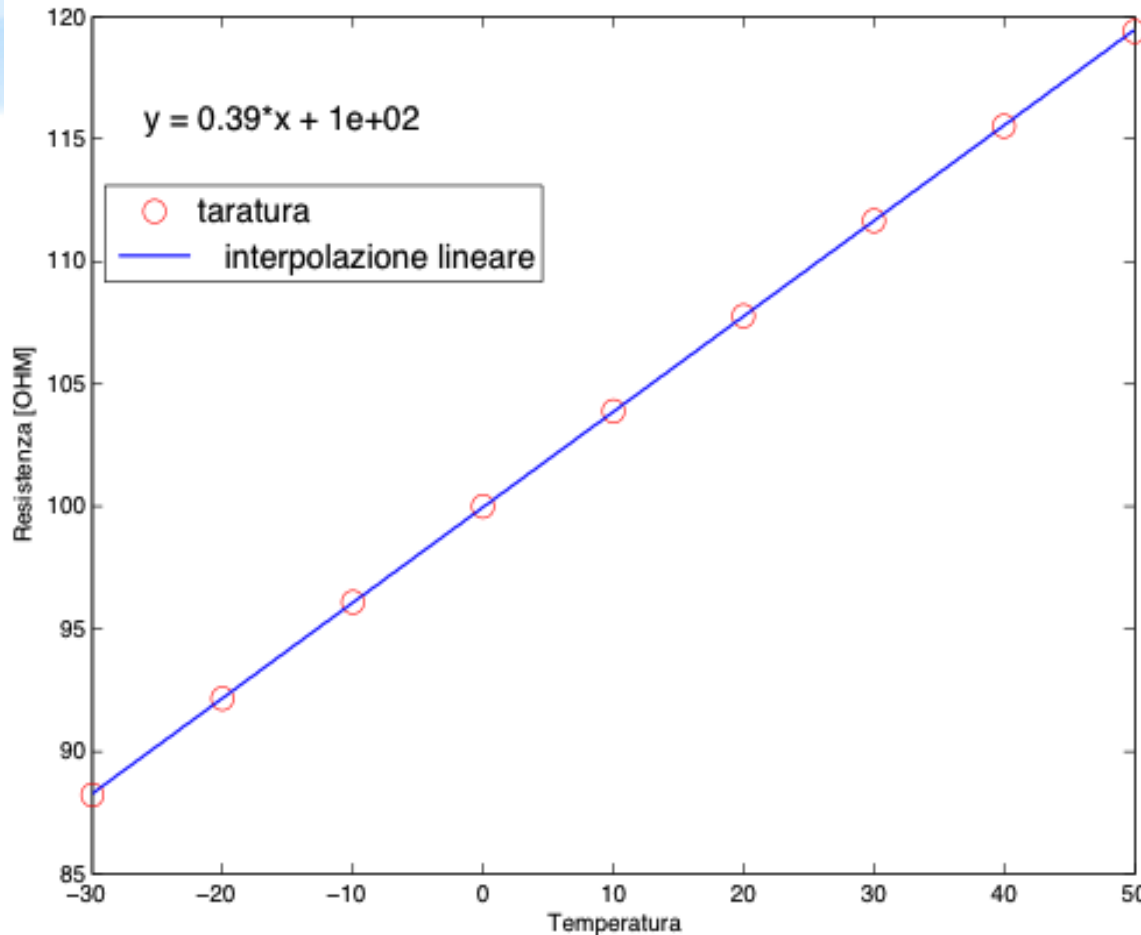
T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)
-200	18.56	-30	88.22	60	123.24	350	229.72
-150	39.73	-20	92.16	70	127.07	400	247.11
-100	60.27	-10	96.09	80	130.89	450	264.20
-90	64.31	0	100.00	90	134.70	500	281.01
-80	68.33	10	103.90	100	138.50	550	297.53
-70	72.34	20	107.79	150	157.32	600	313.77
-60	76.33	30	111.67	200	175.85	650	329.7
-50	80.31	40	115.54	250	194.09	700	345.5
-40	84.28	50	119.40	300	212.05	750	360.8

Se occorrono precisioni maggiori  
 Passo ad approssimazioni  
 di ordine superiore

$$R = R_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \dots + \alpha_n \Delta T^n)$$

PT100

# Sensori termoresistivi RTD



## Funzione di conversione Indiretta (gradi->ohm)

$$y = sx + R(0)$$

$S = 0.39 \text{ Ohm/C}$  **Sensibilità**

$R(0) = 100 \text{ Ohm}$  **offset**  
(uscita con misurando nullo)

## Funzione di taratura (ohm-> gradi)

$$X = yc + R(0) \cdot c$$

$c = 1/s = 2.56 \text{ C/Ohm}$   
**Costante di taratura**

$$\text{Calcolo } TCR(0^\circ C) = \frac{1}{R(0)} \frac{dR}{dT}(0) = \frac{S}{R(0)} = \frac{0.39}{100} = 39 \cdot 10^{-3} = 39 \cdot 10^{-3}$$

**Precisione:** Tolleranza sul valore della resistenza a  $0^\circ\text{C}$   $\pm 0.1 \text{ Ohm}$ , ottengo una precisione di  $\pm 0.26\text{C}$

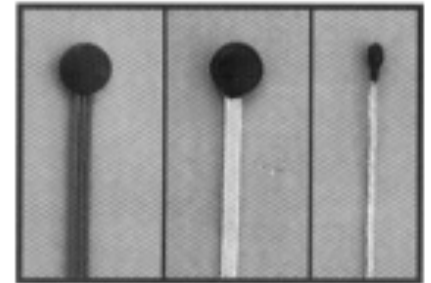
# Trasduttori termoresistivi

## ▪ Termistori

- Si tratta di un trasduttore elettrico che sfrutta le proprietà dei semiconduttori di variare la conducibilità elettrica con la temperatura.
  - Resistori ad ossidi metallici la cui resistenza varia fortemente con la temperatura
- I termistori (Thermal Resistor) possono avere coefficienti di temperatura (TCR) negativi (termistori NTC ) o positivi (termistori PTC )
- Possono essere divisi in due grandi categorie:
  - NTC
    - TCR negativo
    - Sono i più usati
    - Fortemente non lineari
  - PTC
    - TCR positivo

# Termistori NTC e PTC

- Resistenza elevata: da 1 k $\Omega$  a 100 k $\Omega$ 
  - Non ci sono grossi problemi di resistenze parassite dei cavi
- R(T) altamente non lineare
  - Solitamente NTC (ossidi metallici), ma anche di tipo PTC (miscela di titanato di stronzio e bario)
- Piccole dimensioni (ordine del mm)
  - Tempi di risposta molto brevi
- Costano meno delle termoresistenze
- Sensitività e risoluzione molto elevate
  - Fino a 1000 volte più sensitive delle RTD
- Accuratezza fino a 0.1 °C



# Termistori NTC e PTC

- Range di temperatura di un singolo componente abbastanza piccolo  
  
(es: 0÷100 °C)
  - I termistori misurano un range di temperature compreso di solito fra -50 °C e 250 °C  
(ma si arriva anche a -200÷1000 °C)
- L'autoriscaldamento è più problematico che nelle RTD
- Meno stabili delle RTD

# Termistori NTC e PTC

- In generale la funzione di trasferimento di un termistore NTC può essere approssimata da una funzione esponenziale a quattro parametri piuttosto complessa anche se molto spesso si ricorre ad un'espressione semplificata del tipo:

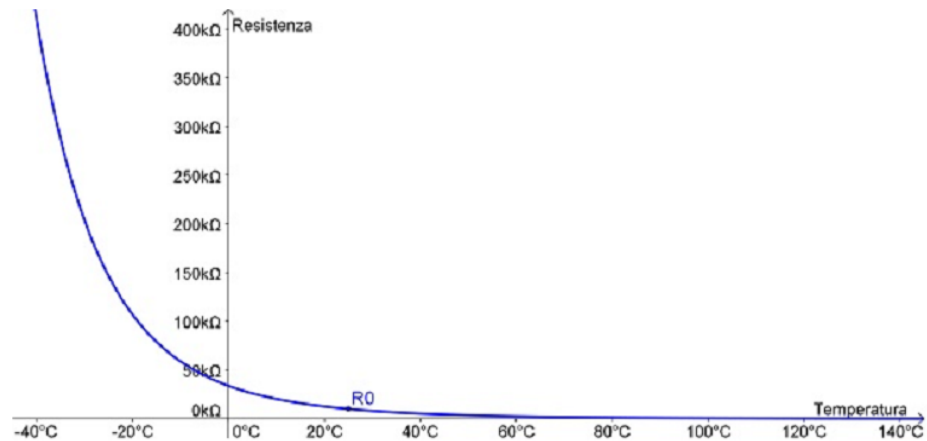
$$R(T) = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

- $R_0$  = resistenza di riferimento misurata alla temperatura  $T_0$

- $T$  = temperatura misurata (K)

- $\beta$  = costante del materiale

- Sensitività  $S(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{R_0 \beta}{T^2} e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$



# Termistori NTC e PTC

Normalmente si è interessati a rilevare solo piccole variazioni  $dT$  di temperatura attraverso la misurazione dell'incremento relativo  $dR$  della resistenza associata al termistore:

a tale scopo, quello che interessa conoscere è il *coefficiente di variazione della resistenza* TCR

Quindi si calcola un  $TCR=\alpha$  valido solo ed esclusivamente nell'intorno del punto di lavoro.

In questo modo si può trattare gli NTC in modo lineare come si faceva per gli RTD

Il modo migliore è sostituire la temperatura  $T$  di lavoro nella formula per il calcolo della resistenza (esponenziale). Si può anche usare una formula più "veloce":

$$\tilde{S}_T^R = \frac{\partial R}{\partial T} \frac{1}{R} = \frac{\partial}{\partial T} \left( R_{T_0} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \right) \frac{1}{R_{T_0} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}} = -\frac{B}{T^2} = \alpha$$

# Termistori

## Legge del termistore

$R(T_0)$  [1 kOhm - 1MOh]

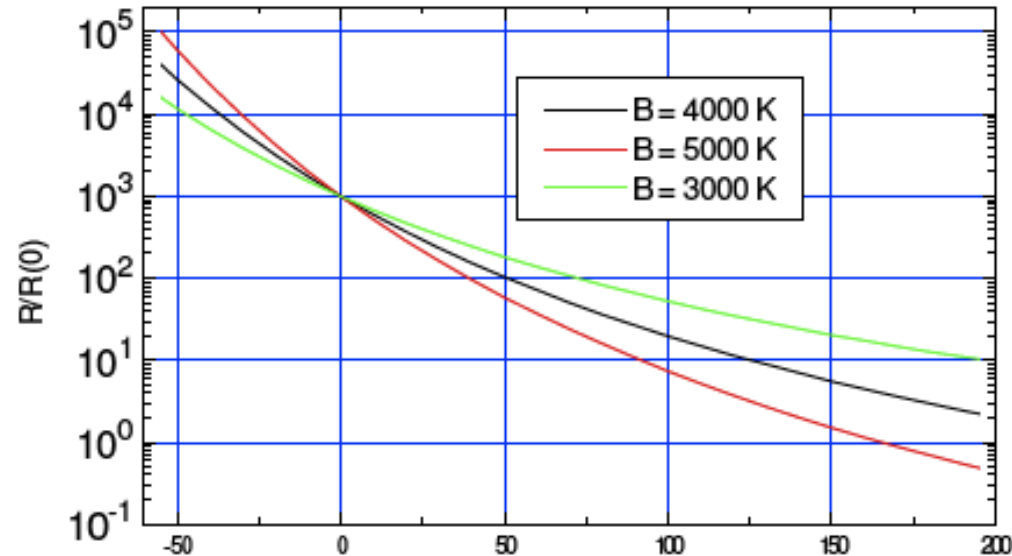
T Espressa in Kelvin

$T_0$  T di riferimento

B T caratteristica [1500-6000 K]

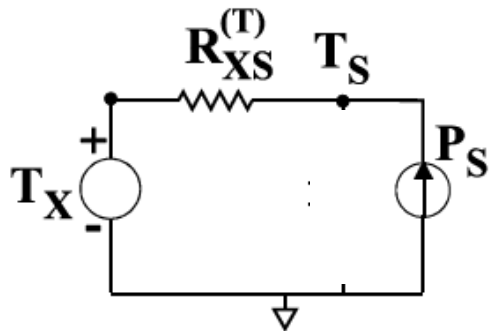
$$R = R(T_0) \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

$$TCR = - \frac{B}{T^2}$$



# Autoriscaldamento e Linearizzazione termistore (1)

- Relazione Resistenza/Temperatura fortemente non lineare
- Parametri
  - Si consideri un termistore  $R(T_0)$ ,  $\beta$ ,  $T_0$
  - Si consideri un corpo a temperatura  $T_x$  con capacità termica infinita
  - Si consideri il sensore alimentato con una certa corrente  $I$
- Necessità di linearizzazione all'intorno del punto di lavoro  $T_x$ 
  - L'approssimazione lineare sarà valida all'intorno di un intorno di  $T_x$
- Necessità di valutare che l'intrinseco errore di auto-riscaldamento non invalidi l'approssimazione



Equivalente termico a **regime**

$$T_s = T_x + R_{XS}^T \cdot P_s = T_x + R_{XS}^T \cdot R(T_s) \cdot I^2$$

Errore di **auto-riscaldamento**

$$\Delta T = T_s - T_x = R_{XS}^T \cdot R(T_s) \cdot I^2$$

# Autoriscaldamento e Linearizzazione termistore (2)

- L'errore di auto-riscaldamento ( $\Delta T$ ) dipende da  $T_s$  in modo non lineare (tramite  $R(T_s)$ )
- Linearizzazione di  $R(T)$  intorno al punto di lavoro (temperatura del corpo  $T_x$ )

$$R(T) = R(T_x) + \frac{dR}{dT}(T_x)(T - T_x)$$

Sviluppo in serie di Taylor  
Fino al primo ordine

$$R(T) = R(T_x) \left( 1 + \frac{1}{R(T_x)} \frac{dR}{dT}(T_x)(T - T_x) \right) = R(T_x) (1 + TCR(T - T_x))$$

$$R(T_x) = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

$R(T_x) * TCR$  sensibilità  
Inverso costante taratura

$$TCR = - \frac{\beta}{T_x^2}$$

# Autoriscaldamento e Linearizzazione termistore (4)

- Determiniamo l'errore di auto-riscaldamento con la relazione linearizzata

$$\Delta T = T_s - T_x = R_{XS}^T P_s = R_{XS}^T \cdot R(T_s) \cdot I^2$$

$$\Delta T = T_s - T_x = R_{XS}^T \cdot R(T_x) (1 + TCR \cdot (T_s - T_x)) I^2$$

$$\Delta T = R_{XS}^T \cdot R(T_x) (1 + TCR \cdot \Delta T) I^2$$

$$\Delta T = \frac{R_{XS}^T \cdot R(T_x) \cdot I^2}{1 - R_{XS}^T \cdot TCR \cdot R(T_x) \cdot I^2}$$

$$T_s = \Delta T + T_x$$

# Autoriscaldamento e Linearizzazione termistore (4)

- L'approssimazione lineare è valida per  $\Delta T$  piccoli ( $T_s$  vicino al punto di lavoro)

## Esempio

–  $T_0=20\text{C}$  (293K),  $R(T_0)=500\text{ Ohm}$ ,  $B = 4000\text{ K}$ ,  $R_{xS}^T=80\text{ K/W}$ ,  $T_x=36.5\text{ C}$  (309.5 K),  $I=7\text{mA}$

– Otteniamo:  $\Delta T=0.916\text{C}$  ovvero  $T_s=T_x+\Delta T=37.416$

- Inverso Funzione di taratura

$$R(T) = R(T_x)(1 + TCR \Delta T)$$

- R termistore (misurata)

$$R(T_s) = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T_x + \Delta T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] = 232.45$$

- Errore di linearizzazione:

$$T_s - T'_s = T_s - \left( \frac{R(T_s)}{R(T_x) TCR} - \frac{1}{TCR} + T_x \right) = 0.02\text{C}$$

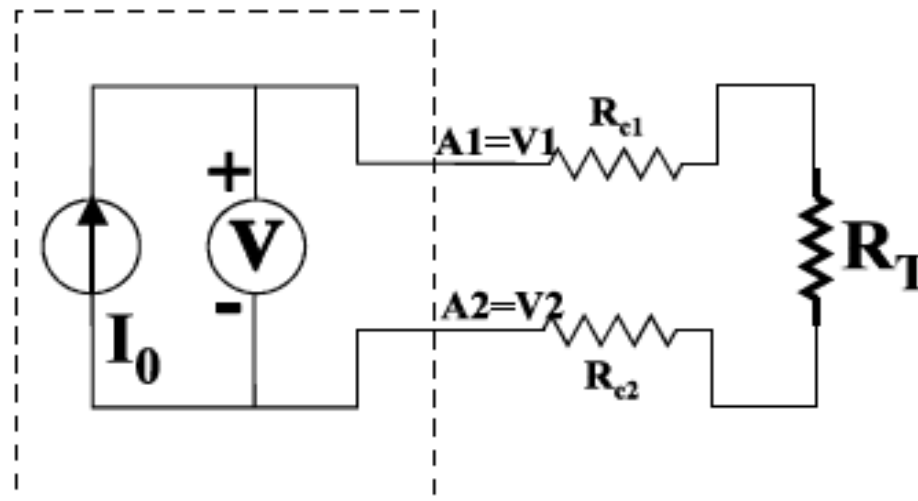
- Se  $\Delta T$  è accettabile per la nostra applicazione (e.g.  $\Delta T < 0.1\text{ C}$ ) il sensore è utilizzabile per misurare la temperatura di interesse

# Circuiti di misura

I problemi relativi all'interfacciamento di un sensore resistivo sono quelli tipici di una misura di resistenza. Lo scopo viene raggiunto polarizzando il sensore con una corrente costante e leggendo la tensione ai suoi capi. In più si vuole portare il segnale acquisito proporzionale alla temperatura nella scala prescelta.

- 2 fili

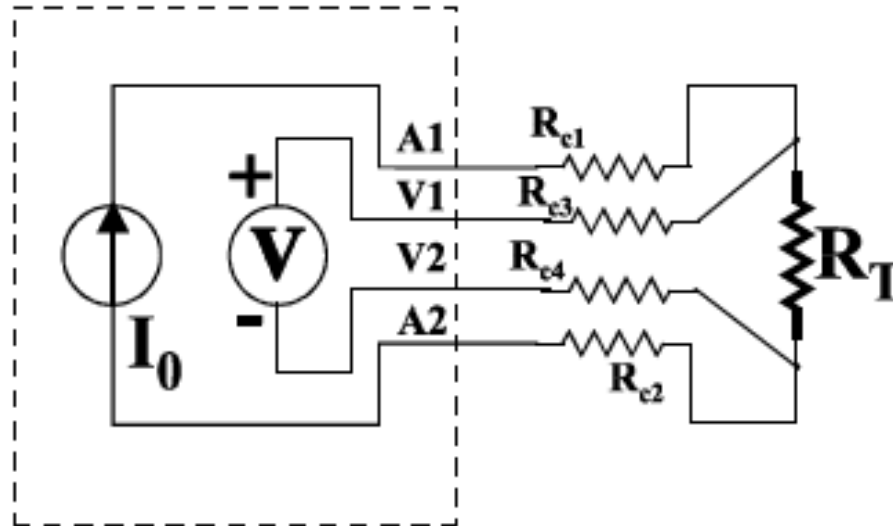
- La misura viene effettuata sugli stessi conduttori che trasportano la corrente di polarizzazione
- Errori dovuti alle  $R_c$  non trascurabili



# Circuiti di misura

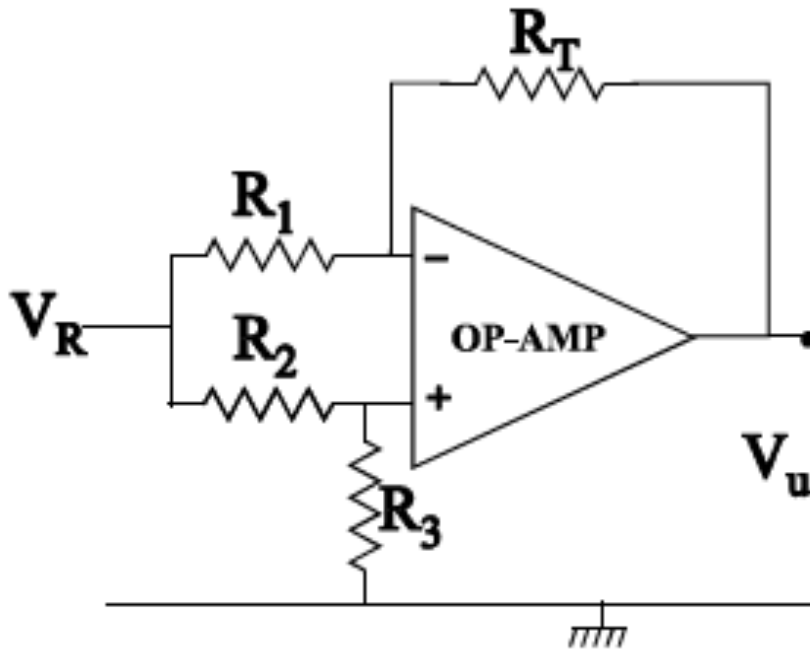
- 4 fili

- La corrente di polarizzazione viene portata attraverso conduttori separati rispetto a quelli di misura
- Risolve il problema precedente



# Circuiti di misura

- Esempio 2 fili



$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_T(T_0)}{R_1} \quad I_0 = \frac{V_R R_2}{R_1(R_2 + R_3)}$$

$$V_u(T) = - \frac{V_r}{R_3 + R_2} \frac{R_2}{R_1} R_T(T_0) \alpha (T - T_0)$$

$$V_u(T) = - I_0 R_T(T_0) \alpha (T - T_0)$$

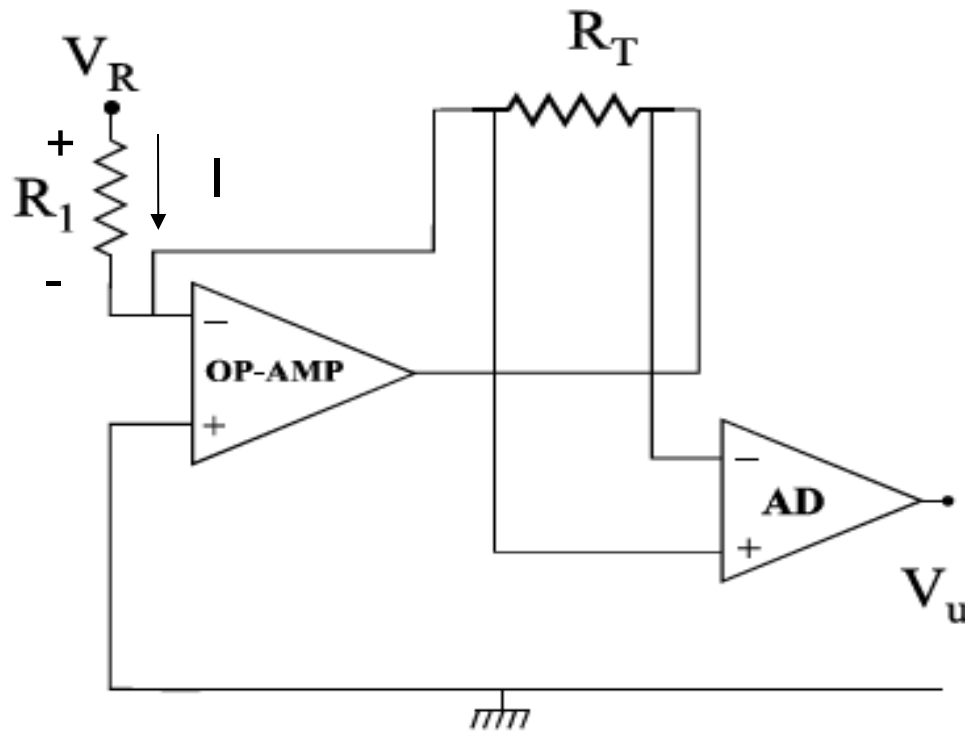
$$V_u(T_0) = 0; \quad \left[ \frac{dV_u}{dT} \right]_{T=T_0} = -\alpha I_0 R(T_0)$$

Compromesso tra  
sensibilità e errore di  
autoriscaldamento

# Circuiti di misura

- Esempio 4 fili

$$I = \frac{V_r}{R_1}$$



$$V_u = \frac{V_r}{R_1} R_T A$$

# Circuiti di misura

Esempio PTC con queste caratteristiche:

$$R(T) = R(T_0) \cdot [(1 + \alpha(T - T_0))]$$

$$R(T_0) = R(0^\circ\text{C}) = 100\Omega$$

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

1) Vogliamo misurare una variazione di 1C:

**Avremo una variazione di resistenza di:**

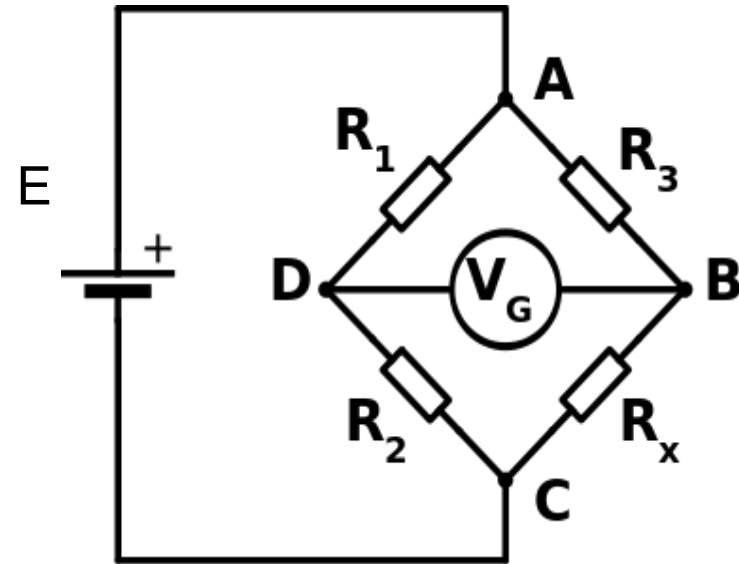
$$3 * 100 * 10^{-3} = 0.3 \text{ Ohm}$$

- Occorre una tecnica di misura molto sensibile

- - Soluzione **Ponte di wheatstone**

$$V_G = \left[ \frac{R_X}{R_X + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot E$$

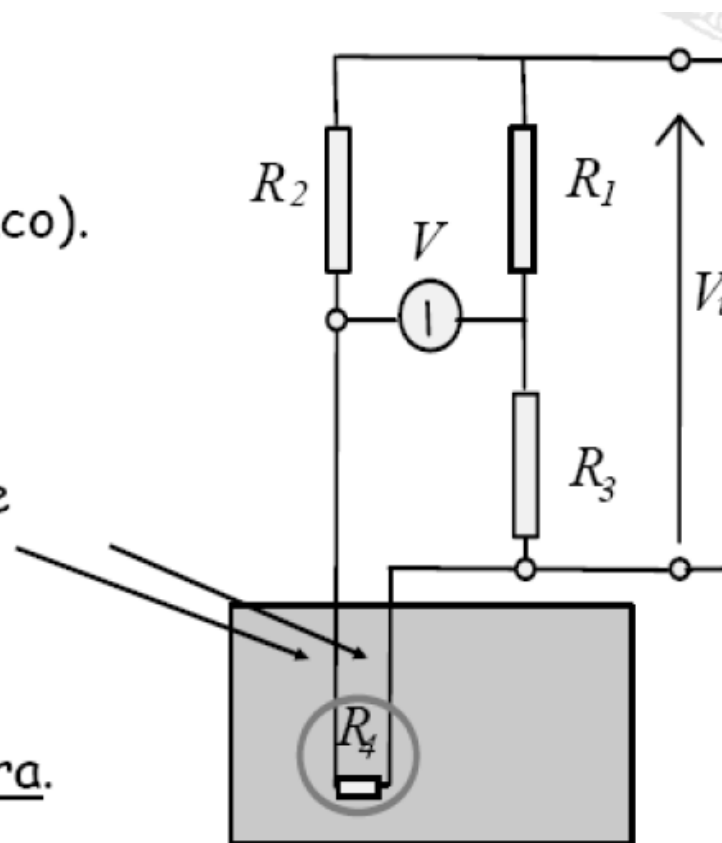
Se  $R_1 = R_2 = R_3 = R_X(0)$



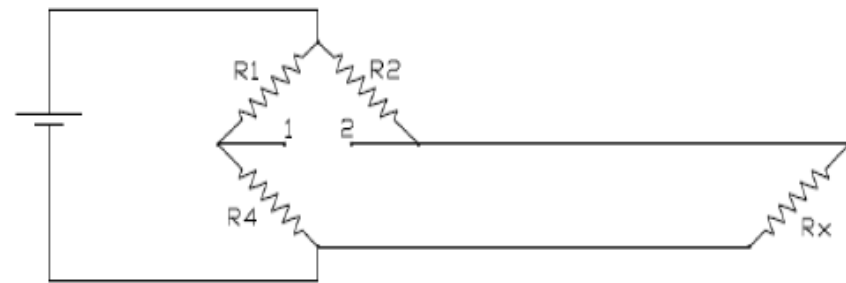
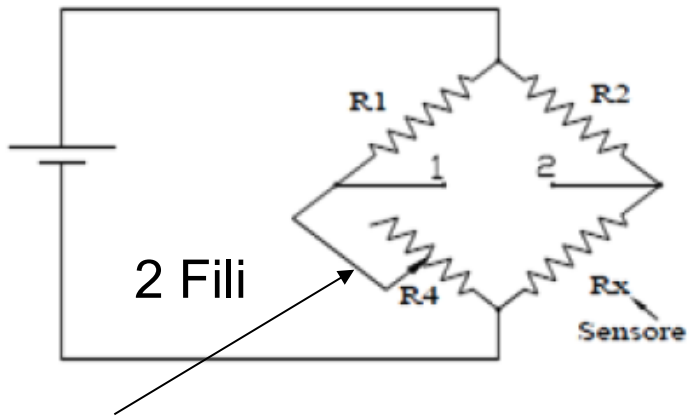
$$V = \frac{E \alpha (T - T_0)}{4}$$

# Circuiti di misura

- Applicazione clinica può richiedere misura temperatura interna (es. catetere intra-cardiaco).
- Errori per ingresso indesiderato:  $\Delta T$  sui cavi di connessione (interni).
- Ponte di Wheatstone compensato in temperatura.



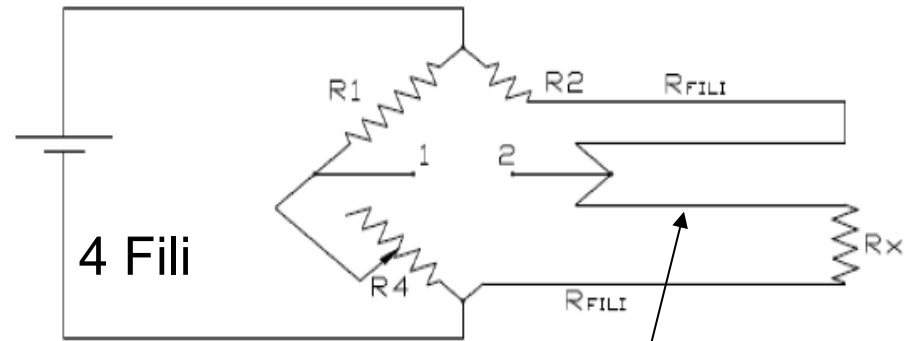
# Ponte di Wheatstone: configurazioni



$$R_X = R_{\text{TRASDUTTORE}} + R_{\text{FILI}}$$

$$R_{\text{FILI}} \ll R_{\text{TRASDUTTORE}}$$

Potenziometro per bilanciare il ponte ovvero rendere l'uscita nulla per  $T=T_0$  ( $R=R_0$ )

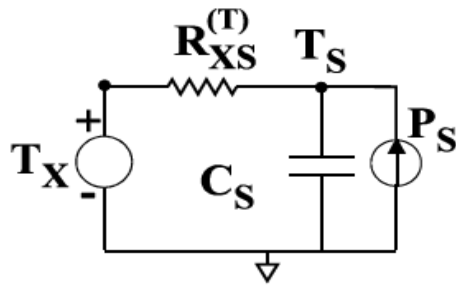


Bilancio il ramo superiore del ponte aggiungendo un percorso uguale a quello delle connessioni del sensore

3 Fili

# Fenomeno dell'auto-riscaldamento

Per effettuare la misura della variazione di Resistenza, legata alla variazione di temperatura che vogliamo misurare, i sensori resistivi devono essere alimentati da una corrente  $I_0$



$$T_f = T_X(0) + R_{XS}^T P_s$$

Per ridurre il fenomeno dell'auto-riscaldamento conviene utilizzare basse correnti. Tuttavia ridurre la corrente significa ridurre la sensibilità del sensore.

Riducendo la corrente le variazioni di temperatura verrebbero a confondersi con quelle indotte dalle derive degli off-set e dal rumore dovuti al circuito di misura.

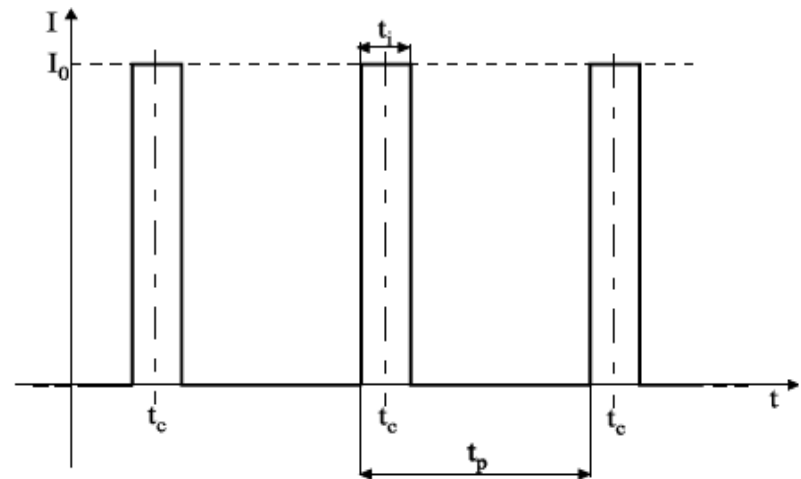
Alternativa: polarizzare il sensore con una corrente grande ma impulsata di frequenza superiore alla frequenza di taglio termica.

# Fenomeno dell'auto-riscaldamento

- Una riduzione della corrente riduce l'auto-riscaldamento, ma riduce anche la sensibilità del sistema
  - Effetto della variazione dovuta alla temperatura paragonabile col rumore

$$T = T_x + P_s R_{XS}^{(T)} \quad \text{con:} \quad P_s = I_0^2 R_T(T) \quad T = T_x + I_0^2 R_T(T) R_{XS}^{(T)}$$

- Alternativa: polarizzazione con corrente impulsata con frequenza maggiore della frequenza di taglio del sistema e campionamento per valori alti della corrente
  - Il sensore non fa in tempo a riscaldarsi



# Applicazioni biomediche

I termistori, in particolare quelli NTC, sono molto utilizzati in applicazioni biomediche.

Esistono in commercio alcuni **termometri orali** "usa e getta" per uso clinico a basso costo che consistono in un sottile film di termistore che entra in contatto con la cavità orale.

Due fili conduttori partono dal film e, ricoperti opportunamente da strati di carta, giungono in un'area di contatto che può essere inserita in un'unità di display durante la misura.

# Applicazioni biomediche

Un'altra apparecchiatura che fa uso di termistori è l'**incubatore**, usato in neonatologia.

In genere i neonati prematuri soffrono di problemi del sistema respiratorio che limitano la quantità di ossigeno che dai polmoni viene trasportata nel sangue. Questo ossigeno è utilizzato nei processi metabolici del neonato, tra cui la generazione di calore per mantenere la temperatura corporea.

Se nell'incubatore viene creato un ambiente artificiale a temperatura superiore a quella ambientale, allora il neonato utilizza una minima quantità di energia per regolare la sua temperatura, mentre l'ossigeno ed i substrati nutrizionali possono essere impiegati per i processi metabolici relativi alla crescita ed allo sviluppo.

Il trasduttore di temperatura utilizzato sul neonato consiste in un termistore che può essere collocato sia in via endocavitaria che in superficie.

Il primo consiste in un filo semirigido alla cui estremità è montato il termistore coperto da un polimero che funge da isolante elettrico, ma con buona conducibilità termica ed in genere viene inserito per via rettale.

La sonda superficiale, invece, consiste in un termistore a forma di disco di diametro approssimativamente di 6 mm. La superficie sensibile è metallica e a diretto contatto con la pelle del neonato, mentre l'altra superficie è coperta da un polimero isolante termicamente per minimizzare perturbazioni esterne.

Il sistema di controllo di un incubatore permette di impostare la temperatura ad un valore prestabilito. Un circuito elettronico determina la temperatura rilevata dal termistore che viene inviata ad un blocco di controllo e attraverso un'operazione di confronto rispetto alla temperatura desiderata viene pilotato l'elemento riscaldante, che può essere una sorgente radiante o convettiva. Accurati circuiti di protezione sono inclusi nel sistema per prevenire sia i problemi di surriscaldamento che di sottoriscaldamento.