

*Corso di*

Misure per l'Automazione e la Produzione Industriale

*(Studenti Ingegneria della Produzione Industriale III anno NO)*

# Sensori e Circuiti di Condizionamento



*Gruppo Misure Elettriche ed  
Elettroniche*

*Facoltà di Ingegneria, DAEIMI.*

*Università degli Studi di Cassino*

Marco Laracca

*m.laracca@unicas.it*

# Sensori e Trasduttori

Il sensore è il primo elemento della catena di misura.

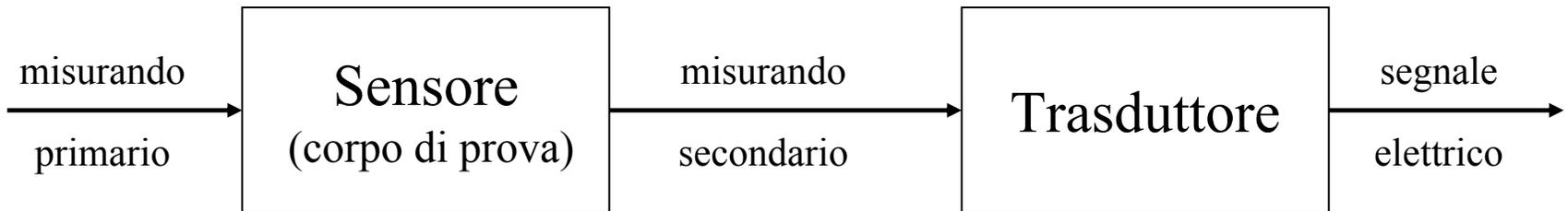
Ha il compito di convertire la grandezza fisica da misurare (**misurando**) in un'altra più facilmente trattabile.

Il trasduttore è un dispositivo sensibile che fornisce un segnale elettrico misurabile in risposta ad uno specifico misurando.

*Un trasduttore è un sensore ma un sensore non è necessariamente un trasduttore*

# Sensori e Trasduttori

Se il sensore non è un trasduttore può essere chiamato *corpo di prova* e richiedere in cascata un trasduttore



# Trasduttori attivi e passivi

Un trasduttore può essere attivo o passivo:

- **Attivo** se l'effetto fisico su cui è basato assicura la trasformazione in energia elettrica dell'energia propria del misurando (termica, meccanica, d'irraggiamento, ...).

*Esempi: Termoelettrico (termocoppia), Piroelettrico (cristalli la cui polarizzazione dipende dalla temperatura), ...*

- **Passivo** se l'effetto del misurando si traduce in una variazione d'impedenza dell'elemento sensibile.

*Esempi: estensimetri, magnetici, ...*

# Classificazione dei trasduttori

- Attivi / passivi
- In base alla grandezza misurata: sensori di temperatura, umidità, illuminamento, velocità, ...
- In base alla grandezza che forniscono in uscita: trasduttori resistivi, induttivi, capacitivi, in tensione, in corrente, ...
- Analogici / digitali

# Circuiti di condizionamento

Un trasduttore è completato dal **circuito di condizionamento**.

**Trasduttore passivo:** il circuito di condizionamento è indispensabile per la generazione del segnale elettrico (*montaggio*).

**Trasduttore attivo:** il circuito di condizionamento ha il compito di adattare i parametri dell'energia elettrica, generata dal trasduttore, alle caratteristiche d'ingresso del sistema di misura (*condizionamento del segnale*).

# Descrizione di un trasduttore

**Misurando:** grandezza da misurare.

**Principio di trasduzione:** principio fisico su cui si basa la generazione del segnale elettrico.

**Proprietà significative:** tipo di elemento sensibile, tipo di costruzione, circuiteria interna, ...

**Range:** limite superiore ed inferiore di variazione del misurando.

# Caratteristiche di un trasduttore

- **Di progetto** (specificano come il trasduttore è o dovrebbe essere)
- **Prestazioni** (caratteristiche metrologiche)
- **Affidabilità** (caratteristiche ambientali e d'uso che influenzano la vita utile del trasduttore).

# Caratteristiche relative all'ingresso

- **Specie:** grandezza fisica in ingresso.
- **Campo di misura (*input range*):** intervallo di valori del misurando entro il quale il sensore funziona secondo le specifiche. Il suo limite superiore è la **portata**.
- **Campo di sicurezza del misurando:** intervallo di valori del misurando al di fuori del quale il sensore resta danneggiato permanentemente. I suoi valori estremi sono detti di **overload** o **overrange**.

# Caratteristiche relative all'uscita

- **Specie:** natura della grandezza in uscita.
- **Campo di normale funzionamento** (*output range*): intervallo di valori dell'uscita quando l'ingresso varia nell'*input range*.
- **Potenza erogabile:** valore limite della potenza che il sensore può fornire al sistema utilizzatore a valle. Se l'uscita è in corrente, si precisa l'impedenza di carico.
- **Impedenza di uscita**

# Caratteristiche relative all'uscita (2)

- **Incertezza di uscita:** larghezza della fascia comprendente tutti i valori che potrebbero essere assunti, con una certa probabilità (*livello di confidenza*) a rappresentare il valore della uscita corrispondente ad una certa condizione di funzionamento.
- **Alimentazione ausiliaria** (*power supply*): viene precisato il valore di tensione o corrente da fornire con una sorgente esterna.

# Caratteristiche statiche (1)

- **Funzione di conversione:** funzione che permette di ricavare dall'ingresso il valore della uscita.
- **Funzione di taratura:** relazione che permette di ricavare da ogni valore della grandezza in uscita il valore dell'ingresso e la corrispondente fascia di incertezza.
  - **Curva di taratura:** valore uscita  $\Rightarrow$  valore centrale ingresso;
  - **Costante di taratura:** pendenza della curva di taratura, se è lineare;
  - **Incerteza di taratura:** ampiezza della fascia di valori.

# Caratteristiche statiche (2)

- **Sensibilità** (*sensitivity*): pendenza della curva di conversione in un certo punto:

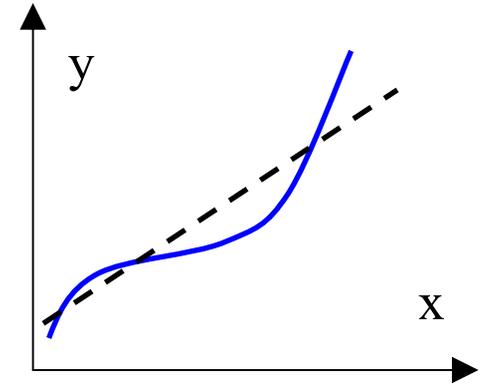
$$S = \frac{dy}{dx}$$

Corrisponde all'inverso della pendenza della curva di taratura.

- **Stabilità**: capacità di conservare inalterate le caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo.

# Caratteristiche statiche (3)

- **Linearità:** indica di quanto la curva di taratura si discosta dall'andamento rettilineo. E' il massimo scostamento rispetto ad una retta che può essere calcolata in modi diversi:
  - Retta che rende minimo il massimo scostamento.
  - Retta ai minimi quadrati.
  - Retta congiungente gli estremi.

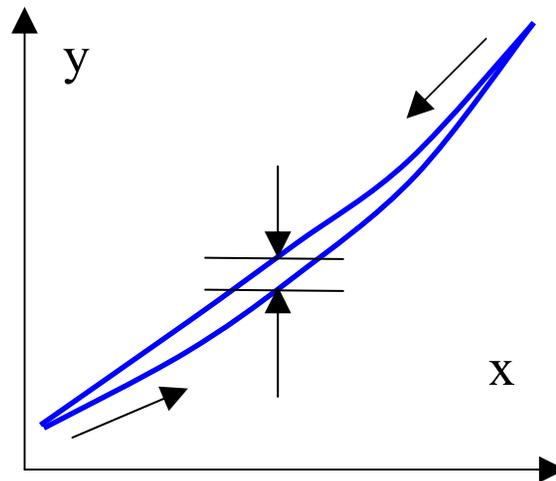


# Caratteristiche statiche (4)

- **Risoluzione:** variazione del valore del misurando che provoca una variazione apprezzabile del valore della grandezza in uscita.
  - ✓ Se il sensore lavora vicino allo zero, si parla di **soglia**.
- **Ripetibilità:** attitudine dello strumento a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando è applicato all'ingresso lo stesso misurando, nelle stesse condizioni operative. Si esprime in modo simile all'incertezza di taratura.

# Caratteristiche statiche (5)

- **Isteresi:** massima differenza tra i valori della uscita corrispondenti al medesimo misurando, quando si considerano tutti i valori del campo di misura, ed ogni valore viene raggiunto con misurando prima crescente e poi decrescente.



# Condizioni di riferimento

*(Reference operating conditions)* Insieme delle fasce dei valori delle grandezze di influenza in corrispondenza delle quali sono valide le specifiche metrologiche indicate dal costruttore.

- **Funzioni di influenza** (*operating influence*): informazione su come una grandezza di influenza agisce su una delle caratteristiche metrologiche. Può essere espressa attraverso la **sensibilità** della grandezza metrologica alla grandezza di influenza.

# Caratteristiche dinamiche (1)

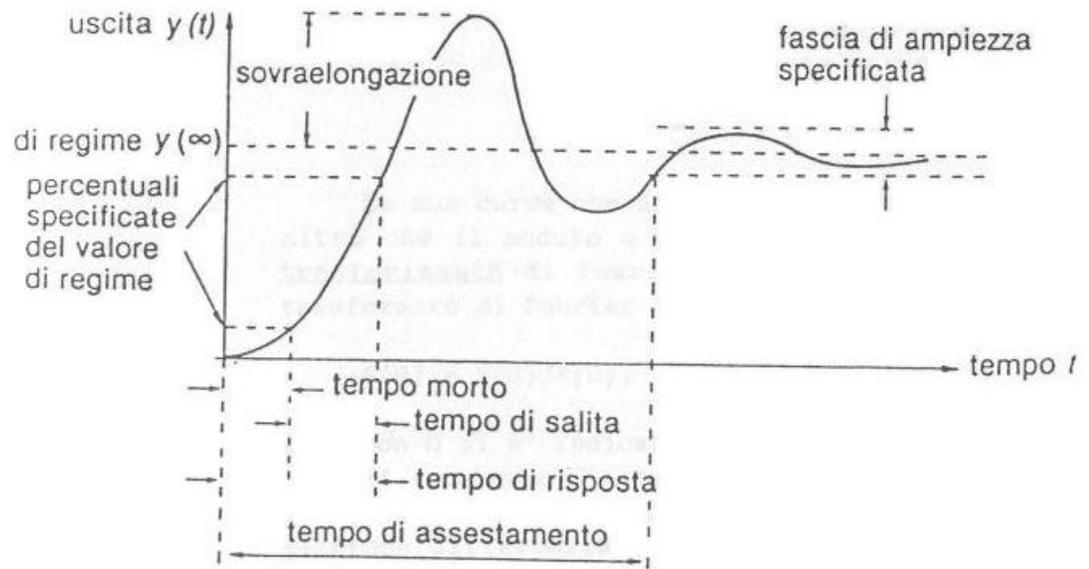
Nel dominio della frequenza:

- **Risposta in frequenza:** curve del **modulo** e della **fase** rispetto alla frequenza (Diagrammi di Bode).
- **Campo di frequenza:** intervallo di frequenze nel quale la curva di risposta in modulo non esce da una fascia di tolleranza prefissata.
- Eventuale **frequenza di risonanza**.

# Caratteristiche dinamiche (2)

Nel dominio del tempo:

- **Tempo morto**
- **Tempo di salita**
- **Tempo di risposta**
- **Costante di tempo**
- **Tempo di assestamento**
- **Sovraelongazione**
- **Frequenza delle oscillazioni di assestamento**
- **Fattore di smorzamento**



# Caratteristiche dinamiche (3)

- **Limite di velocità:** massima velocità di variazione del misurando oltre la quale l'uscita non varia corrispondentemente.
- **Tempo di recupero** (*recovery time*): intervallo di tempo richiesto dopo un evento specificato (ad es. un sovraccarico) affinché il sensore riprenda a funzionare secondo le caratteristiche specificate.

# Varietà dei sensori

Physical principle	Typical application	Measurand	Output
<b>Resistive</b> The variation of the sensing element electric resistance depends on the measurand.	Thermistor or resistance thermometer Potentiometer Hot-wire anemometer Resistive hygrometer Chemioresistor	Temperature Displacement, force, pressure Flow Humidity Presence of gas	Change in resistance
<b>Capacitive</b> The sensing element capacitance depends on the measurand.	Parallel-plate capacitor sensor Rotary-plate capacitor sensor Differential capacitor Capacitance manometer Humidity sensor Capacitive diaphragm	Displacement, force, liquid level, pressure Displacement, force, angular position, torque Small displacement Very low pressure Moisture Pressure	Capacitance or change in capacitance
<b>Inductive</b> The sensing element inductance depends on the measurand.	Linear variable differential transformer Self inductance sensor Eddy current sensor	Displacement, torque Displacement, torque, liquid level Position, conductivity, thickness, cracks in materials	Inductance or change in inductance
<b>Reluctive</b> The variation in the reluctance path between two or more coil depends on the measurand.	Linear variable differential transformer Rotary variable differential transformer Microsyn Resolver Syncro Reluctive diaphragm	Linear displacement Angular rotation Angular displacement Position Position, torque Pressure	Voltage Voltage Voltage Voltage Voltage Change in reluctance
<b>Electromagnetic</b> In any circuit capturing a magnetic flux, whenever the flux changes an electromotive force is induced. (Faraday law)	Linear velocity sensor Flowmeter Tachometer generator Torque sensor	Linear velocity Flow Angular speed Torque	Voltage
<b>Piezoresistive effect</b> Resistance of the sensing element depends on the strain.	Strain gauge	Stress, strain, Fluid pressure, displacement, force	Change in resistance
<b>Hall effect</b> If the sensing element, carrying current, is put in a magnetic field a differential in electric potential among its sides is generated.	Gaussmeter Wattmeter	Magnetic field, displacement Power	Voltage

# Varietà dei sensori

<p><b>Magnetoresistive effect</b> Resistance of the sensing element depends on the strain.</p>	Magnetoresistor	Magnetic field, linear and angular displacement, proximity, position	Change in resistance
<p><b>Piezoelectric effect</b> Subjecting the sensing element to stress there is a generation of electric charge.</p>	Vibration cables Active and passive force sensor Piezoelectric microphone Piezoelectric temperature sensor	Vibration Force Ultrasonic waves Temperature	Voltage or charge
<p><b>Pyroelectric effect</b> The sensing element generates an electric charge in response to a heat flow.</p>	Heat flowmeter Pyroelectric sensor	Change in the temperature	Voltage
<p><b>Thermoelectric effect</b> When there is a difference in temperature between two junctions of different metals, a difference of electric potential is generated.</p>	Thermocouples, thermopiles, infrared pyrometer	Difference of temperature	Voltage
<p><b>Ionization effect</b> The sensing element when exposed to the measurand becomes ionized.</p>	Electrolytic sensor Vacuum gages Chemical ionizer	Electrical conductivity, pH Pressure Atomic radiation	Current
<p><b>Photoresistive</b> The electric resistance of the sensing element is caused by the incidence of optical radiation.</p>	Photoresistor, photodiode, phototransistor, photofet	Light, position, motion, sound flow, force	Change in resistance
<p><b>Photovoltaic effect</b> When the sensing element is subject to a radiation it generates an electric potential</p>	Flame photometer Light detector Pyrometers	Light intensity Light, position, motion, sound flow, force Temperature	Voltage
<p><b>Acoustooptic effect</b> The interaction of an optical wave with an acoustic wave produces a new optical wave</p>	Acoustic optic deflection, Bragg cell	Physical vibration	Phase modulated voltage signal
<p><b>Doppler effect</b> The apparent frequency of a wave train changes in dependence of the relative motion between the source of the train and the observer.</p>	Remote sensor of linear velocity, Doppler radar, laser Doppler velocimeter	Relative velocity	Frequency
<p><b>Thermal radiation</b> An object emanates thermal radiation, which intensity is related to its temperature</p>	Pyrometer	Temperature	Voltage 22

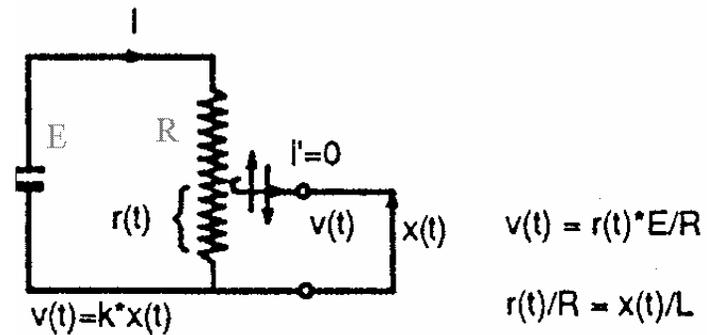
# Sensori Resistivi

- 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:

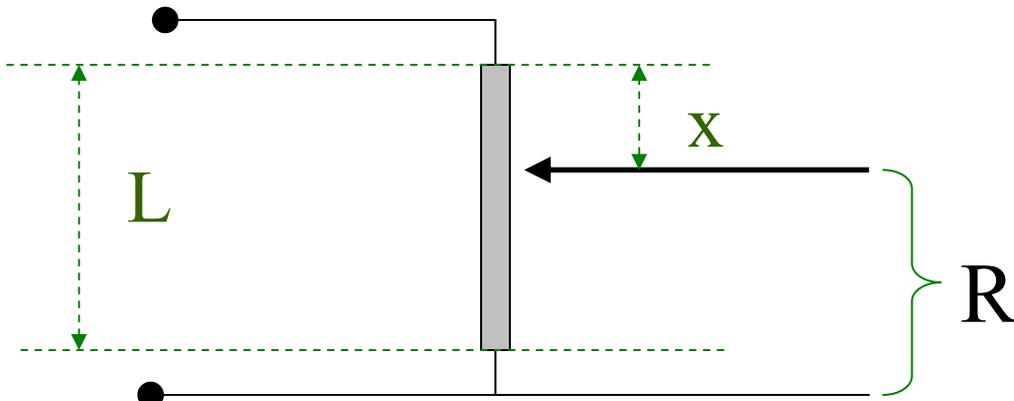
- Potenziometri



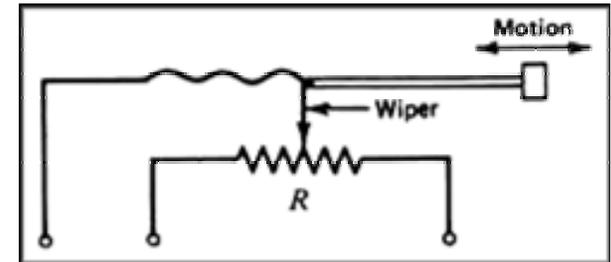
- Sensori a piccola variazione di resistenza:

- estensimetri (piezoresistenze)
- Termoresistenze (RTD) e termistori

# Potenzimetro per misure di posizione (*displacement*)



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



Il più semplice sensore di posizione è 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

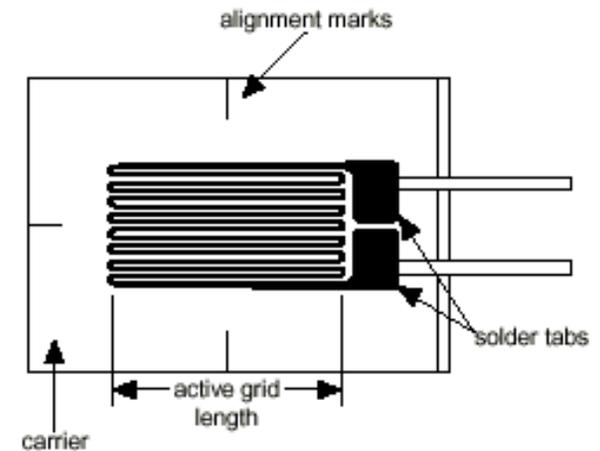
$$\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

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

- Sebbene sia adimensionale spesso si esprime in  $\mu\varepsilon$  (“*microstrain*”,  $\mu\text{m}/\text{m}$ ).



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



# 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 ( $\sim 50 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ ).  
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 Resistance Thermometer*.
- Nei metalli, un aumento di temperatura fa diminuire la velocità media degli elettroni, ed aumenta R.

=> Coefficiente di temperatura **positivo**.

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

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

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



# Resistive Temperature Detector (RTD)

Tipicamente si usano:

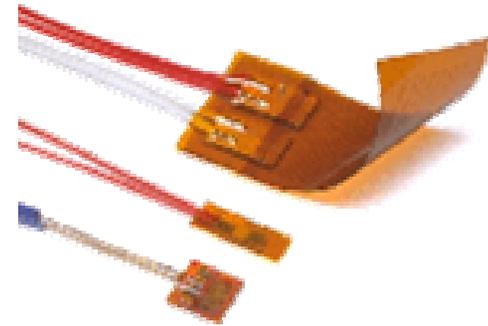
- Platino (-200°C, +850 ° C)
- Rame (-200 °C,+260 °C)
- Nichel (-80 °C,+320 °C)

Disponibili con diversi *output range* (100  $\Omega$  – 2000  $\Omega$ ).

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

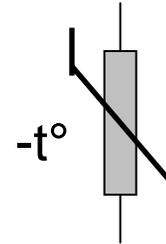
## *Altre applicazioni:*

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

# Termistori (*Thermally Sensitive Resistor*)

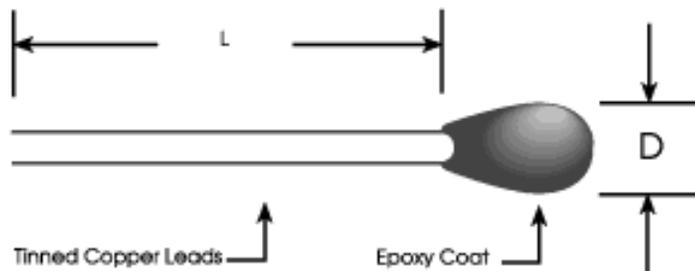
Realizzati con semiconduttori.

- 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 Sensitive Resistor*)

Per gli NTC:

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

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

# **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  $E_S$  ed almeno un'altra impedenza  $Z_k$ , in modo da produrre una variazione  $\Delta V_m$  di un parametro elettrico del circuito che sia funzione di una variazione  $\Delta m$  del misurando.

# Qualità del condizionatore

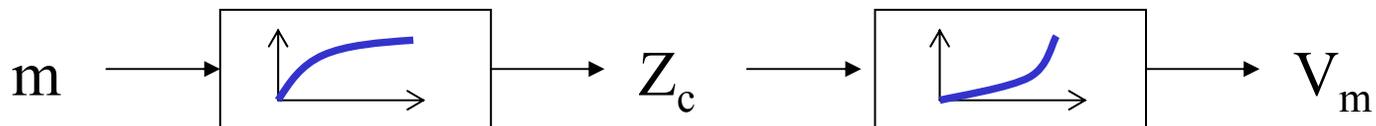
$$S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m} \quad \text{Sensibilità del sensore}$$

$$S_c = \frac{\Delta V_m}{\Delta Z_c} \quad \text{Sensibilità del condizionatore}$$

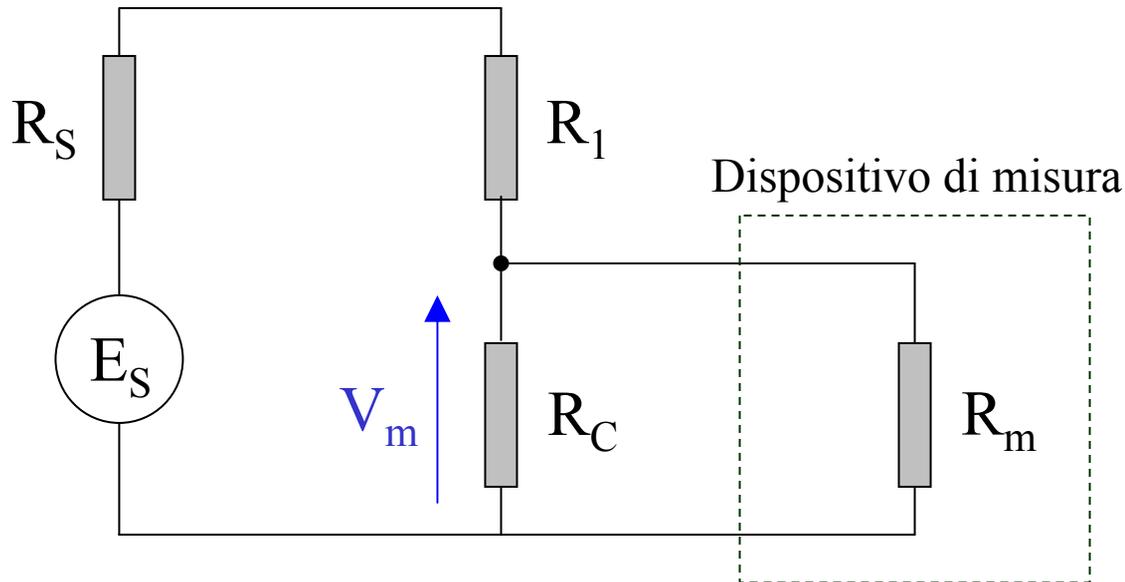
$$S_a = \frac{\Delta V_m}{\Delta m} \quad \text{Sensibilità del montaggio}$$



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



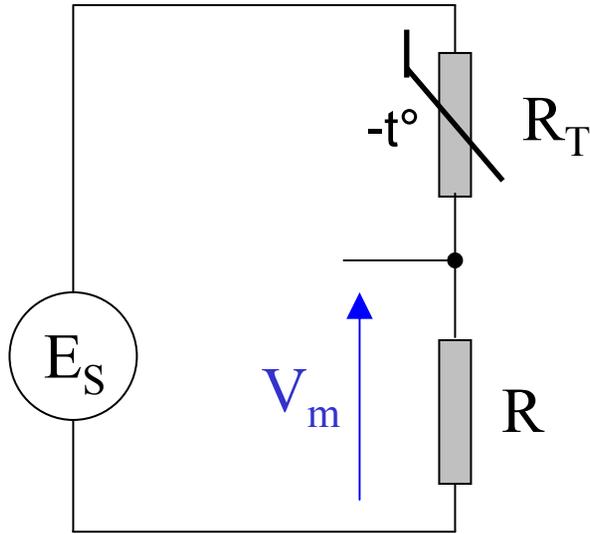
Se  $R_m \gg R_C$  :

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

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

La sensibilità del condizionatore  $S_C$  non è costante

# Applicazione ai termistori



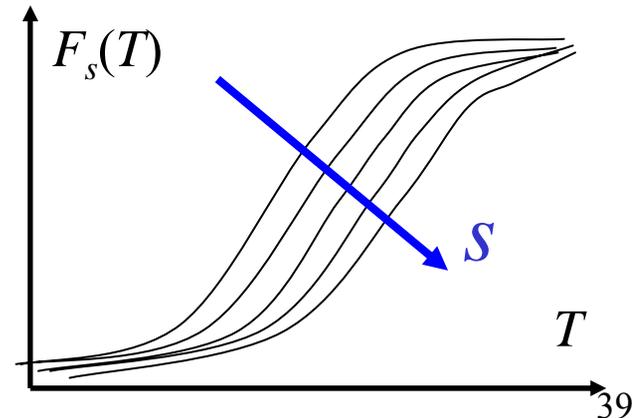
$$R_T = R_0 \exp \left\{ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25^\circ C}} \right) \right\} = R_0 f(T)$$

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

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

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

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

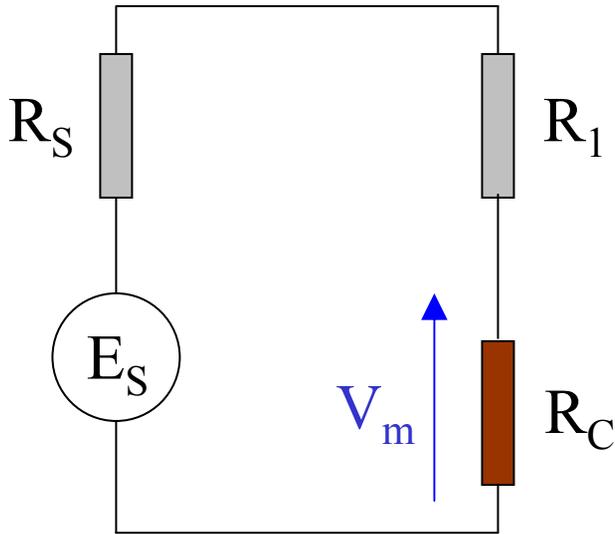


# Linearità con i montaggi potenziometrici

Si ottiene una sensibilità del condizionatore costante in tre casi:

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

# Montaggio potenziometrico: piccoli segnali



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

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

$$\begin{aligned} V_{mo} + \Delta V_m &= E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + \Delta R_C + R_S + R_1} = E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + R_S + R_1} \cdot \frac{R_{CO} + R_S + R_1}{R_{CO} + \Delta R_C + R_S + R_1} = \\ &= E_S \frac{R_{CO} + \Delta R_C}{R_{CO} + R_S + R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_C}{R_{CO} + R_S + R_1}} \end{aligned}$$

## Montaggio potenziometrico: piccoli segnali (2)

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

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

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

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

# Montaggio potenziometrico: piccoli segnali (dettagli)

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

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

Sia  $R_D = R_1 + R_s$

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

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

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

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

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

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

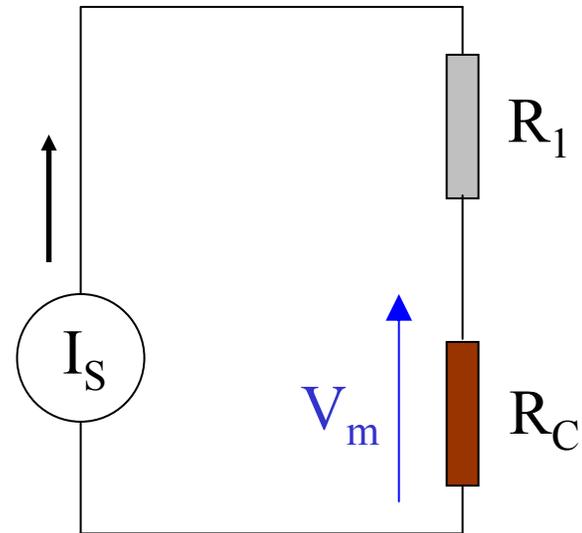
$$\Delta V_m = E_s \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + R_D)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R_{CO} + R_D}} \cong E_s \frac{R_D\Delta R}{(R_{CO} + R_D)^2} = E_s \frac{(R_1 + R_s)\Delta R}{(R_{CO} + R_1 + R_s)^2}$$

# Alimentazione stabilizzata in corrente

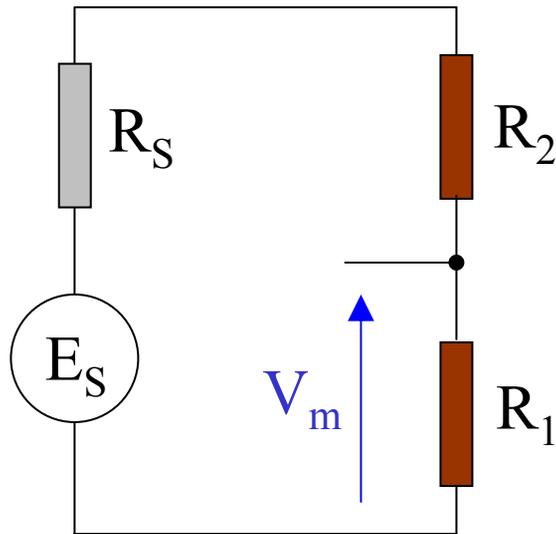
Se  $I_S$  è costante:

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

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:

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

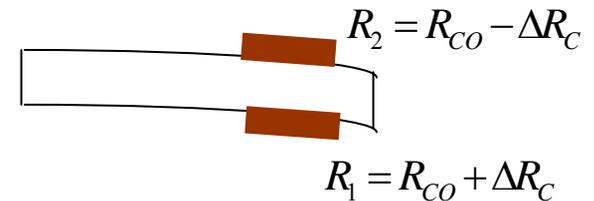
$$R_2 = R_{CO} - \Delta R_C$$

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

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

- Legge lineare
- Sensibilità costante

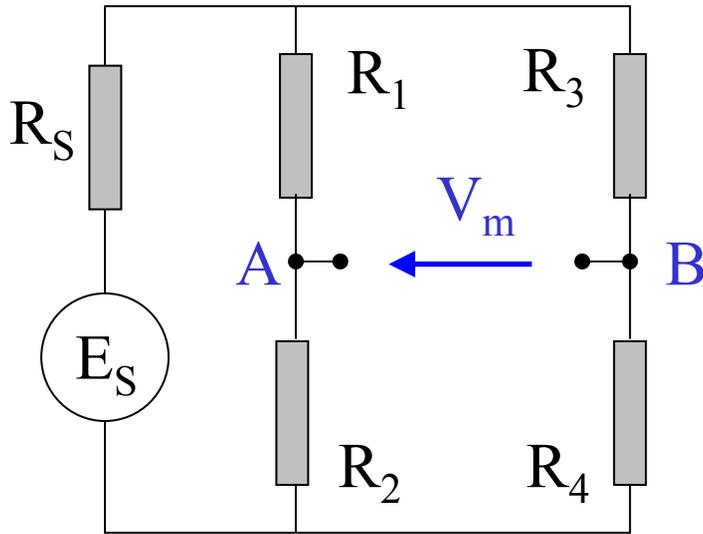
Esempio: coppia di estensimetri



# 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  $V_m$ .

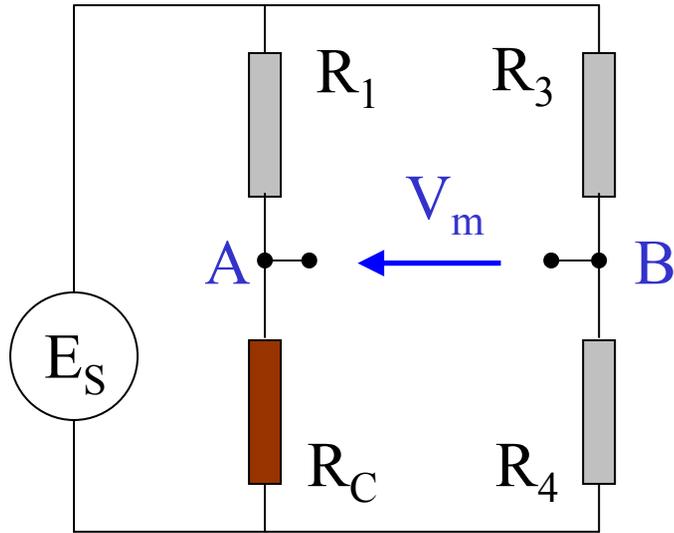
Il valore misurato è meno dipendente dalla deriva dell'alimentazione e dai parametri parassiti.

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



$$R_C = R_O + \Delta R_C$$

$$R_1 = R_3 = R_4 = R_O$$

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

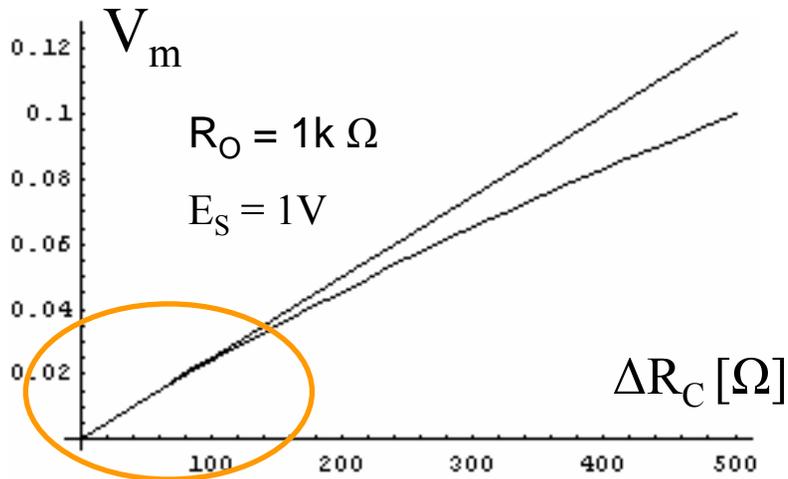
$$\begin{aligned} V_m &= E_s \left\{ \frac{(R_O + \Delta R_C)R_O - R_O^2}{(2R_O + \Delta R_C)2R_O} \right\} = E_s \frac{R_O \Delta R_C}{4R_O^2 + 2R_O \Delta R_C} = \\ &= \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O + \frac{\Delta R_C}{2}} = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_C}{R_O} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R_C}{2R_O}\right)} \end{aligned}$$

# 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:

$$\Delta R_C \ll 2R_O$$



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:

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

# Compensazione delle grandezze di influenza

Si utilizzano due trasduttori identici:

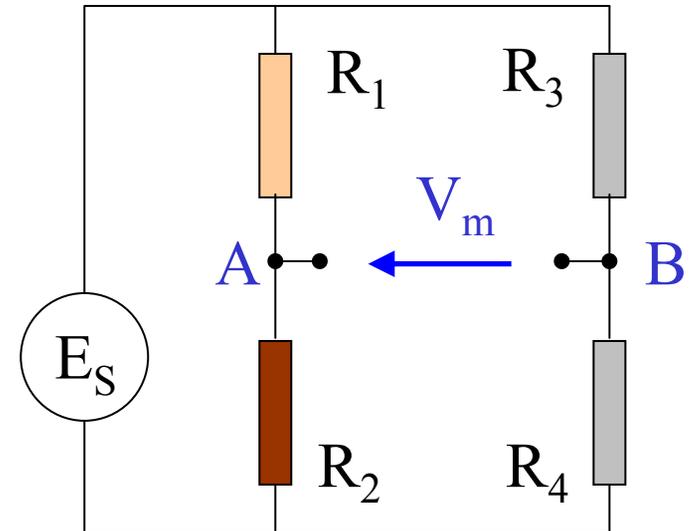
- Il primo sottoposto al misurando  $m$  ed alla grandezza di influenza  $g$ .
- Il secondo (**di compensazione**) sottoposto alla sola grandezza di influenza  $g$ .

$$R_2 = R_0 + \Delta R_2, \quad \text{con } \Delta R_2 = S_g \Delta g + S \Delta m$$

$$R_1 = R_0 + \Delta R_1, \quad \text{con } \Delta R_1 = S_g \Delta g$$

$$R_3 = R_4 = R_0$$

Si ottiene l'indipendenza della  $V_m$  da  $g$ .



*continua ...*

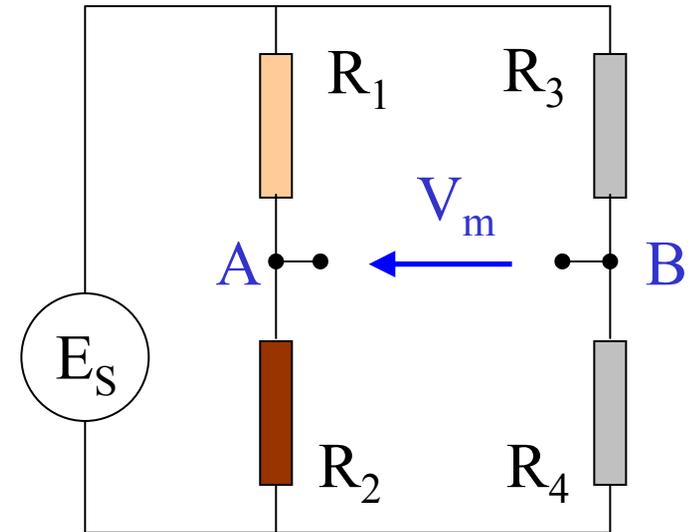
# Compensazione delle grandezze di influenza

Si ha:

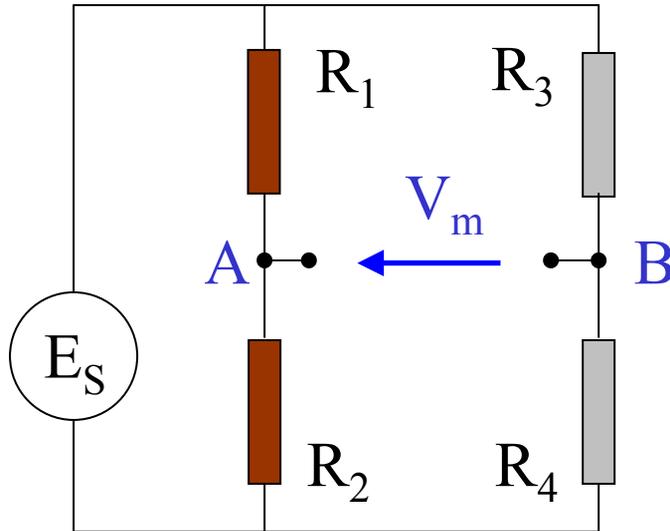
$$dV_m = \left[ \frac{\partial V_m}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial g} + \frac{\partial V_m}{\partial R_2} \frac{\partial R_2}{\partial g} \right] dg = 0$$

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

$$\text{cioè se } \begin{cases} \frac{\partial R_1}{\partial g} = \frac{\partial R_2}{\partial g} \Rightarrow \text{sensori identici} \\ \frac{\partial V_m}{\partial R_1} = -\frac{\partial V_m}{\partial R_2} \Rightarrow \text{vera se } R_1 = R_2 \end{cases}$$



# Ponti: montaggio *push-pull* a mezzo ponte



Sono presenti due elementi stesso lato che presentano variazioni opposte:

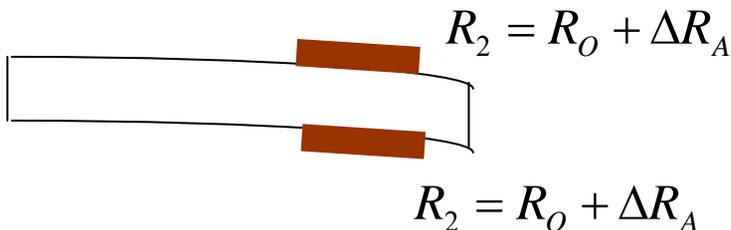
$$R_1 = R_O - \Delta R_A$$

$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$

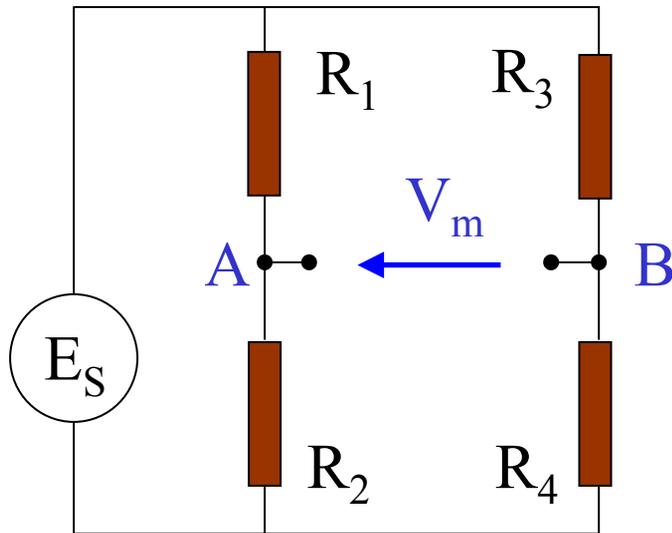
Risulta:

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

Esempio: coppia di estensimetri



# Ponti: montaggio *push-pull* a ponte intero



Elementi sullo stesso lato presentano variazioni opposte:

$$R_1 = R_O - \Delta R_A$$

$$R_2 = R_O + \Delta R_A$$

$$R_3 = R_O + \Delta R_B$$

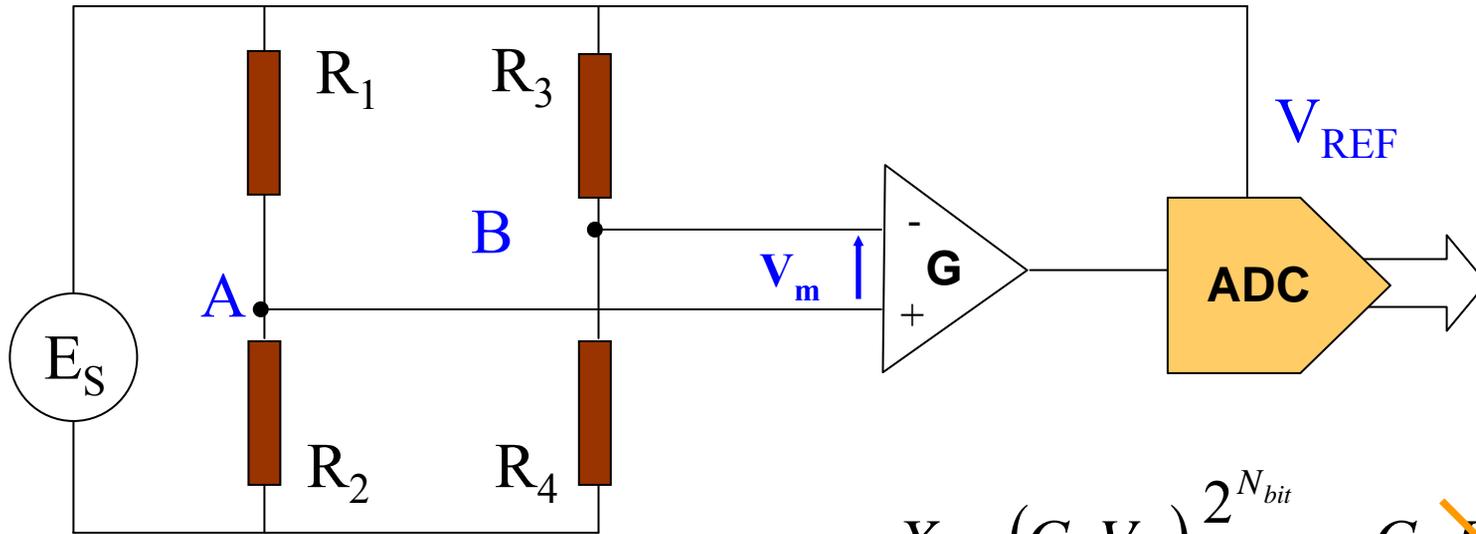
$$R_4 = R_O - \Delta R_B$$

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

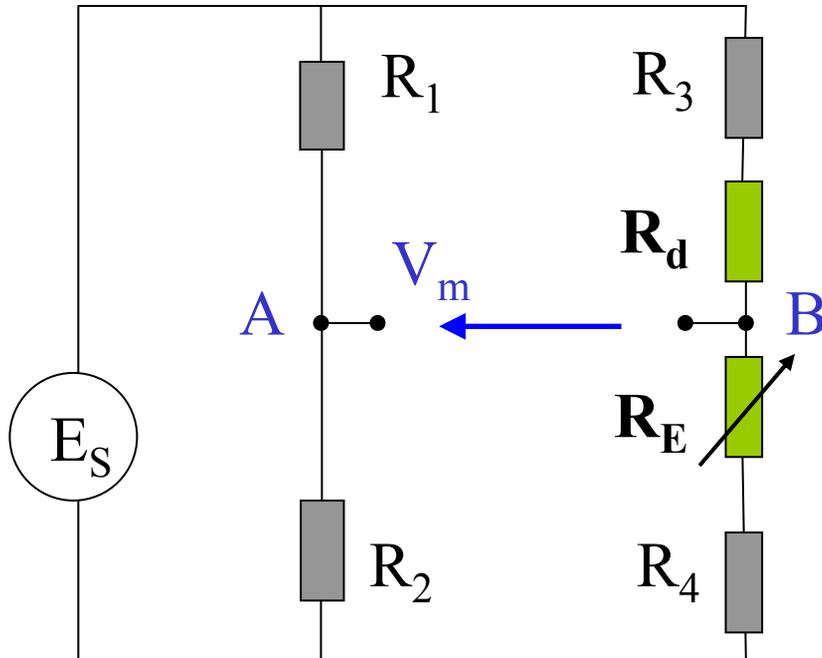


$$X = (G \cdot V_m) \frac{2^{N_{bit}}}{V_{REF}} = G \cdot \cancel{E_S} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{2^{N_{bit}}}{\cancel{E_S}}$$

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

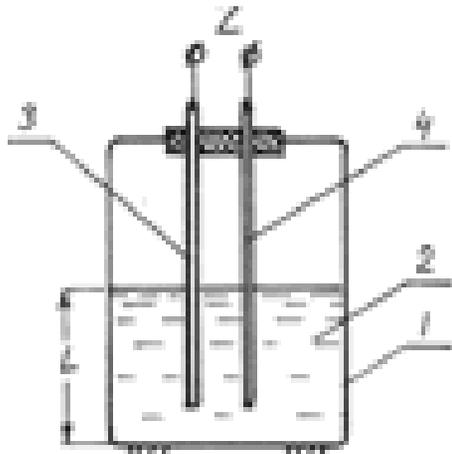
- La resistenza  $R_d$  si sceglie con coefficiente termico opportuno per compensare la dipendenza di  $V_m$  dalla temperatura.

- La  $R_E$  si regola in modo da azzerare il ponte per la condizione iniziale, in modo da avere la massima sensibilità.

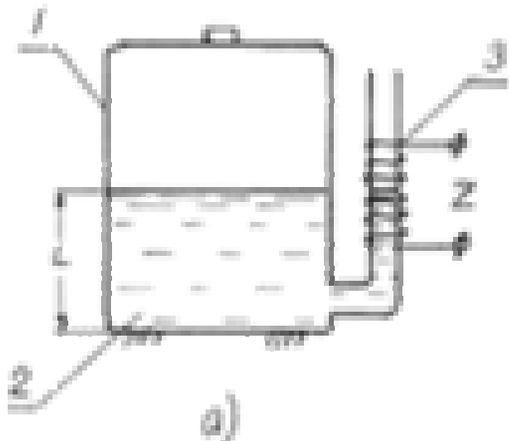
# Sensori induttivi e capacitivi

- Rispetto ai sensori resistivi, spesso introducono minori effetti di consumo
- Intrinsecamente non lineari, richiedono montaggi differenziali
- Richiedono alimentazione **ac**
- Limite in frequenza ( $f_{\text{misurando}} < f_{\text{alimentazione}}$ )
- Diffusi come sensori di posizione, spostamento, prossimità, livello, ...

# Sensori di livello



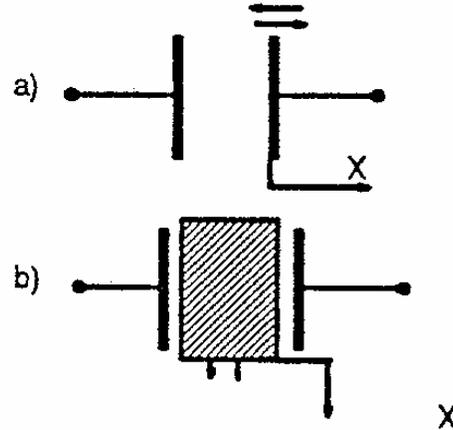
Misura della variazione di impedenza tra due elettrodi immersi in un liquido.



Misura del livello di liquidi elettroconduttivi attraverso una variazione di induttanza.

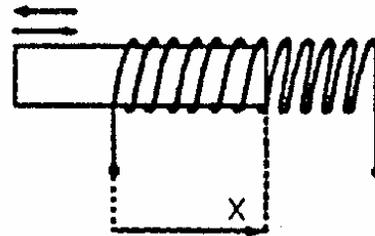
## La capacità come sensore

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

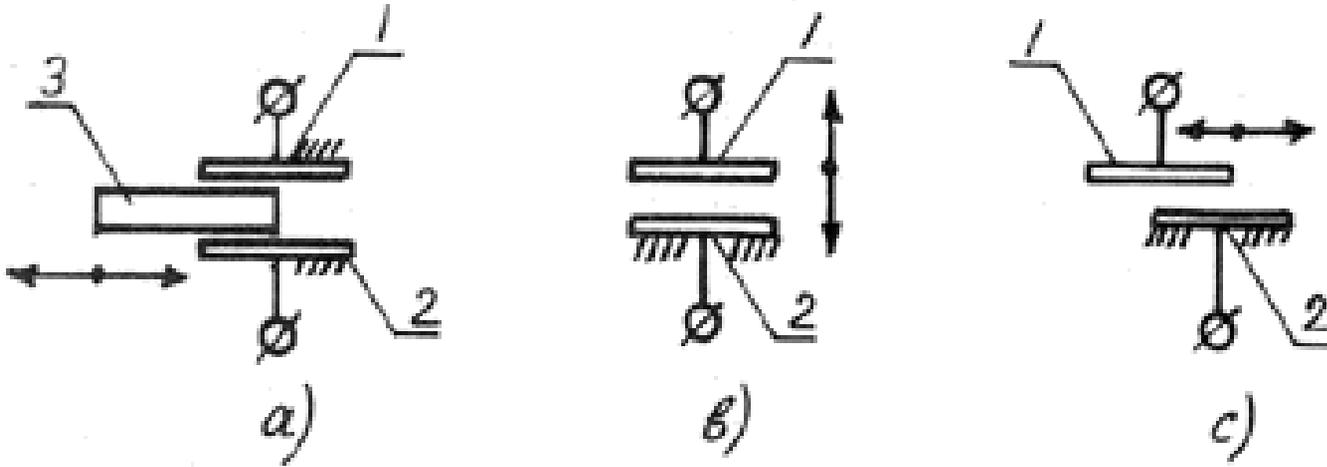


## Variazione di induttanza

$$L = \mu \mu_0 n^2 \frac{A}{\ell}$$



# Sensori capacitivi di spostamento lineare

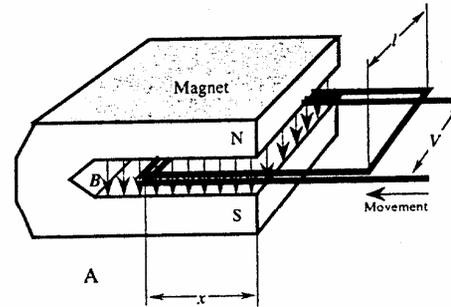


$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

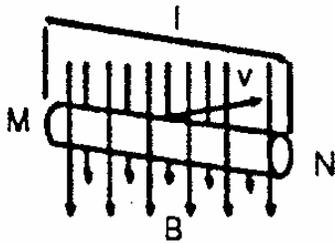
Principio fisico: variazione di  $C$  rispetto ad una delle tre grandezze  $\varepsilon$ ,  $A$ ,  $d$ .

# Induzione elettromagnetica (Faraday 1791-1867)

- E' possibile risalire a spostamenti, deformazioni, forze, pressioni, velocità (v)



$$e = nBlv$$

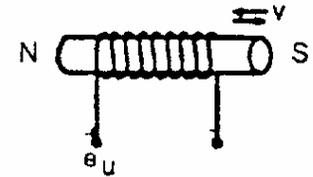


$$e_{MN} = B l v$$

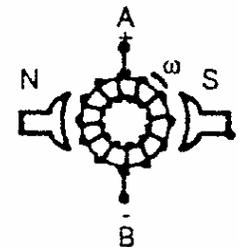


$e_{MN}$  proporzionale a  $v_m$   
 Condotta non metallica  
 Fluido conduttore

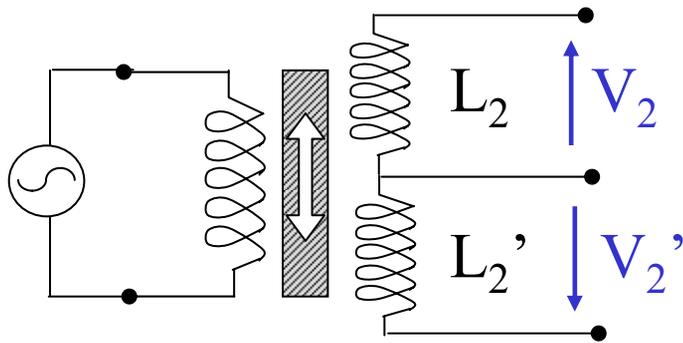
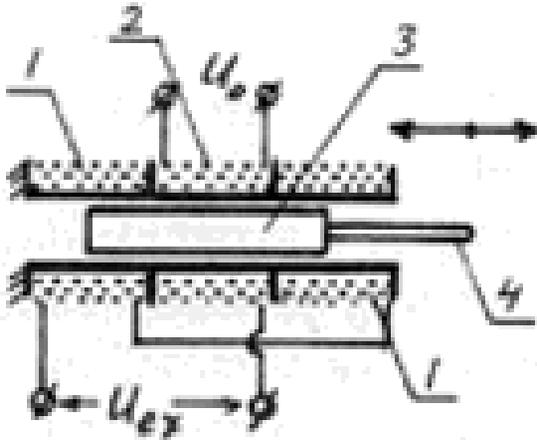
$$e_u = k v$$



$$e_{AB} = k \omega$$



# Trasduttore a trasformatore



- La variazione della posizione del nucleo ferromagnetico (misurando) provoca una variazione della mutua induttanza tra gli avvolgimenti.
- Alimentato in tensione alternata, lega la ampiezza della tensione in uscita allo spostamento.
- Noto come **LVDT** (*Linear Variable Differential Transformer*), consente misure di tipo **differenziale** (*push-pull*).

# Problemi con i sensori di tipo reattivo

- E' necessario alimentare con tensione o corrente alternata:
  - ✓ A valle del circuito di condizionamento si ha una grandezza **alternata**.
  - ✓ Estrazione del valore efficace o del valore di picco.
- Le variazioni di impedenza da misurare sono in genere molto piccole, spesso confrontabili con **capacità parassite**.
- La frequenza della alimentazione deve essere scelta in modo da rendere massima la variazione di impedenza. In genere si devono impiegare valori di frequenza elevati:
  - ✓ Aumento dei fenomeni parassiti.

# Condizionamento per sensori induttivi e capacitivi

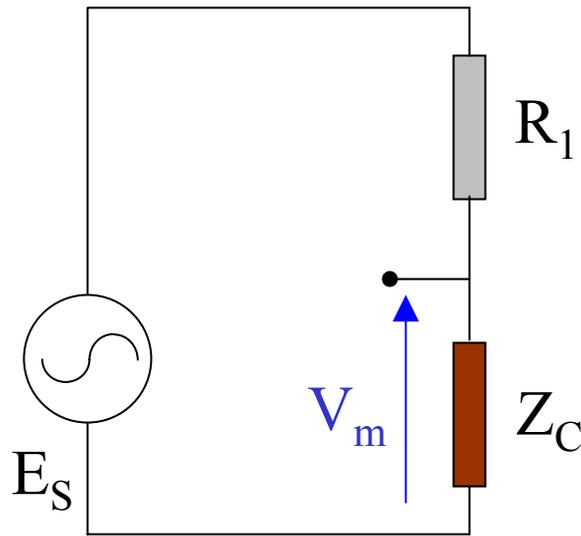
Montaggi **potenziometrici**.

Montaggi **galvanometrici**.

Metodi di **ponte**.

**Oscillatori**.

# Montaggio potenziometrico: caso $Z_1=R_1$



$$Z_C = Z_{CO} + \Delta Z$$

$$\Delta V_m = E_S \frac{R_1 \Delta Z}{(Z_{CO} + R_1)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z}{Z_{CO} + R_1}}$$

$$\text{Se } R_1 \gg |Z_{CO}|:$$

$$\Delta V_m = \frac{\bar{E}_S}{R_1} \Delta Z = I_S \Delta Z$$

L'impedenza  $Z_C$  è alimentata a corrente costante.

Dunque, si può ottenere uno schema equivalente con un generatore di corrente.

# Montaggio potenziometrico: caso $Z_1=R_1$ (dettagli)

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

$$V_m = V_{mo} + \Delta V_m = E_S \frac{Z_{CO} + \Delta Z}{Z_{CO} + \Delta Z + R_1}$$

$$\Delta V_m = V_m - V_{mo} = E_S \left\{ \frac{Z_{CO} + \Delta Z}{Z_{CO} + \Delta Z + R_1} - \frac{Z_{CO}}{Z_{CO} + R_1} \right\}$$

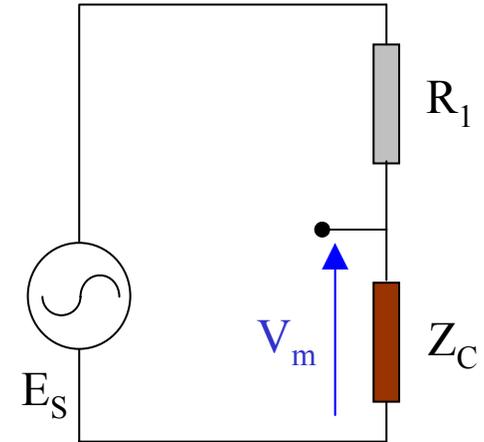
$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{(Z_{CO} + \Delta Z)(Z_{CO} + R_1) - Z_{CO}(Z_{CO} + \Delta Z + R_1)}{(Z_{CO} + \Delta Z + R_1)(Z_{CO} + R_1)} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{Z_{CO}^2 + Z_{CO}R_1 + Z_{CO}\Delta Z + R_1\Delta Z - Z_{CO}^2 - Z_{CO}\Delta Z - Z_{CO}R_1}{(Z_{CO} + \Delta Z + R_1)(Z_{CO} + R_1)} \right\}$$

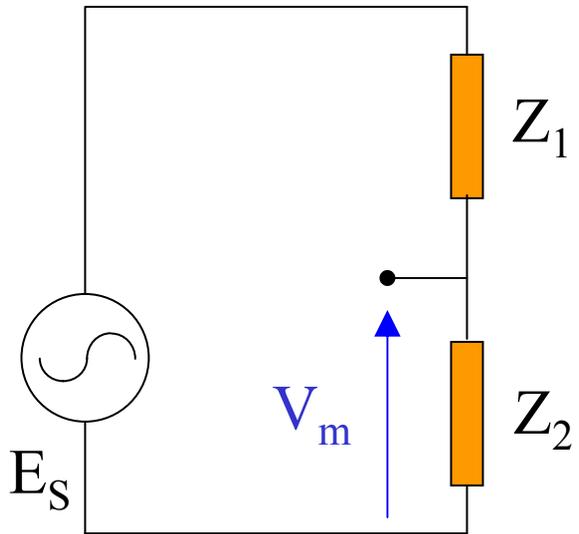
$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{R_1\Delta Z}{(Z_{CO} + \Delta Z + R_1)(Z_{CO} + R_1)} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \left\{ \frac{R_1\Delta Z}{(Z_{CO} + R_1)(Z_{CO} + R_1)} \cdot \frac{Z_{CO} + R_1}{Z_{CO} + \Delta Z + R_1} \right\}$$

$$\Delta V_m = E_S \frac{R_1\Delta Z}{(Z_{CO} + R_1)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z}{Z_{CO} + R_1}}$$



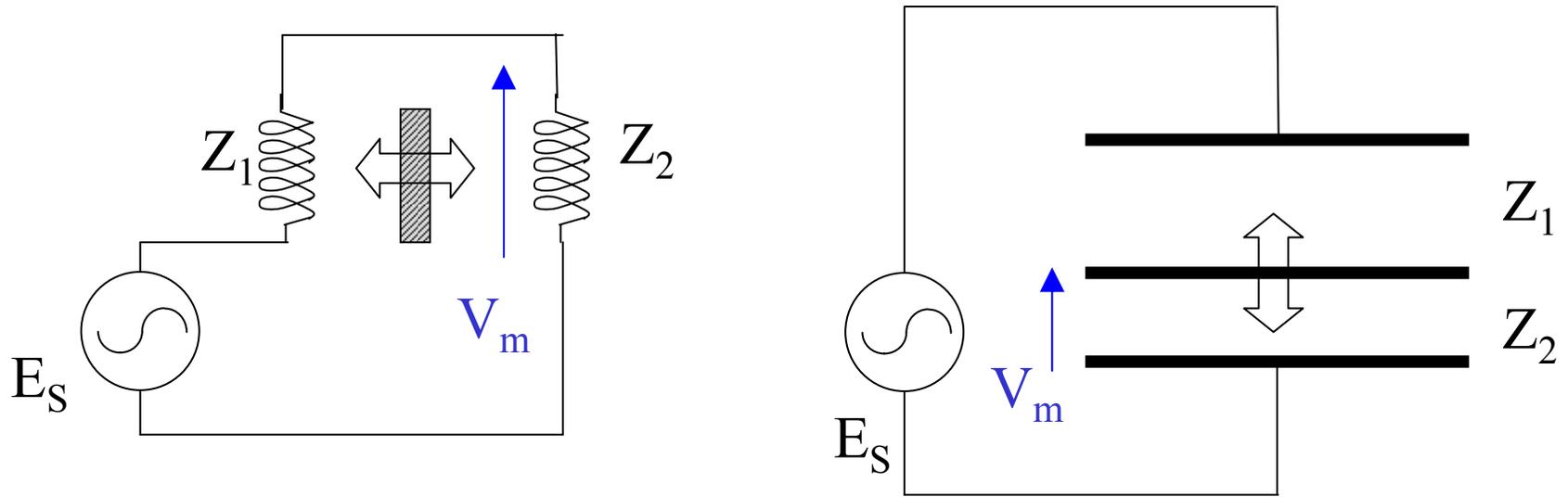
# Montaggio potenziometrico: due sensori



Possibilità:

- Compensazione delle grandezze di influenza
- Miglioramento della linearità, con il montaggio *push-pull*

# Montaggio potenziometrico: *push-pull*

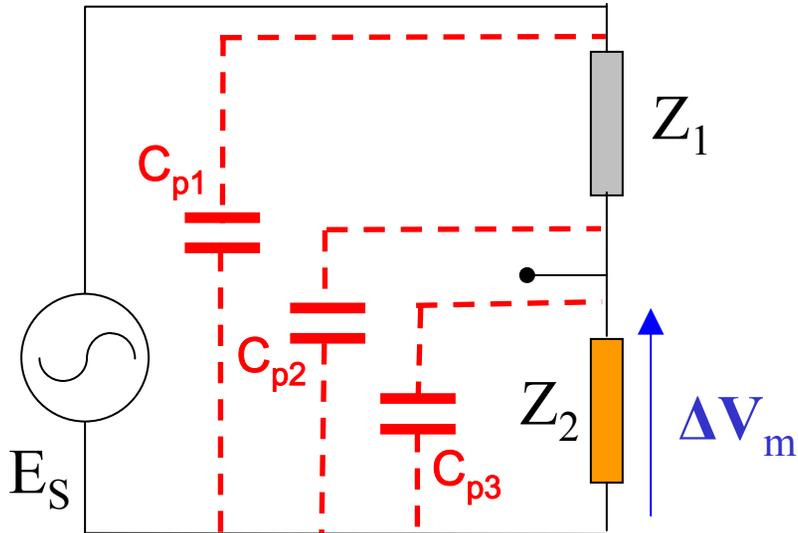


Con i sensori di tipo reattivo si preferiscono le misure di tipo differenziale:

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z;$$

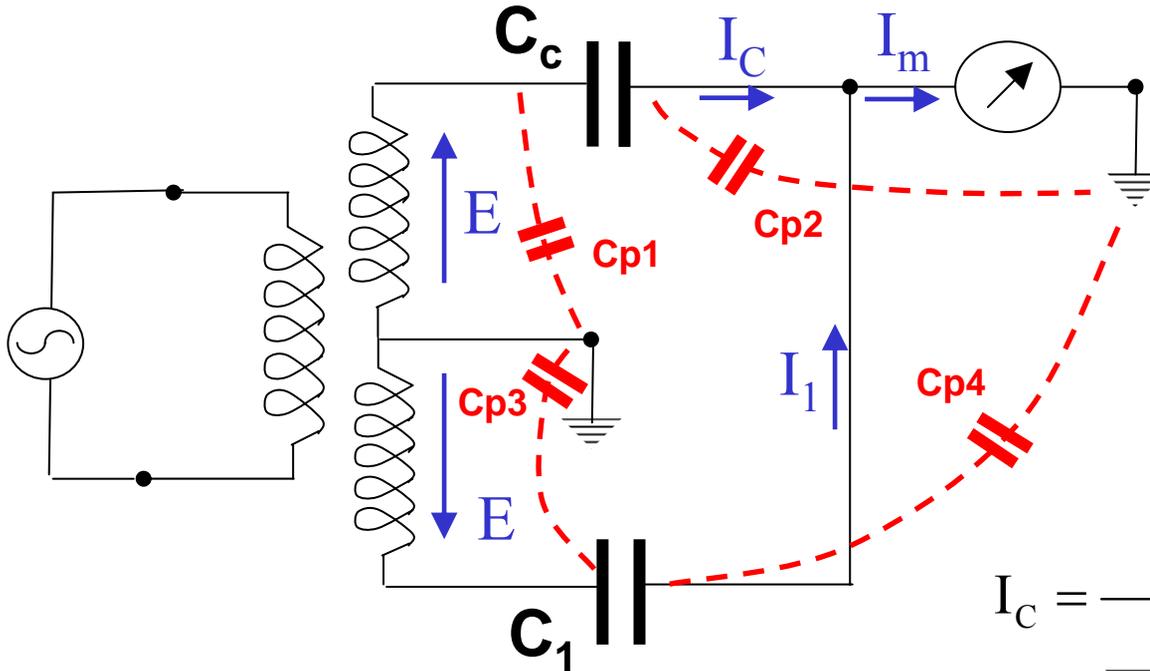
$$Z_2 = Z_0 - \Delta Z$$

# Montaggio potenziometrico: *capacità parassite*



- $C_{p1}$  è in parallelo all'alimentazione e non dà problemi
- $C_{p2}$  e  $C_{p3}$  sono in parallelo a  $Z_2$ : la variazione di  $V_m$  dovuta a  $C_{p2}$ , dunque  $C_{p3}$  risulta indistinguibile da quella dovuta alla  $Z_2$

# Montaggio galvanometrico



- $C_{p1}$  e  $C_{p3}$  in parallelo all'alimentazione
- $C_{p2}$  e  $C_{p4}$  sono quasi cortocircuitate se la resistenza interna del galvanometro è molto piccola

$$I_C = \frac{E}{\frac{1}{j\omega C_C}} = E \cdot j\omega C_C$$

$$I_1 = -E \cdot j\omega C_1$$

$$I_m = I_C + I_1 = E \cdot j\omega (C_C - C_1)$$

$$\text{Se } C_C = C_{C0} + \Delta C \quad \text{e} \quad C_1 = C_{C0} :$$

$$\boxed{I_m = E \cdot j\omega \Delta C} \quad \Rightarrow \text{Lineare}$$

# Montaggio galvanometrico *push-pull*

$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{D-d} = C_0 \frac{1}{1-\frac{d}{D}}$$

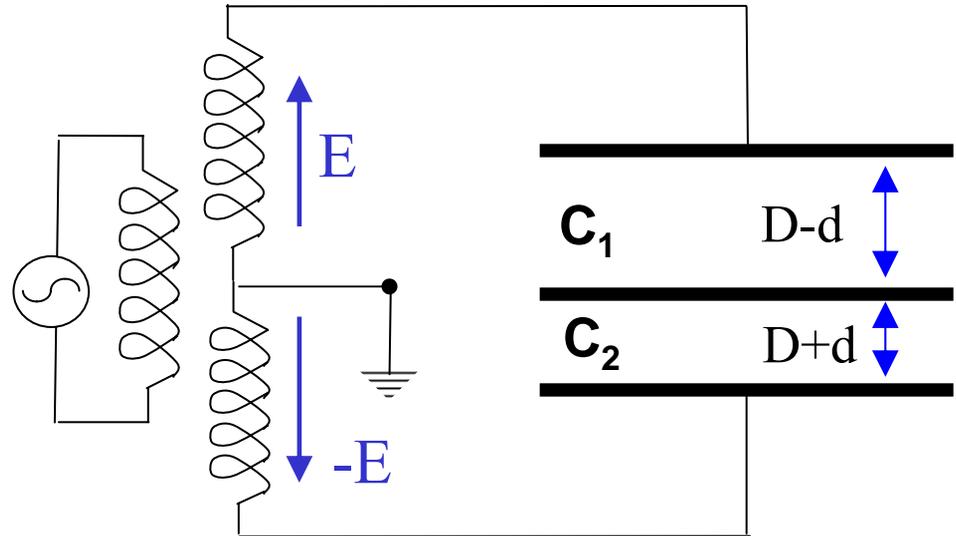
$$C_2 = C_0 \frac{1}{1+\frac{d}{D}}$$

Poiché, se  $\alpha^2 \ll 1 \Rightarrow (1+\alpha)^n \cong 1+n\alpha$ ,

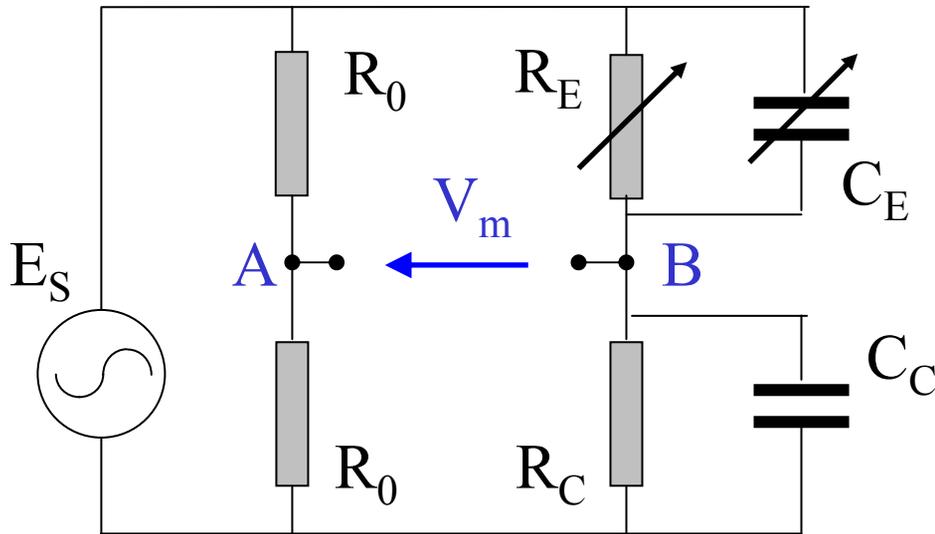
allora, se  $\left(\frac{d}{D}\right)^2 \ll 1$ :

$$C_1 - C_2 \cong C_0 \left(1 - \frac{d}{D} - 1 - \frac{d}{D}\right) = -2C_0 \frac{d}{D}$$

$$I_m = Ej\omega(C_1 - C_2) = 2 \cdot Ej\omega \cdot C_0 \frac{d}{D} \quad \Rightarrow \text{Lineare}$$



# Esempio di ponte per sensori capacitivi: ponte di Nernst



Sotto le ipotesi consuete:

$$V_m = \frac{E_s}{4} \frac{\Delta Z}{Z_{co}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta Z}{2Z_{co}}}$$

Per piccoli segnali il montaggio è lineare.

# Sensori attivi

- Effetto termoelettrico

*Una f.e.m. funzione della temperatura appare ai capi di giunzioni tra metalli diversi.*

- Effetto piezoelettrico

*Una polarizzazione elettrica proporzionale ad una sollecitazione meccanica appare in particolari materiali.*

- Effetto piroelettrico

*Una polarizzazione elettrica proporzionale alla temperatura appare in particolari materiali.*

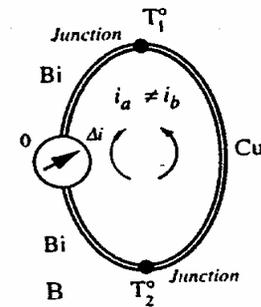
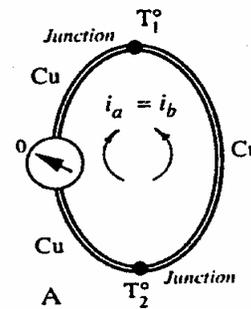
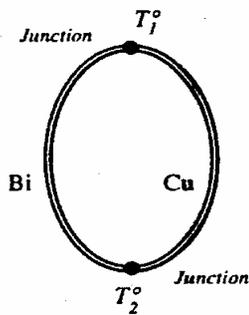
- Effetto fotovoltaico

*Insorgere di una tensione proporzionale alla radiazione e.m. incidente*

- ...

# Effetti termoelettrici (Seebeck 1826, Peltier 1834)

- Un conduttore, con una estremità posta ad una temperatura  $T_1$  e con l'altra ad una temperatura  $T_2$ , diventa sede di un passaggio di energia dalla parte calda alla parte fredda
- il gradiente termico genera un campo elettrico che si manifesta con un incremento di tensione

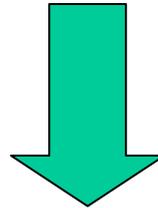


$$dV_a = \alpha_a dT$$

Usando due materiali differenti A e B si ha

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT$$



**Per ottenere la migliore sensibilità**

**si scelgono materiali con coefficienti di segno opposto**

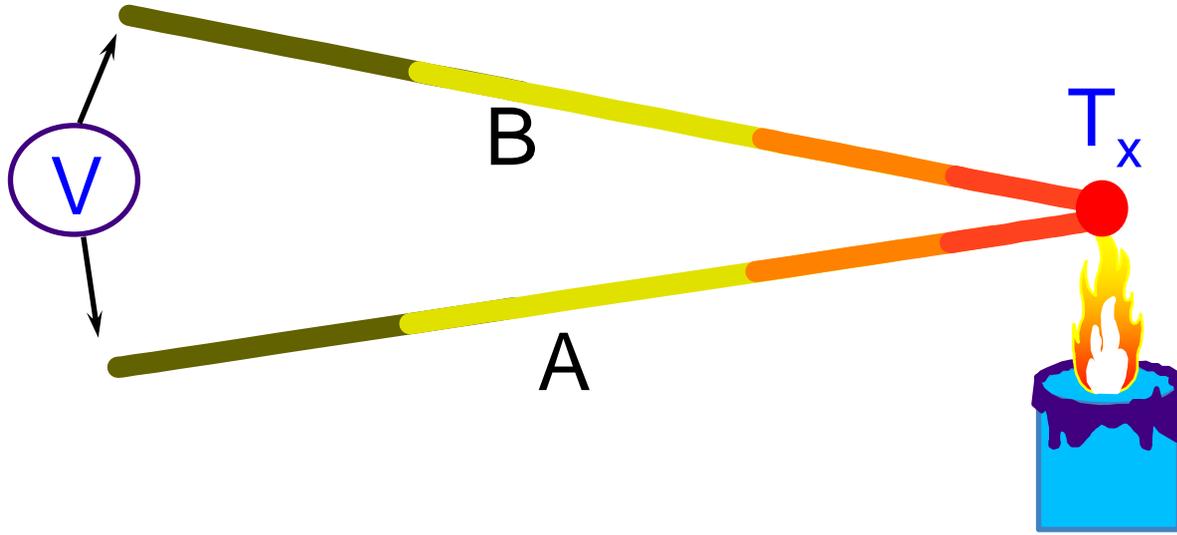
- **Effetto Peltier:** Consiste nel manifestarsi di una certa quantità di calore, assorbita o ceduta da una termocoppia quando questa è attraversata da corrente elettrica
- **esempio:** frigoriferi termoelettrici di piccole dimensioni e limitato assorbimento di potenza

# Termocoppie

<b>Tipo</b>	<b>Materiale bimetallo</b>	<b>Campo T°C</b>	<b>V<sub>u</sub> [mV]</b>	<b>Caratteristiche</b>
J	Ferro-Costantana	-200...780	30 con $\Delta T=500^{\circ}\text{C}$	Economica
T	Rame-Costantana	-200...400	15 con $\Delta T=320^{\circ}\text{C}$ Sens.: $45\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	Piccole dimensioni
E	Cromel-Costantana	-200...1250	>70 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Elevata f.e.m.
S	Pt-Pt90%, Rd10%	0...1760	10 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Robusta, affidabile, costosa, poco sensibile
C	Tungsteno- Tungsteno,Iridio	0...2400	Dipende dalla % della lega	Alta temperatura

# Termocoppie: l'effetto Seebeck

Ai capi di una giunzione tra due metalli diversi A e B appare una f.e.m. che dipende dalla natura dei metalli e dalla temperatura  $T_x$

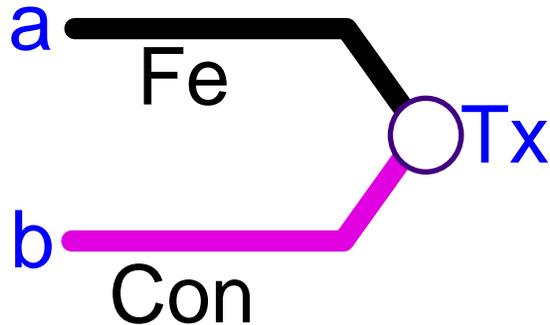


# Termocoppie: effetto Peltier ed effetto Thomson

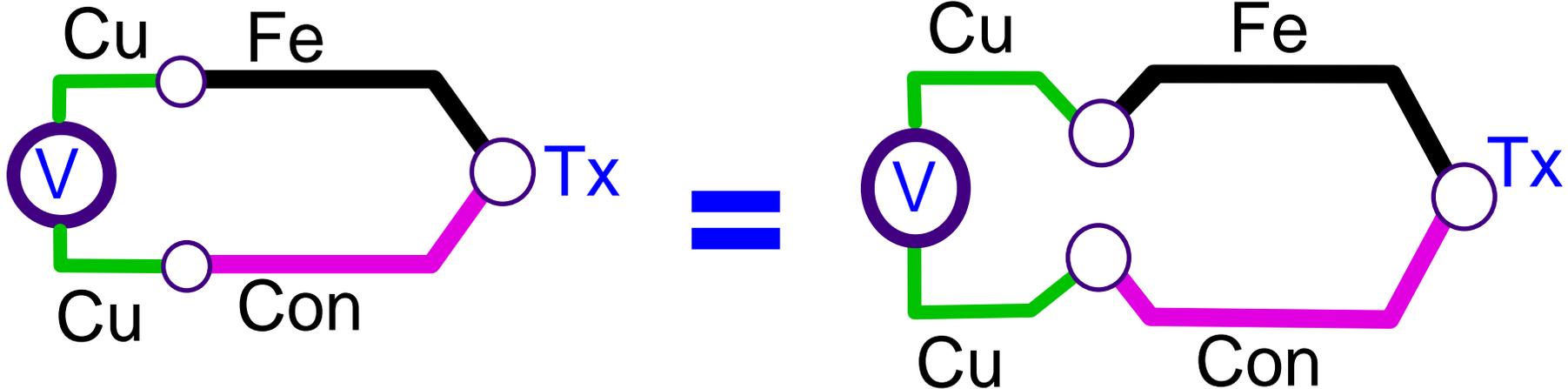
Si può dimostrare che l'effetto Seebeck è una conseguenza dei seguenti:

- Effetto **Peltier**: una giunzione di due metalli diversi si riscalda o raffredda se è attraversata da una corrente.
- Effetto **Thomson**: un conduttore di composizione omogenea, ma con temperatura non omogenea, cede o assorbe calore se attraversato da corrente.

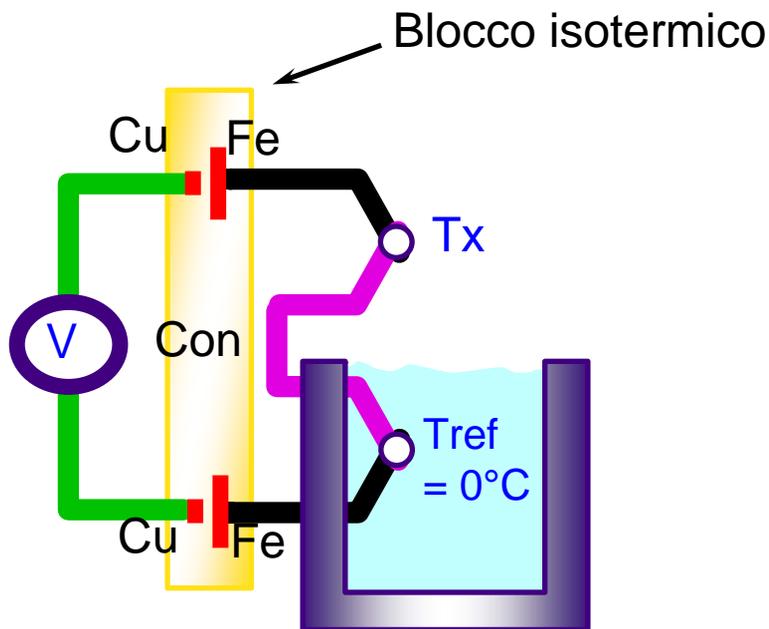
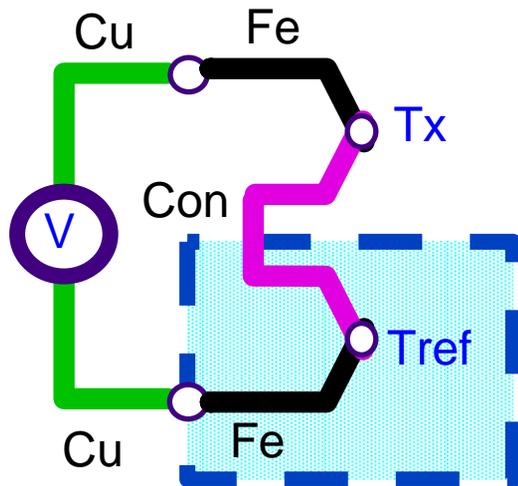
# Problemi di misura



Se si collega un voltmetro per la misura di  $V_{ab} = f(T_X)$ , si realizzano inevitabilmente altre due giunzioni a temperatura incognita.

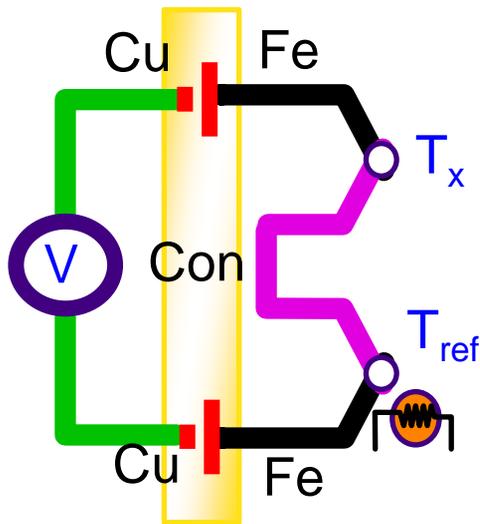


# Soluzione “classica”



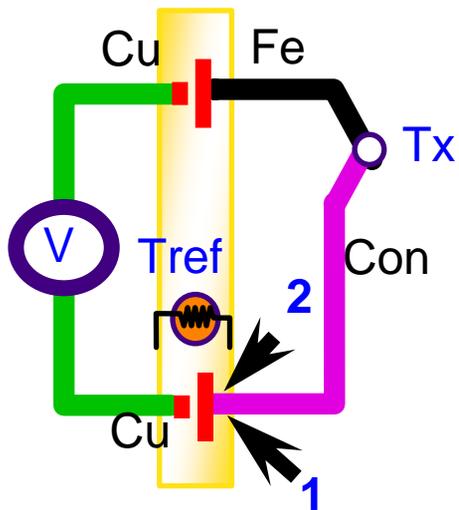
- Si aggiunge una seconda termocoppia di riferimento (“*giunto freddo*”), posta ad una temperatura fissa
- Se le altre due giunzioni (Cu-Fe, nell’esempio) sono mantenute ad una identica temperatura, allora i loro effetti si cancellano e la  $V$  misurata dipende solo da  $T_X$
- Le termocoppie sono corredate di tabelle  $V - T_X$  per una  $T_{REF}$  a  $0^\circ\text{C}$  (*ghiaccio fondente*).
- Si tratta di una soluzione accurata ma poco pratica.

# Compensazione del giunto freddo



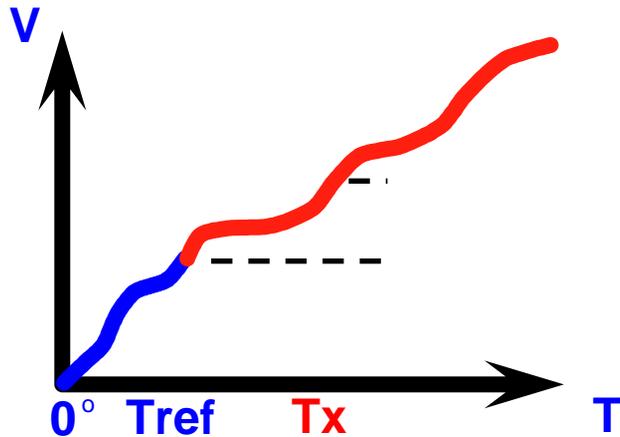
Invece di forzare la giunzione di riferimento ad una data temperatura  $T_{REF}$ :

1. Si misura  $T_{REF}$  (RTD, termistore,...)
2. Si compensa matematicamente: è sufficiente conoscere le tabelle  $V - T_x$  per una  $T_{REF}$  a  $0^\circ\text{C}$  per le due termocoppie.



E' possibile, inoltre, eliminare la termocoppia di riferimento, usando una delle due giunzioni di misura come riferimento.

# Linearizzazione



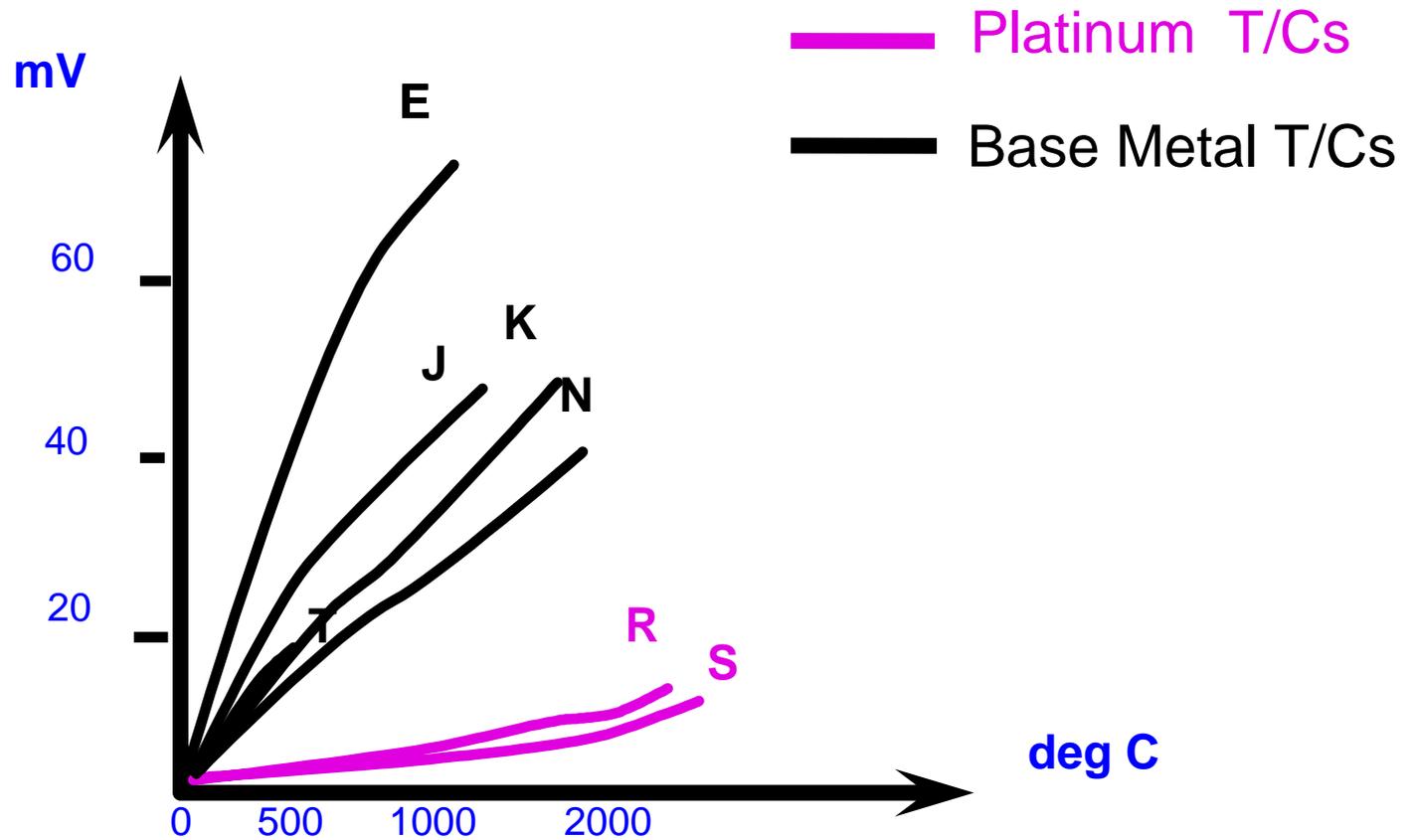
Le termocoppie sono sensori non lineari, e richiedono polinomi di grado relativamente elevato rappresentare la loro caratteristica.

- Polinomiale:  $T = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + \dots + a_n V^n$
- “*Nested*” (più veloce):  $T = a_0 + V (a_1 + V (a_2 + V (a_3 + \dots)))$
- Per tratti (più veloce):  $T = T_0 + bV + cV^2$
- Lookup table: Molto veloce, impegna memoria
- Combinazioni dei precedenti

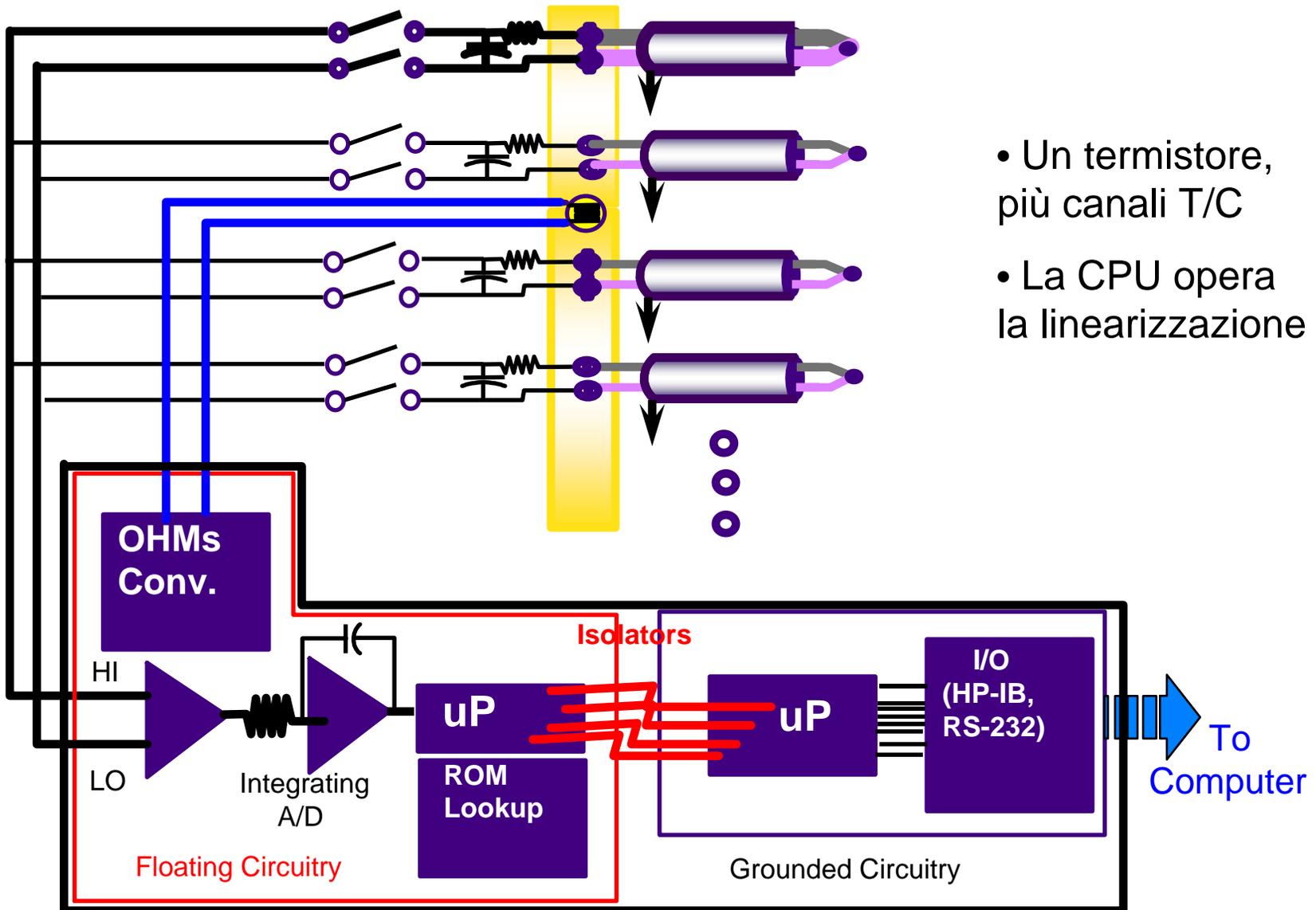
# Tipi di termocoppie

<u>Codice ANSI</u>	<u>Composizione</u>	<u>Range °C</u>	<u>mV @ full range</u>
B	Pt / Rhodium	38 – 1800	3.6
C	W / rhenium	0 – 2300	37.0
E	Chromel / Constantan	0 – 982	75.0
J	Iron / Constantan	0 – 760	43.0
K	Chromel / Alumel	-184 – 1260	56.0
N	Nicrosil (Ni/Cr/Si) / Nisil (Ni/Si/Mg)	-270 – 1300	51.8
R	Pt / Rhodium	0 – 1593	18.7
S	Pt / Rhodium	0 – 1538	16.0
T	Cu / Constantan	-184 – 400	26.0

# Tipi di termocoppie



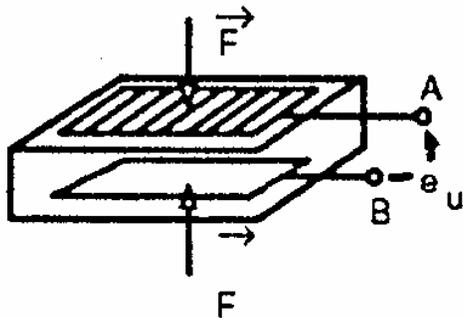
# Sistema di acquisizione dati per termocoppie



## Effetto piezoelettrico (Curie, 1880)

- Esiste in cristalli naturali (quarzo) e in ceramiche e polimeri artificiali opportunamente polarizzati (anisotropia del quarzo)
- Consiste nella generazione di carica elettrica da parte di un materiale cristallino sottoposto ad una sollecitazione meccanica
- E' un effetto reversibile:

energia meccanica  $\longleftrightarrow$  energia elettrica



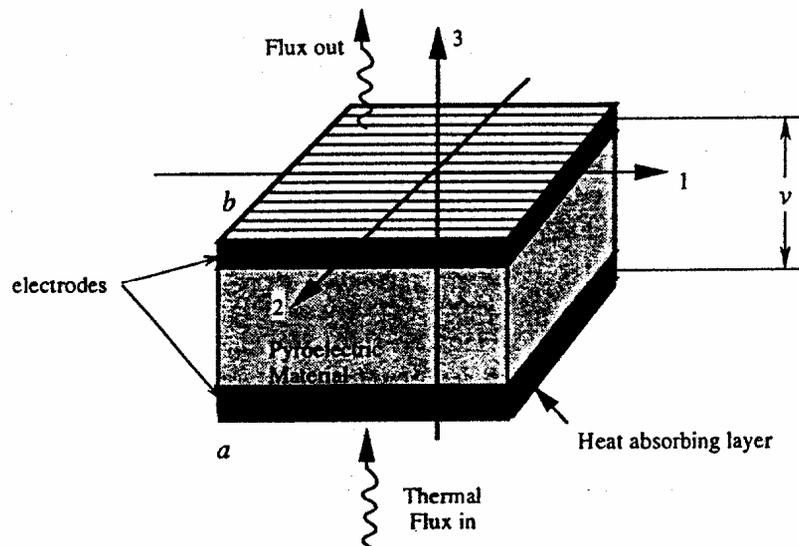
$$e_u = kF$$

$$e_u = \text{f.e.m. ai morsetti A e B}$$

$$F = \text{Forza applicata}$$

# Effetto piroelettrico

- Tra i cristalli piezoelettrici ve ne sono alcuni (in 10 delle 32 classi cristalline) che presentano un'unica direzione privilegiata per l'orientamento dei momenti elettrici.
- Consiste nella generazione di carica elettrica per effetto di un flusso di calore (cariche indotte termicamente).
- Il materiale non necessita di eccitazione esterna
- contrariamente ai termoelettrici (es. termocoppie), le cariche vengono generate in risposta ad una variazione di temperatura

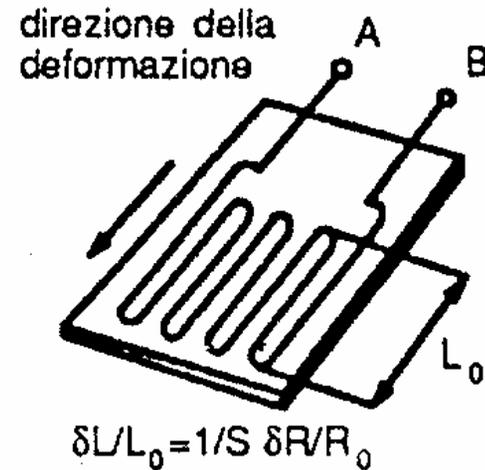


# Effetto piezoresistivo (Strain-gauge, Strain-gage)

E' l'effetto di variazione della resistività di un opportuno materiale quando è soggetto ad una deformazione dovuta ad uno sforzo ad esso applicato (ridotto nei materiali metallici, più consistente nei semiconduttori).

- Sforzo:  $\sigma = \frac{F}{a} = E \frac{d\ell}{\ell}$
- dove E = modulo di Young del mate:
- F = forza applicata
- a = sezione interessata

$$\frac{d\ell}{\ell} = \varepsilon \quad \text{È chiamato tensione (deformazione normalizzata)}$$



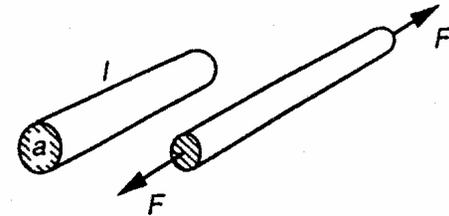
## Effetto piezoresistivo (2)

- Il conduttore cilindrico che subisce una elongazione  $d\ell$  (supponendo che il volume  $V$  rimanga costante) possiede una resistenza pari a:

$$R = \frac{\rho}{V} \ell^2$$

da cui si ricava la sensibilità:

$$\frac{dR}{d\ell} = 2 \frac{\rho}{V} \ell$$



che è tanto migliore quanto più lungo e stretto è il cilindro e quanto maggiore è la resistività del materiale.

Si può esprimere come:

$$\frac{dR}{R} = S_e \varepsilon$$

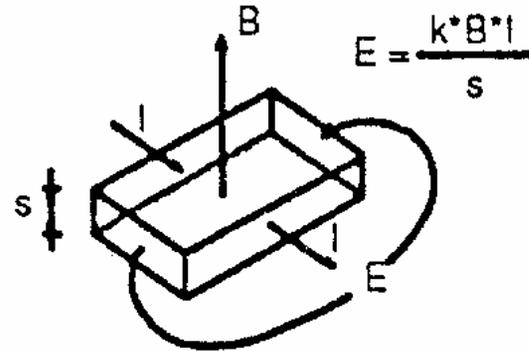
$S_e =$  **Sensibilità** (gauge factor) [2-6 per metalli, 40-200 per semiconduttori]

- applicazioni:** accelerometri, microfoni.

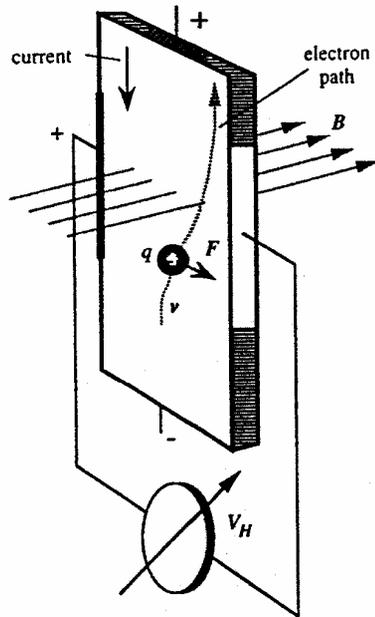
## **Effetto piezoresistivo (3)**

- E' formato da un resistore saldato su un substrato portante elastico, che viene fissato sull' oggetto che si deforma
- il resistore è in tal modo isolato elettricamente dall' oggetto
- il coefficiente di espansione termica del substrato deve essere coincidente con quello del materiale di cui è fatto il resistore
- la resistenza varia in genere da 100 a migliaia di ohm.
- Per avere una buona sensibilità il sensore deve avere lunghi segmenti longitudinali e corti segmenti trasversali, così la sensibilità trasversale è solo di pochi percento di quella longitudinale

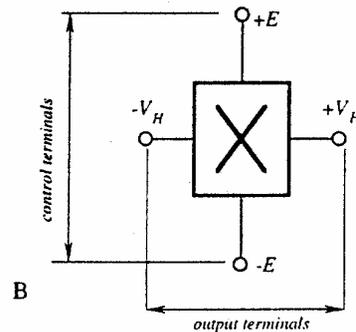
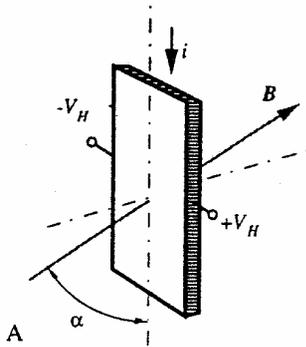
## Effetto Hall (E.Hall 1879)



- In un materiale conduttore sottoposto ad un campo di induzione magnetica  $B_z$  normale al flusso di una corrente elettrica di intensità  $I_x$ , si manifesta una d.d.p.  $V_y$  in direzione perpendicolare alle direzioni sia di  $B_z$  sia di  $I_x$ .
- Il fenomeno è dovuto al fatto che le cariche elettriche, in movimento per la presenza della corrente, si accumulano su di una faccia del materiale per effetto del campo magnetico, finchè non si determina un campo elettrico agente sugli elettroni tale da opporsi e compensare la forza dovuta al campo magnetico.
- Sensori Hall sono usati per rilevare campi magnetici, posizione e spostamento di oggetti

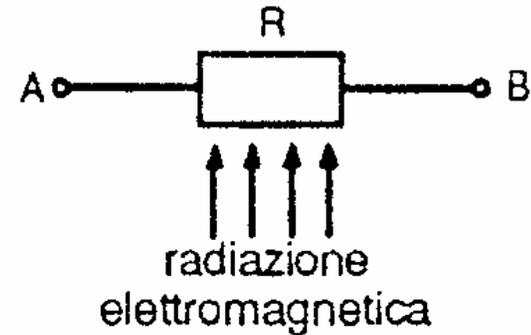


- La tensione di Hall può essere prelevata con opportuni elettrodi. (Bassa nei conduttori e negli isolanti, buona nei semiconduttori)
- non sono molto lineari rispetto all'intensità del campo  $B$  e quindi richiedono una calibrazione per misure di precisione
- per misure di posizione e di spostamento devono essere forniti con una sorgente di campo magnetico ed una interfaccia elettronica
- Un dispositivo commerciale che utilizza arseniuro di indio ha una corrente di controllo di 0.1 A e presenta una tensione di Hall pari a 0.15 V per un campo di induzione magnetica di  $1 \text{ Wb/m}^2$  (T)



# Effetto fotoconduttivo

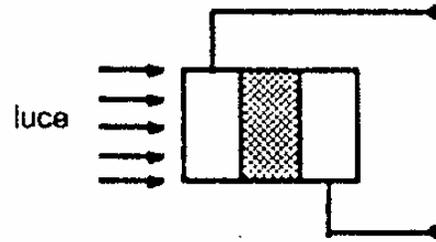
(Sensori passivi)



- Determina un passaggio di corrente elettrica in materiali investiti da radiazioni di varia lunghezza d'onda.
- Dovuto alla variazione della conduttività di materiali isolanti e semiconduttori.
- La radiazione incidente consente il passaggio di elettroni da uno stato di legame ad uno libero, questi non hanno energia sufficiente per uscire dal materiale (*fotoemissione*) ma contribuiscono alla conduzione facendo diminuire la resistività.
- E' necessario collegare il sensore ad un generatore di tensione per avere un flusso di corrente elettrica variabile con la radiazione incidente.

# Effetto fotovoltaico

(Sensori attivi)



- Conseguente alla conversione dell'energia radiante in energia elettrica che consente la realizzazione di celle solari.
- Si presenta nelle giunzioni p-n dei semiconduttori, sottoposte a radiazioni che danno luogo alla comparsa di una f.e.m.
- Illuminando la giunzione si producono coppie elettroni-buche.
- Materiali tipici sono selenio-ferro e rame-(ossido di rame)
- Fotodiodi o fototransistor sono elementi fotovoltaici usati come interruttori nei quali piccole quantità di luce sono in grado di produrre la commutazione del circuito dalla condizione di minima corrente a quella di corrente elevata

## Sistemi ad ultrasuoni (Effetto Doppler, 1842)

- Consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche, ottiche , radio dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore delle onde.



$$f_1 - f_2 = k v$$

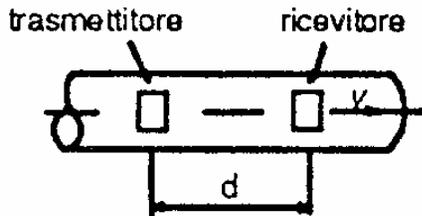
$f_1$  = Frequenza dell'onda incidente

$f_2$  = Frequenza dell'onda riflessa

$v$  = Velocità media del fluido

## Sistemi ad ultrasuoni (tempo di volo)

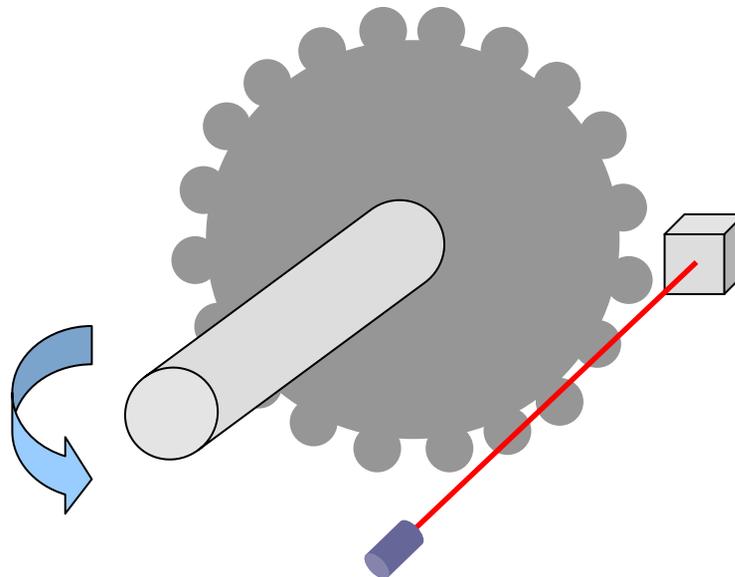
- Misura della velocità di un fluido all'interno di un condotto
- Controlli non distruttivi: misura delle inclusioni in pezzi metallici
- Trasmettitore e ricevitore sono sensori piezoelettrici che funzionano ad impulso o ad onda continua.



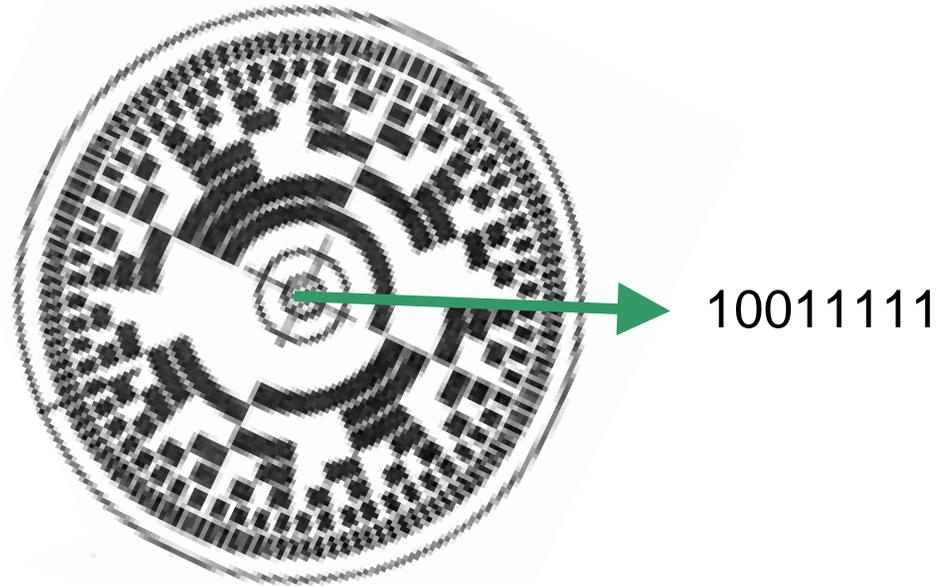
$$\Delta t = \frac{d}{c + v} ; \quad \Delta \varphi = \frac{2\pi f d}{c + v}$$

# Sensori digitali: gli *encoder* incrementali

- Misure di posizione lineare ed angolare.
- Il rilevamento dei settori può essere magnetico, elettrico oppure ottico.
- La misura è incrementale (problemi).



# *Encoder assoluti*



Le regioni sono univocamente contraddistinte da una proprietà: ad es. un codice binario.

# Riferimenti Bibliografici

- ✓ I.Gorini “Le misurazioni tramite trasduttori con uscita elettrica” in: E.Arri S.Sartori “Le misure delle grandezze fisiche”, Paravia Editore, Torino 1984.
- ✓ M.Savino “Fondamenti di scienza delle misure”, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1992.
- ✓ H.K.P. Neubert “Instrument transducers”, Clarendon Press, Oxford, 1976.
- ✓ J.Fraden “Handbook of modern sensors”, AIP Press, New York, 1995.
- ✓ H.Sheingold “Transducer interfacing handbook”, Analog devices, Norwood, 1980.