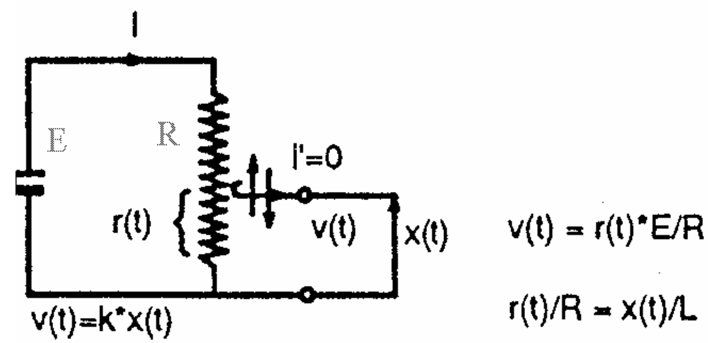
Sensori Resistivi

- La variazione della grandezza in ingresso è legata alla variazione della resistenza esibita dal sensore ai suoi capi.
- Molto comuni, perché sono numerose le grandezze fisiche in grado di alterare la resistenza elettrica di un materiale. Sensori per la misura di temperature si usano anche per compensare facilmente sistemi che misurano altre grandezze.

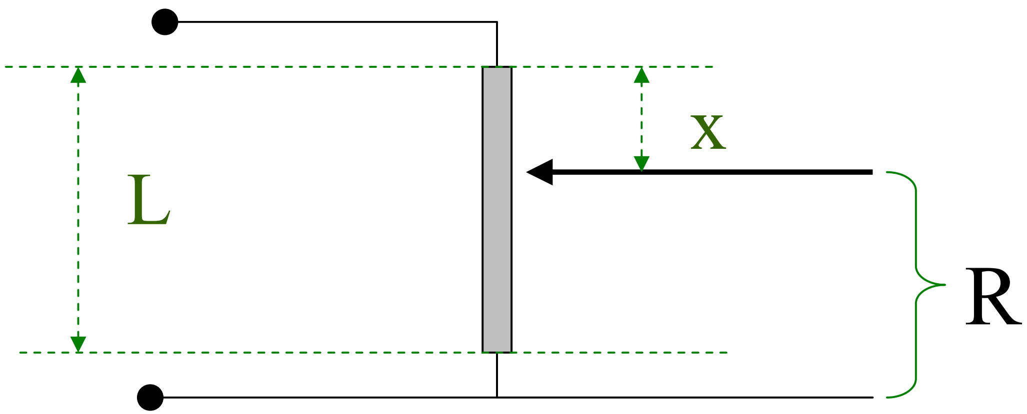
Sensori Resistivi

- Sensori a grande variazione di resistenza:
  - Potenziometri

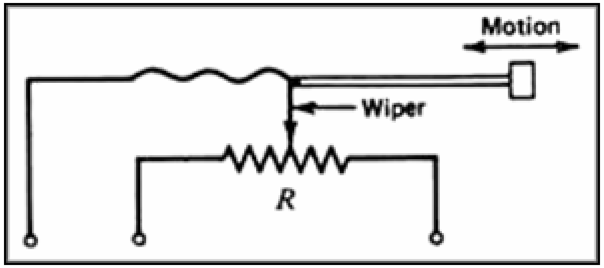


- Sensori a piccola variazione di resistenza:
  - estensimetri (piezoresistenze)
  - Termoresistenze (RTD) e termistori

Potenziometro per misure di posizione (*displacement*)



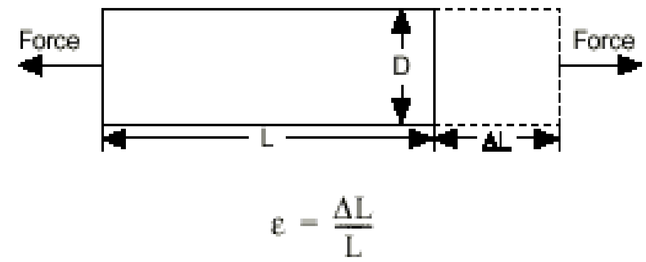
$$R = \frac{\rho}{A}\left(L - x\right)$$



Il più semplice sensore di posizione e il potenziometro: esso converte una variazione di distanza (lineare od angolare) in una variazione di resistenza. Tale variazione non è di per se direttamente misurabile, ma impone l'uso di un circuito di condizionamento.

I dispositivi potenziometrici soffrono di problemi legati all'attrito meccanico, limitata risoluzione, e grande rumore termico.

Estensimetri

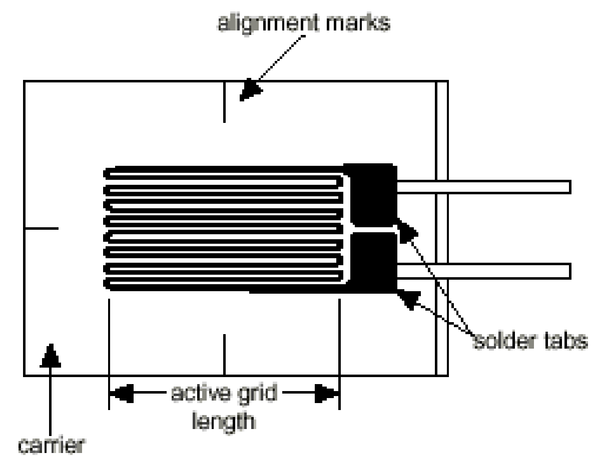


- Presentano una variazione di resistenza legata alla deformazione meccanica cui sono sottoposti.
- La grandezza

$$\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

rappresenta la variazione percentuale della deformazione ed è detta *strain* (deformazione).

- Sebbene sia adimensionale spesso si estprime in με ("*microstrain*", μm/m).



Estensimetri: principio fisico

- Principio: variazione di resistenza di un conduttore (o di un semiconduttore) quando è sottoposto a deformazione meccanica.

- Sotto l'azione di uno stress longitudinale tutte e tre le grandezze variano:

$$R = \rho \frac{l}{A} \qquad \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dA}{A}$$

Estensimetri: caratteristica

La relazione che lega la variazione di resistenza esibita alla deformazione subita, per estensimetri **metallici** ha la forma (lineare):

$$\frac{dR}{R} = G \frac{dl}{l}$$

La costante G è detta **gage factor**, e vale circa 2 (tranne che per il platino, per il quale vale circa 6). Risulta, quindi:

$$R = R_0 (1 + x)$$

Per gli estensimetri a **semiconduttore** la caratteristica non è lineare.

Estensimetri

Vantaggi:

• Dimensioni ridotte

• Elevata linearità

• Bassa impedenza

Svantaggi:

• Ancoraggio meccanico: la forza deve essere trasmessa tutta all'estensimetro.

• Dipendenza dalla temperatura (~50 $\mu\varepsilon$ / °C). Si risolve con montaggi differenziali.

• Forza termoelettrica che appare ai capi di giunzioni bimetalliche. Si risolve con una doppia misura a polarità invertita.

Resistive Temperature Detector (RTD)

- Se sono realizzati in platino sono chiamati anche PRT, *Platinum Resistence Thermometer*.
- Nei metalli, un aumento di temperatura fa diminuire la velocità media degli elettroni, ed aumenta R.

=> Coefficiente di temperatura **positivo**.

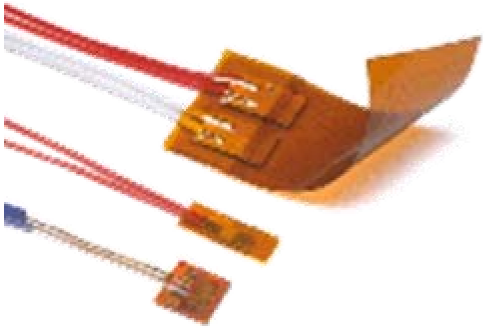
- Relazione generale:

$$R = R_0\left(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \ldots + \alpha_N T^N\right)$$

- A seconda del metallo, esiste un range di **linearità**, in cui:

$$R = R_0\left(1 + \alpha T\right)$$

Resistive Temperature Detector (RTD)



Tipicamente si usano:

- Platino (-200°C, +850 ° C)
- Rame (-200 °C,+260 °C)
- Nichel (-80 °C,+320 °C)

Disponibili con diversi *output range* (100 Ω – 2000 Ω).

Grazie a valori di resistenza elevati:

⇒ Minore influenza delle resistenze dei collegamenti

⇒ Cavi più lunghi.

Resistive Temperature Detector (RTD)

Vantaggi:

- Elevata sensibilità (10 volte maggiore rispetto alle termocoppie)
- Elevate prestazioni in termini di incertezza
- Ripetitività
- Basso costo (Rame e Nichel)

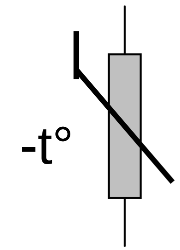
Svantaggi:

- Autoriscaldamento

Altre applicazioni:

- Misura della velocità di fluidi (*hot wire anemometer*)

Termistori (*Thermally Sensistive Resistor*)

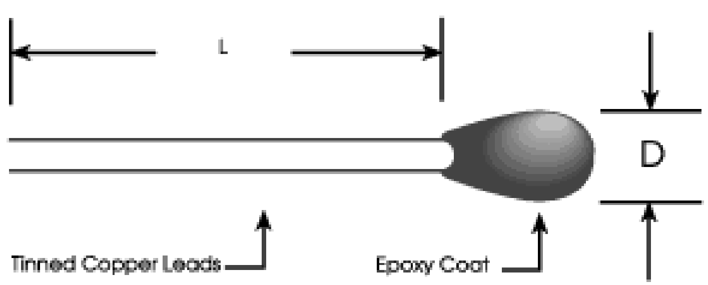


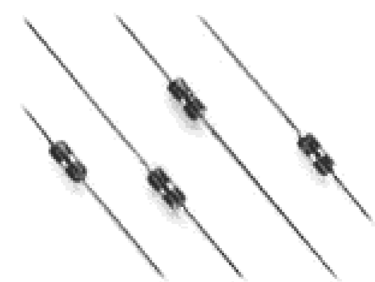
Realizzati con semiconduttori.

- NTC: coefficiente di temperatura negativo.
- PTC : coefficiente di temperatura positivo.

Principio di funzionamento:

- Aumento del numero di portatori con T (coeff. **negativo**);
- Con opportuni droganti si ottiene un coefficiente **positivo.**





Termistori (*Thermally Sensistive Resistor*)

Per gli NTC:

$$R_T = R_{25^\circ C} \exp\left\{ \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25^\circ C}} \right) \right\}$$

- β è la temperatura caratteristica del materiale (~4000K).
- Anche β ha una (leggera) dipendenza dalla temperatura.
- I valori di $R_{25^\circ C}$ possono andare da ~1Ω a ~100MΩ (tipici da ~100Ω a ~100kΩ).
- Gli NTC tipicamente hanno range limitati (~50°C) in 100°C,+450°C
- Costanti di tempo dipendenti dal package (da ~1ms a ~10s).

Condizionamento di trasduttori passivi (in particolare resistivi)

• Il metodo voltamperometrico è inadeguato per piccole resistenze

• Il metodo della caduta di potenziale richiede 2 misurazioni ed un resistore campione: difficilmente applicabile a sensori.

Si impiegano:

Metodi **potenziometrici**.

Metodi di **ponte**.

Oscillatori.

Principio

Alimentare il trasduttore passivo con una sorgente $\mathbf{E_S}$ ed almeno un'altra impedenza $\mathbf{Z_k}$, in modo da produrre una variazione $\mathbf{\Delta V_m}$ di un parametro elettrico del circuito che sia funzione di una variazione $\mathbf{\Delta m}$ del misurando.

Qualità del condizionatore

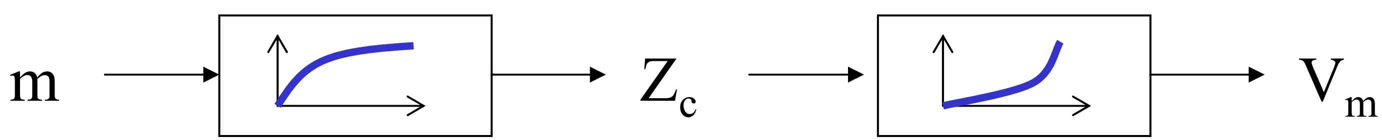
$$S = \frac{\Delta Z_C}{\Delta m}$$ Sensibilità del sensore

$$S_C = \frac{\Delta V_m}{\Delta Z_C}$$ Sensibilità del condizionatore

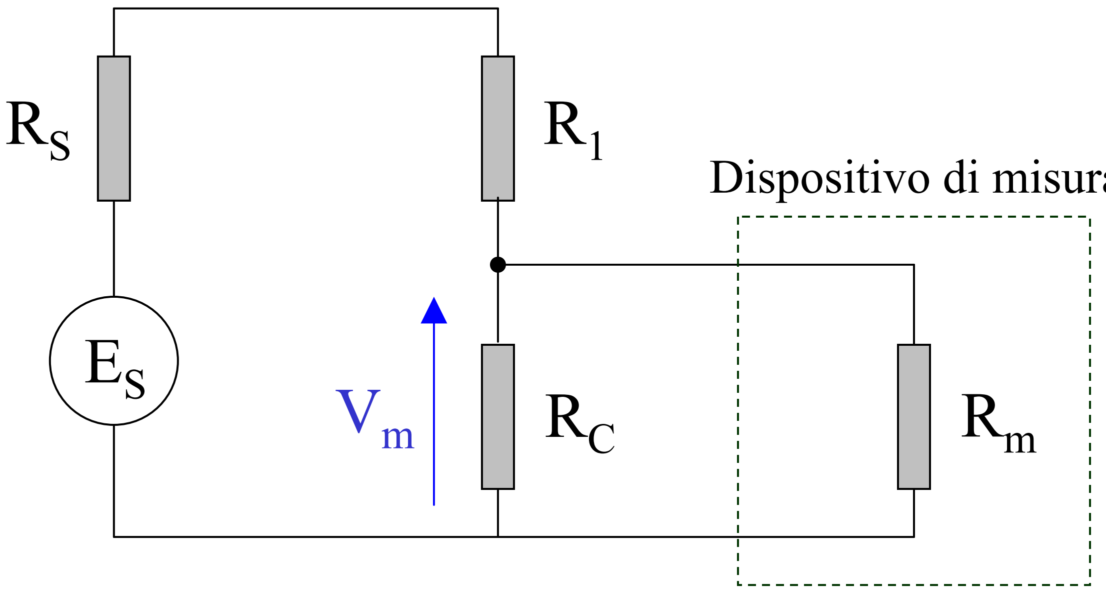
$$S_a = \frac{\Delta V_m}{\Delta m}$$ Sensibilità del montaggio

$$m \longrightarrow \boxed{\text{SENSORE}} \longrightarrow Z_c \longrightarrow \boxed{\text{CONDIZ.}} \longrightarrow V_m$$

Nel caso di sensore non lineare, si può ottenere una maggiore linearità del montaggio, se si usa un condizionatore con una non-linearità opportuna:



Metodo potenziometrico



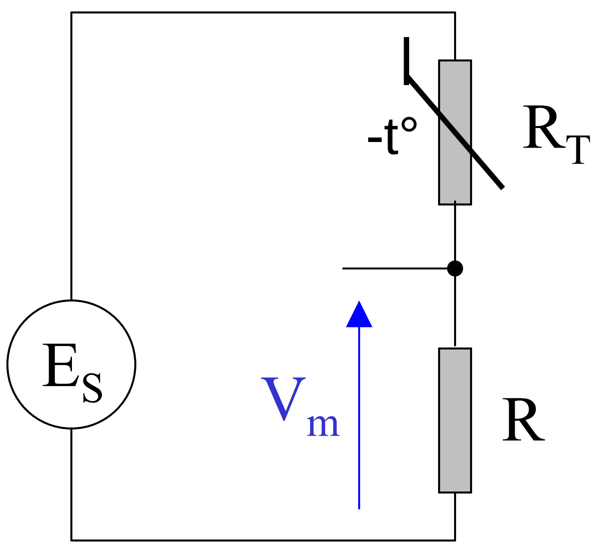
$$Se \quad R_m >> R_C :$$

$$V_m = E_S \frac{R_C}{R_C + R_s + R_1}$$

La relazione $V_m = f\,(\,R_C\,)$ non è lineare

La sensibilità del condizionatore S_C non è costante

Applicazione ai termistori



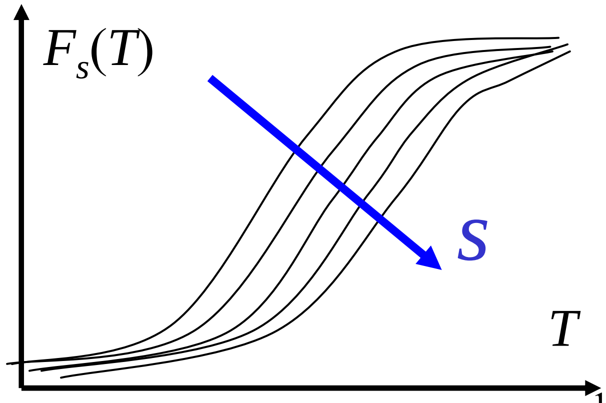
$$R_T = R_0 \exp\left\{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25°C}}\right)\right\} = R_0\ f(T)$$

$$V_m = E_S \frac{R}{R+R_T} = \frac{E_S}{1+\frac{R_T}{R}}$$

$$Si\ pone: \quad \frac{R_T}{R} = \frac{R_0}{R} f(T) = s \cdot f(T)$$

$$\Rightarrow \quad V_m = \frac{E_s}{1+s\cdot f(T)} = E_s \cdot F_s(T)$$

Scegliendo R ed R_0, si sceglie la *s* che dà la linearità desiderata:

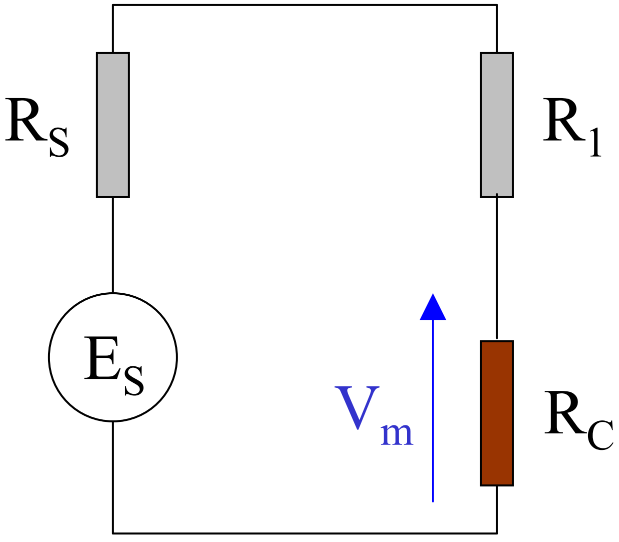


Linearità con i montaggi potenziometrici

Si ottiene una sensibilità del condizionatore costante in tre casi:

- Piccoli segnali
- Alimentazione in corrente
- Montaggio *push-pull*

Montaggio potenziometrico: piccoli segnali



$$R_C = R_{CO} + \Delta R_C$$

$$V_{mo} = E_S \frac{R_{CO}}{R_{CO} + R_s + R_1}$$

$$V_{mo} + \Delta V_m = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + \Delta R_C + R_s + R_1} = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + R_s + R_1} \cdot \frac{R_{CO} + R_s + R_1}{R_{CO} + \Delta R_C + R_s + R_1} =$$

$$= E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + R_s + R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_C}{R_{CO} + R_s + R_1}}$$

Montaggio potenziometrico: piccoli segnali (2)

$$V_{mo} + \Delta V_m = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + R_s + R_1} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{\Delta R_C}{R_{CO} + R_s + R_1}}$$

$$\text{Se } \Delta R_C << R_{CO} + R_s + R_1 \quad \Rightarrow \quad \Delta V_m = E_S \frac{(R_s + R_1)\Delta R_C}{(R_{CO} + R_s + R_1)^2}$$

Poiché si ottiene la massima sensibilità per $R_S + R_1 = R_{CO}$:

$$\Delta V_m = E_S \frac{\Delta R_C}{4 R_{CO}}$$

Montaggio potenziometrico: piccoli segnali (dettagli)

$$V_{mo} = E_S \frac{R_{CO}}{R_{CO} + R_D}$$

Sia $R_D = R_1 + R_S$

$$V_m = V_{mo} + \Delta V_m = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R}{R_{CO} + \Delta R + R_D}$$

$$\Delta V_m = V_m - V_{mo} = E_S \left\{ \frac{R_{CO} + \Delta R}{R_{CO} + \Delta R + R_D} - \frac{R_{CO}}{R_{CO} + R_D} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{(R_{CO} + \Delta R)(R_{CO} + R_D) - R_{CO}(R_{CO} + \Delta R + R_D)}{(R_{CO} + \Delta R + R_D)(R_{CO} + R_D)} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{R_{CO}^2 + R_{CO}R_D + R_{CO}\Delta R + R_D\Delta R - R_{CO}^2 - R_{CO}\Delta R - R_{CO}R_D}{(R_{CO} + \Delta R + R_D)(R_{CO} + R_D)} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + \Delta R + R_D)(R_{CO} + R_D)} \right\}$$

Se $\Delta R_C << R_{CO} + R_s + R_1$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + R_D)(R_{CO} + R_D)} \cdot \frac{R_{CO} + R_D}{R_{CO} + \Delta R + R_D} \right\}$$

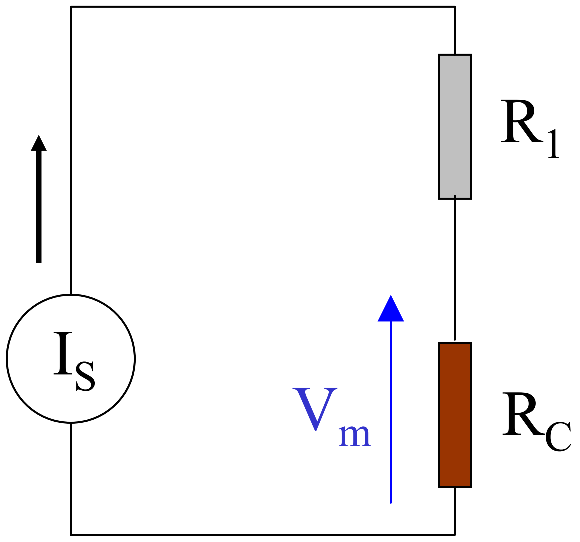
$$\Delta V_m = E_S \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + R_D)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R_{CO} + R_D}} \cong E_S \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + R_D)^2} = E_S \frac{(R_1 + R_S)\Delta R}{(R_{CO} + R_1 + R_S)^2}$$

Alimentazione stabilizzata in corrente

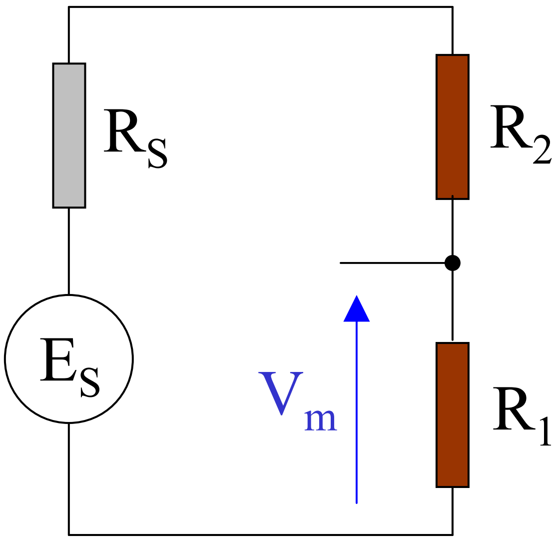
Se I_S è costante:

$$\frac{dV_m}{dR_C} = \text{costante}$$

Dunque, la relazione tra V_m ed R_C è lineare



Montaggio *push-pull*



Si sostituisce al componente fisso un secondo sensore uguale al primo, ma le cui variazioni sono di segno contrario:

$$R_1 = R_{CO} + \Delta R_C$$

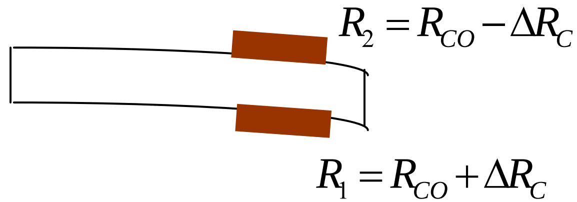
$$R_2 = R_{CO} - \Delta R_C$$

$$V_{mo} + \Delta V_m = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + \cancel{\Delta R_C} + R_s + R_{CO} - \cancel{\Delta R_C}}$$

$$\Delta V_m = E_S \frac{\Delta R_C}{2R_{CO} + R_s}$$

- Legge lineare
- Sensibilità costante

Esempio: coppia di estensimetri

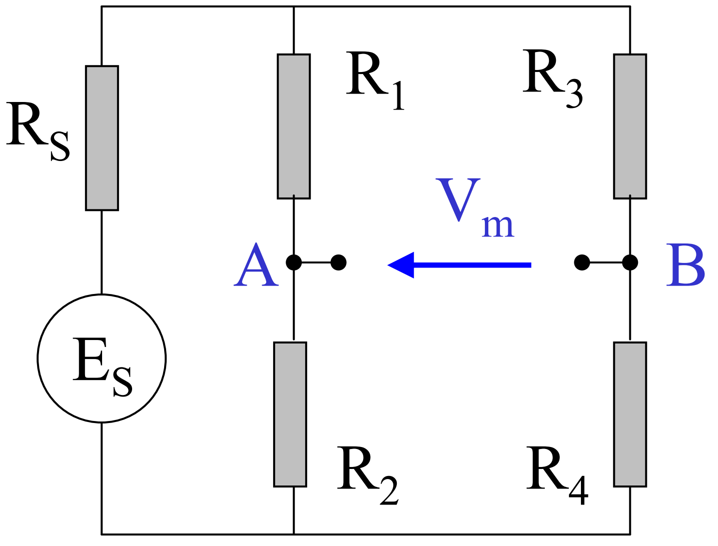


Montaggio potenziometrico: svantaggi

- Eccessiva sensibilità ai parametri parassiti

- Eccessiva sensibilità alla deriva della sorgente di alimentazione

I ponti



Ipotesi: R_s si può ritenere nulla.

Si possono considerare potenziometri doppi, che consentono una misura differenziale di V_m.

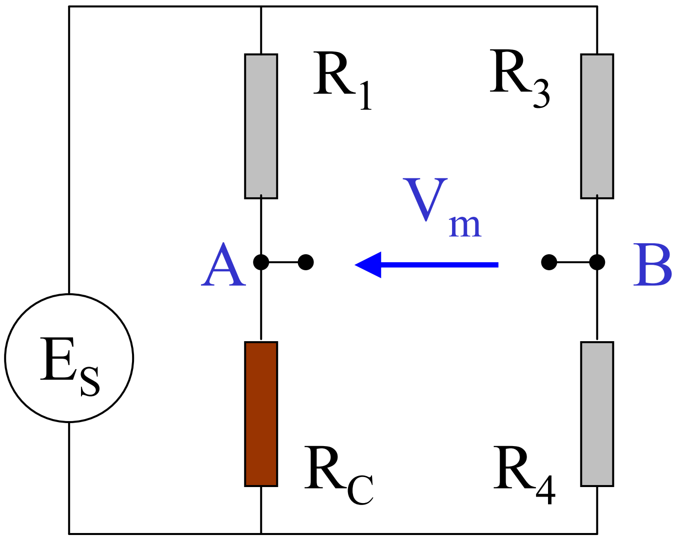
Il valore misurato è meno dipendente dalla deriva dell'alimentazione e dai parametri parassiti.

Per trasduttori resistivi si usa il **ponte di Wheatstone**.

Siamo interessati alla tensione di squilibrio:

$$V_m = V_A - V_B = E_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} - E_s \frac{R_4}{R_3 + R_4} = E_s \left\{ \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right\}$$

Ponte con un solo elemento variabile



$$R_C = R_O + \Delta R_C$$

$$R_1 = R_3 = R_4 = R_O$$

$$V_m = E_s \left\{ \frac{R_C R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_C)(R_3 + R_4)} \right\}$$

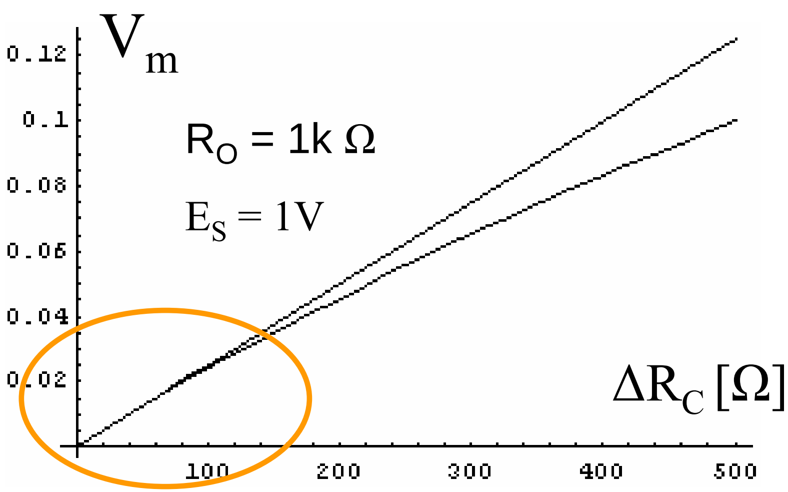
$$V_m = E_s \left\{ \frac{(R_O + \Delta R_C) R_O - R_O^2}{(2R_O + \Delta R_C) 2R_O} \right\} = E_s \frac{R_O \Delta R_C}{4R_O^2 + 2R_O \Delta R_C} =$$

$$= \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O + \frac{\Delta R_C}{2}} = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_C}{2R_O}\right)}$$

Ponte con un solo elemento variabile (2)

$$V_m = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_C}{2R_O}\right)}$$

La relazione è **non lineare**, a meno che non sia: $\boxed{\Delta R_C << 2R_O}$



Ipotesi di **piccoli segnali**

$$\Rightarrow \; V_m \cong \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O}$$

Ponte con un solo elemento variabile: altri casi

- Se la resistenza della sorgente non è trascurabile, la sensibilità del ponte si riduce.

- Se il ponte è alimentato in corrente la linearità è maggiore:

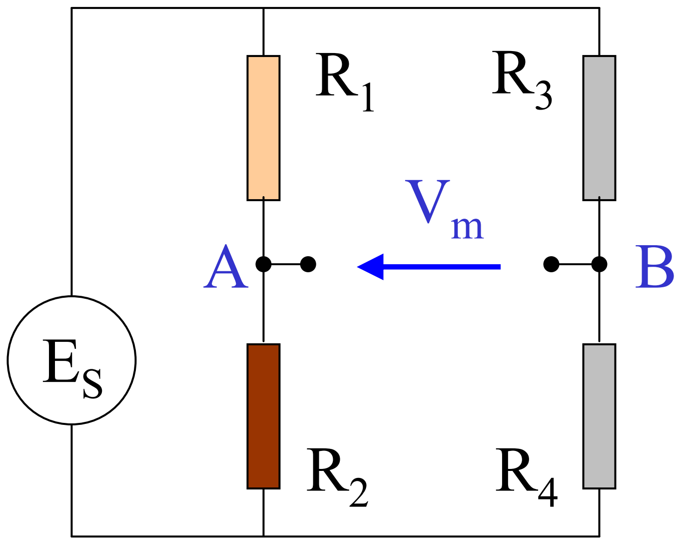
$$V_m = \frac{I_s}{4} \cdot \Delta R_C \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_C}{4 R_O}\right)}$$

Compensazione delle grandezze di influenza

Si utilizzano due trasduttori identici:

• Il primo sottoposto al misurando **m** ed alla grandezza di influenza **g.**

• Il secondo (**di compensazione**) sottoposto alla sola grandezza di influenza **g**.



$$R_2 = R_O + \Delta R_2, \qquad con\ \Delta R_2 = S_g \Delta g + S \Delta m$$

$$R_1 = R_O + \Delta R_1, \qquad con\ \Delta R_1 = S_g \Delta g$$

$$R_3 = R_4 = R_O$$

Si ottiene l'indipendenza della V_m da g.

continua …

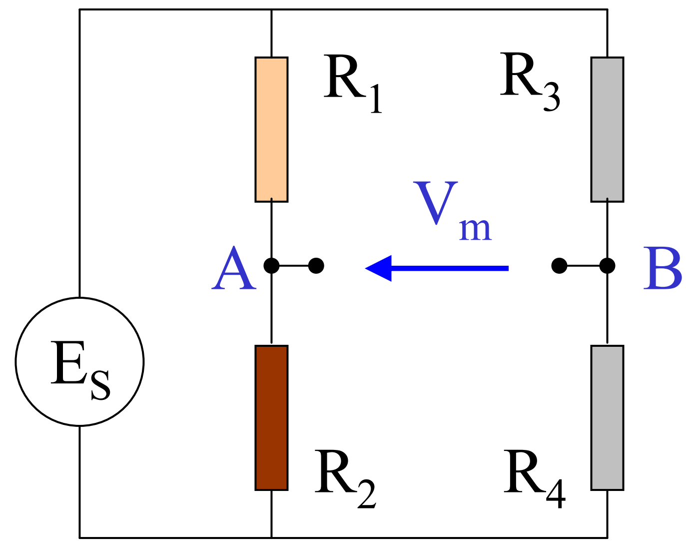
Compensazione delle grandezze di influenza

$$Si\ \ ha:$$

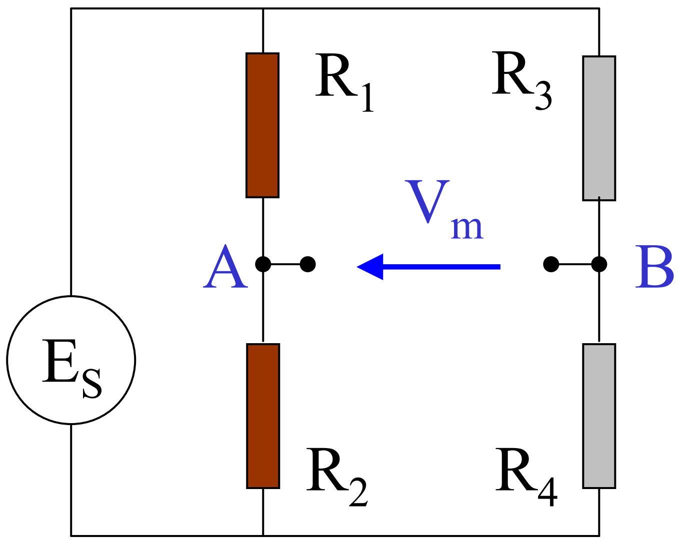
$$dV_m = \left[\frac{\partial V_m}{\partial R_1}\frac{\partial R_1}{\partial g} + \frac{\partial V_m}{\partial R_2}\frac{\partial R_2}{\partial g} \right] dg = 0$$

$$se\, \frac{\partial V_m}{\partial R_1}\frac{\partial R_1}{\partial g} + \frac{\partial V_m}{\partial R_2}\frac{\partial R_2}{\partial g} = 0$$

$$cio\grave{e}\ \ se\ \begin{cases} \dfrac{\partial R_1}{\partial g} = \dfrac{\partial R_2}{\partial g} \Rightarrow sensori\ identici \\ \dfrac{\partial V_m}{\partial R_1} = -\dfrac{\partial V_m}{\partial R_2} \Rightarrow vera\ se\, R_1 = R_2 \end{cases}$$



Ponti: montaggio *push-pull* a mezzo ponte



Sono presenti due elementi stesso lato che presentano variazioni opposte:

$$R_1 = R_O - \Delta R_A$$

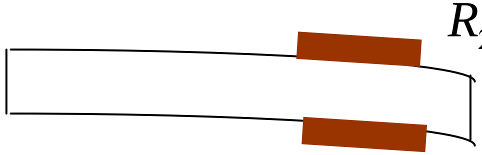
$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$

Risulta:

$$V_m = E_S \frac{\Delta R}{2R_0}$$

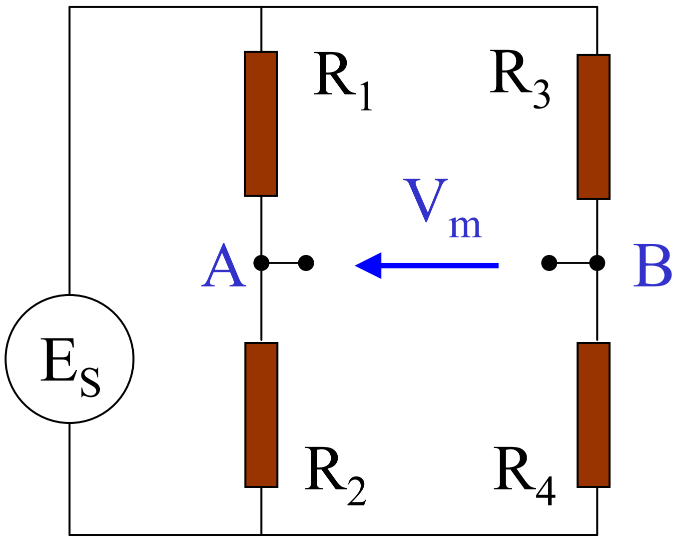
Esempio: coppia di estensimetri

$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$



$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$

Ponti: montaggio *push-pull* a ponte intero



Elementi sullo stesso lato presentano variazioni opposte:

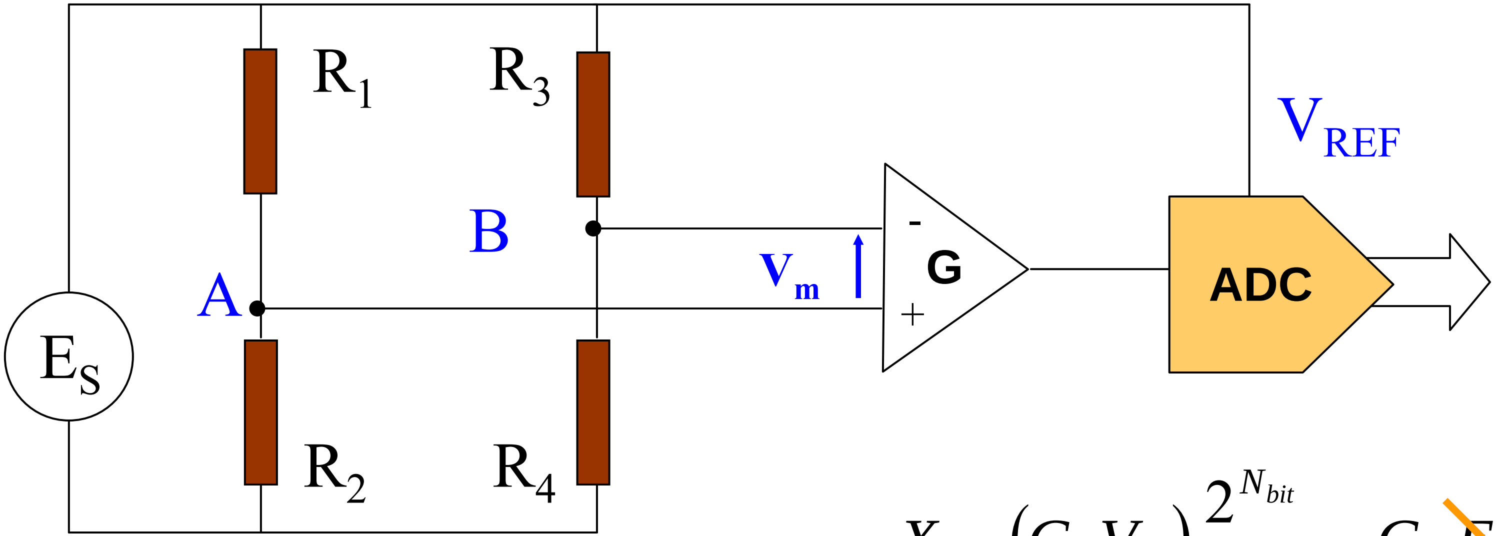
$$R_1 = R_O - \Delta R_A$$
$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$
$$R_3 = R_O + \Delta R_B$$
$$R_4 = R_O - \Delta R_B$$

Se, inoltre, $\Delta R_A = \Delta R_B$:

$$V_m = E_S \frac{\Delta R}{R_0}$$

La sensibilità è **raddoppiata** rispetto al mezzo ponte.

Ponti: compensazione della deriva dell’alimentazione

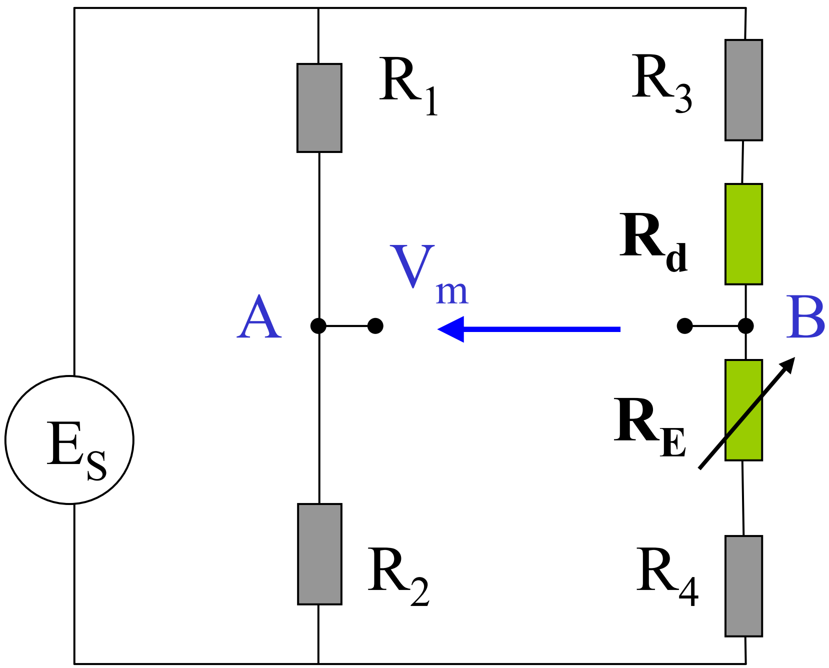


$$X = \left(G \cdot V_m\right)\frac{2^{N_{bit}}}{V_{REF}} = G \cdot \cancel{E_S}\,\frac{\Delta R}{R_O}\,\frac{2^{N_{bit}}}{\cancel{E_S}}$$

La tensione di riferimento dell’ADC varia come la E_S.

Si impiega l’ADC come divisore (*ratiometric measurement*).

Azzeramento del ponte



- Le 4 resistenze che compongono il ponte non sono mai perfettamente uguali:
  - ✓Valore
  - ✓Coefficiente termico
- La resistenza R_d si sceglie con coefficiente termico opportuno per compensare la dipendenza di V_m dalla temperatura.
- La R_E si regola in modo da azzerare il ponte per la condizione iniziale, in modo da avere la massima sensibilità.