

# Tecnologie dei Sistemi di Automazione e Controllo

Prof. Gianmaria De Tommasi

## Lezione 3

### Sensori di temperatura, pressione e forza

**Corso di Laurea**  
**Codice insegnamento**  
**Email docente**  
**Anno accademico**

N39  
U0998  
detommas@unina.it  
2019/2020

**Lezione numero: 3**

**Parole chiave:** Sensori di temperatura, sensori di pressione, sensori di forza

## Sommario della lezione

- **Sensori di temperatura**
  - **Sensori resistivi - RTD**
  - **Termistori**
  - **Termocoppie**
  - **Termometri**
  - **Sensori bimetallici**
- **Sensori di fluido**
  - **Sensori di pressione**
  - **Sensori di portata**
  - **Sensori di livello**
- **Sensori di forza**

## Sensori resistivi 1/6

### RTD (Resistance Temperature Detectors)

- Sono i sensori di temperatura più semplici
- Sono formati da una lunga spira di metallo di cui si misura la resistenza
- In generale:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

- Al variare della temperatura si può ritenere che, per determinati metalli, **l'effetto maggiore sulla sulla variazione della resistenza sia dovuto alla resistività  $\rho$**
- **La caratteristica di misura è nonlineare**
- In alcuni range di temperatura, un modello approssimato per la variazione della resistenza rispetto ad un valore di riferimento (tipicamente a  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ) è dato da un'approssimazione polinomiale del tipo:  $R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3]$

## Sensori resistivi 2/6 Platinum RTD (PRTD)

- Gli RTD sono spesso realizzati utilizzando il **platino (PRTD)**
- Per i PRTD la funzione di trasduzione è definita dalle **formule di Calendar–Van Dusen**

$$R(T) = R_0[1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3], \quad -200 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R(T) = R_0[1 + A \cdot T + B \cdot T^2], \quad 0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 850 \text{ } ^\circ$$

Esempio:

$$\begin{aligned} A &= 3.908 \cdot 10^{-3} \text{ } (^\circ\text{C})^{-1}, \\ B &= -5.802 \cdot 10^{-7} \text{ } (^\circ\text{C})^{-1}, \\ C &= -4.274 \cdot 10^{-12} \text{ } (^\circ\text{C})^{-1} \end{aligned}$$

## Sensori resistivi 3/6

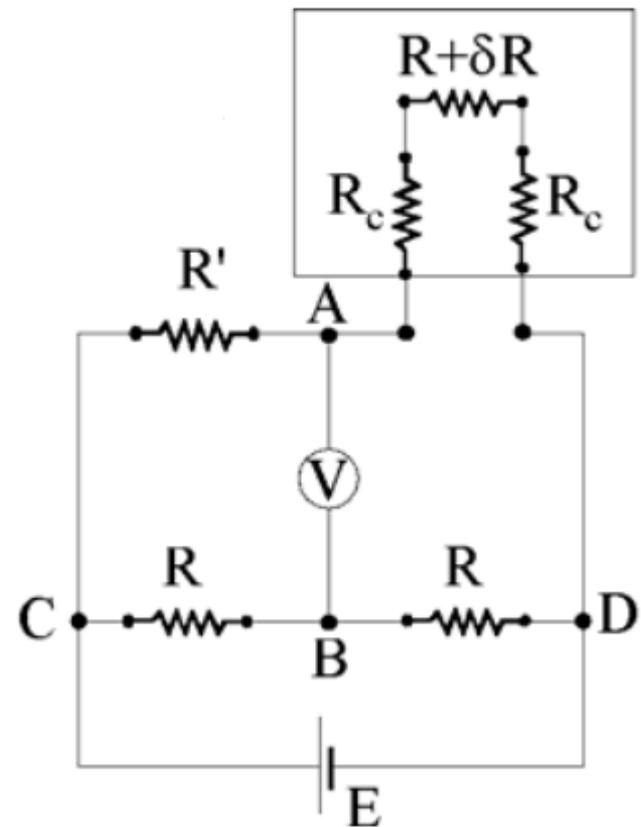
### Caratteristiche

- Gli RTD generalmente presentano una buona accuratezza
- Il range di misura dei PRTD è molto ampio (tipicamente  $[-100, 650] \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- I tempi di risposta, essenzialmente dovuti anche al raggiungimento dell'equilibrio termico, possono essere anche dell'ordine dei secondi
- Hanno bassa sensibilità (valori bassi dei coefficienti  $A$ ,  $B$  e  $C$ )  $\rightarrow$  si deve far ricorso a particolari accorgimenti per la misura
- Spesso la misura di resistenza di un RTD viene effettuata con un ponte
- La corrente che attraversa il ponte non deve essere troppo alta per evitare aumenti di temperatura indotti dal metodo di misura.
- Spesso viene fornita una costante di dissipazione che indica la potenza necessaria affinché la temperatura aumenti di un grado centigrado

## Sensori resistivi 4/6

### Ponte resistivo a compensazione 1/2

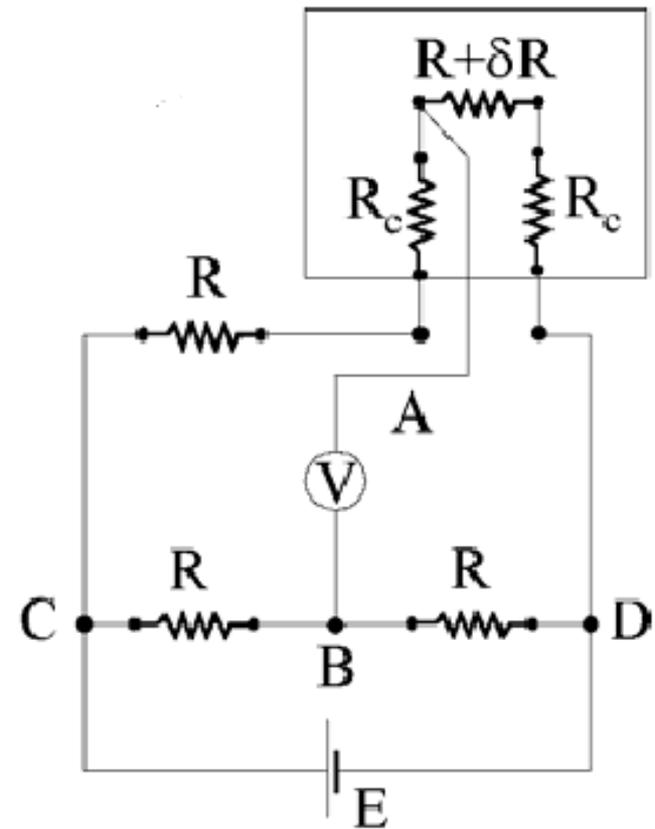
- L'elemento sensibile potrebbe essere lontano dal ponte di misura
- Bisogna considerare la resistenza delle connessioni del ponte altrimenti si possono commettere errori nella misura della resistenza e quindi della temperatura



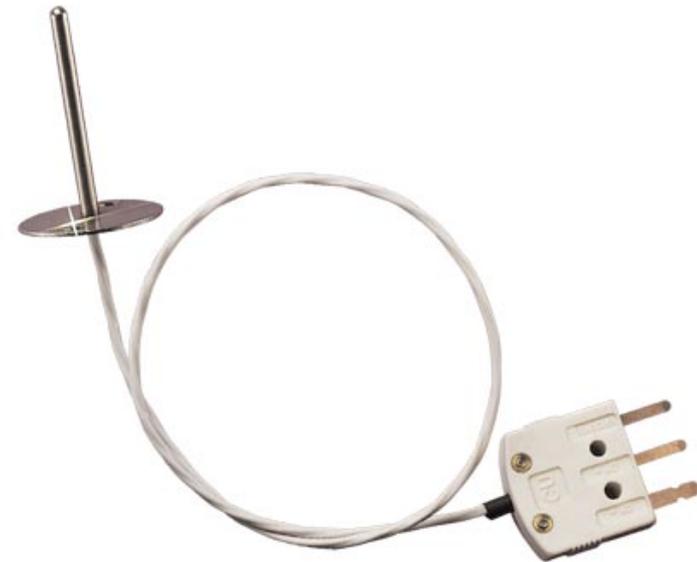
## Sensori resistivi 5/6

### Ponte resistivo a compensazione 2/2

- Per questo motivo si utilizza un ponte con compensazione dei collegamenti



## Sensori resistivi 6/6 RTD - Esempi



## Termistori 1/2

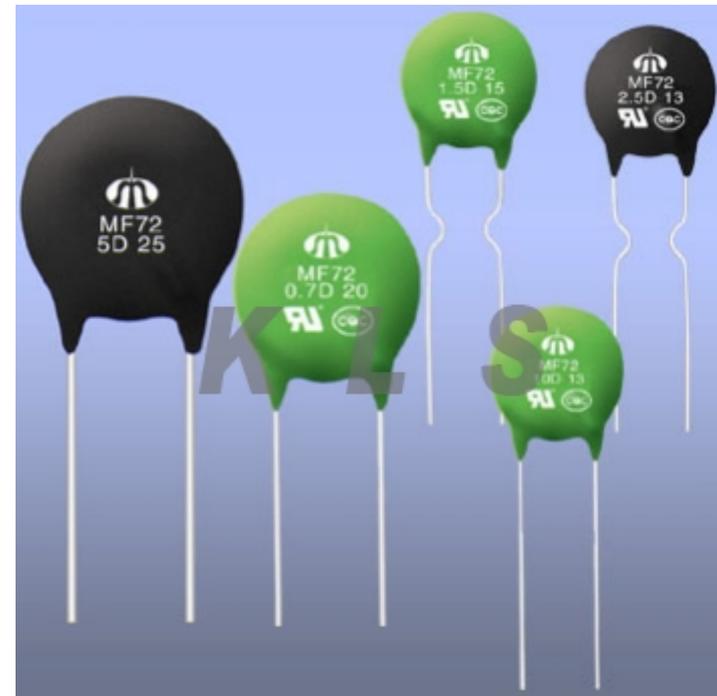
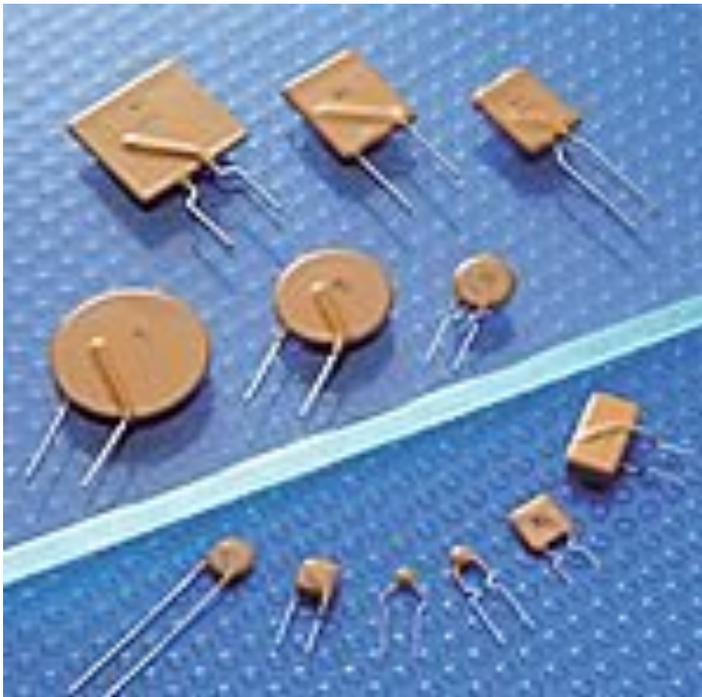
### Caratteristiche

- I termistori sono i sensori di temperatura basati su materiali semiconduttori
- Sono caratterizzati da presentare una resistenza variabile con la temperatura:
  - variazione negativa → NTC (più diffusi)
  - variazione positiva → PTC
- La relazione è del tipo

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

- A causa della loro forte nonlinearietà, il range di misura dei termistori non è molto ampio (tipicamente  $[-50, 200] \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- I tempi di risposta, essenzialmente dovuti al raggiungimento dell'equilibrio termico sono nell'ordine dei secondi

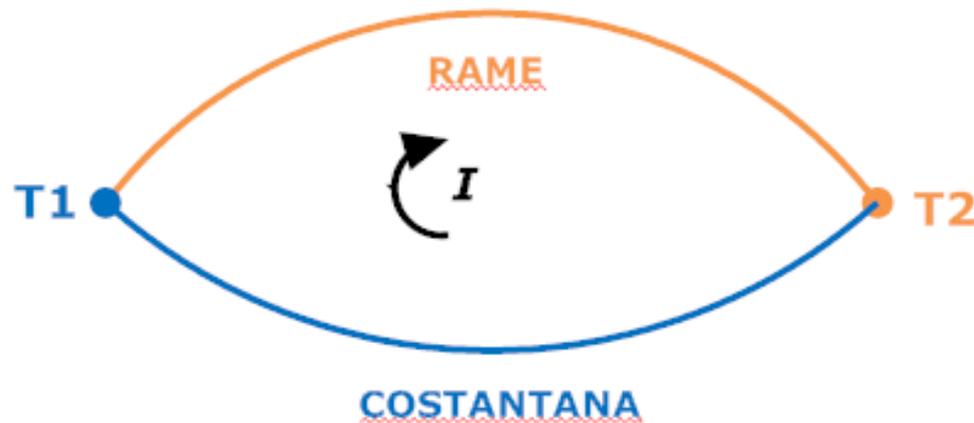
## Termistori 2/2 Esempi



## Termocoppie 1/7

### Effetto Seebeck

- Le termocoppie sono sensori attivi che generano una tensione per effetto termoelettrico.
- Il principio di funzionamento è basato sull'[effetto Seebeck](#): **quando due spire di metalli diversi sono congiunti tra loro e le giunzioni sono tenute a temperature differenti, si instaura una circolazione di corrente**

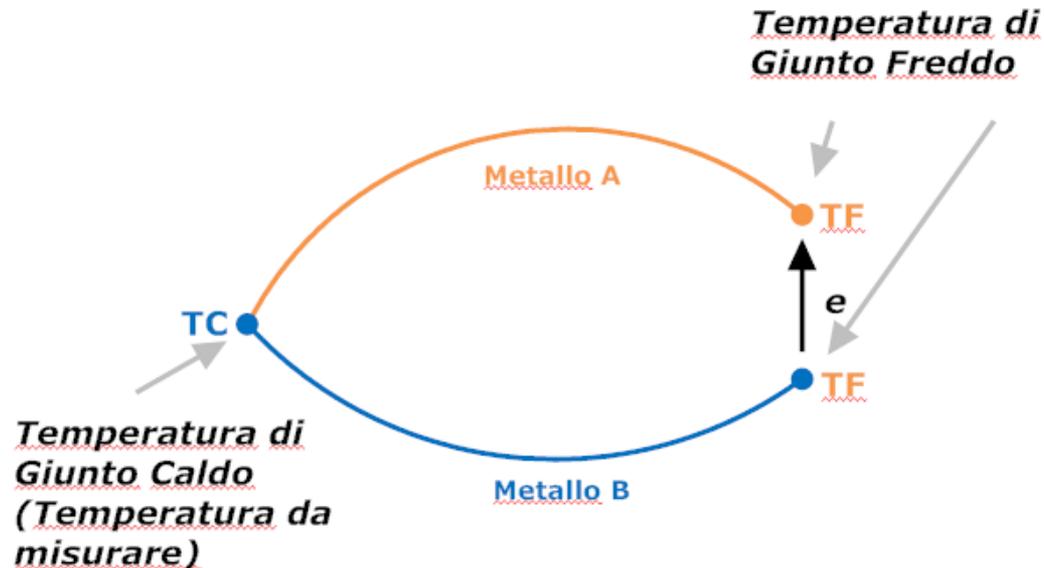


## Termocoppie 2/7

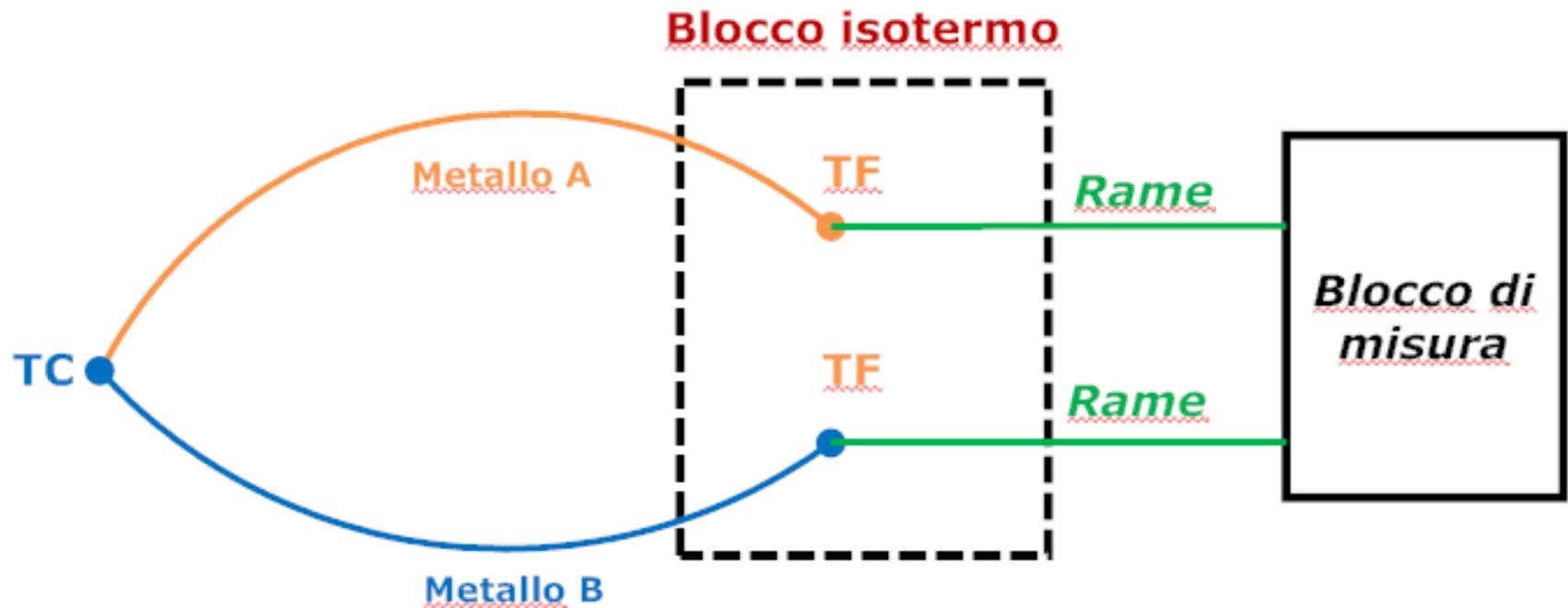
### Caratteristica

Se la giunzione viene aperta si manifesta ai suoi capi una differenza di potenziale  $e$  che è **approssimativamente** proporzionale alla differenza di temperatura:

$$e = S_{AB}(T_C - T_F)$$



## Termocoppie 3/7 Schema di misura



Tipicamente un blocco isoterma contiene i cavi di più termicoppie provenienti da una stessa zona dell'impianto

## Termocoppie 4/7

### Compensazione del giunto freddo

In generale, se il coefficiente di Seebeck può essere considerato costante, è possibile scrivere:

$$v_{ACQ} = e = K_T(T_C - T_F) = K_T(T_C - 0) - K_T(T_F - 0)$$

Disponendo di una misura della temperatura di giunto freddo è possibile fare una **compensazione via software**:

$$T_C = \frac{1}{K_T} \cdot v_{ACQ} + T_F$$

## Termocoppie 5/7

### Compensazione del giunto freddo

Nel caso in cui, nel range di interesse, il legame temperatura-tensione della termocoppia sia fortemente nonlineare, si sfruttano opportuni sviluppi polinomiali che esprimono la temperatura del giunto caldo quando  $T_F = 0\text{ }^\circ\text{C}$

$$T_C(e) = a_0 + a_1e + a_2e^2 + \dots + a_n e^n$$

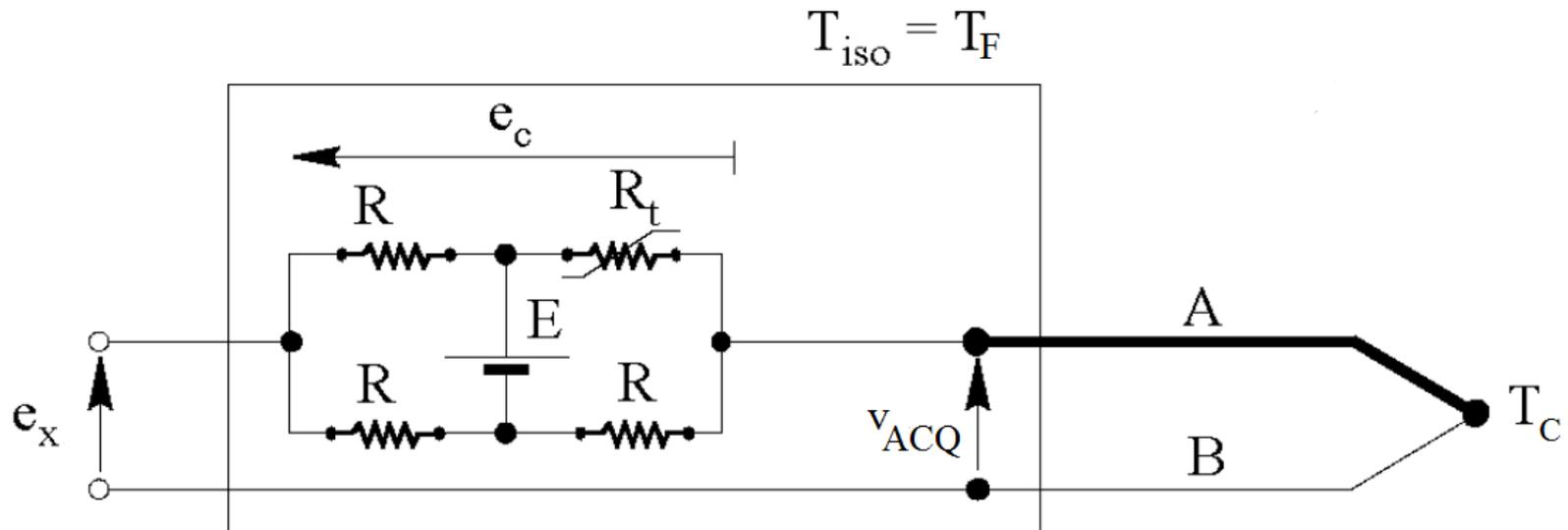
In questo caso la compensazione via software è più articolata:

- si tiene conto che  $e_x = v_{ACQ} + e_c$ , con
  - $v_{ACQ}$  tensione misurata corrispondente a temperatura da misurare
  - $e_c$  tensione di compensazione corrispondente alla temperatura del giunto freddo (viene calcolata a partire da una misura della temperatura del giunto freddo)
  - $e_x$  tensione corrispondente alla temperatura da misurare quando il giunto freddo è alla temperatura di riferimento per la quale è specificata la caratteristica delle termocoppia

## Termocoppie 6/7

### Compensazione hardware

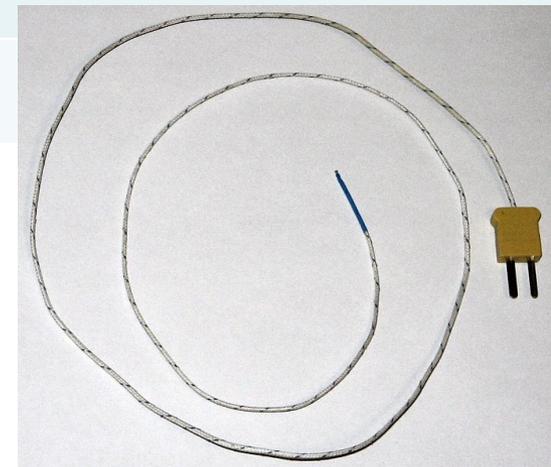
Nel range di funzionamento lineare della termocoppia si può utilizzare un circuito di compensazione della temperatura del giunto freddo.



## Termocoppie 7/7

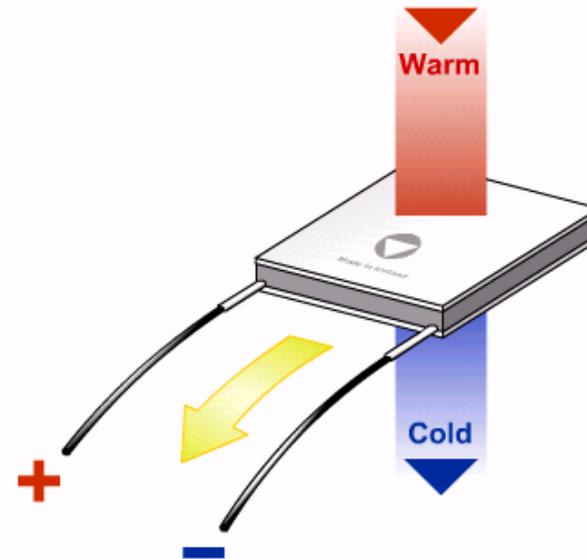
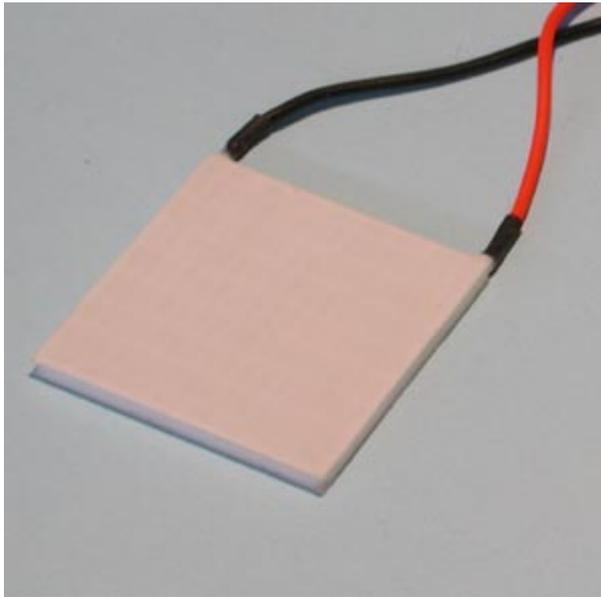
### Tipi di termocoppie - Esempi

Tipo	Range	Caratteristiche
<b>Tipo T</b> Rame-Costantana	-200/400 °C	economiche e disponibili in una grande varietà di formati. Sensibilità: 48,2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
<b>Tipo K</b> Chromel-Alumel	-200/1260 °C	economiche e disponibili in una grande varietà di formati. Sensibilità: 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
<b>Tipo S</b> Platino-Platino 10% Rodio	0/1600 °C	Costose ma permettono misure ad alte temperature
...	...	...



## Effetto Peltier

- L'effetto Peltier è il duale dell'effetto Seebeck
- Sfruttando l'effetto Peltier è possibile realizzare degli attuatori (celle Peltier)



## Termometri

- Sono formati da un recipiente completamente chiuso, riempito di **liquido o di gas**
- Vengono utilizzati spesso come sensori per monitoraggio visuale, piuttosto che sensori per sistemi di controllo automatico
- Se la temperatura si alza aumenta la pressione, nel caso di gas, oppure il volume, nel caso di liquido. **Se connessi a sensori di pressione possono essere utilizzati come sensori termici**
- **Hanno un tempo di risposta molto lento (secondi, decine di secondi) dovuti alle masse termiche da portare all'equilibrio**
- **I range di misura non sono molto ampi**



## Sensori bimetallici 1/2

- Sono i sensori di temperatura più economici
- Vengono spesso utilizzati per la realizzazione di **termostati** meccanici

Il principio di funzionamento è basato sulla dilatazione termica dei materiali metallici. Una *barra* di metallo tende ad allungarsi secondo una legge approssimativamente lineare

$$l = l_0(1 + \gamma \cdot \Delta T)$$

con  $\gamma$  coefficiente di dilatazione termica  
(valori tipici:  $\gamma_{Cu} = 16.6 \cdot 10^{-6}$   $\gamma_{Al} = 26 \cdot 10^{-6}$ )

## Sensori bimetallici 2/2

- Nei sensori bimetallici, due metalli, con diverso coefficiente di dilatazione termica, vengono saldati insieme
- Quando è sottoposto a variazioni di temperatura il sensore si flette, generando uno spostamento dell'estremità che può essere rilevato attraverso un sensore di spostamento
- Si tratta di sensori semplici, meccanicamente robusti
- I range di misura non sono molto ampi
- I tempi di risposta sono dell'ordine dei secondi

## Sensori per fluido

- I sensori per fluido si possono classificare a seconda del tipo di fluido del quale si vogliono misurare le proprietà:
  - **sensori idraulici** – utilizzati per fluidi liquidi
  - **sensori pneumatici** – utilizzati per gas
- Per entrambi i tipi di fluido esistono **sensori di pressione e portata**
- I sensori idraulici comprendono anche i **sensori di livello**

## Sensori di pressione

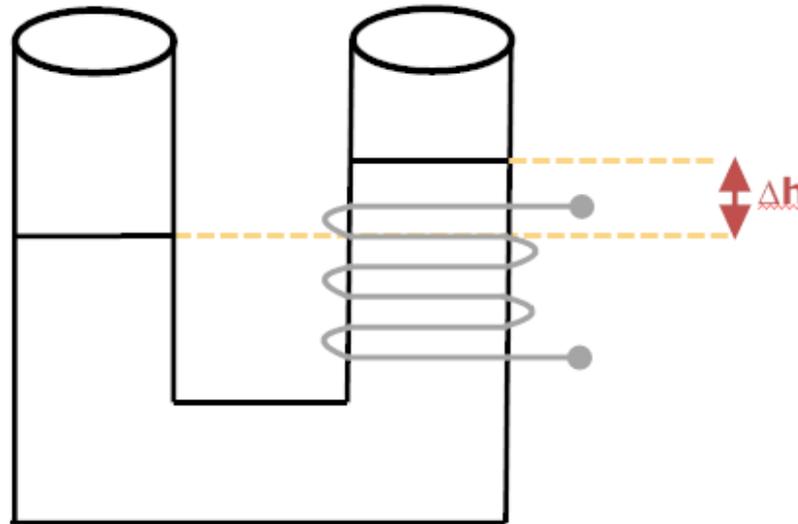
I sensori di pressione possono essere classificati in base al principio di misura utilizzato:

- sensori basati sulla misura dell'altezza di una colonna di liquido (**manometri**)
- sensori basati sulla misura della deformazione di un elemento elastico

## Manometri

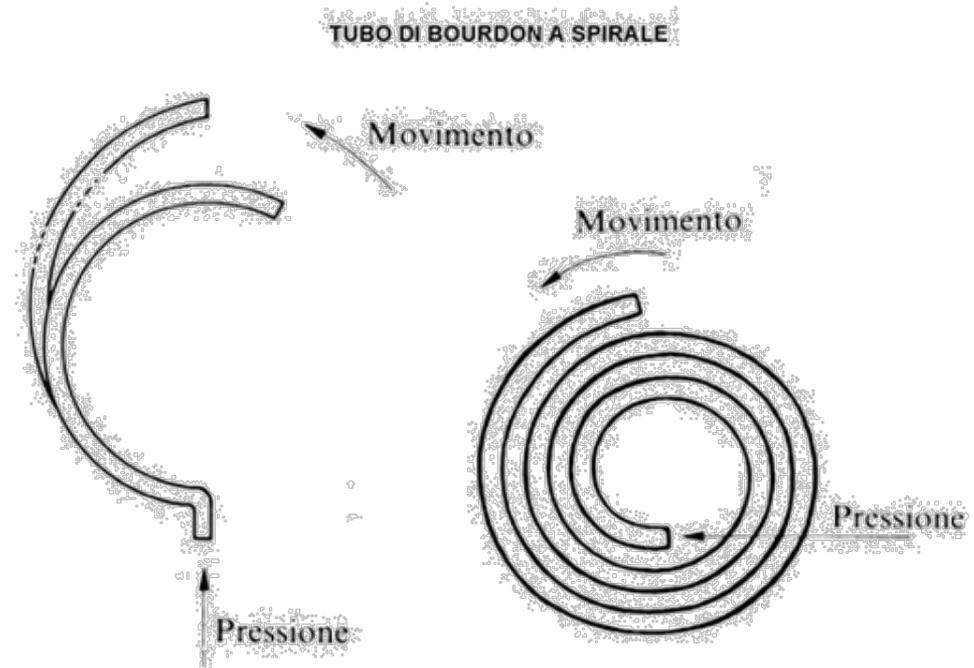
I manometri trasducono una differenza di pressione in uno spostamento di un liquido

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

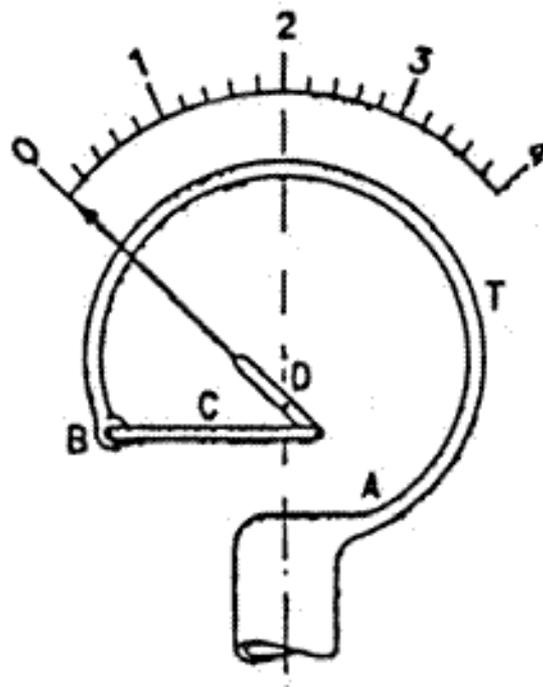


## Tubi di Bourdon 1/2

- I tubi di Bourdon trasducono una differenza di pressione in uno spostamento meccanico dovuto alla deformazione di un elemento elastico
- A causa della forma del tubo, il fluido che entra genera forze diverse su sezioni differenti, deformando il tubo stesso
- L'elasticità del materiale permette al tubo di ritornare alla sua forma originale quando la differenza di pressione si annulla.



## Tubi di Bourdon 2/2 Esempio di utilizzo



## Sensori di pressione integrati 1/3

Esistono tre tipi di sensori di pressione integrati, tutti basati su una membrana deformabile per effetto della pressione:

- **piezoresistivi** - sfruttano la variazione di resistività di un materiale conduttore causata dalla deformazione della membrana
- **capacitivi** - sfruttano la variazione di capacità dovuta al movimento della membrana (analogamente ai sensori di spostamento capacitivi)
- **risonanti** - la pressione esercitata sulla membrana provoca una variazione della frequenza di risonanza di un elemento vibrante posto su di essa

## Sensori di pressione integrati 2/3

### Pro e contro

#### ➤ Piezoresistivi

- Uscita lineare
- Semplicità di fabbricazione
- Impedenza d'uscita bassa
- Basso costo
  
- Sensibili alla temperatura e al drift
- Poco adatti per misure precise o di bassa pressione

#### ➤ Capacitivi

- Sensibilità maggiore
- Minor consumo di potenza
- Effetto temperatura ridotto
  
- Problema capacità parassite
- Uscita non lineare

#### ➤ Risonanti

- Maggior accuratezza
- Uscita variazione frequenza
  
- Processo di fabbricazione molto complesso

## Sensori di pressione integrati 3/3 Esempi



## Sensori di portata

I sensori di portata sono utilizzati per misurare quantità differenti:

- la **portata volumetrica**  $\dot{V}(t)$  (volume di fluido per unità di tempo)
- la **velocità** del fluido  $v = \dot{V}(t)/A$
- La **portata massica**  $\dot{M}(t) = \rho \cdot \dot{V}(t)$

## Sensori a strozzamento

- Il principio di funzionamento è basato sul fatto che una restrizione in un condotto fa aumentare la velocità del fluido e diminuire la pressione a valle
- Richiedono l'utilizzo di un sensore di pressione differenziale (manometro)
- Sono invasivi
- Si possono ostruire
- Richiedono ritarature

## Vortex

- Il principio di funzionamento è basato sulla generazione di vortici in maniera proporzionale alla velocità del fluido
- La misura consiste nel rilevare la frequenza dei vortici con tecniche di vario tipo
- Sono più costosi dei sensori a strozzamento ma hanno prestazioni superiori
- Sono molto utilizzati nel controllo di processo

## Sensori a turbina

- I sensori a turbina sono basati sulla rilevazione del movimento di una turbina immersa nel fluido
- Le lame sono magnetiche e quindi si può misurare la velocità a cui ruota la turbina conteggiando gli impulsi di tensione in uscita ad una bobina
- Possono dare luogo a perdite di carico
- **Non devono essere presenti detriti nel fluido**
- Hanno buona accuratezza
- Sono costosi e di difficile manutenzione
- **Possono presentare zone morte alle basse velocità (alta soglia di sensibilità)**



## Sensori elettromagnetici

- Nel caso di **fluidi conduttivi** è possibile utilizzare sensori di portata elettromagnetici
- Il funzionamento è basato sulla generazione di una differenza di potenziale creata dal conduttore fluido in movimento attraverso un campo magnetico
- La tensione in uscita è proporzionale alla velocità del fluido
- È possibile risalire alla portata volumetrica conoscendo l'area della condotta
- Sono costosi ma hanno buone prestazioni
- **Sono non invasivi**

## Tubo di Coriolis

- Consentono di misurare direttamente la portata massica senza doverla derivare dalla conoscenza della densità
- Il tubo di misura viene portato in risonanza vibrante
- L'ampiezza dell'oscillazione è proporzionale al modulo delle forze di Coriolis e dipende dalla portata massica nel tubo di misura

## Sensori di livello

Possono essere analogici, digitali o **binari (interruttori di livello)**

- Sensori di livello a principio idrostatico
- Sensori a principio resistivo
- Sensori a principio capacitivo
- Sensori ad emissione nucleare
- Sensori a peso
- Sensori ad ultrasuoni

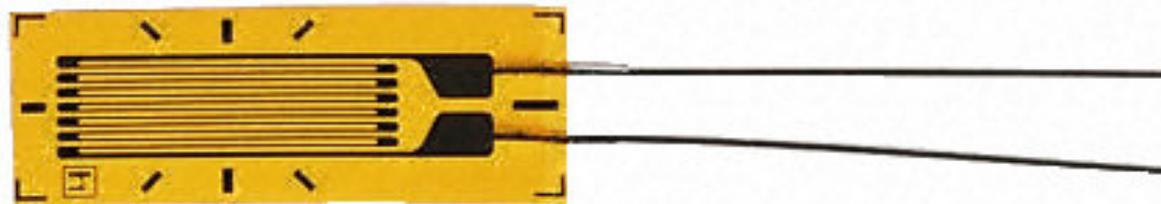
## Sensori di forza

Il principio di funzionamento si basa su una conversione forza/deformazione e sulla misura di grandezze legate alla deformazione (esempio: dinamometro).

- Estensimetri (strain gauge)
- Estensimetri piezoresistivi
- Sensori induttivi
- Sensori piezoelettrici

## Strain gauge 1/2

- Gli strain gauge (estensimetri) rileva le deformazioni meccaniche trasformandole in variazioni di resistenza
- Sono costituiti da elementi sensibili di materiale metallico la cui resistenza varia a seguito di deformazioni che ne variano la geometria



## Strain gauge 2/2

- La variazione di resistenza di una strain gauge si può misurare attraverso un ponte di Wheatstone
- Si è soliti utilizzare un ponte con **due strain gauge** connesse in modo tale che abbiano le stesse variazioni di resistenza dovute alla temperatura, ma una delle due spire è orientata in maniera tale da essere insensibile alle deformazioni

## Estensimetri piezoresistivi

- Sono degli estensimetri in cui l'elemento deformabile è un cristallo di silicio
- Hanno prestazioni superiori rispetto agli estensimetri resistivi (strain gauge)

## Sensori di forza induttivi

I sensori di forza induttivi sono costituiti da un diaframma metallico la cui deformazione per azione della pressione da misurare fa variare la posizione di un nucleo di ferrite →

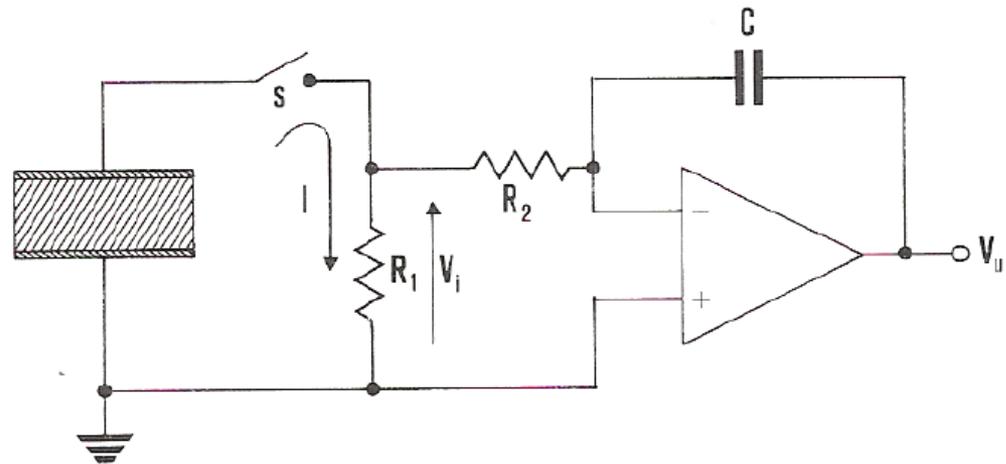
→ variazione dell'induttanza in una bobina

## Sensori piezoelettrici 1/2

- Non sfruttano la deformazione conseguente all'applicazione di una forza
- Sfruttano cristalli che, sottoposti a forza, generano un accumulo di carica proporzionale alla forza stessa
- Grazie alla loro banda elevata permettono di misurare variazioni veloci delle forze applicate

## Sensori piezoelettrici 2/2

Siccome la capacità del cristallo varia, per risalire alla carica accumulata mediante una misura di tensione, la carica va trasferita su una capacità nota attraverso un amplificatore di carica (integratore)



$$v_u = \frac{1}{R_2 C} \int_0^t v_i dt = \frac{R_1}{R_2 C} \int_0^t i dt = \frac{R_1}{R_2 C} Q$$

$$F = \frac{1}{K} \frac{Q}{S} = \frac{R_2 C}{K R_1} v_u$$

# Indice Letture

## Materiali di studio

- ❑ Paragrafi 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 da Magnani-Ferretti-Rocco

## Fonti in rete

- ❑ [Jacob Fraden – Handbook of Modern Sensors](#)