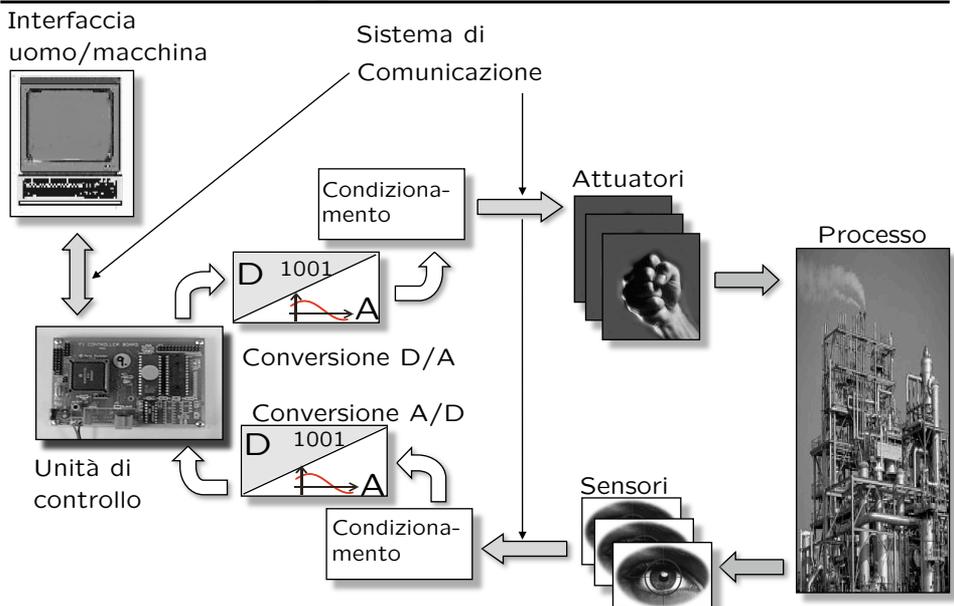


Tecnologie dei Sistemi di Controllo

Alberto Bemporad

Tecnologia di un sistema di controllo



Argomenti del corso

Sensori:



- Temperatura
- Pressione
- Portata
- Livello
- Posizione
- Velocità
- Forza
- Reti di sensori wireless

Attuatori:



- Motori elettrici a collettore
- Motori brushless
- Motori passo-passo
- Pompe
- Valvole

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Libri consigliati

- G. Magnani, "Tecnologie dei sistemi di controllo", McGraw-Hill, 2000



- Introduzione (cap. 1)
- Attuatori: (cap. 2)
 - Valvole, pompe
- Sensori: (cap. 3)
 - Proprietà generali
 - temperatura, pressione, portata, livello

- G. Bertoni, M.E. Penati, S. Simonini, "I componenti dell'automazione", Progetto Leonardo, Bologna, 2001

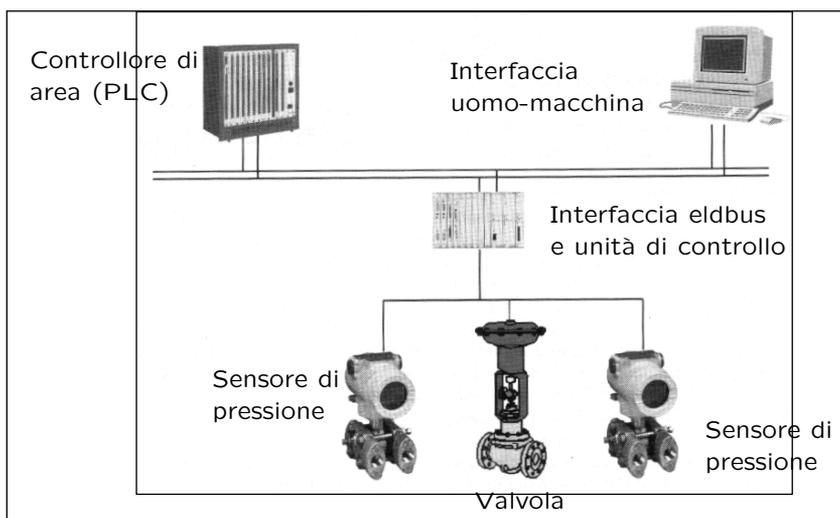


- Attuatori:
 - Motori elettrici a collettore (cap. 1)
 - Motori brushless / passo-passo (cap. 2)
- Sensori: (cap. 5)
 - posizione, velocità, forza, effetto Hall

- A. Bemporad - Appunti del corso (=queste trasparenze)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Esempio di sistema di controllo



Sistema di controllo e misura con rete di comunicazione digitale (eibus)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Esempio di sistema di controllo

Segway™ Human Transporter

The Segway™ Human Transporter (HT) is the first self-balancing, electric-powered transportation device. With dimensions no larger than the average adult body and the ability to emulate human balance, the Segway HT uses the same space as a pedestrian, and can go wherever a person can walk.

Dynamic Stabilization, is the essence of the Segway Human Transporter (HT). Dynamic Stabilization enables Segway HT to work seamlessly with the body's movements.

Gyroscopes and tilt sensors in Segway HT monitor a user's center of gravity at about 100 times a second. When a person leans slightly forward, Segway HT moves forward. When leaning back, Segway HT moves back.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Esempio di sistema di controllo



www.segway.com

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Esempio di sistema di controllo

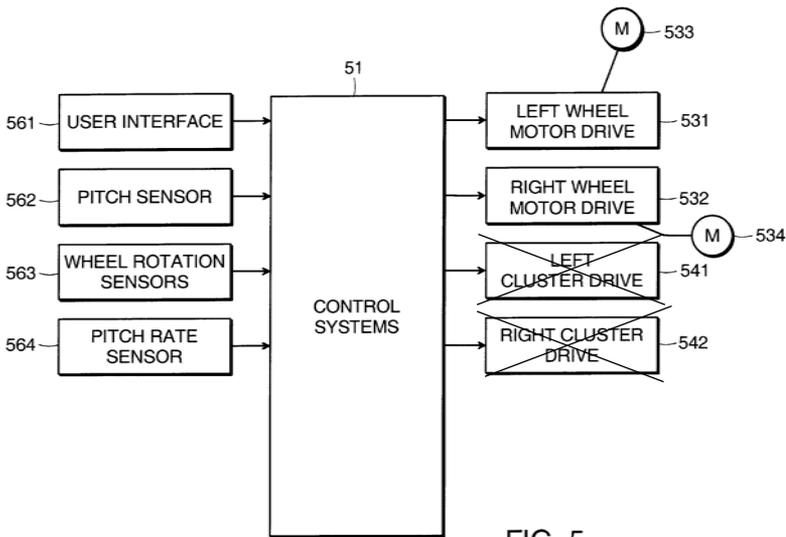


FIG. 5

U.S. Patent Oct. 16, 2001 Sheet 5 of 16 US 6,302,230 B1

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Esempio di sistema di controllo



US006302230B1

(12) **United States Patent**
Kamen et al.

(10) **Patent No.:** **US 6,302,230 B1**
(45) **Date of Patent:** **Oct. 16, 2001**

(54) **PERSONAL MOBILITY VEHICLES AND METHODS**

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

(75) Inventors: **Dean L. Kamen**, Bedford; **Robert R. Ambrogi**, Manchester; **Robert J. Duggan**, Northwood; **J. Douglas Field**, Bedford; **Richard Kurt Heinzmann**, Franctown, all of NH (US); **Burl Amesbury**, Cambridge, MA (US); **Christopher C. Langenfeld**, Nashua, NH (US)

2 048 593 5/1971 (DE) .
31 28 112 A1 2/1983 (DE) .
3411489 A1 10/1984 (DE) .
32 42 880 A1 6/1989 (DE) .
298 08 091
U1 10/1998 (DE) .
298 08 096
U1 10/1998 (DE) .
584127 6/1897 (EP) .

(List continued on next page.)

(73) Assignee: **DEKA Products Limited Partnership**, Manchester, NH (US)

OTHER PUBLICATIONS

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended as indicated under 35

Teruaki Self Supported Carrier Machine and Automatic Control Device Under the Special Patent Act of Japan



<http://ep.espacenet.com/>

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

Link utili

Alcuni possibili link utili:

rswww.com (in inglese, data-sheet on-line)

www.rs-components.it (in italiano)

www.distrelec.com (in italiano)

www.sensorsmag.com

www.omega.com

www.sensorsportal.com/HTML/Sensor.htm

www.temperatures.com

www.findasensor.com/



Distrelec

sensors

omega.com[®]

Your One-Stop Source for Process Measurement and Control!



temperatures.com



 **Google** www.google.com

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2008/09

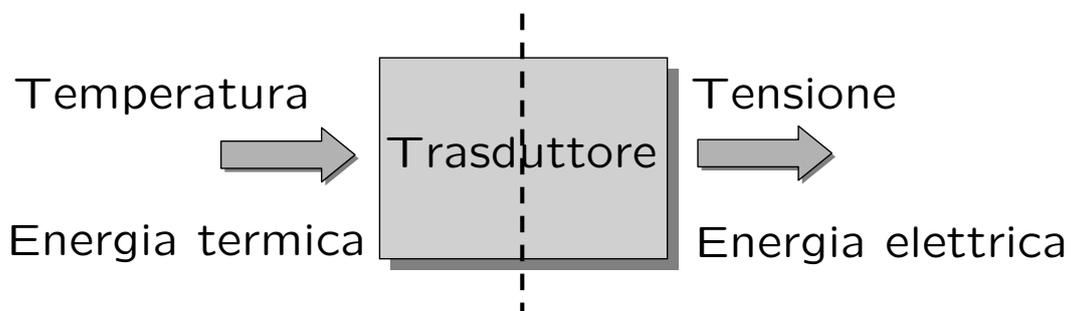
Sensori: Proprietà Generali

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduttore / *Transducer*

- Trasduttore: (dal latino *trasducere* = condurre attraverso)

dispositivo fisico progettato per trasformare grandezze appartenenti a un sistema energetico in grandezze equivalenti appartenenti a un diverso sistema energetico



Esempio:

Energia

elettrica



Energia

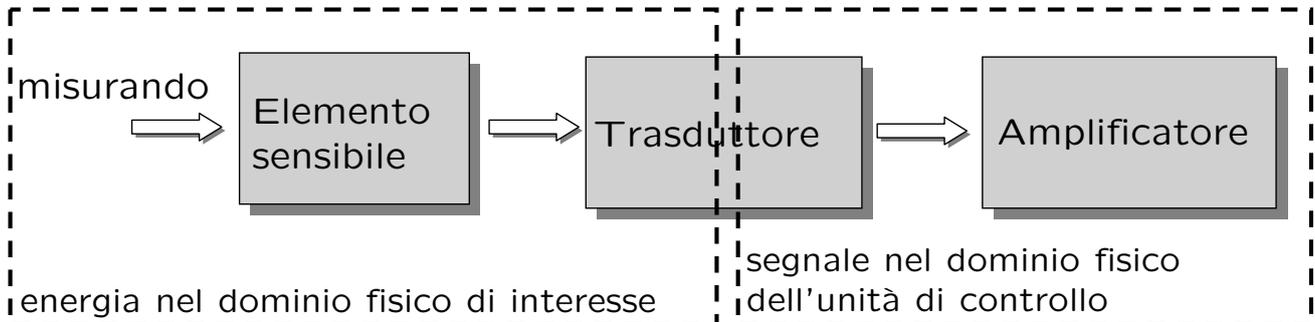
luminosa

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensore / *Sensor*

- Sensore:

Trasduttore utilizzato per misurare le condizioni operative del processo



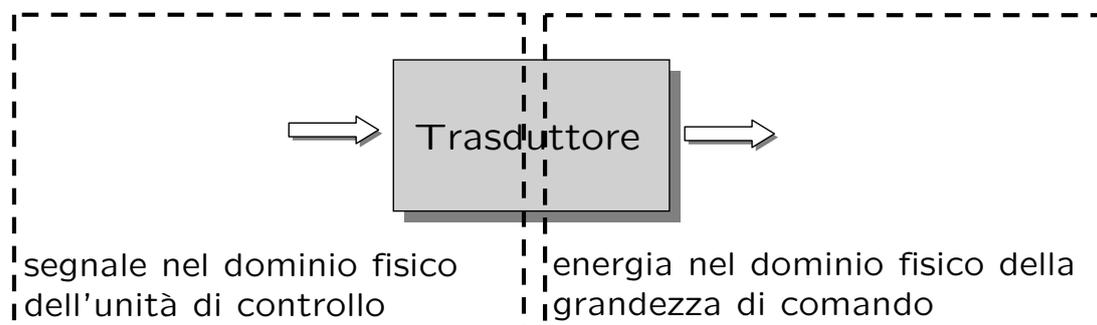
- Tipici domini fisici delle unità di controllo:
elettrico (pneumatico, idraulico)
- Esempi di vita quotidiana: termometro, microfono, occhio, bilancia, ...

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Attuatore / *Actuator*

- Attuatore:

Trasduttore utilizzato per trasformare un segnale di comando in azione sul processo



- Funzione complementare a quella del sensore
- Sono spesso realizzati per mezzo di più trasduttori
- Esempi di vita quotidiana: ventilatore, mano, ...

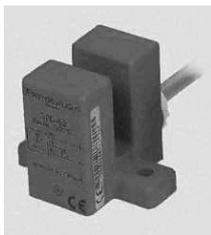
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori: Classificazione

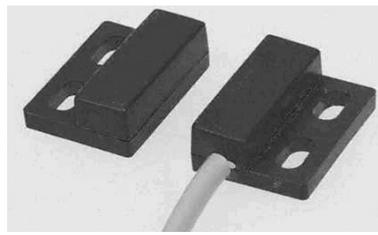
- Sulla base della tecnologia e del principio fisico utilizzato (ottico, piezoelettrico, ...)
- Funzione svolta e grandezza da misurare (m, K, ...)
- Particolare settore cui sono destinati
- In base al loro comportamento energetico:
 - **SENSORI ATTIVI** : convertono direttamente l'energia in ingresso in energia in uscita, senza dover essere alimentati dall'esterno. Esempio: celle fotovoltaiche (trasformano l'energia luminosa in energia elettrica).
 - **SENSORI PASSIVI** : necessitano di un'alimentazione esterna (eccitazione). Esempio: sensori che sfruttano le capacità resistive dei materiali.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

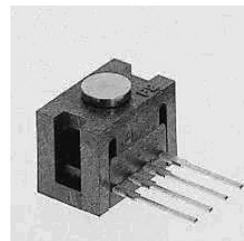
Esempi di sensori



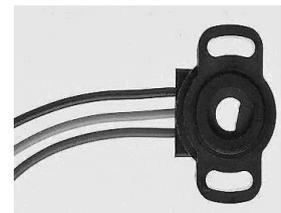
*Sensore
induttivo*



*Sensore
magnetico*



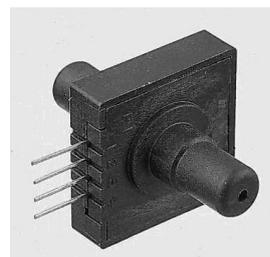
*Sensore di
forza*



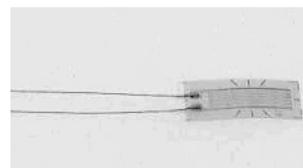
*Sensore di
posizione
angolare*



*Sensore di
flusso per
liquidi*



*Sensore di
pressione*



*Sensore di
deformazione
(Strain Gauge)*

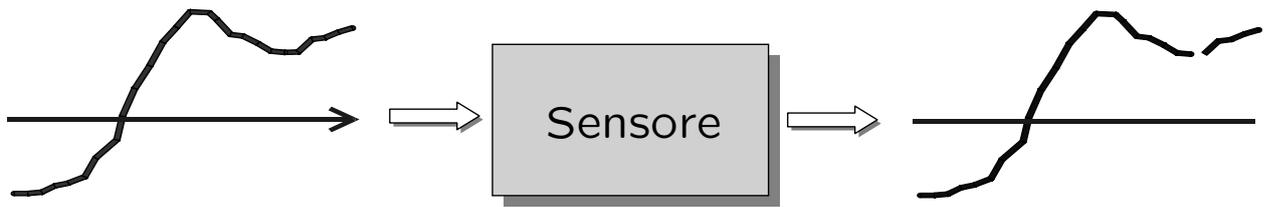


*Sensore di
temperatura
(Termocopia)*

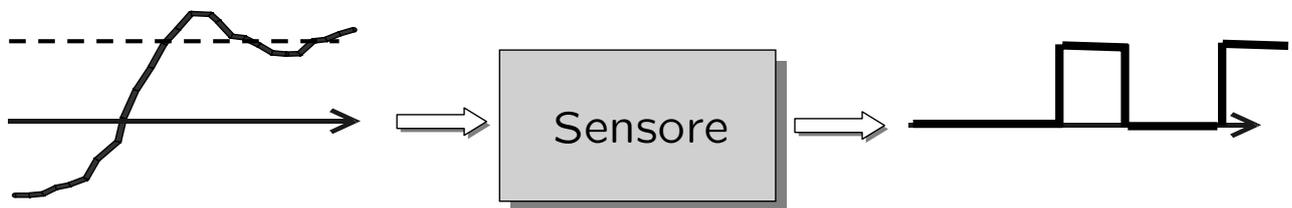
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori: Classificazione

Sensori ad uscita continua: tutta l'informazione viene acquisita



Sensori ad uscita logica: solo una parte dell'informazione è acquisita



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Parametri fondamentali di un sensore

- Accuratezza
- Precisione/Ripetibilità
- Rangeability
- Linearità
- Sensitività
- Risoluzione
- Tempo di risposta (Risposta in frequenza)
- Taratura
- Isteresi
- Stabilità
- Affidabilità
- Range di ingresso
- Costo, dim. e peso
- Impedenza (in/out)
- Fattori ambientali
 - temperatura max/min
 - tempo di warm-up
 - umidità relativa
 - pressione max
 - presenza di gas, fumi,
- molti altri...

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accuratezza / Accuracy

L'accuratezza (*accuracy*) di un sensore è il massimo scostamento tra la misura (o "lettura") fornita dal sensore e il "valore vero" del misurando

$$\text{Accuratezza in \% del fondo scala} \quad \epsilon_f = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_{FS}}$$

- X_v = valore vero del misurando
- X_m = valore misurato (nel caso peggiore)
- X_{FS} = valore di fondo scala

$$\text{Accuratezza in \% della misura} \quad \epsilon_a = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_v}$$

$$\text{Accuratezza assoluta} \quad \epsilon(X_v) = |X_m - X_v|$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accuratezza / Accuracy

- Causa di mancanza di accuratezza:
errori sistematici (*Bias* o *systematic errors*)
- Calibrazione (*calibration*) del sensore:
aggiustamento dei parametri del sensore per farne corrispondere l'uscita a valori rilevati accuratamente con un altro strumento.
- Cause di "staramento" nel tempo: usura, sporco, ...

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

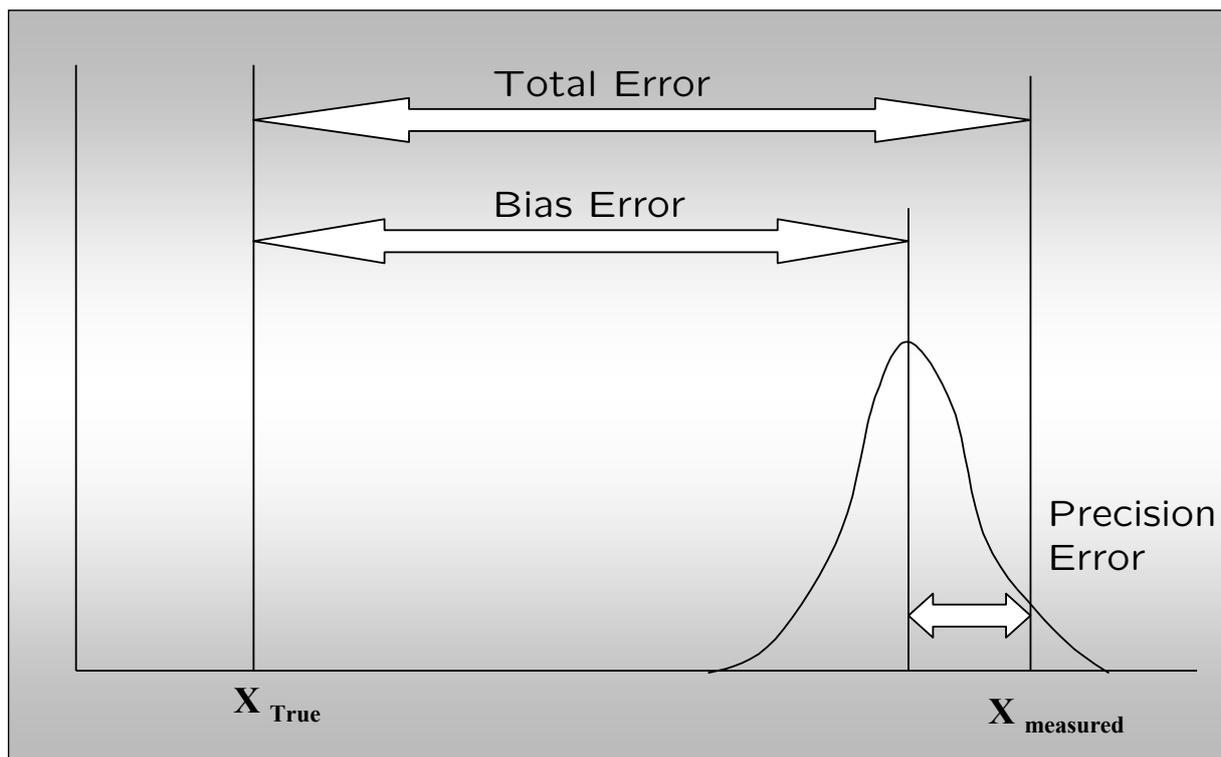
Precisione / *Precision*

La precisione (*precision*) o ripetibilità (*repeatability*) di un sensore esprime la riproducibilità di una misura, ossia esprime l'attitudine del sensore a fornire valori della grandezza in uscita poco diversi tra loro, a parità di segnale di ingresso (=stesso valore vero) e nelle stesse condizioni di lavoro

- Deriva da errori casuali (*random errors*) dovuti ad esempio a variabili incontrollate
- Viene calcolata come deviazione standard

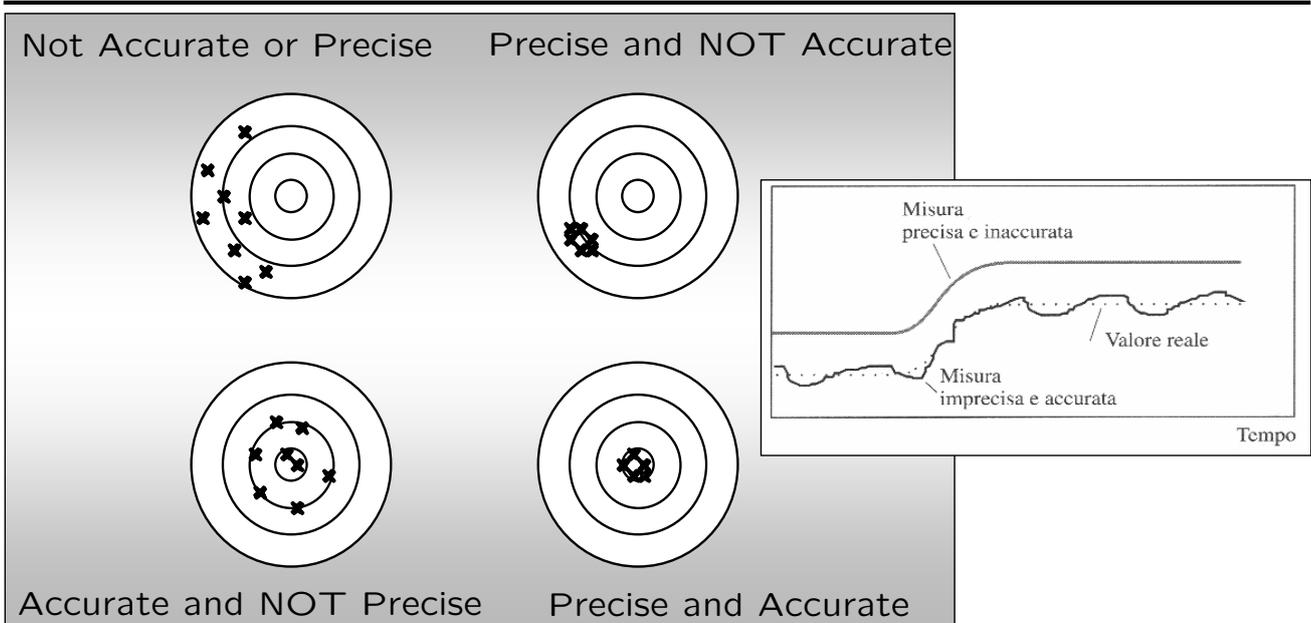
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Bias, Precision, and Total Error



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accuracy versus Precision



Nota: i dati di accuratezza e precisione forniti dai costruttori sono relativi a specifiche condizioni di funzionamento (esempio: temperatura) e allo strumento ben tarato

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Rangeability (o turn-down)

La *rangeability* esprime il rapporto fra l'estremo superiore (fondo scala) e inferiore, normalizzato all'unità, del campo di misura nel quale si applicano i dati di accuratezza e precisione

Esempio: sensore di portata

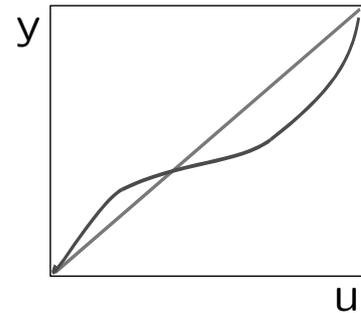
- rangeability = 20:1
- fondo scala = 100 kg/s
- accuratezza = 1%

registra con accuratezza dell' 1% portate comprese fra 5 e 100 Kg/s

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristica statica

- Caratteristica statica: legame $y=f(u)$ in condizioni di regime stazionario (u =misurando, y =segnale di misura)



- Sensori lineari: $|f(u) - Ku| \leq \varepsilon, \forall u \in \text{range}$

ε = accuratezza / precisione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensitività e risoluzione

- Sensitività: $S(y) = \frac{\Delta y}{\Delta u}$ (S=cost. per sensori lineari)

Rapporto tra la variazione del segnale in uscita al trasduttore e la corrispondente variazione della grandezza in ingresso (es: per la termocoppia rame-costantana circa $45 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

- Risoluzione: minima variazione Δu_{\min} che dà luogo ad una variazione apprezzabile di y (ossia la più piccola quantità che può essere misurata)

$$R_{\max} = 100 \cdot \frac{\Delta u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad \text{risoluzione massima}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- Taratura (calibrazione):

L'operazione di taratura di un trasduttore corrisponde con la misurazione della grandezza di uscita per valori noti della grandezza di ingresso al trasduttore stesso.

- Isteresi:

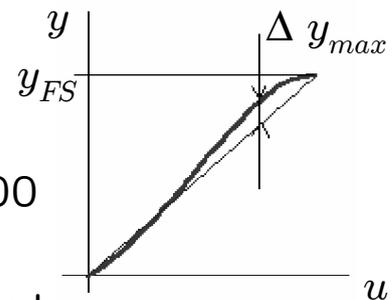
Corrisponde alla massima differenza tra i due cammini di andata e di ritorno dell'uscita di un trasduttore durante il ciclo di calibrazione. È espressa in *percentuale del fondo scala* (% f.s.).

Errori di non linearità, offset e guadagno

- Errore di non linearità: spostamento massimo dalla retta ideale

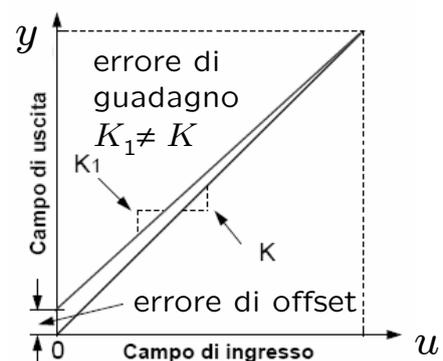
$$\text{Errore linearità \%} = (\Delta y_{max} / y_{FS}) * 100$$

y_{FS} = valore max d'uscita di fondo scala



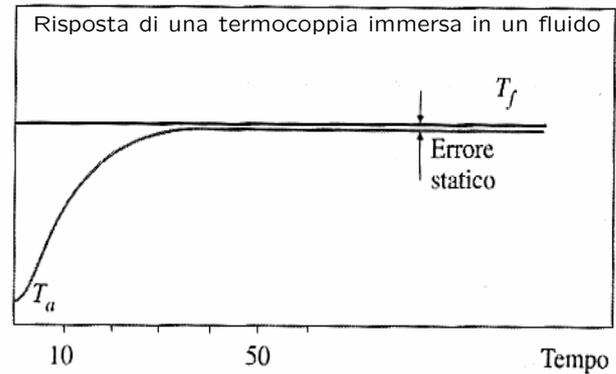
- Errore di offset e di guadagno:

$$e_G = 100 \frac{K_1 - K}{K}$$



Comportamento dinamico

- Ogni sensore ha la sua dinamica !
- Pertanto la risposta di un sensore non è istantanea
- Spesso è trascurabile rispetto alle dinamiche del processo (ma non sempre !)
- Esempio: risposta di una termocoppia immersa in un fluido



$$C \frac{dT}{dt} = \gamma A (T_f - T)$$

- C = capacità termica
- A = superficie di scambio fluido-pozzetto
- γ = coefficiente di scambio fluido-pozzetto

- Caratteristica dinamica: funzione di trasferimento da Δu a Δy

$$F(s, \bar{y}) = \left. \frac{\Delta y}{\Delta u} \right|_{y=\bar{y}} \quad \text{dove} \quad \lim_{s \rightarrow 0} F(s, \bar{y}) = S(\bar{y})$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Comportamento dinamico

- Tempo di risposta:

Quando in ingresso al trasduttore applichiamo una sollecitazione a gradino (cioè un gradino della grandezza da misurare) l'uscita (risposta) varierà fino a raggiungere, dopo un certo tempo, un nuovo valore. A tale proposito vengono definiti:

– **tempo di salita**: tempo impiegato per passare dal 10% al 90% del valore finale

– **tempo di risposta**: tempo impiegato per raggiungere una percentuale prefissata del valore finale.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Stabilità e affidabilità (*reliability*)

- Stabilità:

Capacità del trasduttore a conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un certo intervallo di tempo (lungo, medio, breve).

- Affidabilità:

È l'attitudine del sensore a fornire specificate prestazioni sotto determinate condizioni e per un certo periodo.

È espressa in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni senza guasti per un tempo specificato (nelle specificate condizioni di utilizzo)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Criteri di scelta dei sensori

- Campo (*range*), ad esempio (200÷600 °C) e intervallo (*span*) di misura (400 °C)
- accuratezza, precisione, sensitività, risoluzione
- rangeability
- caratteristiche dinamiche
- livello di affidabilità
- costi (acquisto, installazione, manutenzione)
- problemi di installazione e pericolosità
- materiale di costruzione adatto al misurando ?

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipi di sensore

| Grandezze misurabili | Trasduttori | Grandezze di uscita |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperatura | Termocopie Resistenze al platino(RTD), termistori (PTC, NTC) Trasduttori a semiconduttore | Tensione Variazione di resistenza Corrente (tensione) |
| Forza- Pressione | Potenzimetri, estensimetri (strain gauge) Trasduttori capacitivi Trasduttori piezoelettrici | Variazione di resistenza Variazione di capacità Tensione |
| Posizione | Potenzimetri, estensimetri | Variazione di resistenza |
| Spostamento | Trasduttori capacitivi Trasformatori differenziali, Syncro Trasduttori induttivi Trasduttori ad effetto Hall Trasduttori ottici digitali (encoder incrementale) Fotodiodi, fototransistori | Variazione di capacità Tensione Variazione di induttanza Tensione Numero di impulsi Corrente(tensione) |
| Velocità | Trasduttori piezoelettrici Dinamo tachimetrica Trasduttore ottico digitale (encoder assoluto) | Tensione Tensione Frequenza di impulsi |
| Intensità luminosa | Fotodiodi, fototransistori Fotoresistenze Celle fotovoltaiche | Corrente(tensione) Variazione di resistenza Tensione |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori: proprietà generali

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura

After time, temperature is the second most measured physical unit

(Dopo il tempo, la temperatura è l'unità fisica più misurata)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Meccanismi di trasduzione della temperatura

- Modifiche delle dimensioni fisiche
 - Termometri bimetallici (*bimetallic thermometers*)
 - Termometri a bulbo (*filled-bulb thermometers*)
- Modifiche delle proprietà elettriche
 - Termocoppie (*thermocouples*)
 - Termoresistenze (RTD, *Resistance Temperature Detectors*)
 - Termistori (*thermistors*)
 - Sensori a circuito integrato (IC, *integrated circuit transistors and diodes*)
- Modifiche della fase chimica
 - Termometri ai cristalli di quarzo (*quartz crystal thermometers*)
- Modifiche della radiazione termica emessa
 - Pirometri a radiazione/infrarossi (*radiation/infrared pyrometers*)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie (*thermocouples*)

- Grandezza misurata: differenza di temperatura
- Grandezza in uscita: tensione
- Tipo di sensore:
 - autoeccitante (termoelettrico)
 - non linearità sistematica (compensazione con tabelle o polinomi interpolanti)

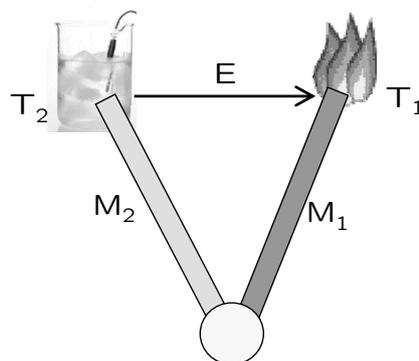


- temperature: $-200 \div 2760 \text{ }^\circ\text{C}$
- tensioni in uscita: $-10 \div 50 \text{ mV}$
- sensibilità: $10 \div 50 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

È il sensore più usato nell'industria per le misure di temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Principio di funzionamento



- Le termocoppie operano secondo il principio per cui in un circuito costituito dalla connessione di **due metalli diversi** si produce una differenza di potenziale elettrico (o forza elettromotrice, *emf-electromotive force*) qualora le due estremità siano poste a **temperatura diversa**

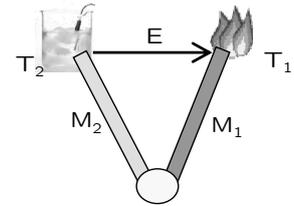
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Principio di funzionamento



Thomas Johann Seebeck (1770-1831)

Nel 1821 Seebeck osservò l'esistenza di una tensione elettrica ai capi di una giunzione di metalli di diverso tipo quando gli estremi sono sottoposti a diverse temperature (effetto Seebeck)



William Thomson (Lord Kelvin) (1824 - 1907)

Thomson osservò che un conduttore, con una estremità posta ad una temperatura T_1 e con l'altra ad una temperatura T_2 , attraversato da una corrente elettrica, sviluppa calore (1857).



Jean-Charles-Athanase Peltier (1785 - 1845)

Peltier scoprì che quando una corrente elettrica percorre un circuito a due conduttori uno dei punti di contatto genera calore e l'altro assorbe calore (1834). È il duale dell'effetto Seebeck.



L'effetto Thomson di solito è molto minore dell'effetto Peltier

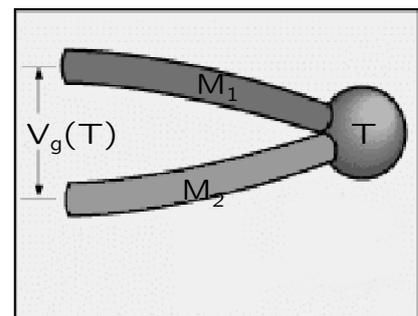
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Effetto Seebeck

Differenza di potenziale ai capi della giunzione:

$$V_g(T) = \frac{1}{e}(P_1(T) - P_2(T))$$

- $P_1(T)$ = potenziale elettrochimico metallo M_1
- $P_2(T)$ = potenziale elettrochimico metallo M_2
- e = carica dell'elettrone

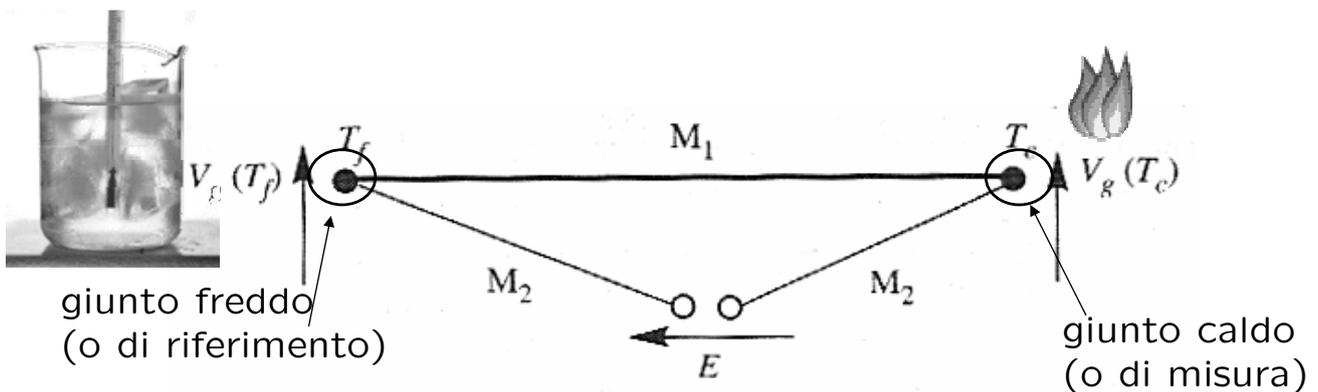


V_g non è facilmente rilevabile, perché collegando un voltmetro si formano altre giunzioni che influiscono sulla misura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Effetto Seebeck

- Due giunzioni a temperature diverse T_c , T_f :



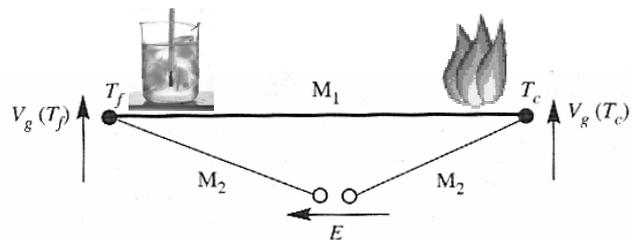
$$E(T_c)|_{T_f=T_f} = V_g(T_c) - V_g(T_f) = \frac{1}{e} [P_1(T_c) - P_2(T_c) + P_2(T_f) - P_1(T_f)]$$

- Il collegamento di un voltmetro ai morsetti, se i terminali del voltmetro sono dello stesso materiale metallico M_3 e i morsetti sono alla stessa temperatura T_3 , non influisce sulla misura di E

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Calcolo della tensione

- La funzione $E(T_c)$ è riportata nei data sheet, in forma tabellare e con risoluzione di $1\text{ }^\circ\text{C}$, per $T_f=0\text{ }^\circ\text{C}$



- Come calcolare $E(T_c)$ per $T_f \neq 0\text{ }^\circ\text{C}$?

$$\begin{aligned} E(T_c)|_{T_f=\bar{T}_f} &= V_g(T_c) - V_g(\bar{T}_f) \\ &= V_g(T_c) - V_g(0) + V_g(0) - V_g(\bar{T}_f) \\ &= E(T_c)|_{T_f=0} - E(\bar{T}_f)|_{T_f=0} \end{aligned}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Calcolo della tensione

- Esempio:

Temperatura giunto freddo: $\bar{T}_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Dal voltmetro: $E(T_c)|_{T_f=\bar{T}_f} = 17.994 \text{ mV}$

Dalle tabelle: $E(30 \text{ }^\circ\text{C})|_{T_f=0} = 1.536 \text{ mV}$

Da cui si ricava: $E(T_c)|_{T_f=0} = 1.536 + 17.994 = 19.530 \text{ mV}$

Dalle tabelle si ricava: $T_c = 358 \text{ }^\circ\text{C}$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Alcune semplici regole

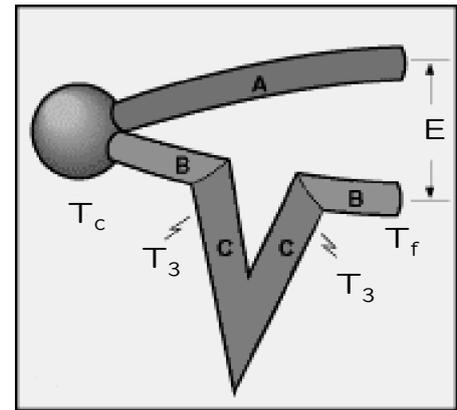
1) Per avere una tensione di uscita utilizzabile nelle applicazioni, una termocoppia deve contenere (almeno):

- due metalli di tipo diverso
- due giunzioni
- due temperature diverse

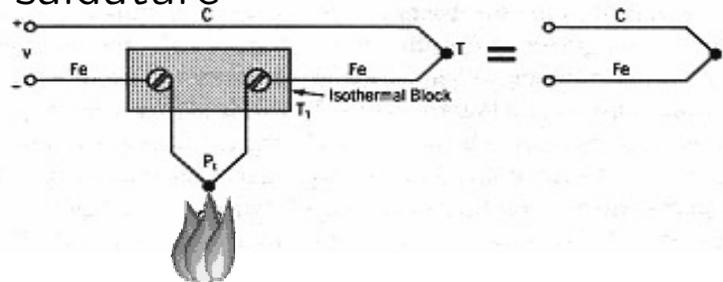
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Legge del metallo intermedio

2) L'inserimento di un terzo metallo all'interno del circuito della termocoppia non cambia la tensione in uscita, purché le due nuove giunzioni siano alla stessa temperatura e il materiale inserito sia omogeneo



Esempio: saldature



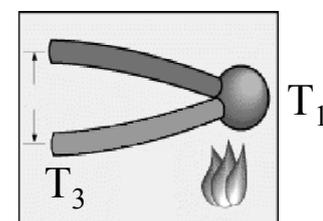
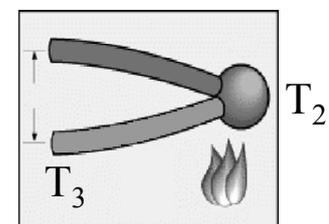
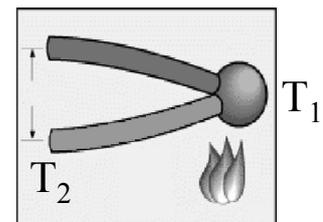
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Legge delle temperatura intermedia

3) Se una termocoppia sviluppa una tensione E_{12} quando la giunzione è alle temperature T_1 , T_2 , e una tensione E_{23} quando alle temperature T_2 , T_3 , allora quando posta alle temperature T_1 , T_3 svilupperà una tensione

$$E_{13} = E_{12} + E_{23}$$

$$\begin{aligned} E(T_1)|_{T_f=T_3} &= V_g(T_1) - V_g(T_3) \\ &= V_g(T_1) - V_g(T_2) + V_g(T_2) - V_g(T_3) \\ &= E(T_1)|_{T_f=T_2} - E(T_2)|_{T_f=T_3} \end{aligned}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- 4) Se una termocoppia composta dai metalli A e C, sottoposta alle temperature T_1 , T_2 , genera una tensione E_{AC} , e una termocoppia composta dai metalli C e B, sottoposta alle medesime temperature, genera una tensione E_{CB} , allora una termocoppia composta dai metalli A e B, sottoposta alle medesime temperature, svilupperà una tensione

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$$

Talvolta è utile in fase di calibrazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

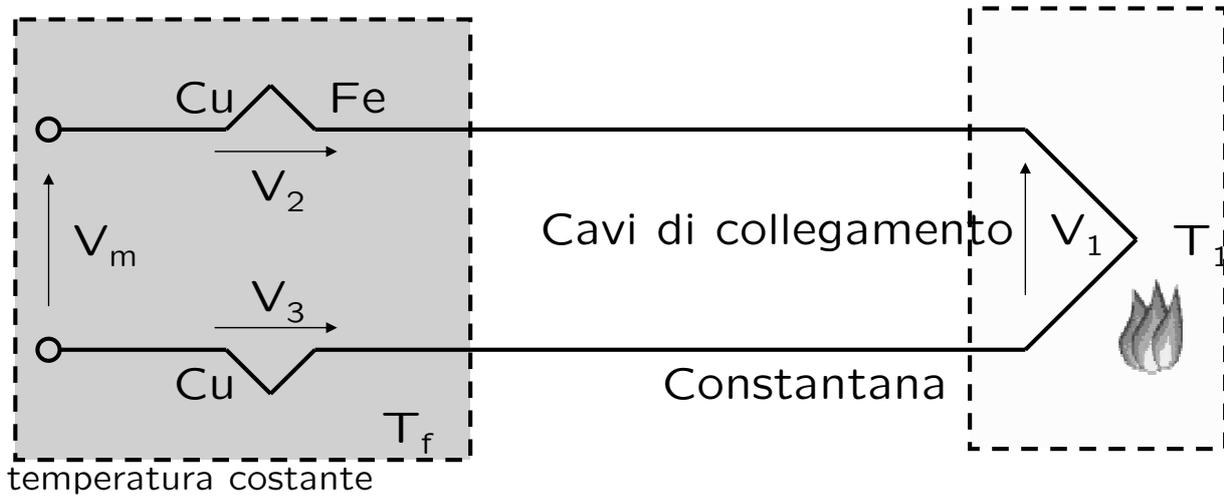
- 5) Variazioni di temperatura nei cavi di collegamento non alterano la tensione di uscita, purché i cavi di collegamento siano di materiale omogeneo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: problemi di collegamento

Problemi:

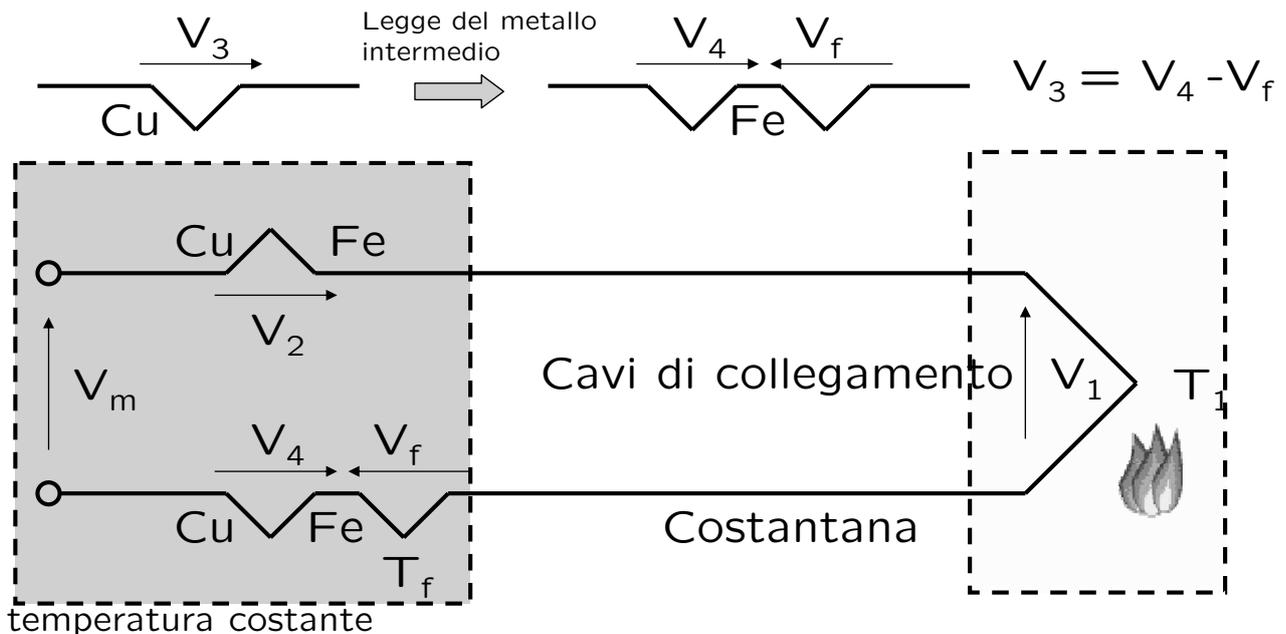
- Giunzioni parassite dovute ai collegamenti
- Necessità di conoscere T_f



$$V_m = V_1 - V_2 + V_3$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: problemi di collegamento



$$V_m = V_1 - V_2 + V_4 - V_f \rightarrow V_1 = V_m + V_f$$

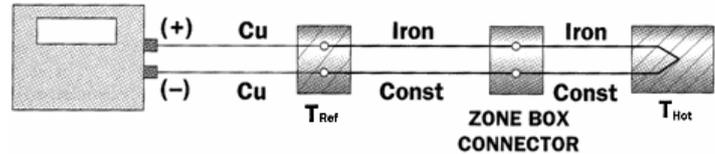
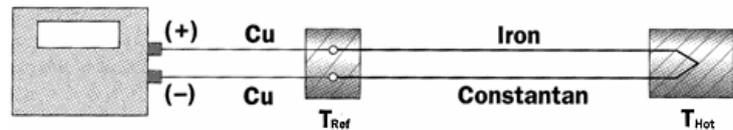
- V_f = tensione generata da una termocoppia (dello stesso tipo di quella di misura) a temperatura T_f

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Temperatura di riferimento e *zone box*

Problema: occorre conoscere la temperatura T_f !

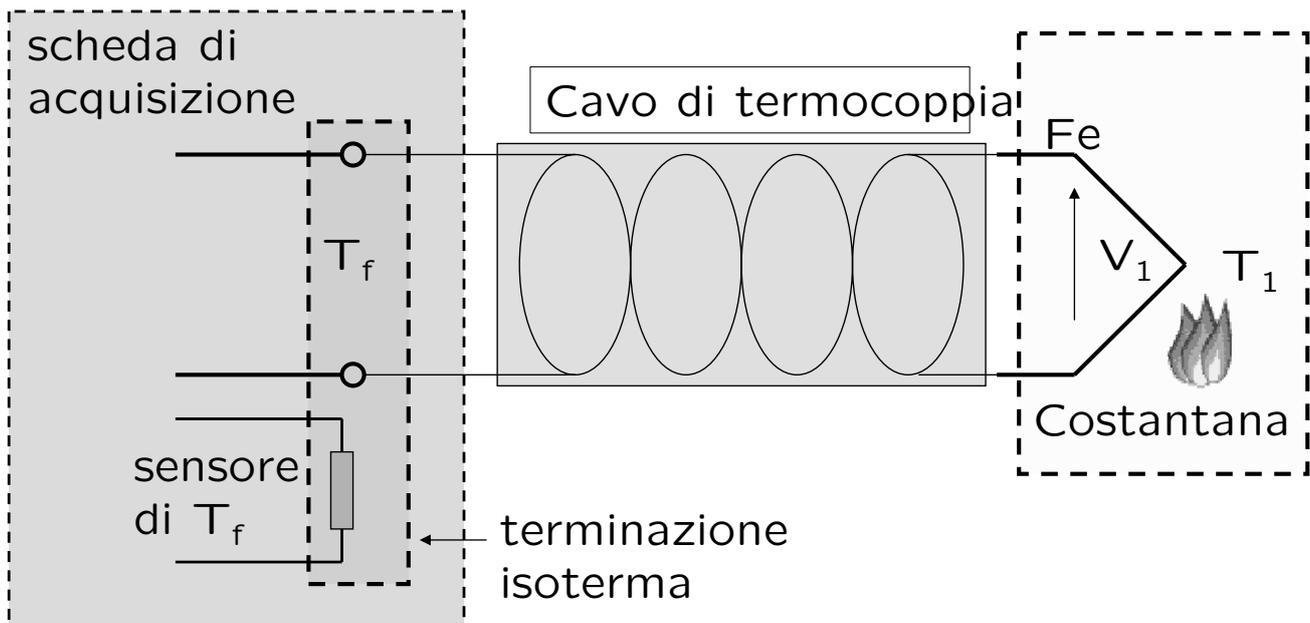
- Bagno di ghiaccio (*ice bath*)
 - Accurato ed economico
- Riferimento controllato elettronicamente
 - Richiede una calibrazione periodica. Non così stabile come il bagno di ghiaccio, ma senz'altro più semplice
- Sistema di compensazione della temperatura di riferimento (compensazione del "giunto freddo")
 - Un sensore di temperatura all'interno dello chassis misura la temperatura del giunto freddo. Tale misura viene utilizzata per calcolare la temperatura misurata dalla termocoppia



Zone box: è una zona a temperatura uniforme che assicura che tutte le connessioni all'interno della zona stessa siano alla stessa temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: compensazione del giunto freddo



Cavi di termocoppia: cavi omogenei con quelli della termocoppia (per non generare tensioni al contatto). Più costosi dei normali cavi di rame per vincoli di purezza, omogeneità, resistenza alla temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: Compensazione del giunto freddo

Algoritmo di compensazione del giunto freddo

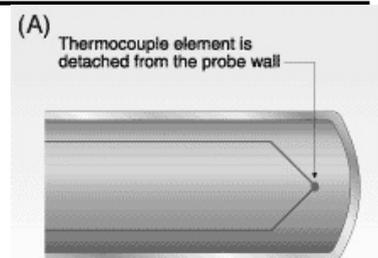
- si misura T_f con un sensore a semiconduttore
- si converte la T_f in una tensione equivalente V_f mediante la tabella (o polinomio) della termocoppia di misura
- alla tensione misurata V_m si somma V_f ricavata dalla tabella per trovare la tensione equivalente V_1 della termocoppia di misura con giunzione fredda a $0\text{ }^\circ\text{C}$
- si converte la tensione V_1 nella corrispondente temperatura mediante la tabella (o il polinomio)
- misura di temperatura (alta) ottenuta mediante un'altra misura di temperatura (bassa)
- più semplice perchè a valori prossimi a T_{amb}

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sonda protettiva o pozzetto (*probe*)

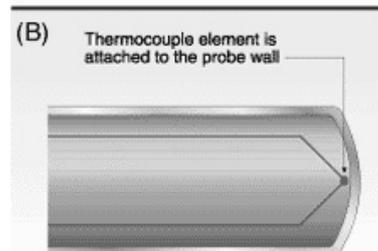
A. Giunzione protetta isolata (*ungrounded*)

- La giunzione non è attaccata alla sonda. Si ottiene l'isolamento elettrico, al prezzo però di un aumento del tempo di risposta



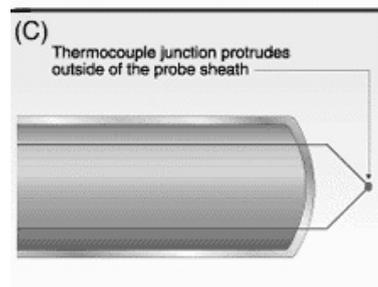
B. Giunzione protetta a massa (*grounded*)

- La giunzione è fisicamente attaccata alla sonda. Si ha un buon trasferimento di calore e quindi tempo di risposta più breve



C. Giunzione esposta (*exposed*)

- La giunzione è esposta all'ambiente circostante. Si ha il tempo di risposta migliore, ma non è utilizzabile in ambienti corrosivi o sotto pressione.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Scelta del tipo di termocoppia

- Dipende da diversi requisiti:
 - Range di temperatura
 - Accuratezza desiderata
 - Problemi di compatibilità chimica
 - Resistenza all'abrasione e alla vibrazione
 - Vincoli di installazione (dimensioni dei cavi)
 - Conduzione termica desiderata

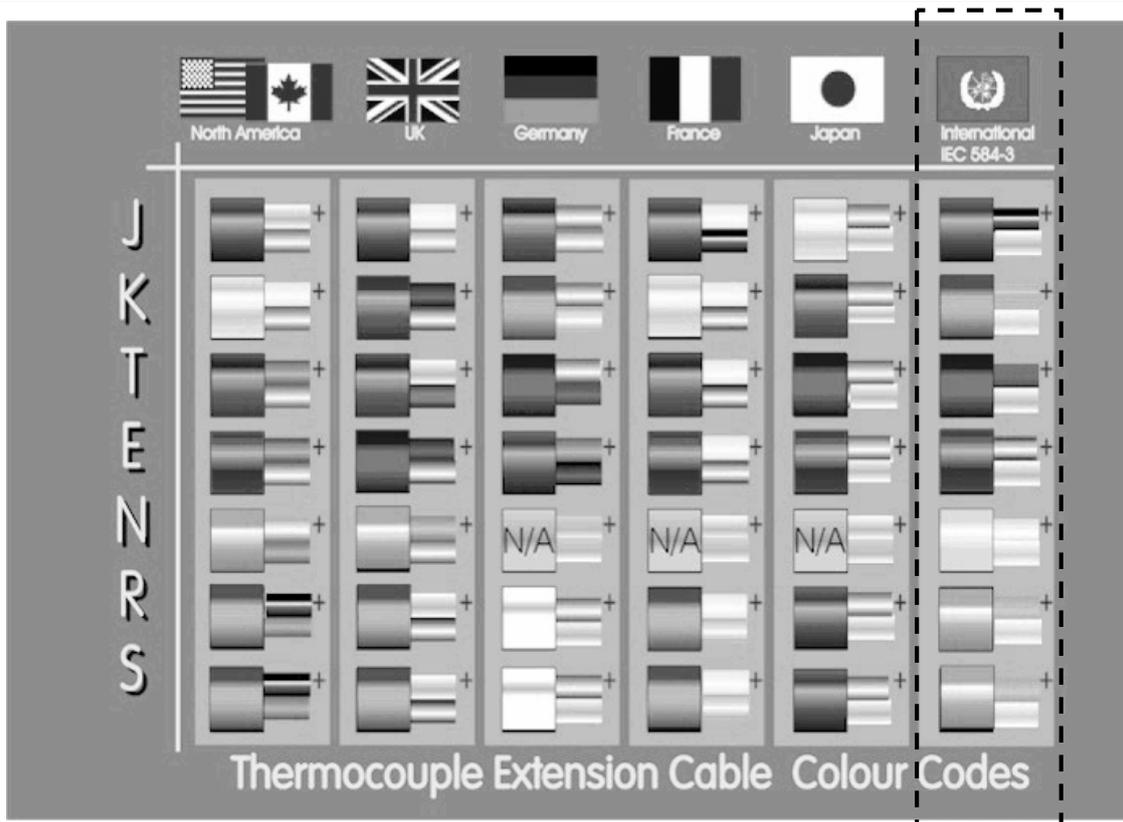
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termocoppie: pro e contro

- Difetti:
 - relativamente poco accurate (per disomogeneità)
 - necessità delle sonde protettive
 - tempi di risposta lunghi (a causa della sonda)
 - caratteristica non lineare (su ampi intervalli di T)
- Pregi:
 - autoeccitante
 - poco costose
 - funzionamento in ambienti critici
 - range di temperature molto ampio (versatilità)
 - cavi di collegamento anche lunghi
- Sensore di temperatura standard:
 - Nelle applicazioni ad altissima temperatura
 - Nelle applicazioni a basso costo (es: domestiche)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Codice dei colori



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Codice dei colori

Colour Code Cross Reference

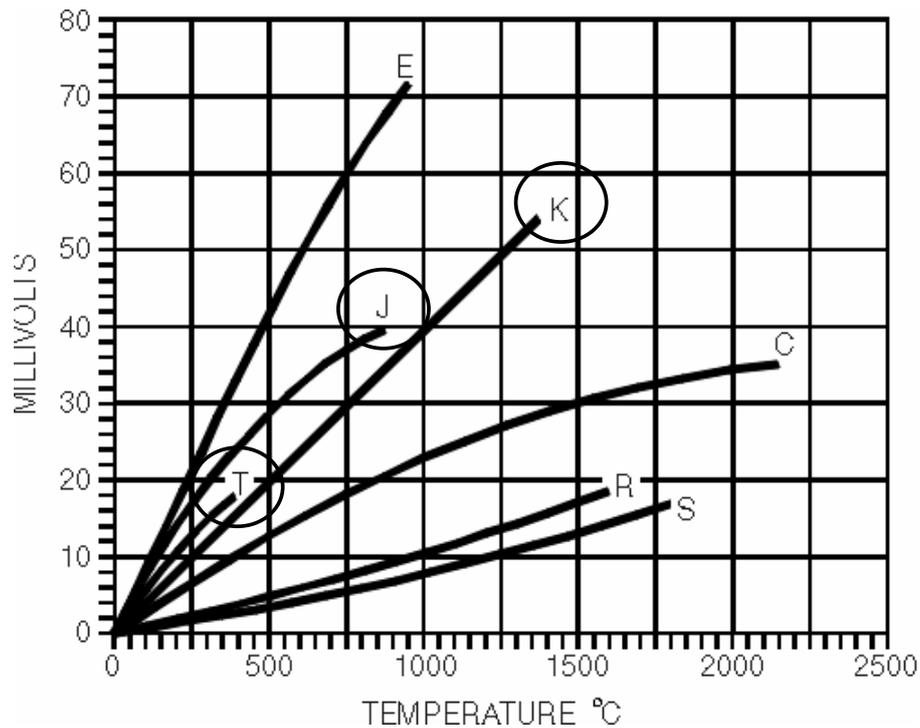
| Type (Cable Code) | Conductors (+/-) | Insulation colour codes | | | | | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| | | British BS 1843:1952 (obsolete) | | | IEC 584-3 | | |
| | | Sheath | +ve | -ve | Sheath | +ve | -ve |
| E (EX) | NICKEL CHROMIUM/CONSTANTAN <small>(nickel Chromium/Copper-Nickel, Chromel/Constantan, T1/Advance, NiCr/Constantan)</small> | Br | Br | Bl | Pp | Pp | Wh |
| J (JX) | IRON*/CONSTANTAN <small>(Iron/Copper-Nickel, Fe/Konst, Iron/Advance, Fe/Constantan, I/C)</small> | Bk | Yw | Bl | Bk | Bk | Wh |
| K (KX) | NICKEL CHROMIUM/NICKEL ALUMINIUM* <small>(NiCrNA, Chromel/Alumel, C/A, T1/T2, NiCr/Ni, NiCr/NiAl)</small> | Rd | Br | Bl | Gn | Gn | Wh |
| N (NX), (NC) | NICROSIL/NISIL | Og | Og | Bl | Pk | Pk | Wh |
| T (TX) | COPPER/CONSTANTAN <small>(Copper/Copper-Nickel, Cu/Con, Copper/Advance)</small> | Bl | Wh | Bl | Br | Br | Wh |
| VX (KCB) | COPPER/CONSTANTAN (LOW NICKEL) <small>(Cu/Constantan) Compensating for 'K' (Cu/Constantan)</small> | Rd | Wh | Bl | Gn | Gn | Wh |
| U (RCA), (SCA) | COPPER/COPPER NICKEL <small>Compensating for Platinum 10% or 13% Rhodium/Platinum (Code S and R respectively) Copper/Cupronic, Cu/CuNi, Copper/No. 11 Alloy)</small> | Gn | Wh | Bl | Og | Og | Wh |

KEY : Bl-Blue Bk-Black Br-Brown Gn-Green Og-Orange Pk-Pink Pp-Purple Rd-Red Wh-White Yw-Yellow

Note : For THERMOCOUPLE CONNECTORS body colours are as outer sheath colours above.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Grafici temperatura-tensione



Le termocoppie di tipo T, J, e K sono le più utilizzate

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Material

Copper-Constantan (T Curve)

- The Copper-Constantan thermocouple, with a positive copper wire and a negative Constantan wire is recommended for use in mildly oxidizing and reducing atmospheres up to 400°C. They are suitable for applications where moisture is present. This alloy is recommended for low temperature work since the homogeneity of the component wires can be maintained better than other base metal wires. Therefore, errors due to the non-homogeneity of wires in zones of temperature gradients are greatly reduced.

Iron-Constantan (J Curve)

- The Iron-Constantan thermocouple with a positive iron wire and a negative Constantan wire is recommended for reducing atmospheres. The operating range for this alloy combination is 870°C for the largest wire sizes. Smaller wire sizes should operate in correspondingly lower temperatures.

Chromel-Alumel (K Curve)

- The Chromel-Alumel thermocouple, with a positive Chromel wire and a negative Alumel wire, is recommended for use in clean oxidizing atmospheres. The operating range for this alloy is 1260°C for the largest wire sizes. Smaller wires should operate in correspondingly lower temperatures.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Materials

Chromel-Constantan (E Curve)

- The Chromel-Constantan thermocouple may be used for temperatures up to 870°C in a vacuum or inert, mildly oxidizing or reducing atmosphere. At sub-zero temperatures, the thermocouple is not subject to corrosion. This thermocouple has the highest emf output of any standard metallic thermocouple.

Platinum-Rhodium (S and R Curve)

- Three types of noble-metal thermocouples are in common use. They are:
 - 1. The S curve shows a positive wire of 90% platinum and 10% rhodium used with a negative wire of pure platinum,
 - 2. The R curve indicates a positive wire of 87% platinum and 13% rhodium used with a negative wire of pure platinum, and
 - 3. (not shown) a positive wire of 70% platinum and 30% rhodium used with a negative wire of 94% platinum and 6% rhodium.
- They have a high resistance to oxidation and corrosion. However, hydrogen, carbon and many metal vapors can contaminate a platinum-rhodium thermocouple.
- The recommended operating range for the platinum-rhodium alloys is 1540°C, although temperatures as high as 1780°C can be measured with the Pt-30% Rh Vs Pt-6% Rh alloy combination.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Thermocouple Materials

Tungsten-Rhenium (C Curve)

- Three types of tungsten-rhenium thermocouples are in common use for measuring temperatures up to 2760°C. These alloys have inherently poor oxidation resistance and should be used in vacuum, hydrogen or inert atmospheres.

| Tipo | Coppie metalli/leghe | Range normale [°C] | Range esteso [°C] |
|------|----------------------|--------------------|-------------------|
| J | ferro/costantana* | -100÷750 | -200÷1100 |
| K | chromel**/alumel*** | 0÷1100 | -100÷1370 |
| E | chromel/costantana | -150÷500 | -200÷1000 |
| T | rame/costantana | -200÷300 | 230:400 |
| B | Pt80/Rh20/Pt94-Rh6 | 600÷1650 | 100÷820 |
| S | Pt90-Rh10/Pt | 550÷1500 | 0÷1700 |
| R | Pt90-Rh13/Pt | 550÷1500 | 0:1700 |
| N | Nicrasil-nichel | 0÷1300 | |

* Costantana: lega rame-nichel

** Chromel: lega nichel-cromo

*** Alumel: lega nichel-alluminio-silicio

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristiche tecniche principali

| | | J | K | T | B | E | S | R | N |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| T_{min} | °C | 0 | -200 | -200 | 100 | -200 | 0 | 0 | 0 |
| T_{max} | °C | 750 | 1250 | 350 | 820 | 900 | 1700 | 1450 | 1300 |
| $*V_{max}$ | mV | 42 | 51 | 18 | | 69 | | 17 | |
| Errore | °C | 2.2 | 2.2 | 0.8 | | 1.7 | | 1.4 | |
| Altro | <ul style="list-style-type: none"> • basso costo • sensibilità alta • accuratezza moderata | | <ul style="list-style-type: none"> • basso costo • sensibilità moderata • bassa accuratezza • resistenza all'ossidazione | | <ul style="list-style-type: none"> • costo contenuto • sensibilità moderata • alta accuratezza • adatta a basse temp. | | | | |

*Le V_{max} sono riportate ipotizzando la giunzione di riferimento a 0 °C

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

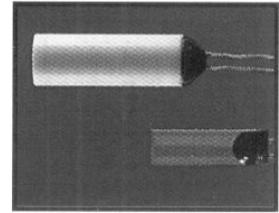
Sensori di temp. resistivi e a semiconduttore

- La resistenza elettrica di diversi materiali cambia con le variazioni di temperatura, in maniera riproducibile. Questo è il principio alla base del funzionamento sia delle termoresistenze che dei termistori
- Termoresistenze (RTD, *resistance temperature device or detector*): sono sensori di temperatura di precisione. Utilizzano un metallo conduttore (tipicamente un filo (*wire*) o uno strato metallico di platino) e ha un coefficiente di temperatura positivo (PTC, *positive temperature coefficient*): all'aumentare di T, la resistenza cresce pressoché linearmente.
- Termistori (thermistors): sono di materiale semiconduttore, hanno un elevato coefficiente di temperatura negativo (NTC, *negative temperature coefficient*): all'aumentare di T, la resistenza decresce.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- Grandezza misurata: temperatura
- Grandezza in uscita: variazione di resistenza
- Tipo di sensore:
 - modulante (termoresistivo)
- Richiede un circuito per la trasformazione della resistenza in tensione

- Temperature: $-200 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termoresistenze: principio di funzionamento

- Ogni metallo ha una resistività specifica ρ che varia con la temperatura

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

α , β , γ sono determinate sperimentalmente
 ρ_0 è la resistività misurata alla temperatura di riferimento T_0
(solitamente $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

- Per piccole variazioni di temperatura, β e γ sono trascurabili
- La resistenza di un filo metallico risulta:

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

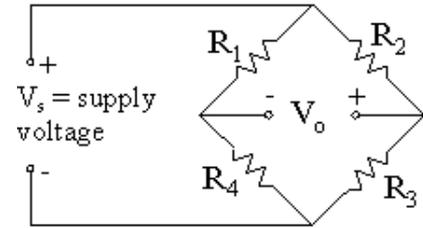
L = lunghezza del filo metallico
 A = area della sezione

- Esempio (platino, Pt100): $R_0 = 100 \text{ } \Omega$
Sensitività: $\frac{\Delta R}{\Delta T} = \rho_0 \alpha \frac{L}{A} = 0.392 \text{ } \Omega / \text{ }^\circ\text{C}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ponte di Wheatstone (*Wheatstone Bridge*)

- Circuito costituito da quattro resistori (R_1, R_2, R_3, R_4), alimentato da una tensione V_s
- Ipotesi: lo strumento che misura V_0 ha impedenza infinita



- Si hanno due partitori di tensione:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right)$$

- Il ponte si dice bilanciato se $V_0=0$:

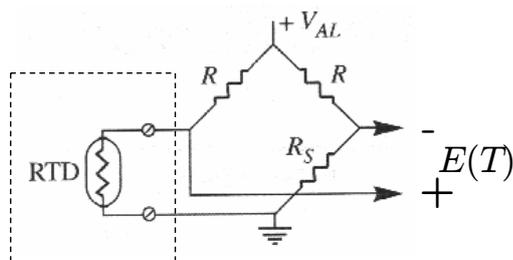
$$0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

a. Risulta $R_3 R_1 = R_4 R_2$, ossia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

b. I resistori sono identici: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone



$$E(T) = V_{AL} \left(\frac{R(T)}{R + R(T)} - \frac{R_S}{R + R_S} \right)$$

- per bilanciare il ponte per $T=T_0$: $R_S = R(T_0)$
- definendo $\Delta R(T) = R(T) - R_S$:

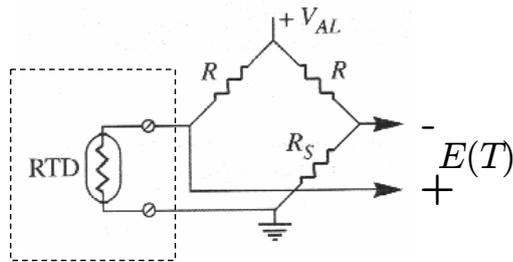
$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S}$$

Nota: la RTD è percorsa da una corrente I e quindi dissipa una potenza $R(T)I^2$. Pertanto la temperatura T sarà maggiore della temperatura da misurare. Occorrerà quindi avere I molto piccola (es: 1 mA).

Regola empirica per calcolare la differenza di temperatura dovuta alla dissipazione termica: $\Delta T \approx \frac{R(T)I^2}{80 \div 100 \text{ mW}/^\circ\text{C}}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone



$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S}$$

• Esempio (Pt100):

- Range di temperatura: 0÷500 °C

- $T_0 = 0 \text{ °C}$ • $V_{AL} = 24 \text{ V}$ $\Delta R(500) \approx 200 \text{ } \Omega$

- $R_S = 100 \text{ } \Omega$ • $R = 24 \text{ k}\Omega$ $I \approx 1 \text{ mA}$

$$E(T) \approx 0.2 \text{ V}$$

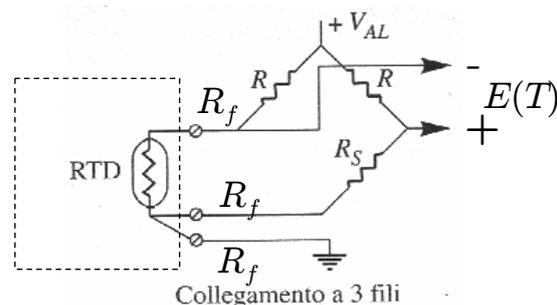
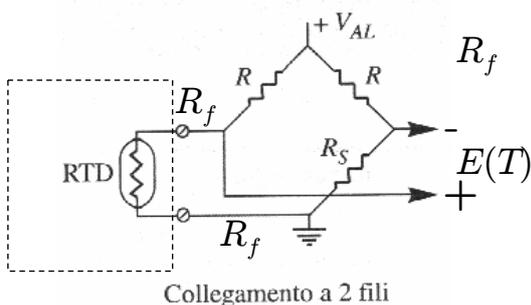
Sensitività (media):

$$S(T) = \frac{E(T) - E(T_0)}{T - T_0} = V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S} \frac{1}{T - T_0} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ V/}^\circ\text{C}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduzione con ponte di Wheatstone

- Consideriamo adesso che la resistenza R_f dei fili di collegamento sia $\neq 0$:



- 2 fili:
$$E(T) = V_{AL} \left(\frac{R(T) + 2R_f}{R + R(T) + 2R_f} - \frac{R_S}{R + R_S} \right)$$

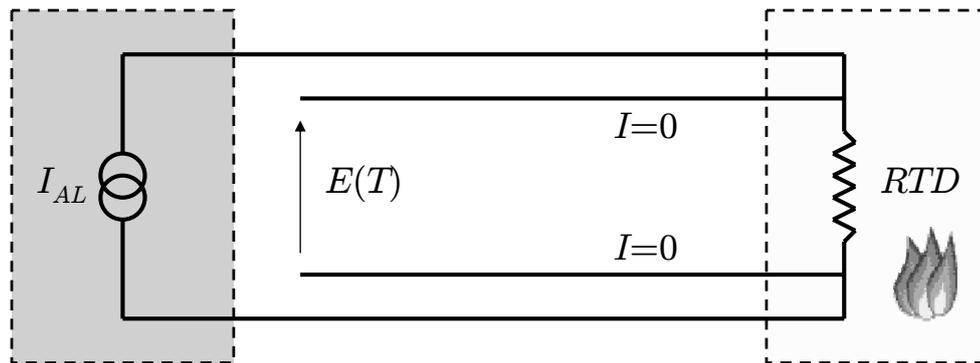
per bilanciare il ponte: $R_S = R_0 + 2R_f$
(R_S dipende da R_f)

- 3 fili:
$$E(T) \approx V_{AL} \frac{\Delta R(T)}{R + R_S + 3R_f}$$

Il ponte è ancora bilanciato per $R_S = R_0$
(R_S non dipende da R_f)

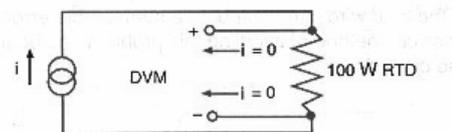
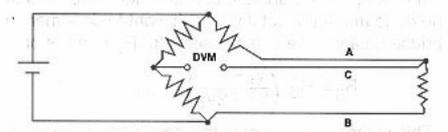
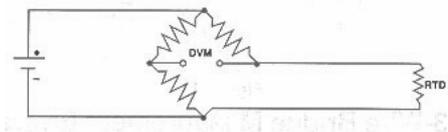
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- 4 fili:



Termoresistenze: caratteristiche

- La resistenza dei cavi può essere non trascurabile
 - 2-fili: se i cavi di collegamento sono molto corti (o non ci sono)
 - 3-fili: compensa bene la resistenze parassite dei cavi.
 - 4-fili: si ottiene la accuratezza/precisione migliore.
- Tempi di risposta lenti
- Sensibile a shock e vibrazioni
- Autoriscaldamento



Termoresistenze: caratteristiche

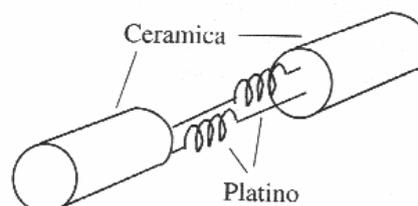
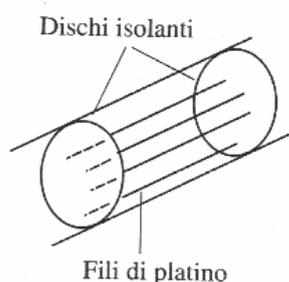
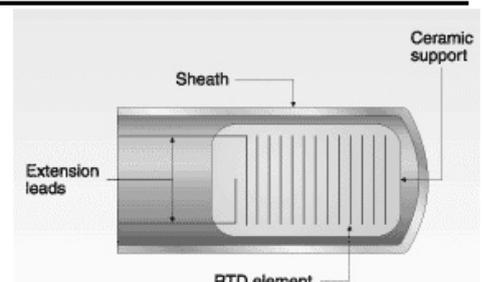
| RTD | Range normale |
|-------------------------------|---------------|
| Pt: 100 Ω DIN (4376) | -180÷800 °C |
| Pt: 100 Ω JIS (C-1604) | -180÷650 °C |
| Ni: 120 Ω Ed#7 | -45÷315 °C |
| Cu: 10 Ω | -20÷250 °C |

- Bassa resistenza
 - da 100 Ω (tipico) fino a 1000 Ω
- Range operativo piuttosto ampio: (-200 °C to 850 °C)
- Sensitività elevata (rispetto alle termocoppie)
- Accuratezza elevata (da ± 0.0006 °C a 0.1°C)
- Ripetibilità e stabilità ottime
 - Deriva (*drift*) anche molto bassa (0.0025 °C/year)
 - Nei componenti industriali: drift < 0.1 °C/year

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termoresistenze: caratteristiche

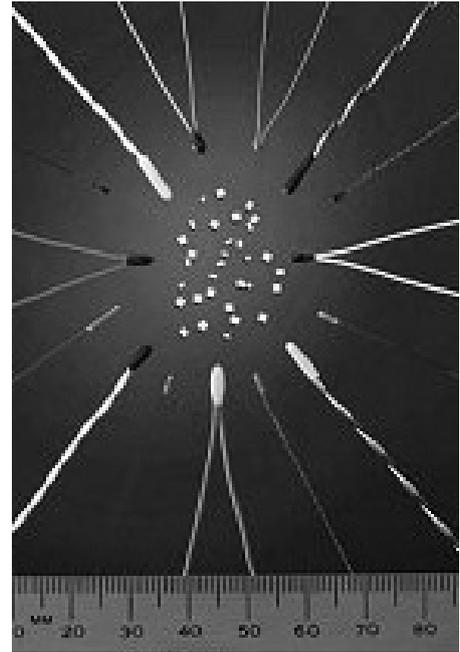
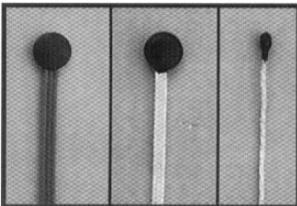
- Tipi di metallo:
 - Platino (high cost, highly linear, most common)
 - Tungsteno (highly linear)
 - Rame (*Copper*) (lower temperature ranges)
 - Nichel (lower temperature, low cost, nonlinear)
 - Leghe di nichel (lower temperature, low cost)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termistori (*Thermistors*)

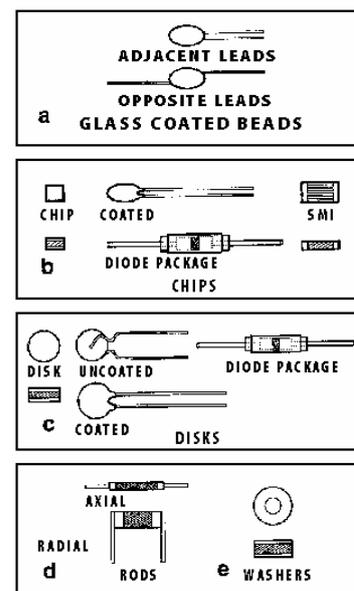
- Resistenza elevata: da 1 k Ω a 100 k Ω
 - Non ci sono grossi problemi di resistenze parassite dei cavi
- R(T) altamente non lineare
 - Solitamente NTC (ossidi metallici), ma anche di tipo PTC (miscela di titanato di stronzio e bario)
- Piccole dimensioni (ordine del mm)
 - Tempi di risposta molto brevi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



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termistori: svantaggi

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



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Relazione resistenza-temperatura (NTC)

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

- R_0 = resistenza di riferimento misurata alla temperatura T_0

- T = temperatura misurata (K)

- β = costante del materiale

- Invertendo: $\log R = \log R_0 + \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$

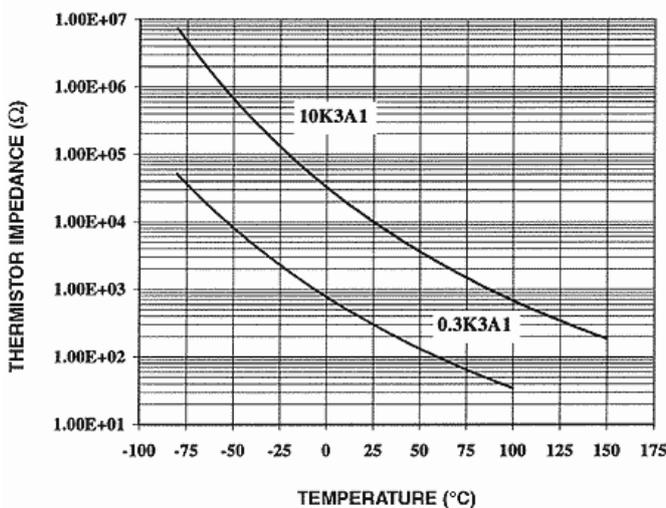
$$\Rightarrow \frac{1}{T} = \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{\beta} \log R_0 \right) + \frac{1}{\beta} \log R$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} = A + B \log R$$

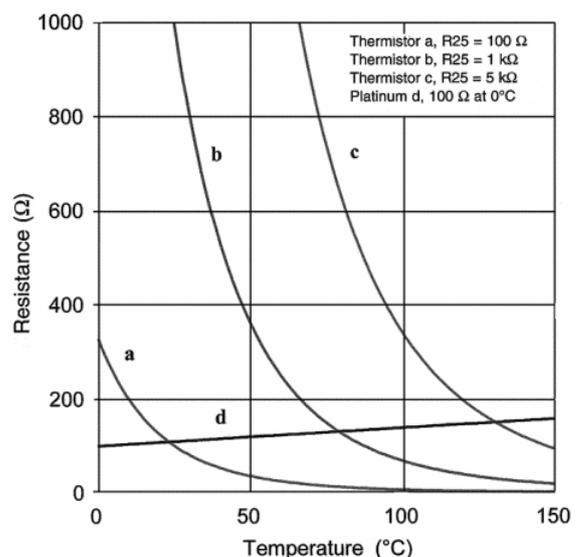
- Sensitività $S(T) = \frac{dR}{dT} = -\frac{R_0 \beta}{T^2} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temp. resistivi e a semiconduttore



Comparative Resistance Graph
Thermistor vs. RTD



Schema di collegamento:

- ponte di Wheatstone
- collegamento a 4 fili

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori a circuito integrato (*IC thermometer*)

- I sensori a circuito integrato contengono un sensore di temperatura e la relativa circuiteria per il condizionamento del segnale. Viene talvolta usato nei circuiti di compensazione della temperatura.
- La tensione (o corrente) di uscita è molto lineare nella temperatura.
 - Richiede una tensione di ingresso al sensore
 - Alcuni dispositivi digitalizzano il segnale e lo rendono disponibile su un'uscita seriale
- Accuratezza: circa 0.5 °C
- Basso costo
- Poco sensibile a rumori di tensione e alle resistenze parassite dei cavi di collegamento
- Range temperature: < 200 °C
- Dinamica: lenta
- Problemi dovuti all'autoriscaldamento

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori a circuito integrato (*IC thermometer*)

LM35, LM45 Celsius Sensors

The LM35 and LM45 are three-terminal devices that produce output voltages proportional to °C (10mV/°C), so the nominal output voltage is 250mV at 25°C and 1.000V at 100°C. These sensors can measure temperatures below 0°C by using a pull-down resistor from the output pin to a voltage below the "ground" pin (see the "Applications Hints" section). The LM35 is more accurate ($\pm 1^\circ\text{C}$ from -55°C to $+150^\circ\text{C}$ vs. $\pm 3^\circ\text{C}$ from -20°C to $+100^\circ\text{C}$), while the LM45 is available in the "Tiny" SOT-23 package. The LM35 is available in the plastic TO-92 and SO-8 packages, and in the TO-46 metal can.

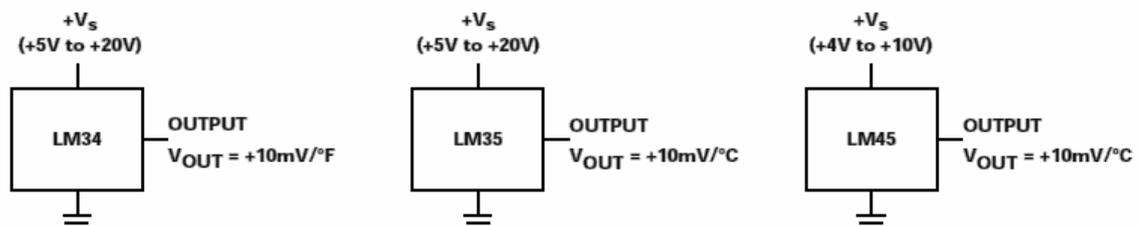
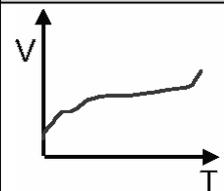
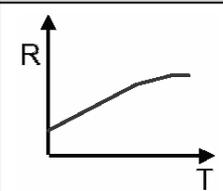
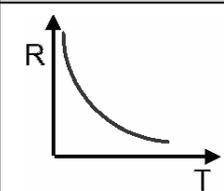
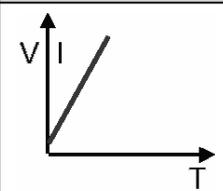


Figure 3.2. LM34, LM35, LM45 Typical Connections. Each IC is essentially a 3-terminal device (supply, ground, and output), although some are available in packages with more pins.



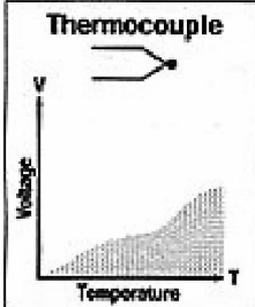
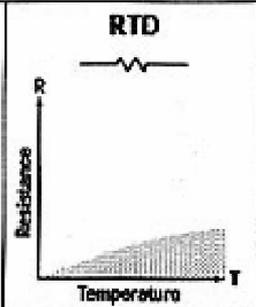
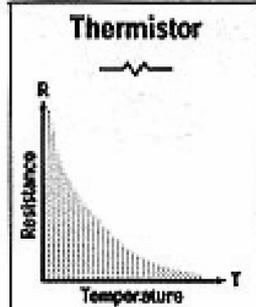
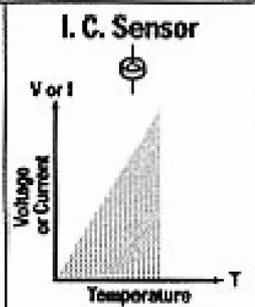
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

| | Termocoppie | RTD | Termistori | Sensori IC |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| |  |  |  |  |
| Pro | <ul style="list-style-type: none"> •autoeccitante •semplice •robusto •economico | <ul style="list-style-type: none"> •stabile •accurato •lineare | <ul style="list-style-type: none"> •sensibile •veloce •misura a 2 fili | <ul style="list-style-type: none"> •lineare •output elevato •Economico |
| Contro | <ul style="list-style-type: none"> •non lineare •bassa V out •richiede T_{ref} •sensibilità | <ul style="list-style-type: none"> •costosa •R bassa •autoriscald. | <ul style="list-style-type: none"> •non lineare •range •autoriscald. | <ul style="list-style-type: none"> •$T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ •alimentazione •lento •autoriscald. |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

| | Thermocouple | RTD | Thermistor | I. C. Sensor |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| |  |  |  |  |
| Advantages | <ul style="list-style-type: none"> • Self-powered • Simple • Rugged • Inexpensive • Wide variety of physical forms • Wide temperature range | <ul style="list-style-type: none"> • Most stable • Most accurate • More linear than thermocouple | <ul style="list-style-type: none"> • High output • Fast • Two-wire ohms measurement | <ul style="list-style-type: none"> • Most linear • Highest output • Inexpensive |
| Disadvantages | <ul style="list-style-type: none"> • Non-linear • Low voltage • Reference required • Least stable • Least sensitive | <ul style="list-style-type: none"> • Expensive • Slow • Current source required • Small resistance change • Four-wire measurement | <ul style="list-style-type: none"> • Non-linear • Limited temperature range • Fragile • Current source required • Self-heating | <ul style="list-style-type: none"> • $T < 250^{\circ}\text{C}$ • Power supply required • Slow • Self-heating • Limited configurations |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

Table 1. Temperature Sensor Ranges

| Sensor | Temperature Range (°C) | Temperature Range (°F) |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Type K thermocouple | -200 to 1250 | -328 to 2282 |
| Type J thermocouple | 0 to 750 | 32 to 1382 |
| Type T thermocouple | -200 to 350 | -328 to 662 |
| Type E thermocouple | -200 to 900 | -328 to 1652 |
| Pt 100 RTD ($\alpha=0.00385$) | -200 to 850 | -328 to 1562 |
| Thermistor | -40 to 200 | -40 to 392 |
| IC sensor | -40 to 125 | -40 to 257 |
| Infrared thermometer | -18 to 1370 | 0 to 2500 |

Source: Omega Engineering

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura: Confronti

A Guide to Choosing between Thermocouples, Resistance Thermometers and Thermistors

Thermocouples Resistance Thermometers and Thermistors are in effect electrical temperature transducers and not direct-indicating thermometers such as mercury-in-glass devices.

In the majority of industrial and laboratory processes, the measurement point is usually remote from the indicating or controlling instrument. This may be due to necessity (e.g. an adverse environment) or convenience (e.g. centralised data acquisition). Devices are required which convert temperature into another form of signal, usually electrical and most commonly thermocouples, resistance thermometers and thermistors.

Alternative indirect techniques for sensing and measuring temperature include optical pyrometry, other non-contact (infra red), fibre-optic and quartz oscillation systems.

The use of thermocouples, resistance thermometers and thermistors requires some form of physical contact with the medium. Such contact can be immersion or surface depending on the sensor construction and the application.

Thermocouples Resistance Thermometers and Thermistors

Thermocouples essentially comprise a thermoelement (a junction of two specified dissimilar metals) and an appropriate two wire extension lead. A thermocouple operates on the basis of the junction located in the process producing a small voltage which increases with temperature. It does so on a reasonably stable and repeatable basis.

Resistance Thermometers utilise a precision resistor, the Ohms value of which increases with temperature (in the case of a positive temperature coefficient). Such variations are very stable and precisely repeatable.

Thermistors are an alternative group of temperature sensors which display a large value of temperature coefficient of resistance (usually negative, sometimes positive). They provide high sensitivity over a limited range

In practical terms, the alternative types of assembly utilise similar (in some case identical) construction but must be used in different ways depending on the application.

| | Platinum Resistance Thermometer | Thermocouple | Thermistor |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Sensor | Platinum-wire wound or flat-film resistor | Thermoelement, two dissimilar metals/alloys | Ceramic (metal oxides) |
| Accuracy (typical values) | 0.1 to 1.0°C | 0.5 to 5.0°C | 0.1 to 1.5°C |
| Long term Stability | Excellent | Variable, prone to ageing | Good |
| Temperature range | -200 to 650°C | -200 to 1750°C | -100 to 300°C |
| Thermal response | Wirewound - slow Film - faster 1-50 secs typical | Sheathed - slow Exposed tip - fast 0.1 to 10 secs typical | Generally fast 0.05 to 2.5 secs typical |
| Excitation | Constant current required | None | Constant current required |
| Characteristic | PTC resistance | Thermovoltage | NTC resistance (some are PTC) |
| Linearity | Fairly linear | Most types non-linear | Exponential |
| Lead resistance effect | 3 & 4 wire - low 2 wire - high | Short cable runs satisfactory | Low |
| Electrical "pick-up"/Interface | Rarely susceptible/ Bridge 2,3 or 4 wire | Susceptible/ Potentiometric input. Cold junction compensation required | Not susceptible/ 2 wire resistance |
| Vibration effects/shock | Wirewound - not suitable Film - good | Mineral insulated types suitable | Suitable |
| Output/characteristic | approx. 0.4 Ohms/°C | From 10µV/°C to 40µV/°C depending on type | -4% / °C |
| Extension Leads | Copper | Compensating cable | Copper |
| Cost | Wirewound - more expensive Film - cheaper | Relatively low cost | Inexpensive to moderate |

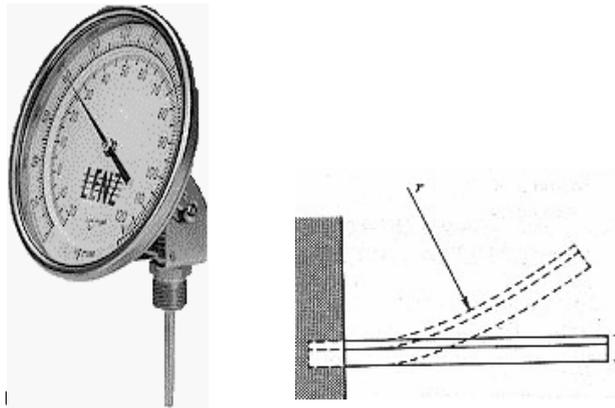
Comments and values shown in this chart are generalised and nominal. They are not intended to be definitive but are stated for general guidance. The information given shows average application experience, but some of the considerations can be modified by special design or selection.

<http://www.labfacility.co.uk/temperature/guide.html>

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri bimetallici (*bimetal thermometers*)

- Costituiti da due lamine di metalli aventi coefficienti di temperatura diversi. Al variare della temperatura, la diversa espansione dei metalli provoca un'incurvatura. Fissando una delle due estremità, si può misurare la variazione di temperatura misurando la deflessione
 - Forma: a spirale o a elica
 - Usati spesso nei termostati (*thermostats*) [controllo on/off della temperatura]
 - Materiali: M_1 = ottone o nichelcromo, M_2 = invar (ferro con 36% nichel)
- Range di utilizzo:
 - Da -65 a 430 °C
- Accuratezza:
 - Da ± 0.5 a 12°C
- Vantaggi:
 - Basso costo
 - Manutenzione praticamente nulla
 - Stabile nel tempo

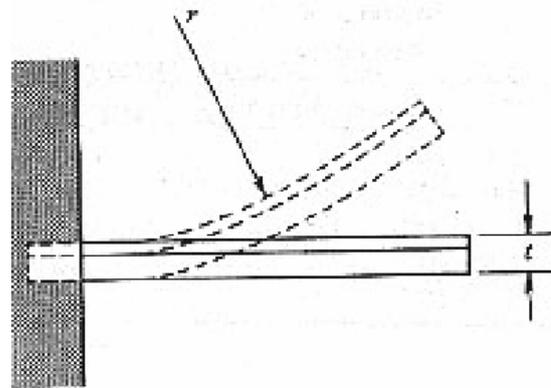


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri bimetallici

- r = raggio di curvatura
- t = spessore totale
- m = rapporto fra gli spessori:
 - Spessore materiale con bassa espansione / spessore materiale ad alta espansione
- n = rapporto dei moduli di Young
 - modulo materiale con bassa espansione / modulo materiale ad alta espansione
- α_1 = coefficiente di espansione termica (1/°C), materiale a bassa espansione
- α_2 = coefficiente di espansione termica (1/°C), materiale ad alta espansione
- T = temperatura (°C)
- T_0 = temperatura con lamina bimetallica a riposo (°C)

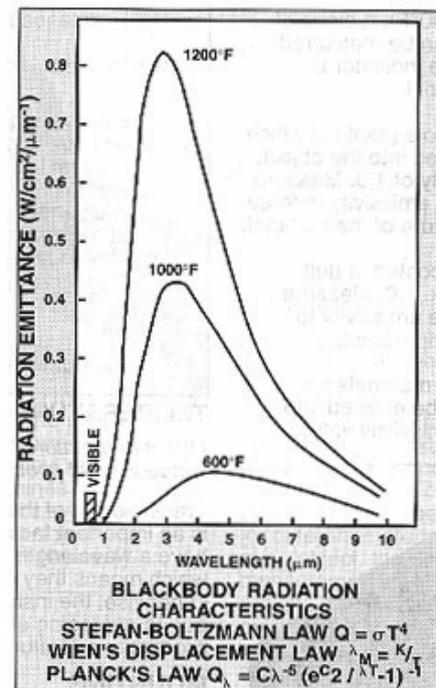
$$r = \frac{t\{3(1+m)^2 + (1+mn)[m^2 + (mn)^{-1}]\}}{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)(1+m)^2}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Termometri a infrarossi (*Infrared Thermometers*)

- L'infrarosso è la porzione dello spettro compresa fra lunghezze d'onda di 0.7 e 1000 μm
- Si basano sul principio che tutti gli oggetti a temperatura $> 0\text{ K}$ emettono energia nell'infrarosso
- I termometri all'infrarosso permettono di determinare la temperatura di un oggetto **SENZA CONTATTO**, misurando la quantità di energia emessa nell'infrarosso dall'oggetto.
- Gli attuali strumenti IR permettono di misurare il range compreso fra 0.7 e 20 μm



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Cameras



| | |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|
| Operating Temperature | 5 to 122 °F (-15 to 50 °C) |
| Measuring Temperature | -40 to 3630 °F (-40 to 2000 °C) |
| Accuracy | ±2% of range or ±4 °F (±2 °C) |
| Sensitivity | 0.2 °F (0.1 °C) |
| Image Storage Capacity | 700 (14 bit) on 100 MB Card |
| Digital Voice Recorder for Active Documentation | yes, 30 sec per image |
| Camera Weight | 5 lbs. |

Modern infrared cameras are light weight, portable, and can accurately measure dynamic temperature changes in equipment and processes. They have the ability to measuring thermal variations of less than 0.1 °C and are non-invasive.

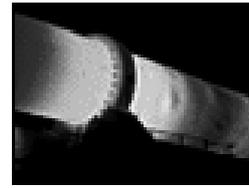
Attaching thermocouples, RTD's, or thermistors is seldom an option in moving components. In addition, thermocouples cannot be attached at every location on the component.

The biggest advantage over conventional temperature measurement techniques is that a total picture of the component or system is possible.

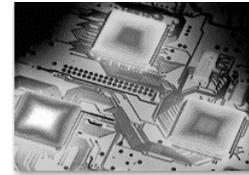
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Camera Examples

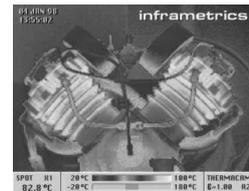
- Piping →
 - Heat transfer coils
 - Valve operation



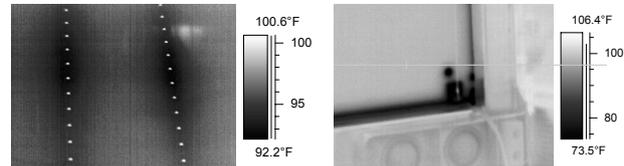
- Electronics →



- Engines/Compressors →



- Building/Structures →



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Single-point Infrared Temperature Sensors

- Non-contact infrared thermometers uses:
 - Facility maintenance
 - Utilities and electrical inspection
 - Medical industry
 - HVAC/R maintenance and inspection
 - Food safety
 - Automotive and diesel maintenance
 - Asphalt, cement, and construction materials.
- Infrared thermometers measure the surface temperature of objects within their field of view. Focal length of instrument is important consideration.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Infrared Thermocouples (IRt/c)

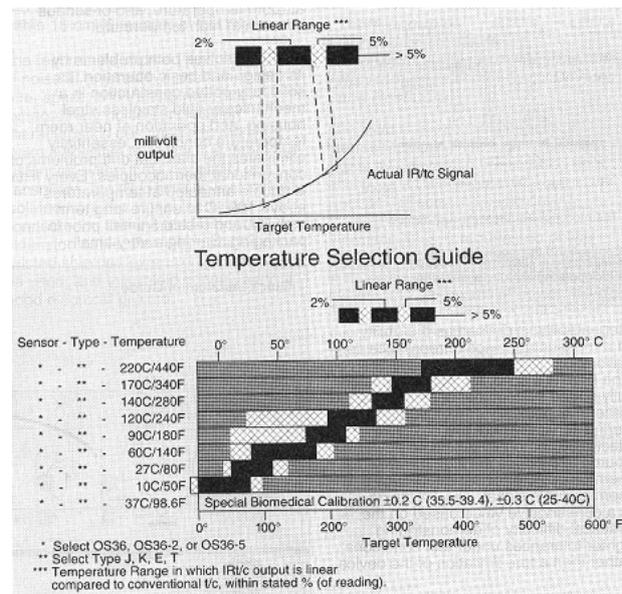
- New method of surface temperature measurement
 - Unpowered
 - Low cost
 - Non-invasive
 - They can be installed on conventional thermocouple controllers.
- How do they work?
 - Receives heat energy from the object that it is aimed at and converts the heat to an electrical potential.
 - Millivolt output signal is produced. This signal is scaled to the desired thermocouple characteristics.
 - Adhere to the same laws as other infrared thermometers.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

IR Thermocouples

- Even though the overall governing equations are nonlinear, the infrared thermocouples output is linear over a small enough range
- Uses:
 - Monitoring process temperatures.
 - Web roller temperature control.
 - Asphalt temperature monitoring.
 - Processing oven temperatures.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Summarize IR Thermometer Advantages

- IR thermometers can measure objects that move, rotate, or vibrate.
- They can measure temperatures >1500 °C
- They do not damage or contaminate the surface of the object of interest (food, painted surfaces)
- Response time is in the millisecond range.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di temperatura

Fine

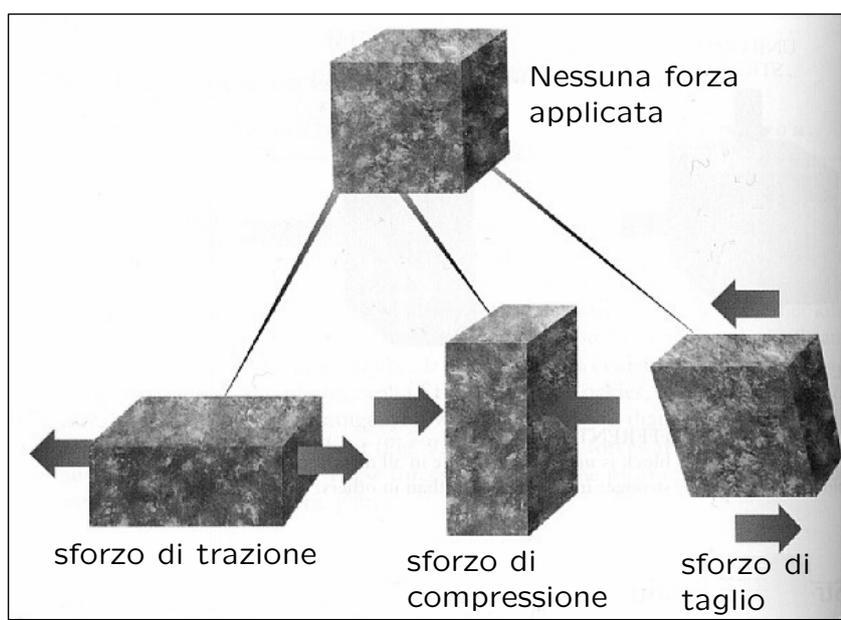
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di deformazione (e forza)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

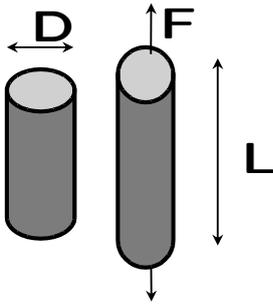
Sforzo e deformazione



- Sforzo (*stress*)
 - Si ha uno sforzo ogni qualvolta che si applica una forza ad un corpo [N/m^2].
- Deformazione (*strain*)
 - È il rapporto fra l'incremento di lunghezza di un corpo e la sua lunghezza originale [adimensionale]

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sforzo e deformazione



sforzo assiale: $\sigma_a = \frac{F_l}{A}$

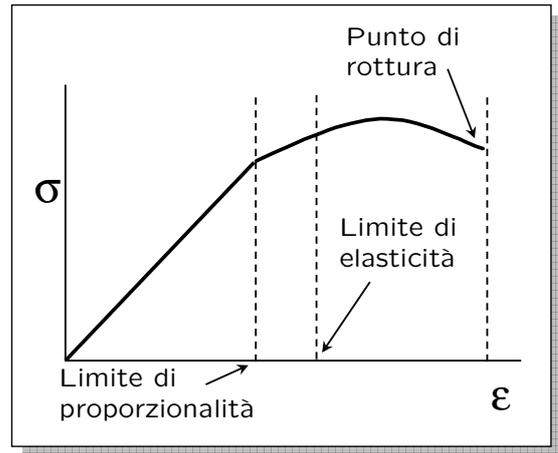
deformazione assiale: $\epsilon_a = \frac{\Delta L}{L}$

deformazione trasversale: $\epsilon_t = \frac{\Delta D}{D}$

modulo di Poisson: $\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} = -\frac{\Delta D/D}{\Delta L/L}$

(tipicamente = 0.3)

modulo di Young (o di elasticità): $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$



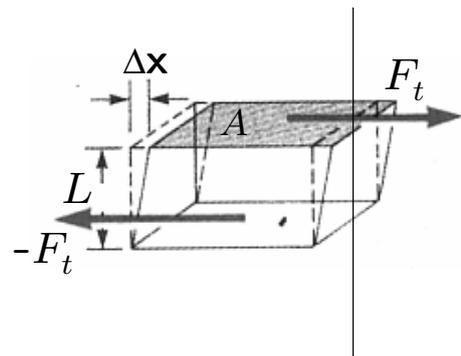
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sforzo di taglio

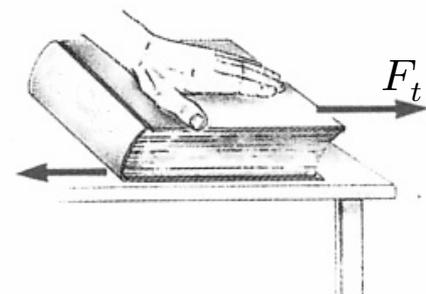
sforzo di taglio (*shear stress*): $\sigma_t = \frac{F_t}{A}$

scorrimento: $\epsilon_s = \frac{\Delta x}{L}$

modulo di scorrimento: $M_t = \frac{\sigma_t}{\epsilon_s}$



Esempio:



| Materiale | E (N/m ²) | M _t (N/m ²) |
|-----------|------------------------------|------------------------------------|
| Acciaio | 20 × 10 ¹⁰ | 8.4 × 10 ¹⁰ |
| Alluminio | 7.0 × 10 ¹⁰ | 3.0 × 10 ¹⁰ |
| Ferro | 19 × 10 ¹⁰ | 7.0 × 10 ¹⁰ |
| Ottone | 9.1 × 10 ¹⁰ | 3.6 × 10 ¹⁰ |
| Piombo | 1.6 × 10 ¹⁰ | 0.56 × 10 ¹⁰ |
| Rame | 11 × 10 ¹⁰ | 4.2 × 10 ¹⁰ |
| Vetro | (6.5÷7.8) × 10 ¹⁰ | (2.6÷3.2) × 10 ¹⁰ |
| Tungsteno | 35 × 10 ¹⁰ | 14 × 10 ¹⁰ |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduttori di deformazione

- Estensimetri (*strain gages* o *gauges*)
 - Si basano sul principio per cui la resistenza elettrica di un materiale varia con la deformazione
 - Misurano deformazioni locali e in una direzione, oppure in più dimensioni qualora si usino estensimetri a rosetta (*rosette gages*)
 - Sono i sensori di deformazione più utilizzati
- Trasduttori piezoresistivi
 - Utilizzano come elemento deformabile un cristallo di silicio (chip) sul quale si realizzano resistenze estensimetriche mediante tecniche di diffusione.
- Risonatori su silicio
 - Realizzati su silicio, la frequenza di risonanza dipende dalla deformazione trasversale del risonatore
- Trasduttori induttivi (vedi trasformatore diff. lineare, LVDT)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Estensimetri (*strain gages*)

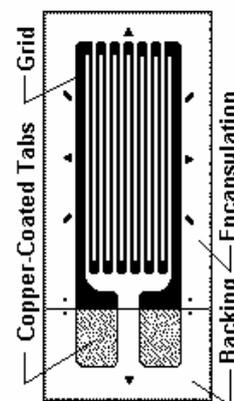
- Sono conduttori che se sottoposti a trazione elastica modificano la loro resistenza elettrica

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

L = lunghezza del conduttore
 A = area della sezione trasv. del conduttore
 ρ = resistività

- All'aumentare della deformazione, L cresce, e quindi R cresce
- All'aumentare della deformazione, A decresce, e quindi R cresce
- Per la maggior parte dei materiali, all'aumentare della deformazione ρ cresce, e quindi R cresce ulteriormente

CEA-Series Strain Gage



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08



Gage factor

• Gage factor: $\lambda = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$

(indicato anche con GF o F in letteratura)
Dipende dal materiale con cui è fatto l'estensimetro)

• Proprietà: $\lambda = \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon_a} + 1 + 2\nu$

differenziale della funzione $R(\rho, L, A)$ rispetto a (ρ, L, A)

Infatti:

$$\Delta R = \Delta \left(\frac{\rho L}{A} \right) = \frac{L}{A} \Delta \rho + \frac{\rho}{A} \Delta L - \frac{\rho L}{A^2} \Delta A$$

$$A = CD^2,$$

$$C = 1 \text{ (quadrato)}, C = \pi/4 \text{ (cerchio)}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta D}{D}$$

$$\lambda = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L} + 1 - 2 \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} = \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon_a} + 1 + 2\nu$$

spesso trascurabile

• Trasduzione: $\frac{\Delta R}{R} = \lambda \epsilon_a$

Strain gage: Valori tipici

- Per avere alta sensitività, si useranno materiali con gage factor elevato
- Il gage factor di solito è compreso fra 1.6 e 4 (es: 2 per la costantana), ma per alcuni semiconduttori arriva fino a 200
- Se la resistività ρ non cambia con la deformazione: $\lambda = 1 + 2\nu$ (per $\nu=0.3$, $\lambda=1.6$)
- Resistenza elettrica R:
 - 120÷350 Ω
 - 1000 Ω per materiali plastici
- La deformazione assiale ϵ_a di solito varia fra 10^{-6} a 10^{-3} , il che vuol dire che per $R = 240 \Omega$, $\Delta R = \lambda(0.00024 \div 0.24) \Omega$ (molto piccola !)

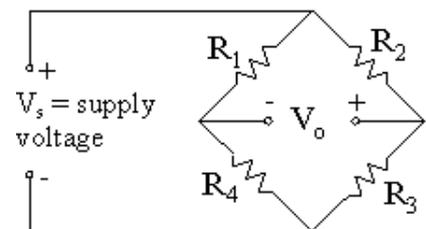
$$\Delta R = \lambda \epsilon_a R$$

ΔR di solito si misura mediante ponte di Wheatstone

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ponte di Wheatstone (*Wheatstone Bridge*)

- Circuito costituito da quattro resistori (R_1, R_2, R_3, R_4), alimentato da una tensione V_s
- Ipotesi: lo strumento che misura V_0 ha impedenza infinita



- Dalla legge di Ohm:
$$V_0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$
- Il ponte si dice bilanciato se $V_0=0$
 - a. I resistori sono identici: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
 - b. Risulta $R_3 R_1 = R_4 R_2$, ossia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

In questo caso è facile dimostrare che

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

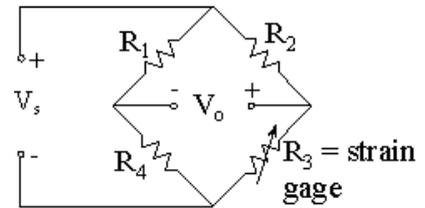
Quarter Bridge Circuit

- $R_3(\epsilon_a)$ = resistenza dello strain gage
- Ipotesi: $V_0=0$ a deformazione nulla, e

$$R_2 = R_3, R_1 = R_4$$

Es:

- $R_3(0) = 120 \Omega$
- $R_1=R_2=R_4=120 \Omega$



$$V_0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

- In queste ipotesi, con facili manipolazioni algebriche si ottiene

$$V_0 = \frac{1}{4} V_s \lambda \epsilon_a$$

Nota: se $R_1 = K R_4$ dove $K = R_2 / R_3$, si ottiene $V_0 = \frac{K}{(K+1)^2} V_s \lambda \epsilon_a$, che è massima per $K=1$, ovvero per $R_2 = R_3$ e $R_1 = R_4$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

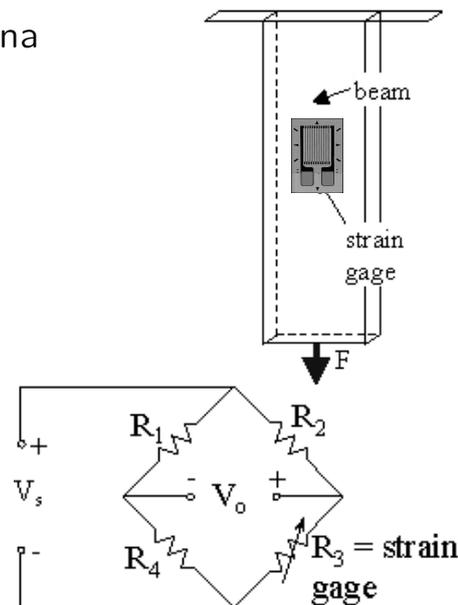
Quarter Bridge Example

- Esempio: determinare la deformazione di una barra sottoposta a trazione
 - $V_s = 5 \text{ V}$
 - $\lambda = 1.8$
 - Ponte bilanciato in assenza di carico F

Applicando il carico F , si misura $V_0 = 2.1 \text{ mV}$

$$\epsilon_a = 4 \frac{V_0}{V_s} \frac{1}{\lambda} = 4 \frac{2.1 \text{ mV}}{5000 \text{ mV}} \frac{1}{1.8}$$

... 0.000930 strain = 930 microstrain

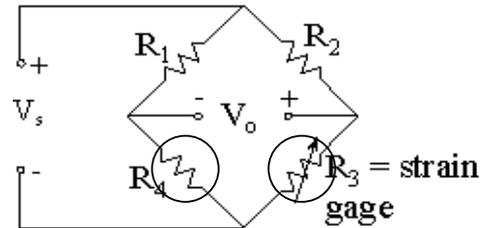
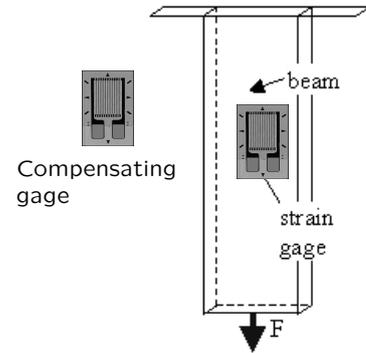


Problema: le variazioni di R dovute alla deformazione sono dello stesso ordine di quelle dovute alla variazione della temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Compensazione della temperatura

- Soluzione 1: Estensimetri autocompensati. Hanno un λ tale da compensare gli effetti della dilatazione termica del corpo a cui sono applicati
- Soluzione 2: Agire a livello di ponte di Wheatstone, applicando un secondo estensimetro (al posto di R_2 o R_4), che però non viene sollecitato
- Esempio: $R_1 = R_2 = R$
 $R_4 = R + \Delta R(T)$
 $R_3 = R + \Delta R(T) + \Delta R(L)$



Si ottiene ancora V_0 per ogni T

$$V_0 \approx \frac{1}{4} V_s \lambda \epsilon_a$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

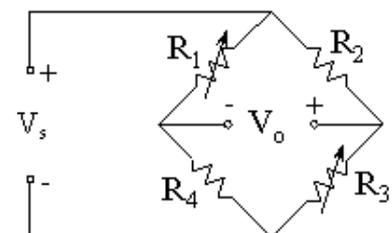
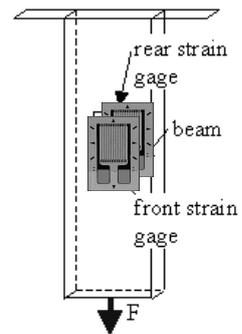
Half Bridge Circuit

- Usiamo adesso due strain gage (entrambe attivi)
- Ipotesi: ponte inizialmente bilanciato
- Ricordando che

si ottiene
$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

$$V_0 = \frac{1}{2} V_s \lambda \epsilon_a$$

- Il circuito half bridge produce una tensione doppia rispetto al quarter bridge (sensibilità raddoppiata)



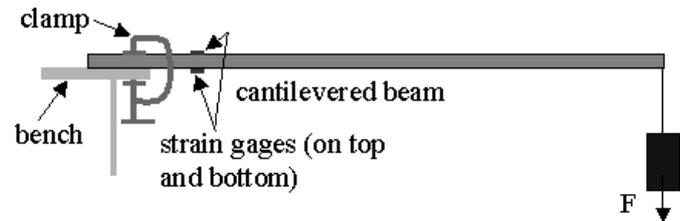
NB: se avessimo messo lo strain gage su R_2 avremmo avuto $V_0 = 0$!

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Esempio con due gage attivi

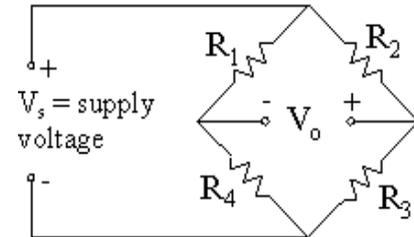
- Avendo un gage in tensione ed uno in compressione, si ha

$$\Delta R_{\text{compressione}} = -\Delta R_{\text{tensione}}$$



- Dove dobbiamo posizionare gli strain gage nel ponte di Wheatstone ?

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\underbrace{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}}_{\text{Scelta 1}} + \underbrace{\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}}_{\text{Scelta 2}} \right]$$

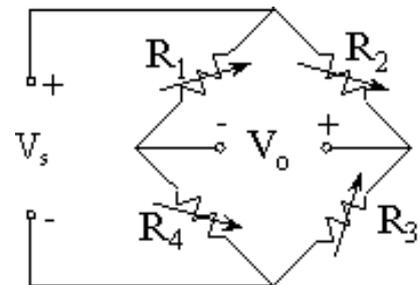


- Le uniche scelte possibili sono le posizioni 1 e 2 oppure 3 e 4 (altrimenti $V_0=0$)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Full Bridge Circuit (4 gage attivi)

- Tutti i resistori sono sostituiti dagli strain gage
- Attenzione a come collegare gli strain gage:



- ad esempio R_1 e R_3 devono avere deformazione positiva, mentre R_2 e R_4 negativa

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

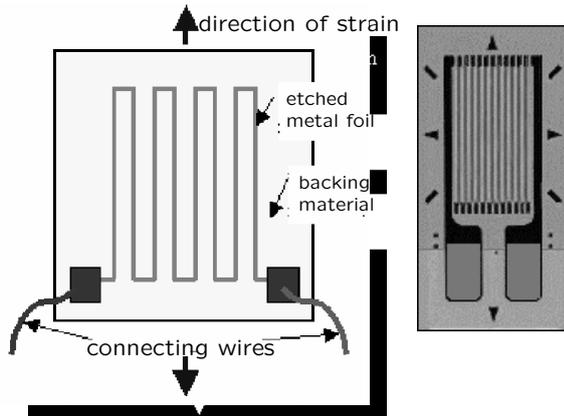
- La sensibilità è 4 volte maggiore rispetto alla configurazione quarter bridge

$$V_0 = V_s \lambda \epsilon_a$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipi di strain gage

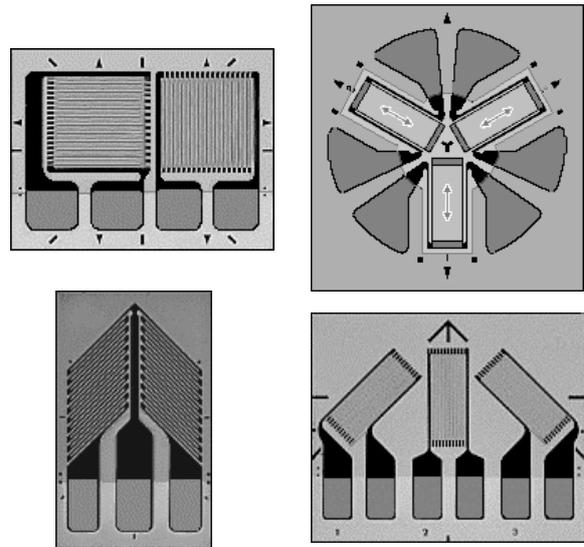
A elemento singolo



Viene misurato lo sforzo medio sull'area occupata dal gage

La dimensione del gage è importante !

A rosetta

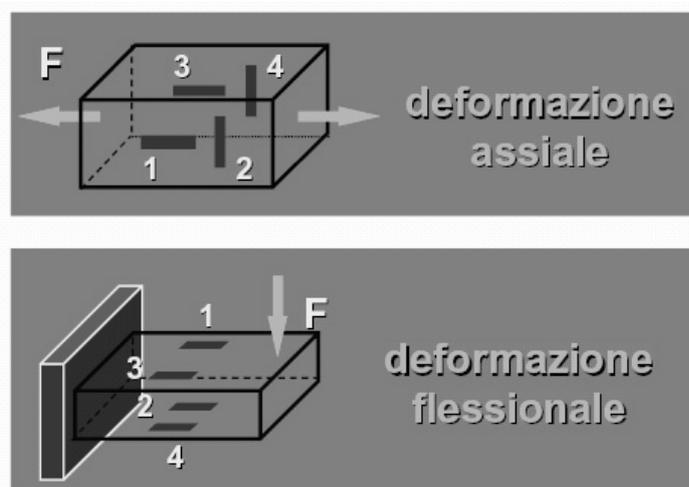


*Le componenti dello sforzo si ricavano dalle tensioni misurate risolvendo un set di equazioni

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Misura di forza

Estensimetri incollati su una struttura metallica che si deforma con l'applicazione della forza



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

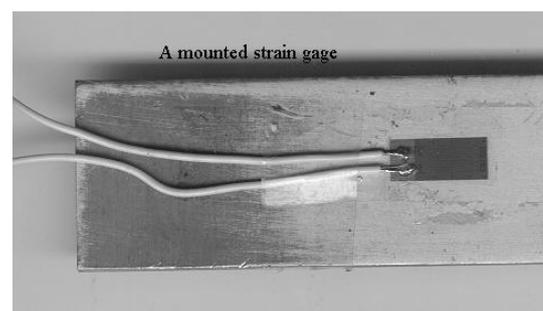
Caratteristiche tecniche essenziali

| parametro | film metallico | semiconduttore |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| GF | $\approx 2 \pm 1\%$ | $\approx 100 \pm 3\%$ |
| Rnom(Ω) | 120, 350 | molti valori |
| $\Delta R / \Delta T$ (p.p.m / $^{\circ}\text{C}$) | 5÷50 | 100÷500 |
| linearità | dipende dall'allestimento meccanico | |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Gages

- Normally strain gages are accurate to $\pm 1\%$. However, mounting (**orientation and bonding**) and environmental errors introduce additional uncertainty, $\pm 1\%$ to 3% .
 - Or much worse!!
- Measure strains from 1×10^{-6} to 0.2 inch/inch. Can be applied to nearly any surface.
- Frequency response is on the order of 50 kHz.
- Gage selections based on:
 - Gage alloy selection, number of gages, gage length, gage width, solder tab type, gage pattern, temperature compensation, grid resistance, accuracy, stability, cyclic endurance, operating environment, and installation requirements.



** \$65 to \$100/hr to install

(i.e. approximately 1 hour per gage) to install a strain gage which includes surface prep, attachment (bonding) and wiring

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Potential Error Sources with Strain Gages

- Applications Errors
 - Gage may be damaged during installation.
 - Need to verify resistance before stress.
- Electrical noise - Electrical and Magnetic fields
 - Utilizing shielded lead wires and insulated coatings.
 - Utilize twisted lead wires.
- Thermally induced voltages caused by thermocouple effects at the junction of dissimilar metals in strain gage circuit.
- Temperature effects
 - Thermal expansion of materials affects measured strain.
 - Self heating of strain gages!

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Measurements

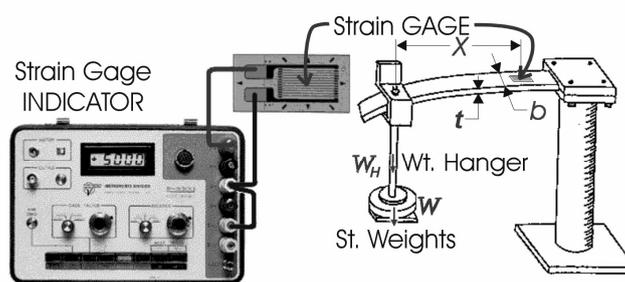
- Strain measurements are made over a finite length of material.
 - Smaller the length the more closely the measurement will approximate the strain at a particular point.
 - The length over which strain measurement is taken is called the base length.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

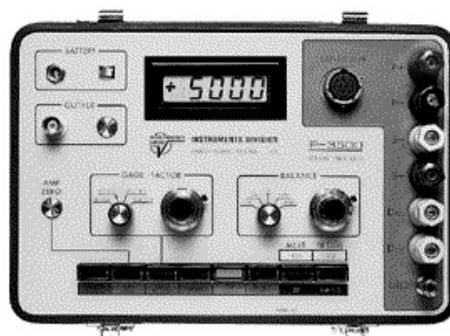
www.measurementsgroup.com

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Gage Indicator



CANTILEVER BEAM STRAIN MEASUREMENT

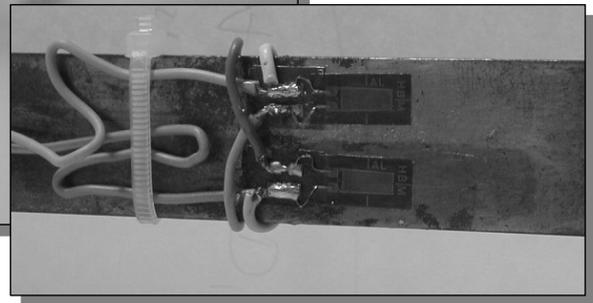


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



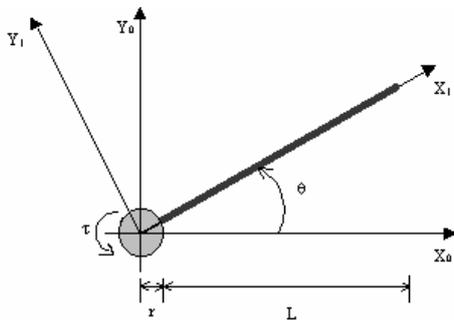
Departamento de Engenharia Mecânica
Grupo de Controlo, Automação e Robótica



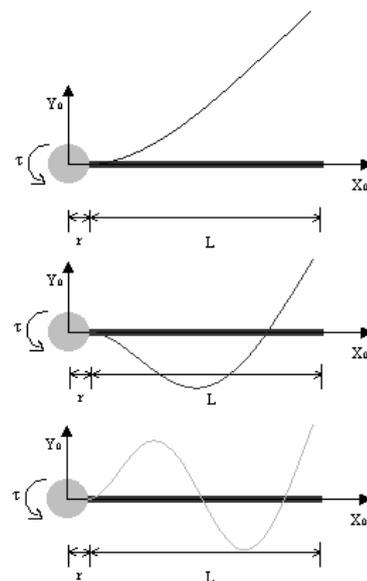
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile

Movimento corpo rigido

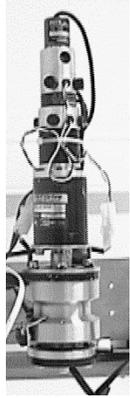


Modi di vibrazione



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

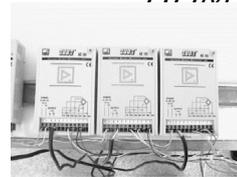
Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



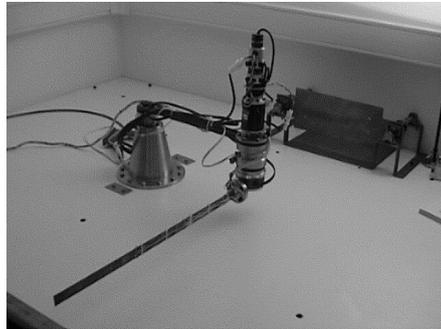
RH-14 Harmonic Drive

Servo Motor Dc
Tachimetro
Encoder

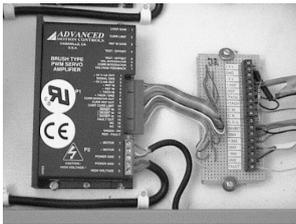
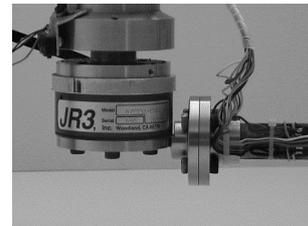
3 Ponte di estensimetri *AE101* della
HRM



- ext1 = 0.045 m
- ext2 = 0.18 m
- ext3 = 0.32 m

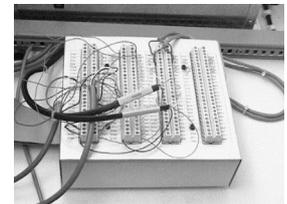


Sensore di Coppia JR3



Amplificatore di corrente:
12A8 *Advanced Motion Controls*

Scheda I/O *Servo to Go*, ISA Bus Servo



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



controllo con/senza feedback
da estensimetri



controllo con/senza feedback
da estensimetri

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08



controllo ad anello chiuso

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di deformazione

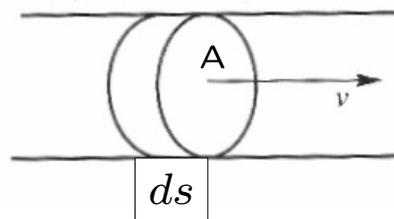
Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Alcuni utili principi di conservazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Portata massica e volumetrica



- Portata massica: massa di fluido che attraversa la sezione A di una tubazione nell'unità di tempo [kg/s]

$$w_S = \rho Av$$

ρ = densità (massa/volume)

A = area sezione

v = velocità media del fluido
in direzione normale a A

- Portata volumetrica: volume di fluido che attraversa la sezione A nell'unità di tempo [m³/s]

$$q_S = Av$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Portata massica e volumetrica

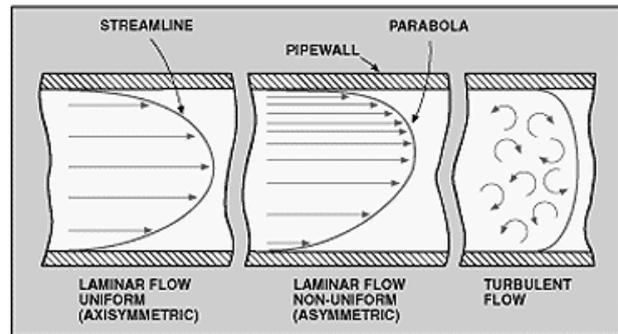
- Tipi di moto del fluido:
 - Moto laminare: il fluido scorre per filetti paralleli. La velocità è massima al centro.
 - Moto turbolento: la velocità è sostanzialmente uniforme (NB: le componenti trasversali non influiscono sulla portata)
 - Numero di Reynolds [adimensionale]:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

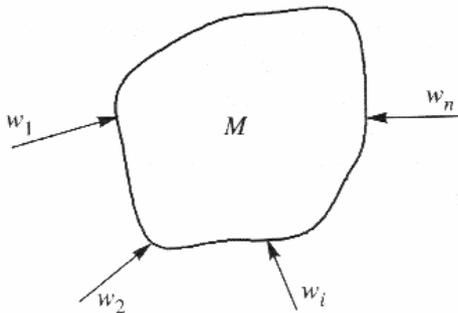
ρ = densità (massa/volume)
 v = velocità media del fluido
 D = diametro nominale
 μ = viscosità (=resistenza che il fluido oppone alla deformazione)

Moto laminare: $Re < 2000$
 Moto turbolento: $Re > 4000$

(per $2000 < Re < 4000$ si ha una condizione intermedia)



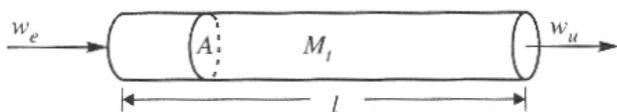
Principio di conservazione della massa



$$\frac{dM(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n w_i(t)$$

M = massa contenuta nel volume
 w_i = portate massiche

- Esempio #1:



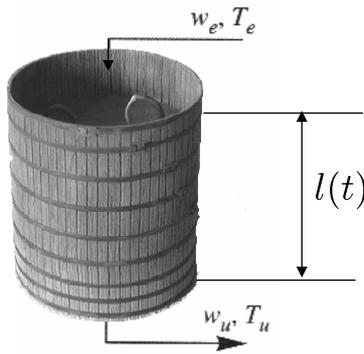
$$\frac{dM_t(t)}{dt} = w_e(t) - w_u(t)$$

Essendo $M_t(t) = lA\rho(t)$, si ha $Al \frac{d\rho(t)}{dt} = w_e(t) - w_u(t)$

Per fluidi incomprimibili $\rho(t) = \text{costante}$, e quindi $w_e(t) = w_u(t)$

Principio di conservazione della massa

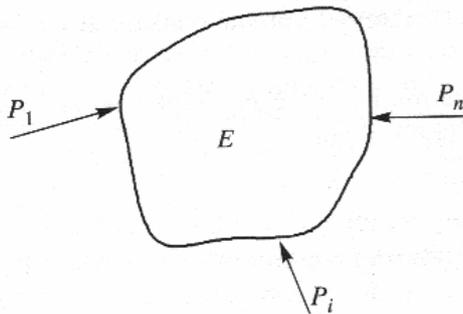
- Esempio #2: $\frac{dM(t)}{dt} = w_e(t) - w_u(t)$



Essendo $M(t) = \rho A l(t)$, si ha $\frac{dl(t)}{dt} = \frac{1}{\rho A} (w_e(t) - w_u(t))$.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principio di conservazione dell'energia



$$\frac{dE(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n P_i(t)$$

E = energia contenuta nel volume

P_i = potenze che transitano attraverso la superficie di confine

Le potenze entranti possono essere:

- potenze associate alle masse entranti (es: cinetico, gravitazionale, ...)
- potenze termiche
- potenze meccaniche (lavoro/unità di tempo) fatte dal/sul volume considerato

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli

Daniel Bernoulli



(1700-1782)

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{cost}$$

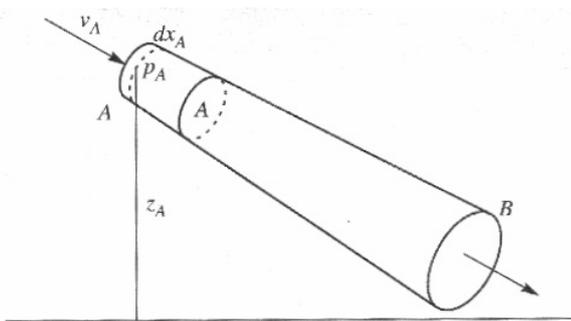
ρ = densità (massa/volume)
 v = velocità media del fluido
 p = pressione del fluido
 g = accelerazione di gravità
 z = quota a cui si trova il fluido

• Ipotesi:

1. Condizioni stazionarie ($dE/dt=0$)
2. Pareti della tubazione: adiabatiche e rigide
3. Non si considera l'energia termica (si suppone indipendente da quella meccanica)
4. Densità ρ del fluido costante
5. Si trascurano gli attriti (interni al fluido e fra fluido e pareti), e quindi l'energia meccanica trasformata in calore per attrito

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli



• Ipotesi:

1. Condizioni stazionarie ($dE/dt=0$)
2. Pareti adiabatiche e rigide
3. Non si considera l'energia termica
4. Densità ρ del fluido costante
5. Si trascurano gli attriti

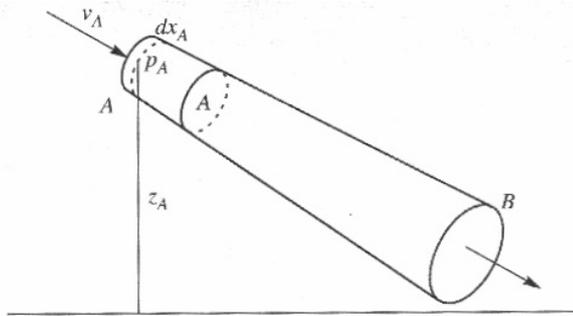
$$0 = \frac{dE(t)}{dt} = P_A(t) - P_B(t) \Rightarrow P_A(t) = P_B(t) \Rightarrow \frac{dE_A(t)}{dt} = \frac{dE_B(t)}{dt} \Rightarrow dE_A(t) = dE_B(t)$$

$dE_A(t)$ = energia associata ad un elemento infinitesimo di fluido di lunghezza dx entrante nel tubo

$$dE = \underbrace{(A dx \rho)}_{\text{massa}} \underbrace{\left(\frac{v^2}{2}\right)}_{\text{E. cinetica}} + \underbrace{(A dx \rho z g)}_{\text{E. potenziale}} + \underbrace{(p A dx)}_{\text{lavoro delle forze di pressione}}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli



• Ipotesi:

1. Condizioni stazionarie ($dE/dt=0$)
2. Pareti adiabatiche e rigide
3. Non si considera l'energia termica
4. Densità ρ del fluido costante
5. Si trascurano gli attriti

$$dE_A = dE_B \Rightarrow A_A dx_A \rho g \left(\frac{v_A^2}{2g} + z_A + \frac{p_A}{\rho g} \right) = A_B dx_B \rho g \left(\frac{v_B^2}{2g} + z_B + \frac{p_B}{\rho g} \right)$$

Per il principio di conservazione della massa si deve avere $A_A dx_A = A_B dx_B$ da cui:

$$\frac{v_A^2}{2g} + z_A + \frac{p_A}{\rho g} = \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \frac{p_B}{\rho g} \Rightarrow \boxed{\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{cost}}$$

In presenza di perdite (energia meccanica diventa energia termica): carico idrostatico

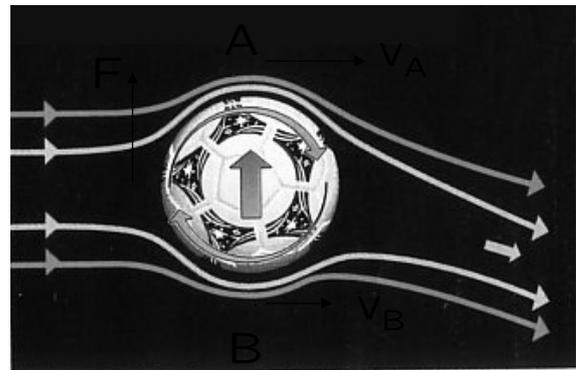
$$\frac{v_A^2}{2g} + z_A + \frac{p_A}{\rho g} = \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \alpha \left(\frac{v_B^2}{2g} \right) \rightarrow \text{(sperimentalmente proporzionali al quadrato della velocità)}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli - Esempio

Moto di un pallone "con effetto"

- Per effetto della rotazione, sul lato A l'aria è più veloce che sul lato B, perché si somma il contributo $v = \omega r$ dato dalla rotazione
- Per il teorema di Bernoulli, la pressione in A è quindi minore che in B
- Si sviluppa quindi una forza risultante F diretta da B ad A



(l'effetto per cui un corpo in rotazione che si muove in un fluido è soggetto ad una forza ortogonale alla sua traiettoria è detto "effetto Magnus")

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Alcuni utili principi di conservazione

Fine

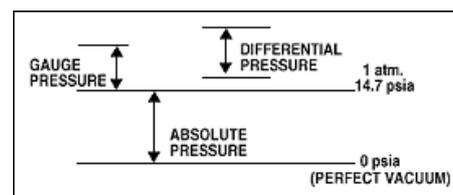
Sensori di pressione



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Terminologia

- Pressione relativa (*Gage Pressure*)
Pressione misurata relativamente alla pressione atmosferica.
- Pressione assoluta (*Absolute Pressure*)
Pressione misurata relativamente alla pressione nulla.
- Pressione differenziale (*Differential Pressure*)
Pressione misurata relativamente ad una pressione di riferimento.
- Grado di vuoto (*Vacuum*)
Grado di vuoto misurato relativamente alla pressione atmosferica.



| | |
|--------|------------------------------|
| 1 psi | = 51.714 mmHg |
| | = 2.0359 in.Hg |
| | = 27.680 in.H ₂ O |
| | = 6.8946 kPa |
| 1 bar | = 14.504 psi |
| 1 atm. | = 14.696 psi |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Criteri di scelta di un trasduttore di pressione

- Condizioni di utilizzo
 - Range richiesto
 - Assoluto, relativo, differenziale o vuoto
 - Intensità di sovrappressioni temporanee (*Burst*) e limiti di sovrappressione
 - Compatibilità chimica con il fluido da misurare
 - Temperatura operativa
 - Compensazione della temperatura
- Accuratezza
- Sensitività
- Tempo di risposta / Risposta in frequenza
- Tipo di segnale in uscita richiesto
 - Analogico, digitale, manuale
- Costo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipi di sensore di pressione

- Gravitazionali
 - Basati sulla misura dell'altezza di una colonna di liquido
- Meccanici
 - Basati sulla deformazione di un elemento elastico
 - A soffietto (*bellows*), tubi Bourdon, diaframmi (*diaphragms*)
- Elettrici

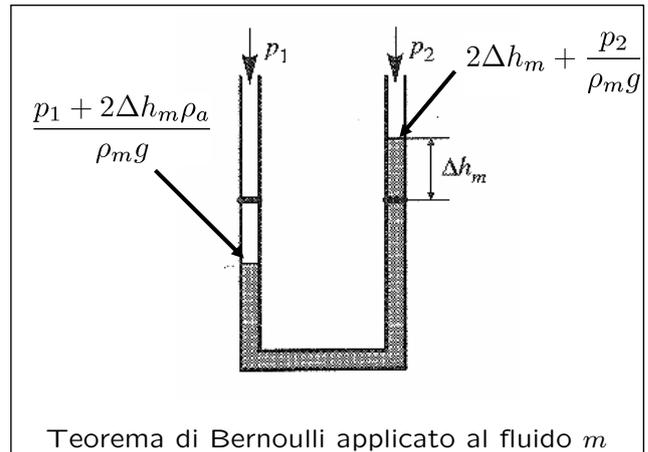
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Manometri (*Manometers*)

- I manometri a colonna o a U (*U-tube manometers*) sono i sensori di pressione più semplici.

- **Vantaggi**

- Semplici
- Economici
- Ottima sensitività (soprattutto quelli inclinati)
- Ottima accuratezza (0.5 mm H₂O o Hg)



- **Svantaggi**

- Risposta dinamica lenta
- Soltanto sensori locali
- Range di pressione limitato
 - 0.001-0.25 bar (ad acqua)
 - 0.01-2 bar (a mercurio)

Nel caso in cui:

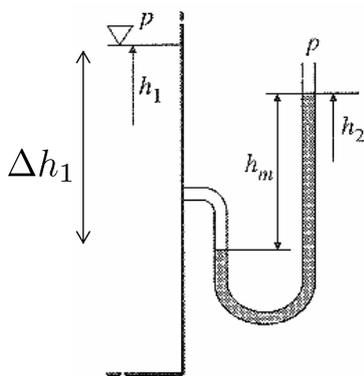
- p_2 è nota (es: press. atmosferica)
- Densità del fluido $\rho_a \approx 0$ (es: aria)

$$\hookrightarrow p_1 - p_2 = 2\rho_m g \Delta h_m$$

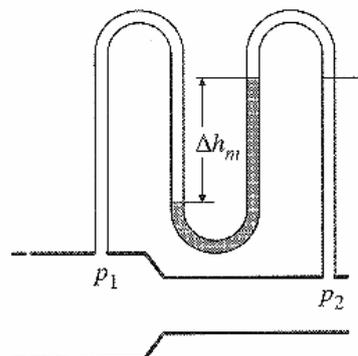
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Manometri (*Manometers*)

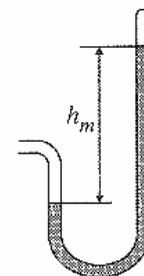
- Esempi di manometri a U



a U aperto



differenziale



chiuso

$$p_1 - p_2 = (\rho_m - \rho_f)g\Delta h_m$$

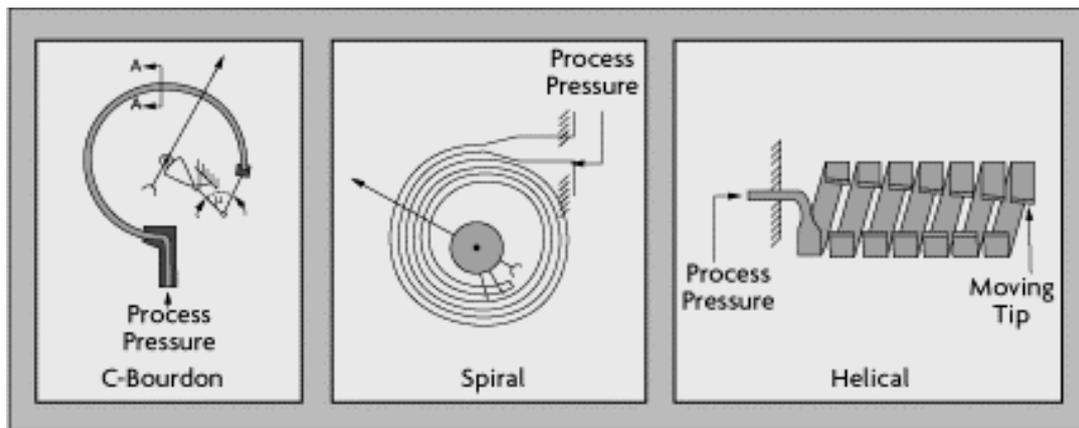
ρ_f = densità del fluido

$$p_1 = \rho_m g h_m$$

Es: barometro

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dispositivi meccanici: Tubi Bourdon



a "C"

a spirale

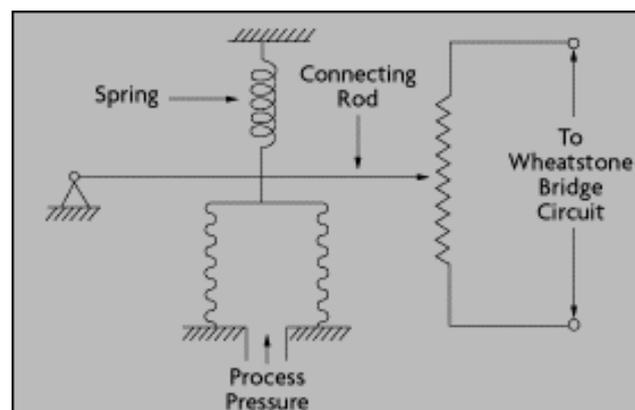
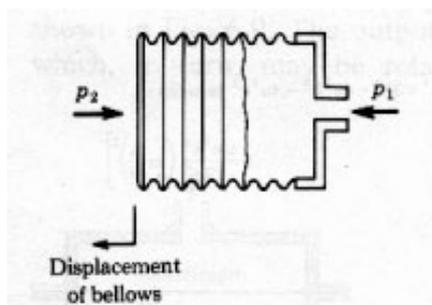
a elica

La pressione del fluido entrante nel tubo ne provoca una deformazione che può essere opportunamente rilevata e trasdotta

- Range di pressione: da 10^{-2} a 10^4 bar
- Accuratezza fino al 0.1% FS
- Bronzo fosforoso o acciaio inossidabile

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

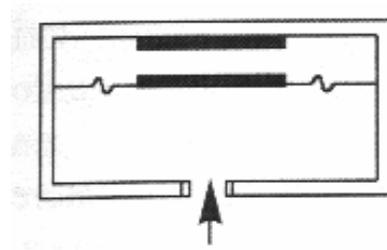
Dispositivi meccanici: a soffiETTO (*bellows gages*)



- Range di pressione: max alcuni Kg/cm^2
- Accuratezza fino al 0.5% FS
- Bronzo fosforoso o acciaio inossidabile
- Tempi di risposta lunghi

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

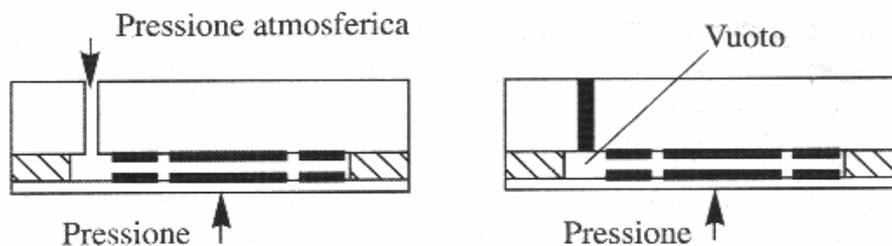
Dispositivi meccanici: a diaframma (*Diaphragm Gages*)



- Range di pressione: sia pressioni piccole che elevate
- La dinamica può essere molto veloce
- Possono usare un estensimetro o un sensore di posizione come trasduttore in tensione
- Il disco presenta ondulazioni per aumentarne la deformabilità

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dispositivi meccanici: celle di misura capacitiva



- Principio: la pressione varia la distanza d fra le armature di un condensatore, e quindi la capacità

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / d$$

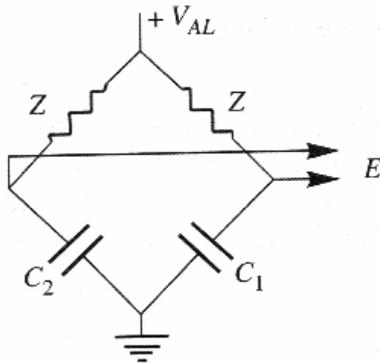
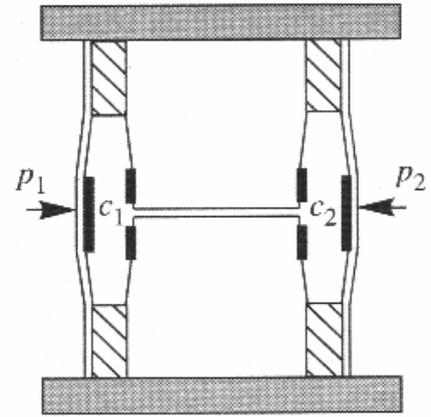
- A = area delle armature
- ϵ_r = costante dielettrica del mezzo
- ϵ_0 = costante dielettrica del vuoto
- d = distanza fra le armature

- Pressione relativa (press. atmosferica) o assoluta (vuoto)
- Range di pressione: sia pressioni piccole che elevate
- La dinamica può essere molto veloce
- Trasduzione: es. ponte di Wheatstone alimentato in tensione alternata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dispositivi meccanici: celle di misura capacitave

- Cella ceramica a doppia capacit 
- Per misure differenziali
- Dielettrico = liquido che pu  passare da una capacit  all'altra
- Il flusso del dielettrico dipende dalla differenza di pressione $p_1 - p_2$



- Trasduzione con ponte di Wheatstone
- Doppia capacit  = sensitivit  raddoppiata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di pressione

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di portata



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

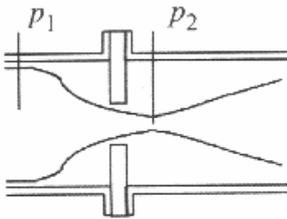
Tipi di sensore di portata (flussimetri, *flowmeters*)

- A strozzamento (*Obstruction meters*)
- A sezione variabile (*variable-area-flowmeters* o *rotameters*)
- A vortice (*Vortex meters*)
- Elettromagnetici (*Electromagnetic flowmeters*)
- A forze di Coriolis (*Coriolis Mass Flow Meters*)
- Rotanti (*Rotameters and Turbine Flow Meters*)

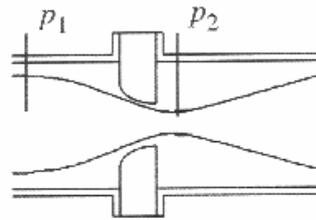
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A strozzamento (*Obstruction meters*)

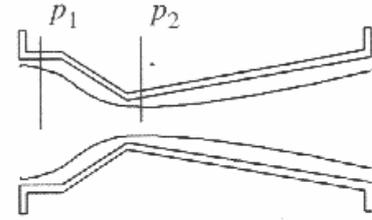
- Dischi forati, boccagli e venturimetri
 - Lo strozzamento provoca una caduta di pressione. Dalla misura di tale pressione, tramite l'equazione di Bernoulli, si risale alla portata volumetrica (e quindi massica)



disco forato
(*orifice meters*)



boccaglio
(*flow nozzle*)



venturimetro
(*Venturi meter*)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

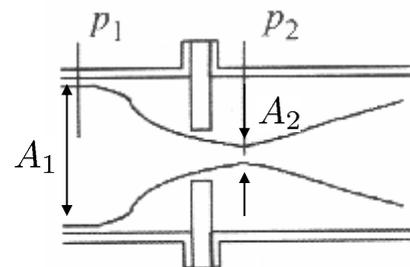
A strozzamento (*Obstruction meters*)

- Applichiamo l'equazione di Bernoulli:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2$$

$$z_1 = z_2 \quad \text{tubo orizzontale}$$

$$w = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad \text{portata massica}$$



$$\hookrightarrow \boxed{w = \gamma A_2 \sqrt{\rho(p_1 - p_2)}} \quad \text{con } \gamma = \sqrt{\frac{2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

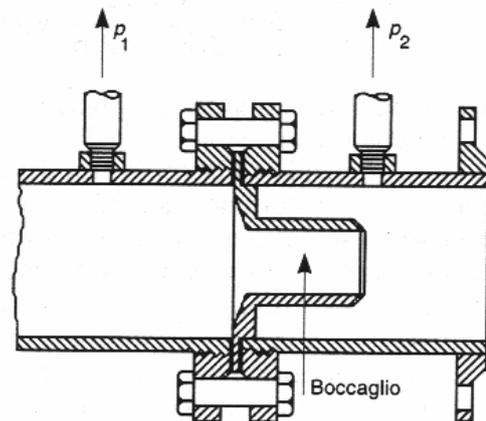
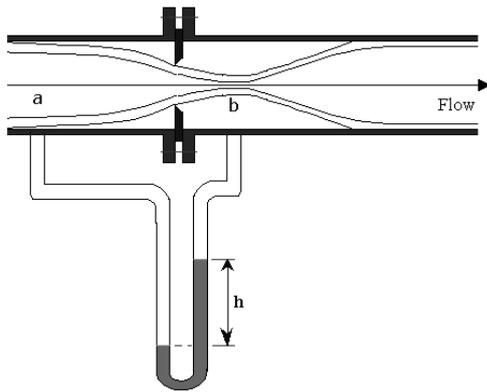
- Tenendo conto delle perdite $\alpha \frac{v_2^2}{2}$ causate dalla strozzatura:

$$\gamma = \xi \sqrt{\frac{2}{1 + \alpha - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

- Il coefficiente $K = \gamma A_2 \sqrt{\rho}$ è calcolato in fase di taratura del sensore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A strozzamento (*Obstruction meters*)

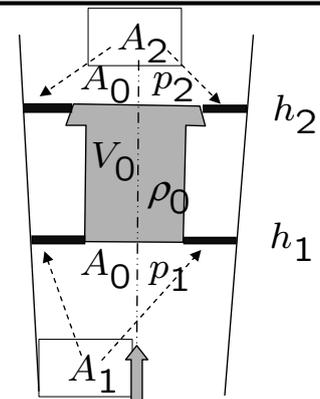


- Rangeability=3:1, accuratezza=3-5%
(perché A_2 varia con la portata)
- Ripetibilità=buona
(ma ritaratura frequente per via delle incrostazioni)
- Difetto: introducono perdite di carico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A sezione variabile (*Variable-area flowmeters*)

- Per tubature disposte verticalmente
- Trasducono la portata in spostamenti dell'otturatore



- Equilibrio delle forze sull'otturatore (si trascurano eventuali molle):

$$A_0 p_1 = A_0 p_2 + g V_0 \rho_0 \quad \Rightarrow \quad p_1 - p_2 = \frac{g V_0 \rho_0}{A_0}$$

- Eq. Bernoulli applicata al fluido sulle sezioni A_1, A_2 :

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_2 \quad \Rightarrow \quad v_1^2 - v_2^2 = 2 \frac{p_2 - p_1}{\rho} + 2g \frac{V_0}{A_0}$$

- Conservazione della massa:

$$w = \rho v_1 A_1 = \rho A_2 v_2 \quad \Rightarrow \quad v_1^2 - v_2^2 = w^2 \frac{1/A_1^2 - 1/A_2^2}{\rho^2}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

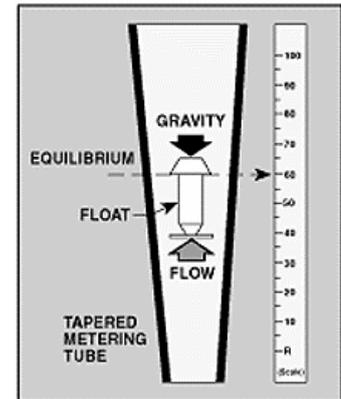
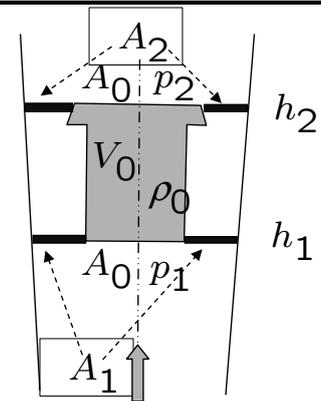
A sezione variabile (*Variable-area flowmeters*)

- Dalle relazioni precedenti si ricava che:

$$w^2(1/A_1^2 - 1/A_2^2) = 2g\rho(\rho_0 - \rho) \frac{V_0}{A_0};$$

$$w^2 = \frac{2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}} A_2^2 \rho g (\rho_0 - \rho) \frac{V_0}{A_0} = \gamma^2 A_2^2 \rho g (\rho_0 - \rho) \frac{V_0}{A_0}$$

$$w = \gamma A_2 \sqrt{\rho \frac{g V_0 (\rho_0 - \rho)}{A_0}}$$



- γ è circa costante (varia al più di qualche % tra inizio e fine corsa)
- Supponendo che il termine sotto radice sia costante, essendo anche γ circa costante risulta che la portata massica w è proporzionale alla sezione A_2 e quindi alla quota del galleggiante.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A sezione variabile (*Variable-area-flowmeter*)

- Qualora la densità ρ , seppur costante, non sia quella nominale ρ_n di calibrazione, la relazione fra portata w e area A_2 viene corretta:

$$w = w_n \sqrt{\frac{\rho}{\rho_n}}$$



| | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Installazione (lunghezza) | 100-600 mm |
| Campo di utilizzo (min-max) acqua | $2 \cdot 10^{-6} - 30$ kg/s |
| Campo di utilizzo (min-max) aria | $0.1 \cdot 10^{-6} \div 1$ kg/s |
| Accuratezza (% della misura) | 1 (al 100%) - 3÷10 (al 10%) |

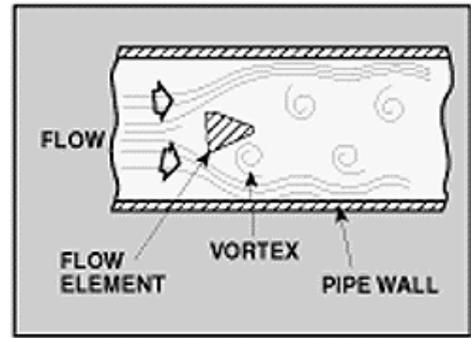


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A vortice (*Vortex*)

- Un corpo non smussato inserito nel centro della corrente produce un moto instabile con vortici
- La frequenza di formazione dei vortici è proporzionale alla velocità del fluido

$$f_v = Kv \Rightarrow w = \rho A \frac{f_v}{K}$$



- Metodi per misurare f_v : termistori, sensori piezoelettrici
- Accuratezza: elevata ($\pm 0.75\%$ per fluidi, $\pm 1\%$ per gas)
- Limiti di misura: $0.2 \div 450$ kg/s (acqua), $4 \div 3600$ kg/s (aria)
- Rangeability: 10:1, 20:1
- Perdite di carico: significative (evaporazione e cavitazione)
- Meno economici ma prestazioni migliori dei sensori a strozzamento

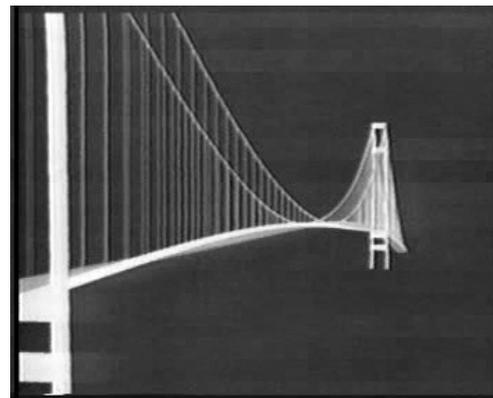
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A vortice (*Vortex*)

- **Vortex massici:** oltre alla frequenza, misurano anche l'ampiezza dei vortici (con sensore piezoelettrico), determinando direttamente la portata massica
- **Swirl meters:** sensori di portata a vortice, utilizzati principalmente per gas
- Esempio di formazione di vortici:



Collapse of Tacoma Bridge (1940, USA)



Karman Vortex

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Elettromagnetici (*Electromagnetic flowmeters*)

- Condizione essenziale: fluido elettricamente conduttivo

• Operano secondo la legge di Faraday: ai capi di un conduttore che si muove in un campo magnetico si genera una tensione elettrica $e = vdB$

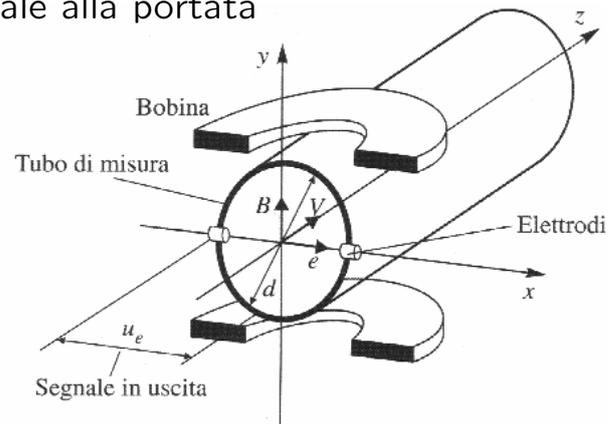
- Il fluido agisce da conduttore

- Il campo magnetico viene generato da una bobina

- La tensione è direttamente proporzionale alla portata

$$w = \rho A \frac{e}{Bd}$$

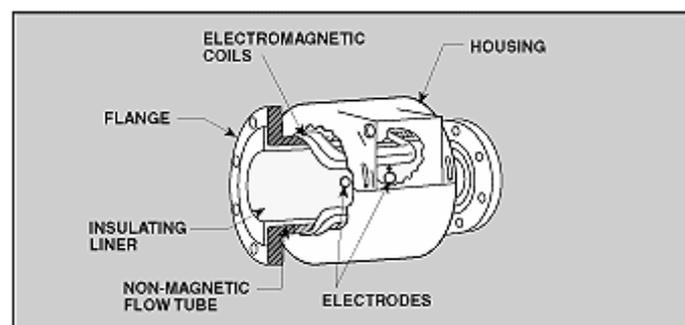
- La tensione viene misurata da due elettrodi interni al tubo



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Elettromagnetici (*Electromagnetic flowmeters*)

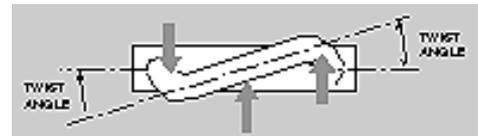
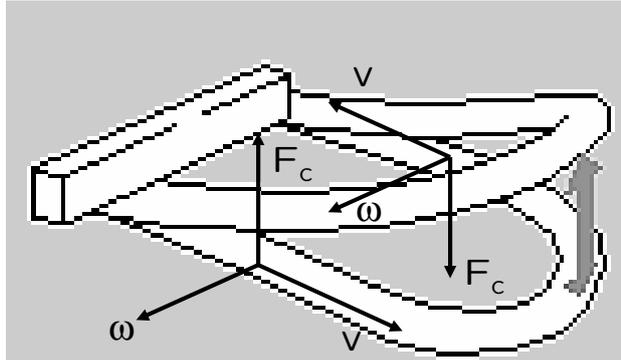
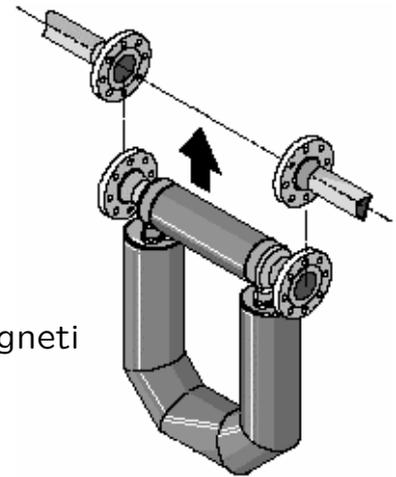
- Perdite di carico: trascurabili
- Accuratezza: ottima (fino a 0.5%)
- Rangeability: 50:1 fino anche a 100:1
- Estremamente robusti e affidabili (no parti in movimento)
- Limiti di misura: 0.005÷30000 kg/s



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori massici (*Coriolis mass flowmeters*)

- Misurano direttamente la portata massica (adatti pertanto per ρ molto variabili)
- Forza di Coriolis: $\underline{F_c} = 2m \underline{\omega} \wedge \underline{v}$
- Il fluido viene fatto passare attraverso un tubo a U
- Il tubo viene messo in vibrazione tramite elettromagneti



- Lo svergolamento è proporzionale a F_c , e può essere misurato mediante estensimetri

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

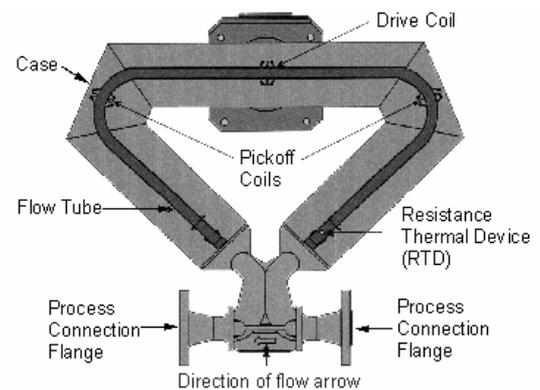
Sensori massici (*Coriolis mass flowmeters*)

- Si ha: $F_c = 2m\omega v$

$m = \rho A l$ A =area sezione tubo
 l =lunghezza tratti rettilinei

$w = \rho A v$ w =portata massica

$$F_c = 2\rho A l \omega v = 2\omega l w \quad \Rightarrow \quad w = \frac{F_c}{2\omega l}$$

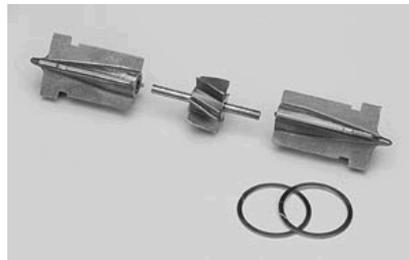
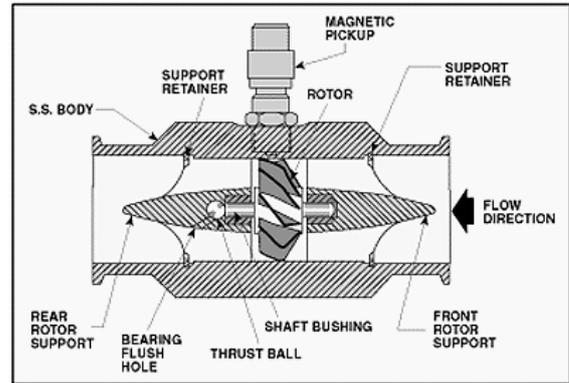


- Accuratezza: fino a $\pm 0.25\%$ della portata
- Rangeability: 100:1
- Ripetibilità: $\pm 0.15\%$ della portata
- Perdite di carico: contenute
- Limiti di misura: 0.001÷20 Kg/s
- Piuttosto cari (€4000 - €5000)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori rotanti (*Turbine Flow Meters*)

- Una girante viene posta in rotazione dal fluido
- La velocità di rotazione è proporzionale alla portata volumetrica
- Viene rilevata solitamente da pick-up magnetici
- Gli impulsi elettrici vengono contati
- Perdite di carico: rilevanti (e si ha usura)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tubo di Pitot (*Pitot-Static Tubes*)

- Sensore costituito da due tubi concentrici

- Al punto di presa dinamica, il carico idrostatico vale $\frac{p_D}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h$

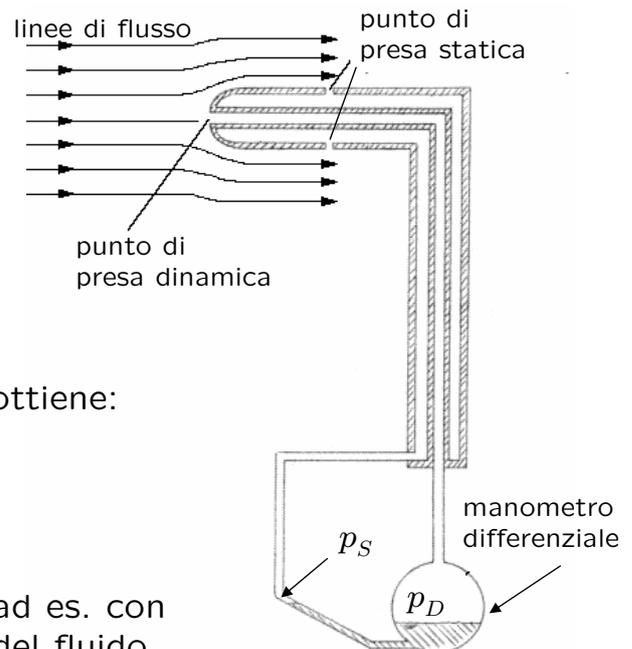
- Al punto di presa statica, il carico idrostatico vale $\frac{p_S}{\rho g} + h$

- Applicando l'equazione di Bernoulli si ottiene:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_D - p_S)}$$

- Misurando la pressione relativa $p_D - p_S$ (ad es. con un manometro) si ricava la velocità v del fluido

- Vantaggi: adatto per misure puntuali di velocità. Basso costo, assenza di parti in movimento, facilità di installazione, minima caduta di carico



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tubo di Pitot (*Pitot-Static Tubes*)

- Adatto per misure puntuali di velocità
- **Vantaggi:** semplice costruzione, costo relativamente basso, assenza di parti in movimento, facilità di installazione, minima caduta di carico
- **Svantaggi:** l'accuratezza può non essere elevata, il tubo deve essere allineato con la velocità del fluido (max disallineamento: $\pm 5^\circ$)
- Esempio di applicazione: in aeronautica, per misurare la velocità dell'aereo rispetto all'aria

Vertically mounts under wing or on fuselage. Electrically heated, 80 watt nominal, self regulating heater automatically draws more power under icing conditions and less on ground operation. Long life rugged tubular or cartridge heater. Features heated internal water drain trap to prevent ice blockage and moisture entry. Used on executive jets, single and twin engine propeller aircraft and helicopters. FAA TSO-C16. Shipping Weight 1 Lb.

(source: <http://www.chiefaircraft.com>)



Prezzo: circa \$1000

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di portata

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

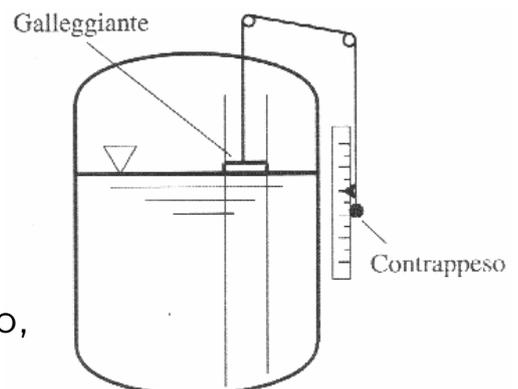
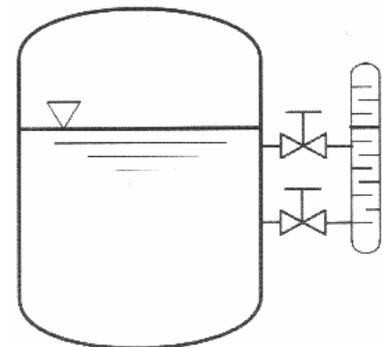
Sensori di livello



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dispositivi visuali e a galleggiante

- A vasi comunicanti:
 - Errori sistematici dovuti a differenze di temperatura fra interno ed esterno provocano differenze di densità del fluido.
- A galleggiante:
 - Piuttosto precisi
 - Difficoltà per la realizzazione delle tenute
 - Accoppiamento del movimento del galleggiante con l'indicatore: a nastro, a leva e albero, magnetico

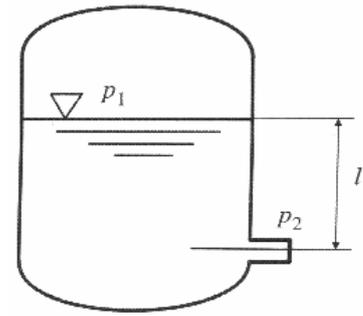


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

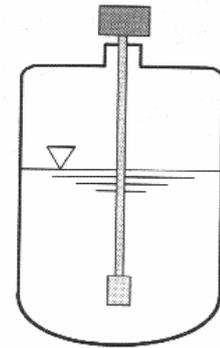
Altri misuratori di livello

- A principio idrostatico
 - Basati sulla misura della differenza di pressione al fondo e a pelo libero

$$l = \frac{p_2 - p_1}{\rho g}$$



- A principio capacitivo
 - La capacità fra sonda e parete del serbatoio (o fra due elettrodi della sonda) dipende dal livello del liquido
- A ultrasuoni
 - Si misura il tempo impiegato da un'onda ultrasonora a percorrere la distanza fra l'emettitore e la superficie a pelo libero



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di livello

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Elettrici



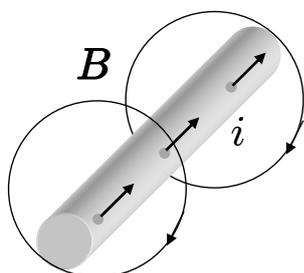
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

Legge di Lenz: se in un circuito elettrico il flusso concatenato varia nel tempo si genera una tensione

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Legge di Biot-Savart: un conduttore percorso da corrente di intensità i genera un campo magnetico di intensità B



$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$
permeabilità magnetica nel vuoto

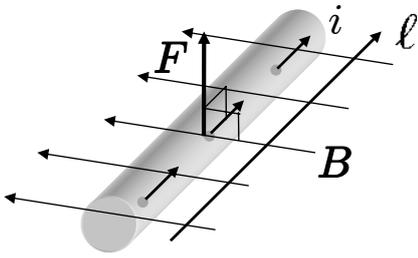
$$\left(\underline{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r^2} \underline{s} \wedge \underline{r} \right)$$

Unità di misura di B nel sistema SI
tesla ($T=NA^{-1}m^{-1}$)

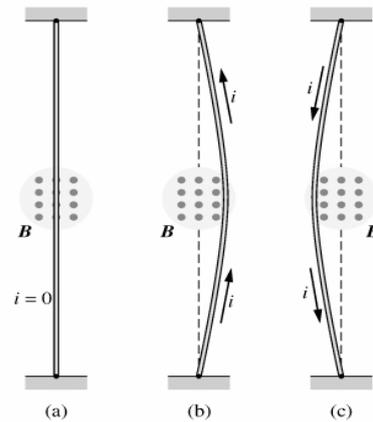
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

Legge di Faraday: una carica q in moto con velocità v e immersa in un campo magnetico di intensità B è sottoposta ad una forza $\underline{F} = q\underline{v} \wedge \underline{B}$



Un conduttore di lunghezza l percorso da corrente i e immerso in un campo magnetico di intensità B è sottoposto ad una forza $\underline{F} = \underline{li} \wedge \underline{B}$

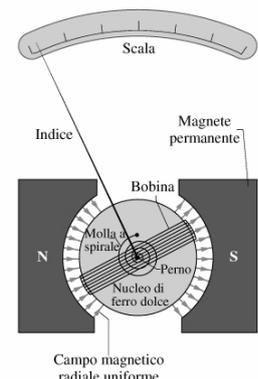
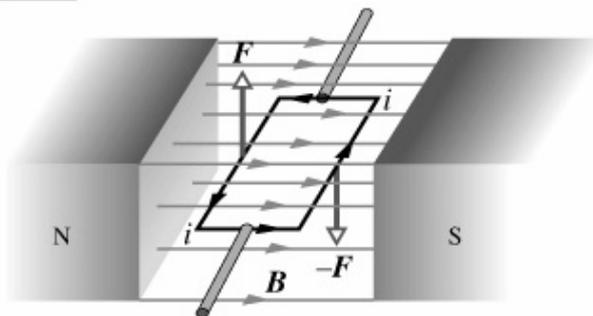
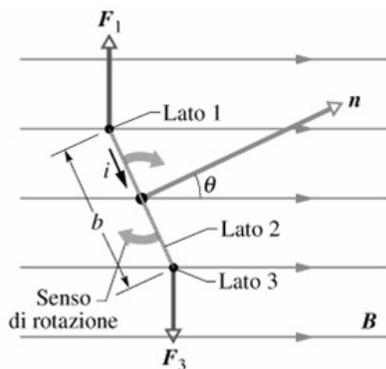


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi fisici

In particolare, una spira conduttrice di area A percorsa da corrente i e immersa in un campo magnetico di intensità B è sottoposto ad una coppia meccanica:

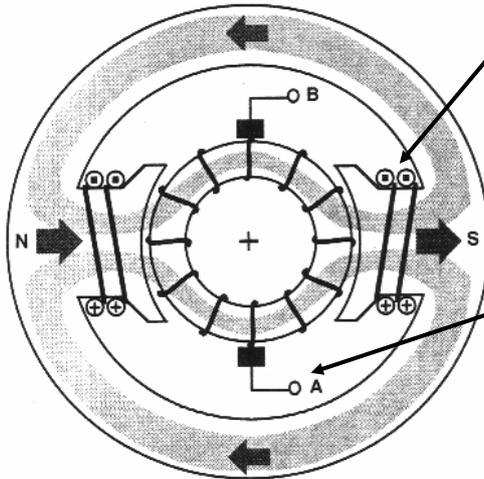
$$T = iAB \sin \theta$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in corrente continua

Il motore elettrico in c.c. (*DC motor*) è costituito da uno **statore** (parte esterna e fissa) e da un **rotore** (posto all'interno e mobile).

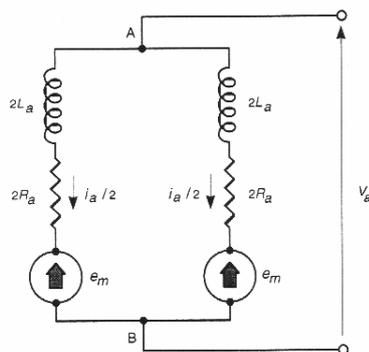


Circuito di eccitazione (o di statore): alimentato in continua, genera il campo magnetico sulle espansioni polari, rivolte verso l'interno del motore. Può essere sostituito da un magnete permanente

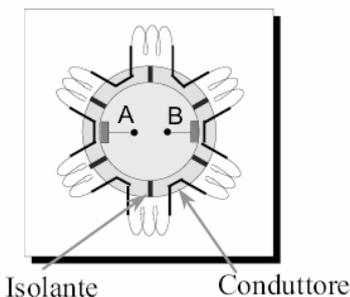
Circuito di armatura (o di rotore): le spire formano un avvolgimento chiuso che a tratti ha tratti scoperti, che entrano in contatto elettrico con le spazzole attraverso le quali si fornisce potenza elettrica al motore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.



Attraverso le spazzole A e B, il circuito di armatura viene percorso da due correnti circa uguali in modulo (che complessivamente danno la corrente di armatura)



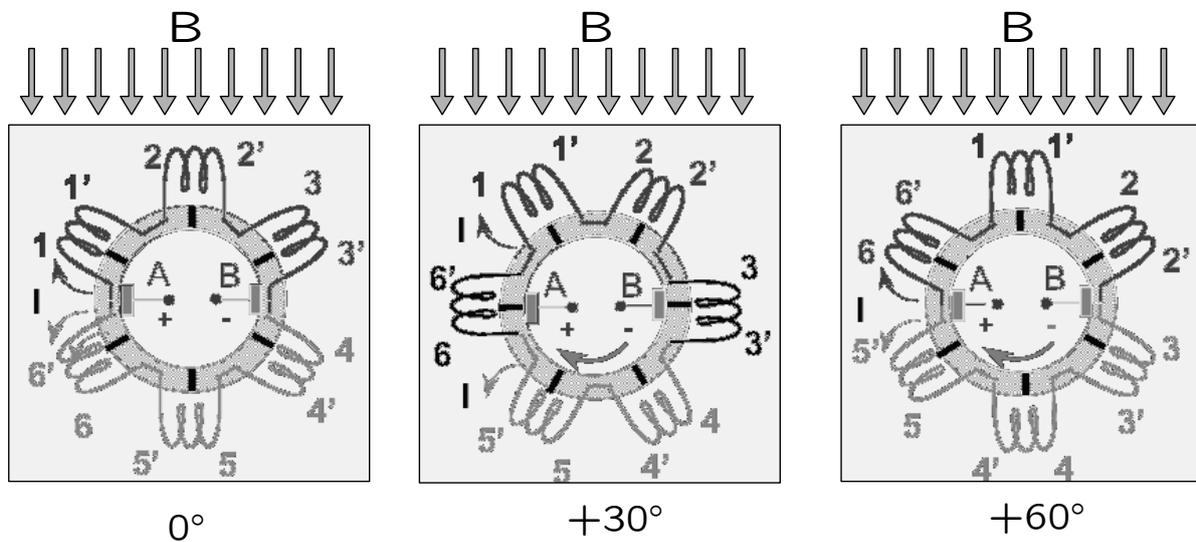
In realtà il rotore è un cilindro di materiale ferromagnetico laminato e sagomato in modo da presentare una serie di cave disposte assialmente. All'interno di queste cave sono collocati avvolgimenti (detti di armatura) che vengono collegati in serie tra loro, esternamente, per mezzo di un dispositivo detto collettore.

Il campo magnetico di eccitazione si **concatena** con quello di armatura, producendo una coppia che muove il rotore.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Collegamenti degli avvolgimenti di rotore e azione delle spazzole e del collettore



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Equazioni che descrivono la parte meccanica del motore:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - \beta\omega - T_l$$

ω = Velocità angolare del motore

β = Coefficiente attrito viscoso

J = Inerzia apparato mobile del motore

T_l = Coppia resistente dovuta al carico

T_m = Coppia generata dal motore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Equazioni che descrivono la parte elettrica del motore:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e$$

$$V_e = R_e i_e(\Phi_e) + N_e \frac{d\Phi_e}{dt}$$

V_a, V_e = Tensione alimentazione rotore/statore

i_a, i_e = Corrente rotore/statore

R_a, R_e = Resistenza spire del rotore/statore

Φ_e = Flusso magnetico statore

e = Tensione controelettromotrice del rotore

L_a = Induttanza spire rotore

N_e = Numero spire statore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Tensione controelettromotrice del rotore: $e = k\Phi_e\omega$

Coppia generata dal motore: $T_m = k\Phi_e i_a$

NB: la costante k è la stessa, dovendo conservarsi la potenza durante la conversione da elettrica a meccanica

$$e i_a = T_m \omega$$

Nel caso in cui Φ_e sia costante (come nel caso di motori a *magneti permanenti*), posto $k_m = k\Phi_e$ si ha:

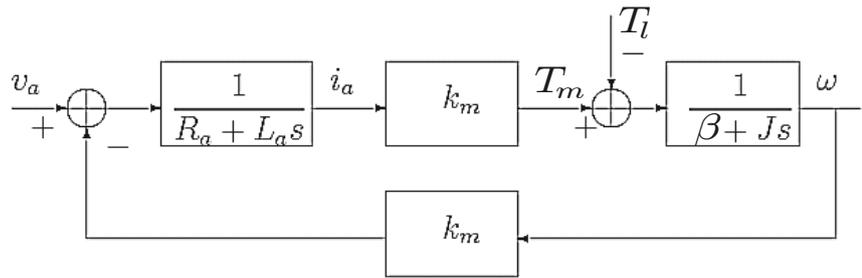
$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_m \omega \text{ f.e.m.}$$
$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - \beta \omega - T_l$$

Coppia

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motore elettrico a collettore in c.c.

Schema a blocchi:



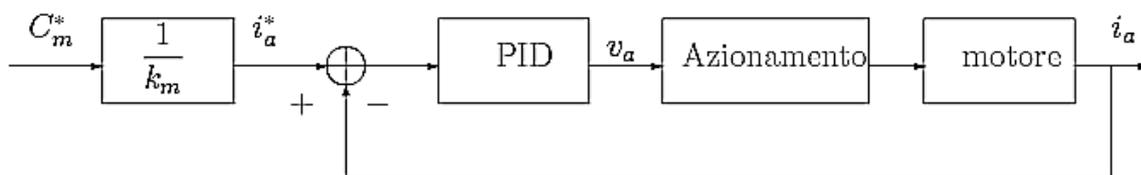
È evidente la presenza di una retroazione negativa interna che tende a stabilizzare la velocità del motore.

Questa capacità di autostabilizzazione del motore a collettore è un elemento che semplifica notevolmente il progetto di un sistema di controllo di velocità. Unitamente alla semplicità offerta dal singolo ingresso di controllo, essa ha contribuito notevolmente all'affermazione del motore a magneti permanenti nelle applicazioni a velocità variabili.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pro e contro dei motori in c.c.

PRO: Facilità di regolazione (controllo in tensione di armatura o in tensione del circuito di eccitazione). Il modello matematico del motore c.c. è molto semplice (lineare tempo-invariante).



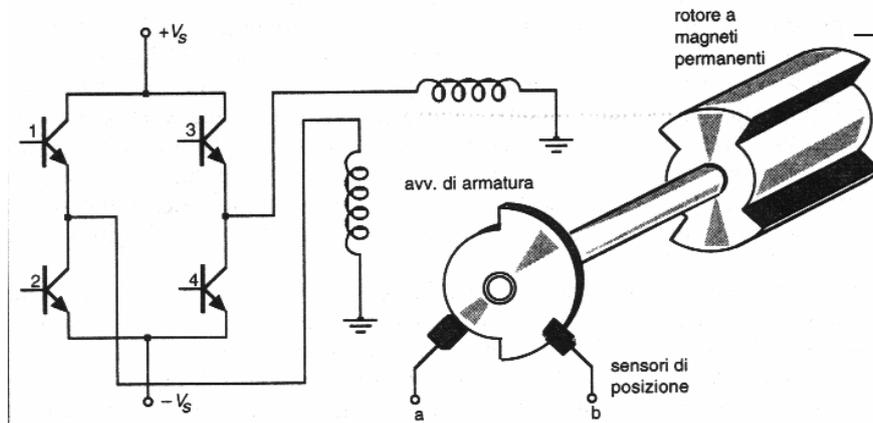
CONTRO:

- Perdite elettriche per cadute di tensione nel contatto spazzola-collettore
- Perdite meccaniche dovute ad attrito durante la commutazione
- Produzione di scintille durante la commutazione (dovuta ad autoinduzione)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Commutazione elettronica:

- La commutazione della corrente negli avvolgimenti viene fatta per via elettronica. Evita quindi l'uso di spazzole e contatti striscianti (=brushless). Anche i motori passo-passo (*step motors*) appartengono a questa categoria.



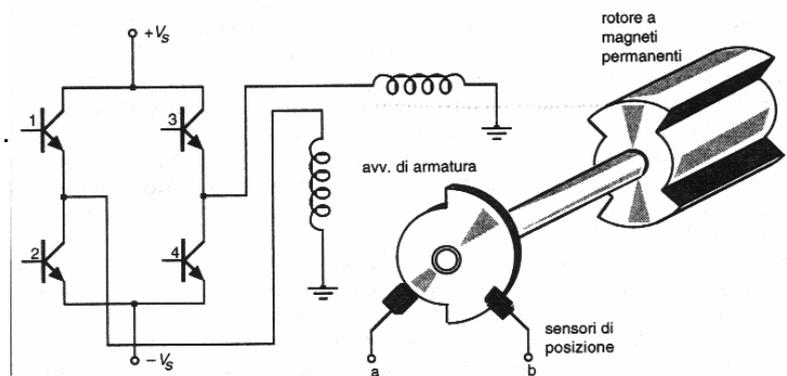
– Rispetto al motore c.c., l'avvolgimento di armatura è posto sullo statore, mentre il rotore è costituito (quasi sempre) da un magnete permanente

- L'assenza di spazzole non pone problemi nell'alimentazione dell'avvolgimento di armatura, quindi si possono raggiungere potenze elevate

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

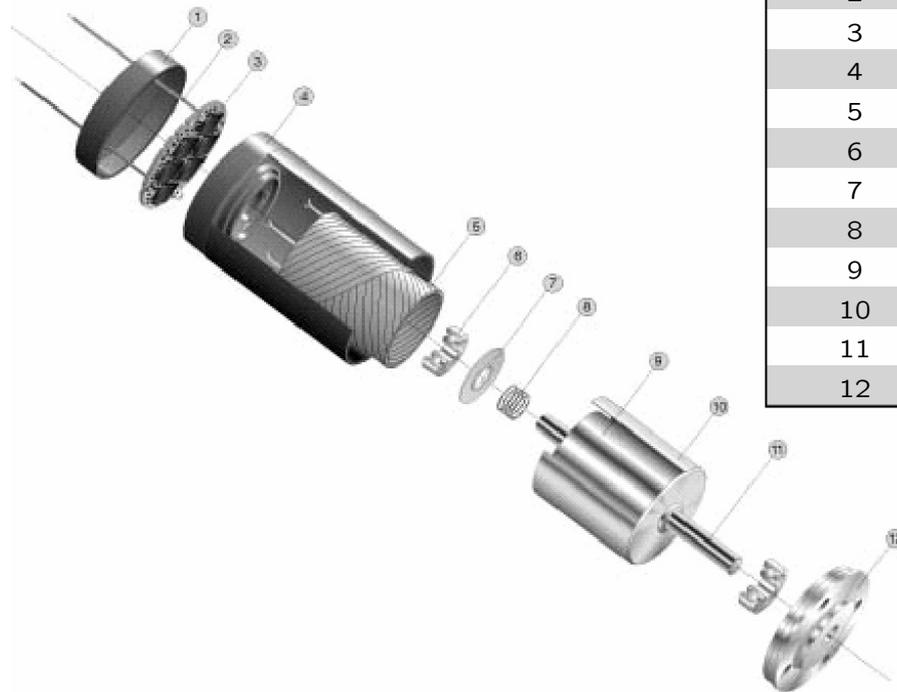
Parti costitutive:

1. Rotore. Genera il flusso magnetico di eccitazione.
2. Statore. Avvolgimento polifase del circuito di armatura
3. Sensori di posizione. Forniscono la posizione dell'albero motore (es: a effetto Hall, elettro-ottici LED+fototransistor)
4. Modulo di alimentazione in c.c. o c.a.
5. Modulo elettronico di controllo. Costituito da:
 - Circuito logico. Combina i segnali che danno la posizione desiderata con i segnali provenienti dai sensori (=posizione effettiva).
 - Sistema di azionamento. Genera i segnali di controllo al ponte a H (=interruttori realizzati mediante transistor di potenza) attraverso cui sono alimentati gli avvolgimenti di armatura



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

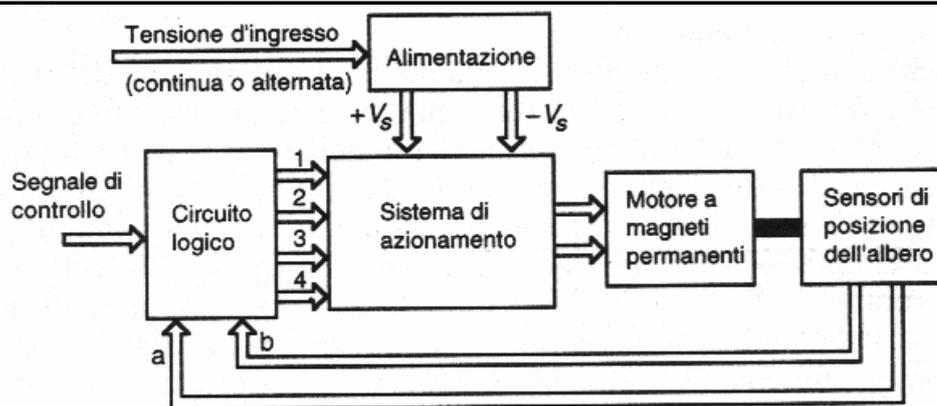
2-Wire Brushless DC Motor



| Pos. | Description |
|------|----------------|
| 1 | Rear cover |
| 2 | Leadwires |
| 3 | Electronics |
| 4 | Housing |
| 5 | Coil |
| 6 | Ball bearing |
| 7 | Washer |
| 8 | Spring |
| 9 | Magnet |
| 10 | External rotor |
| 11 | Shaft |
| 12 | Front cover |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless



Funzionamento:

1. Il sensore di posizione indica l'avvolgimento di armatura che genera il campo magnetico perpendicolare a quello del rotore
2. Il rotore si mette pertanto in movimento (la situazione è analoga al motore c.c. quando le spazzole si trovano a $\pi/2$ rispetto al campo di statore)
3. In seguito alla rotazione, il modulo elettronico di controllo commuta l'alimentazione sugli avvolgimenti, in modo che i campi magnetici siano sempre perpendicolari

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless - caratteristiche

- Non ci sono spazzole, quindi non ci sono perdite elettriche, meccaniche per attrito, scintille.
- Il circuito di alimentazione è nello statore, quindi la dissipazione termica è più facile (es: raffreddamento). Inoltre è facile inserire sensori termici per tenere la temperatura sotto controllo
- Riduzione del momento di inerzia del rotore (con materiali ad alto flusso per unità di peso, es. terre rare) e quindi dimensioni più piccole
- Coppie di spunto e velocità maggiori che nei motori a collettore (e quindi bande passanti superiori)
- A differenza dei motori a collettore, però, il numero di avvolgimenti è molto minore (da 2 a 6), quindi risulta più difficile avere una coppia costante

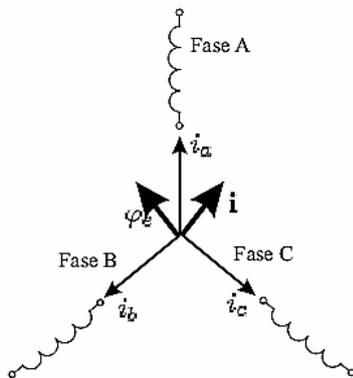


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori brushless

Modello matematico (motore a due poli del magnete permanente e tre avvolgimenti di statore):

Le equazioni elettriche che governano il circuito di statore sono:



$$V = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = Li + \tilde{\Phi}(\theta)$$

$$T_m = i^T \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Flusso dovuto al rotore (dipende dagli angoli θ fra il vettore flusso $\tilde{\Phi}$ e i relativi riferim. angolari)

Dalla conservazione della potenza:

$$\frac{d\theta}{dt} T_m = i^T \frac{d\tilde{\Phi}}{dt}$$

$$V = [V_a \ V_b \ V_c]^T$$

$$i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$$

$$\Phi = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T$$

$$\theta = [\theta_a \ \theta_b \ \theta_c]^T$$

R = matrice delle resistenze (diagonale)

L = matrice dei coefficienti di auto e mutua induttanza dei tre avvolgimenti di statore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Combinando tra di loro le equazioni, si ottiene una relazione per la parte elettrica del motore simile a quella vista per il motore in corrente a collettore:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

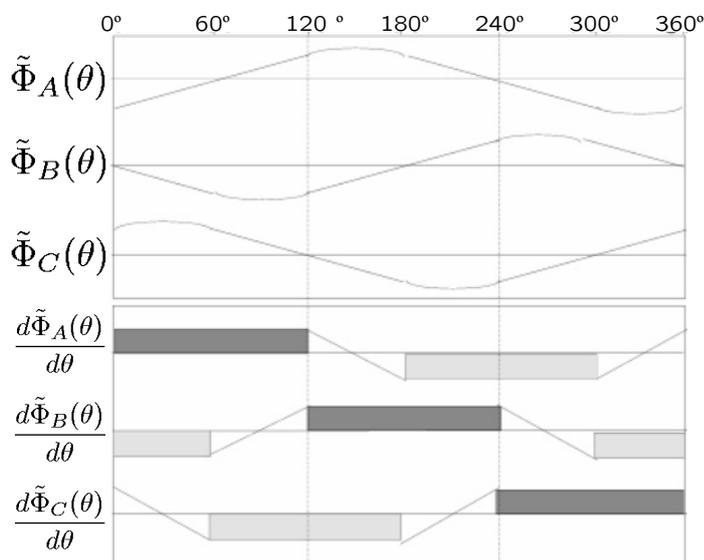
I motori brushless possono essere alimentati con:

- **Campo trapezoidale:** generato utilizzando correnti costanti commutate opportunamente (DC brushless).
- **Campo sinusoidale:** necessita di una modalità di pilotaggio a correnti variabili sinusoidali (AC brushless).

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale

Il flusso magnetico $\tilde{\Phi}$ del rotore che si concatena con gli avvolgimenti di statore è di tipo quasi lineare, nel senso che è lineare per ampi angoli di rotazione del motore, e quindi con derivata $k_e(\theta) = d\tilde{\Phi}/d\theta$ costante su tali tratti.



$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

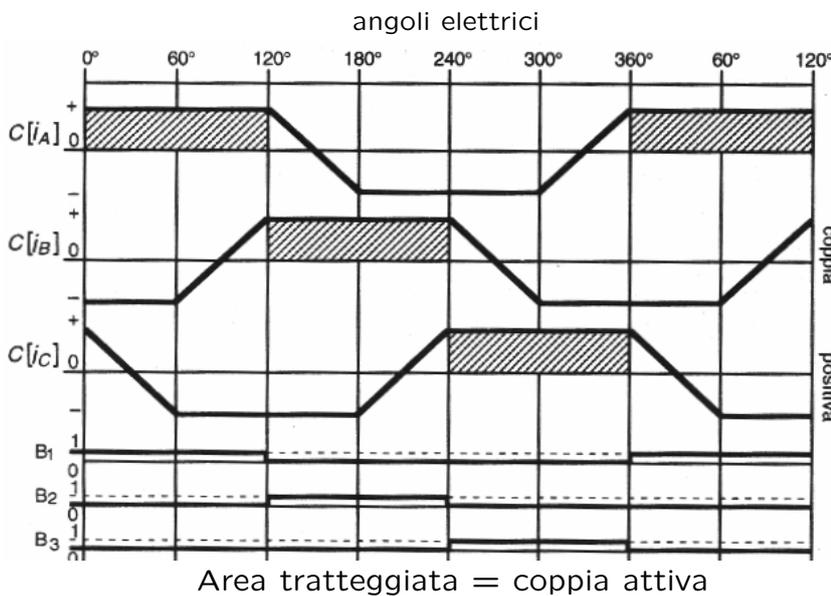
$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale

Imponendo correnti i costanti e in fase rispetto ai flussi concatenati si ottiene una coppia costante lungo l'intero arco di rotazione del motore.



1=transistor in conduzione

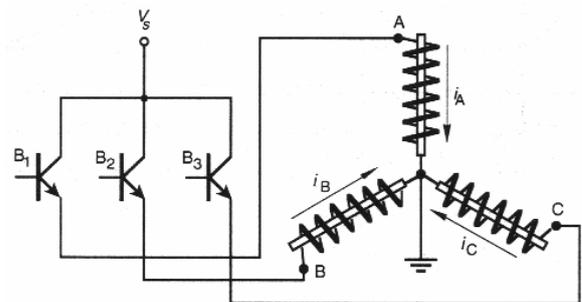
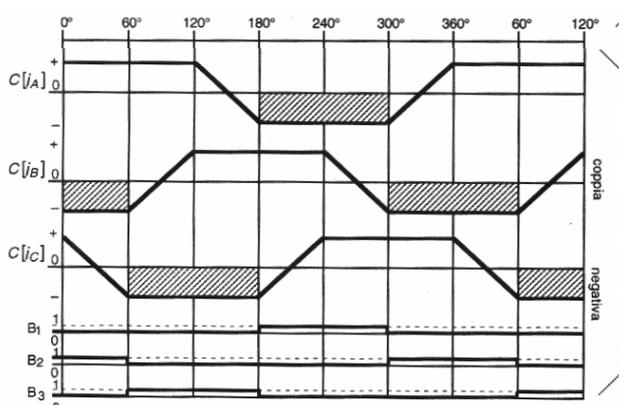
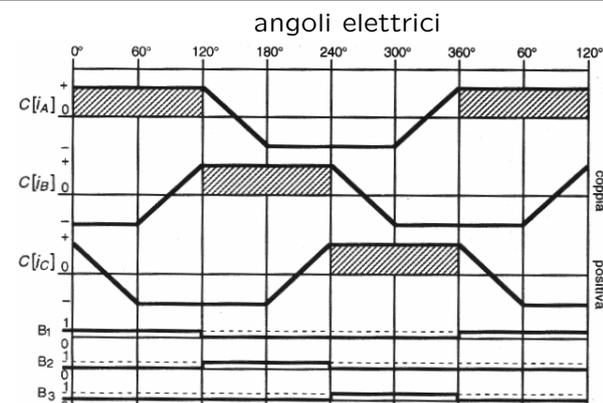
$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e(\theta)\omega$$

$$T_m = k_e^T(\theta)i$$

$$k_e(\theta) = \frac{d\tilde{\Phi}}{d\theta}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (DC brushless) a campo trapezoidale



- V_s = tensione continua. La coppia prodotta è proporzionale all'ampiezza di V_s
- Per invertire la coppia, basta sfasare gli angoli di metà intervallo (nel motore c.c. invece occorre invertire la tensione V_s)
- Questo schema va bene solo a basse velocità/potenze (trascura le induttanze parassite)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori (AC brushless) a campo sinusoidale

Si fa in modo che per ogni avvolgimento di fase, la coppia relativa alla corrente che lo percorre vari sinusoidalmente con l'angolo θ

Consideriamo un avvolgimento bifase:

$$T_1 = i_1 K_T \sin(\theta) \quad K_T = \text{costante di coppia}$$

$$T_2 = i_2 K_T \cos(\theta)$$

Imponendo che anche la corrente vari sinusoidalmente con θ :

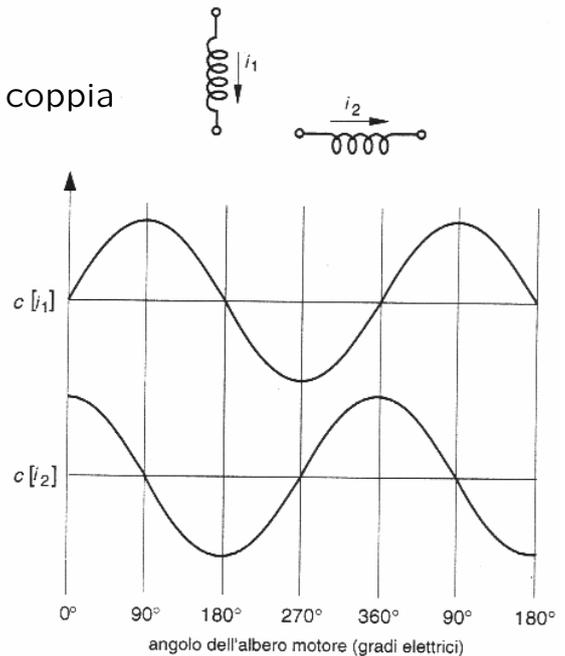
$$i_1 = I \sin(\theta)$$

$$i_2 = I \cos(\theta)$$

la coppia totale $T = T_1 + T_2$ risulta:

$$T = IK_T(\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)) = IK_T$$

ed è quindi costante



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo (*step motors*)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- Convertono impulsi digitali elettronici in spostamenti meccanici programmati di elevata precisione.
- Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica (no contatti elettrici striscianti)
- E' facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.



La fotografia mostra una coppia di motori step recuperati da vecchie stampanti (notare i numerosi fili di alimentazione)

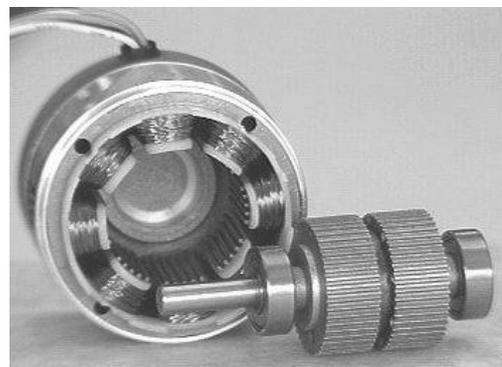
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

Per ottenere una rotazione occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio.

I motori passo-passo si dividono in tre grandi gruppi:

- motori a magnete permanente
- motori a riluttanza variabile
- motori ibridi



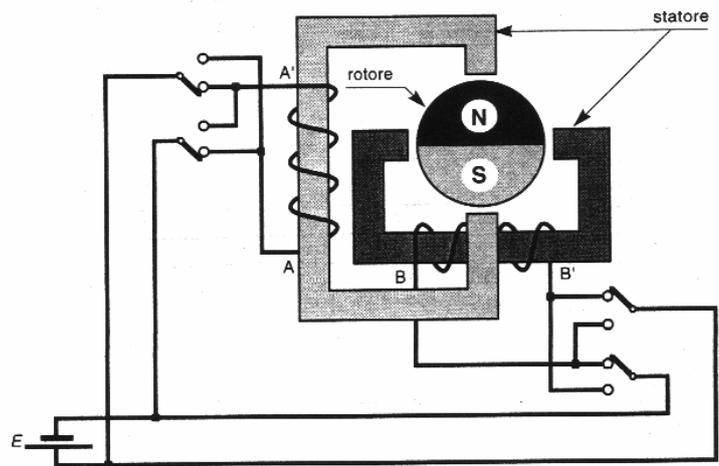
Motore ibrido (rotore, statore).

Il rotore è formato da due ruote dentate (che sono i due poli del magnete) realizzate in materiale ferromagnetico.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo - principi di funzionamento

- Statore. Ha diverse coppie di espansioni polari, attorno alle quali si dispongono gli avvolgimenti del circuito di armatura
- Rotore. Fornisce il flusso magnetico di eccitazione
- Circuito di pilotaggio e sistema di azionamento, che alimentano i circuiti di armatura in successione

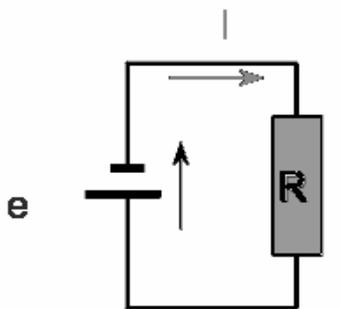


- Il funzionamento è simile a quello del motore brushless, ma non ci sono sensori di posizione.
- Ad ogni commutazione il rotore si porta pressoché istantaneamente in posizione di coppia nulla, ruotando di un certo angolo (passo angolare)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Richiami di Elettrotecnica - Riluttanza

Circuito elettrico

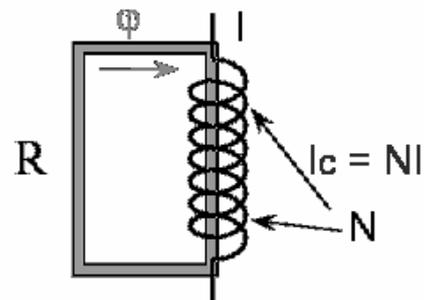


f.e.m. e
corrente I
resistenza R

$$e = R \cdot I$$

legge di Ohm

Circuito magnetico



f.m.m. Ic
flusso ϕ
riluttanza R

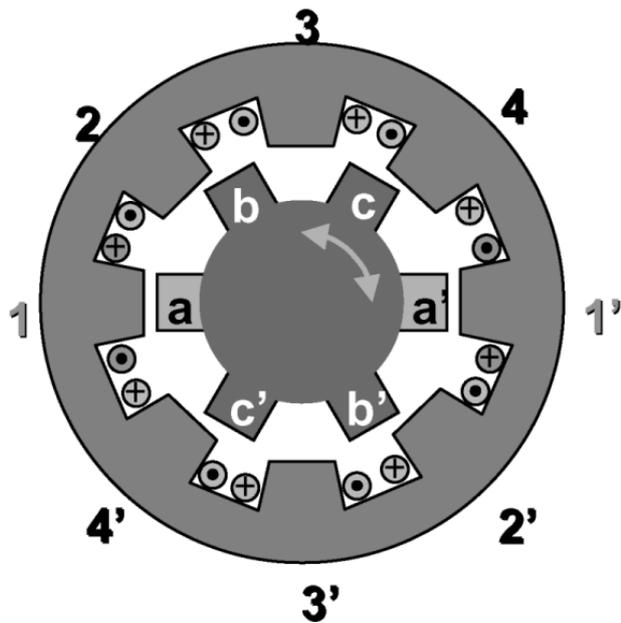
$$NI = R \cdot \phi$$

legge di Hopkinson

La riluttanza dipende dal materiale e dal percorso geometrico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile

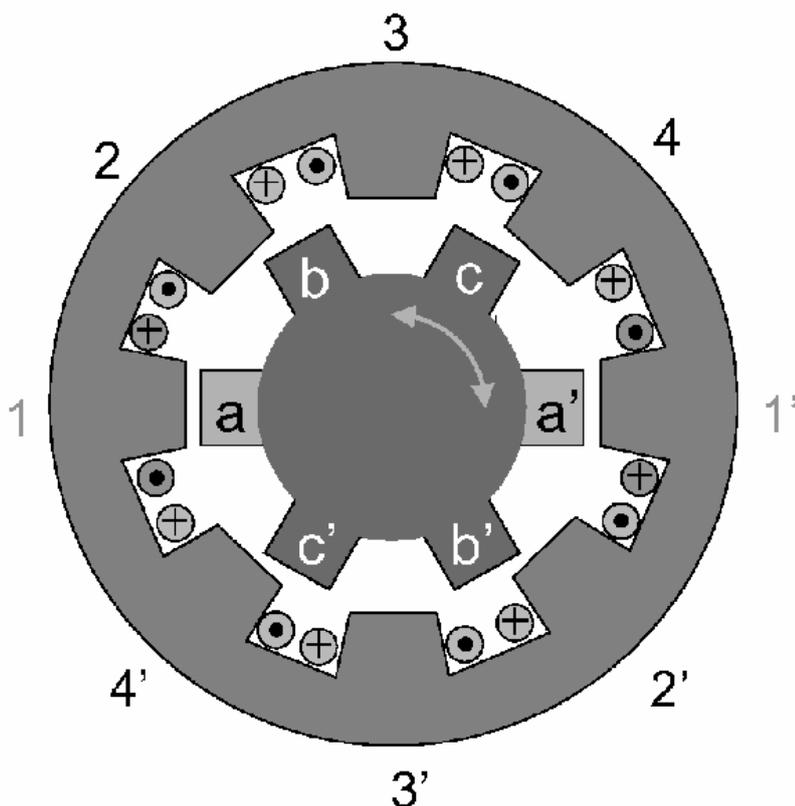


Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

- Il rotore è costituito da materiale magnetico
- Alimentando una fase con una corrente costante il rotore si porta nella posizione per la quale il circuito magnetico assume la minima riluttanza e cioè con una coppia di denti (a-a') allineati con la fase alimentata (1-1').
- Motore fortemente nonlineare, moti incrementali

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



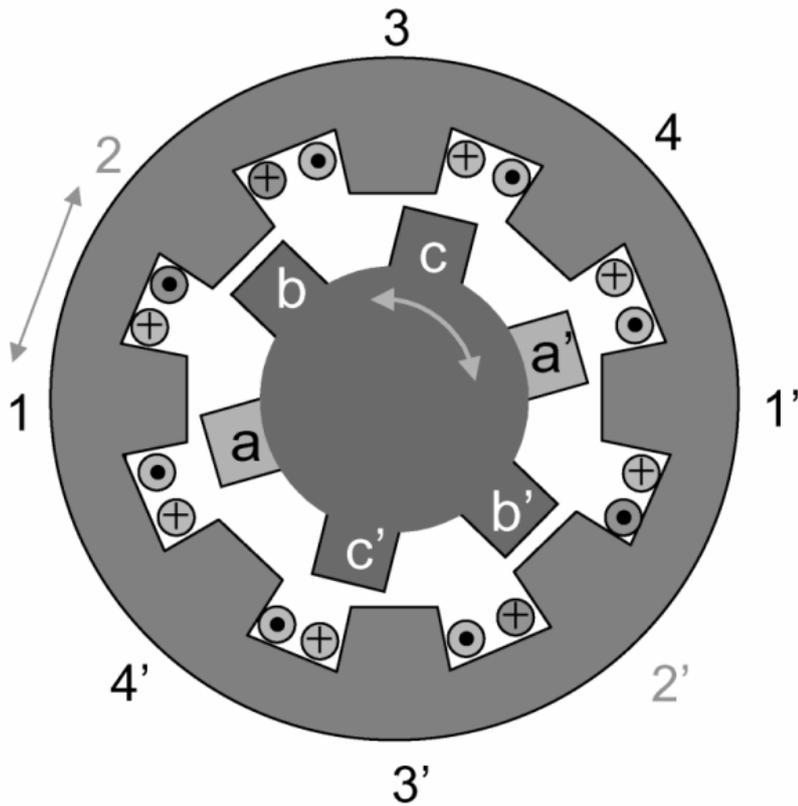
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 1-1'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



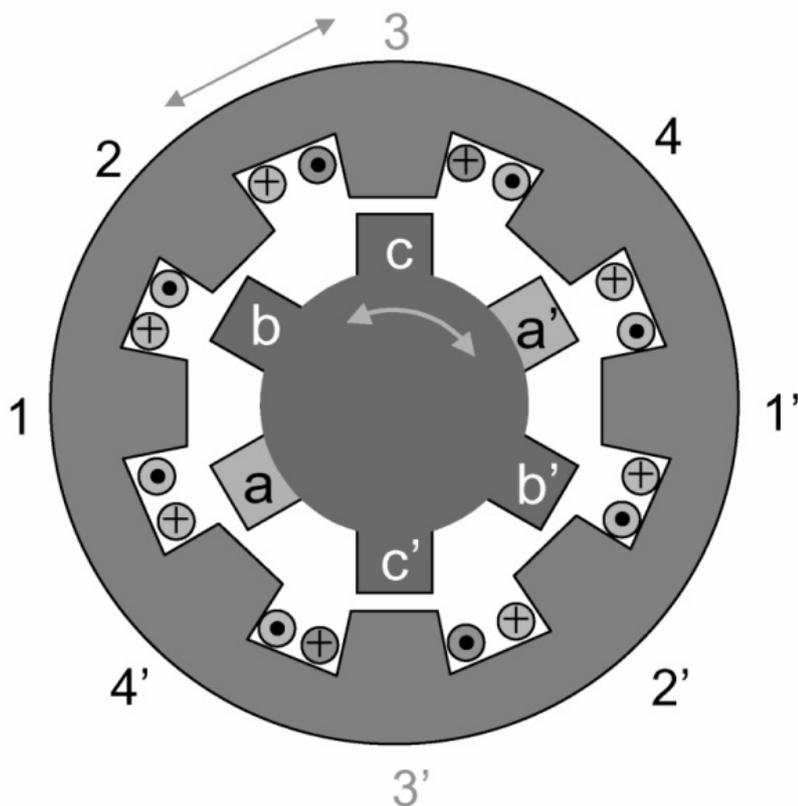
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 2-2'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



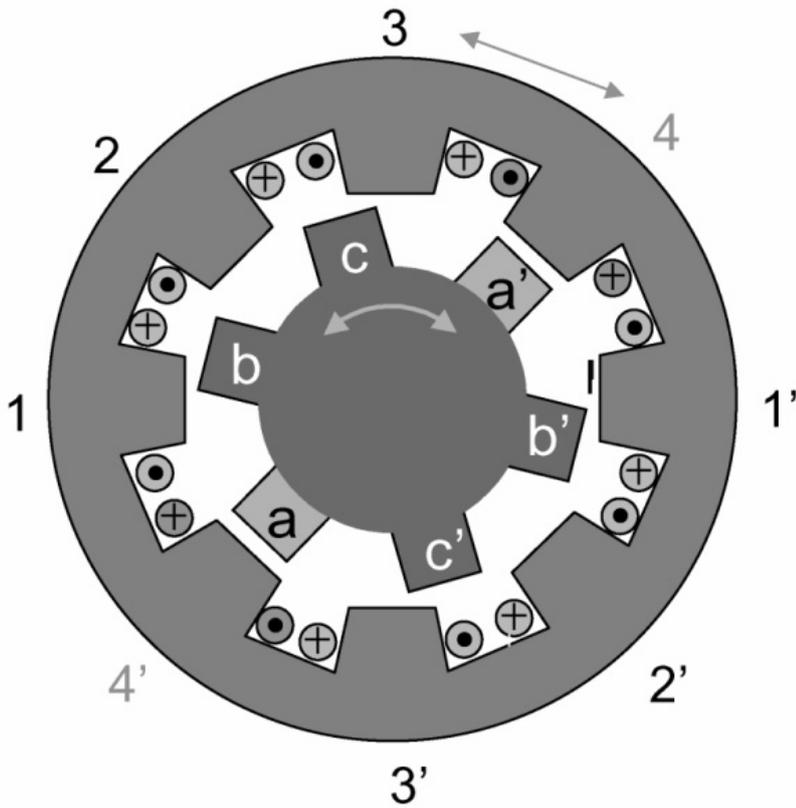
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 3-3'
alimentata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



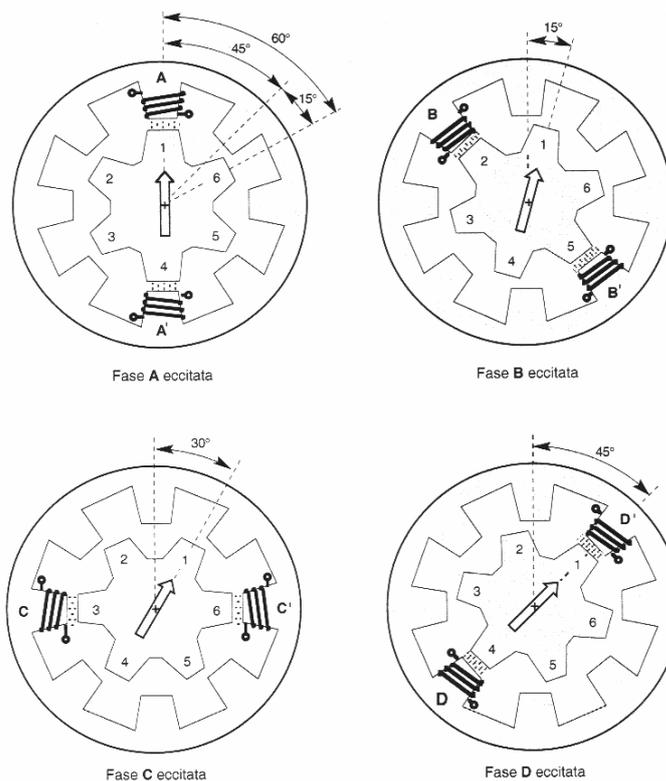
Funzionamento

Motore a 4 fasi
del tipo 6-8

fase 4-4'
alimentata

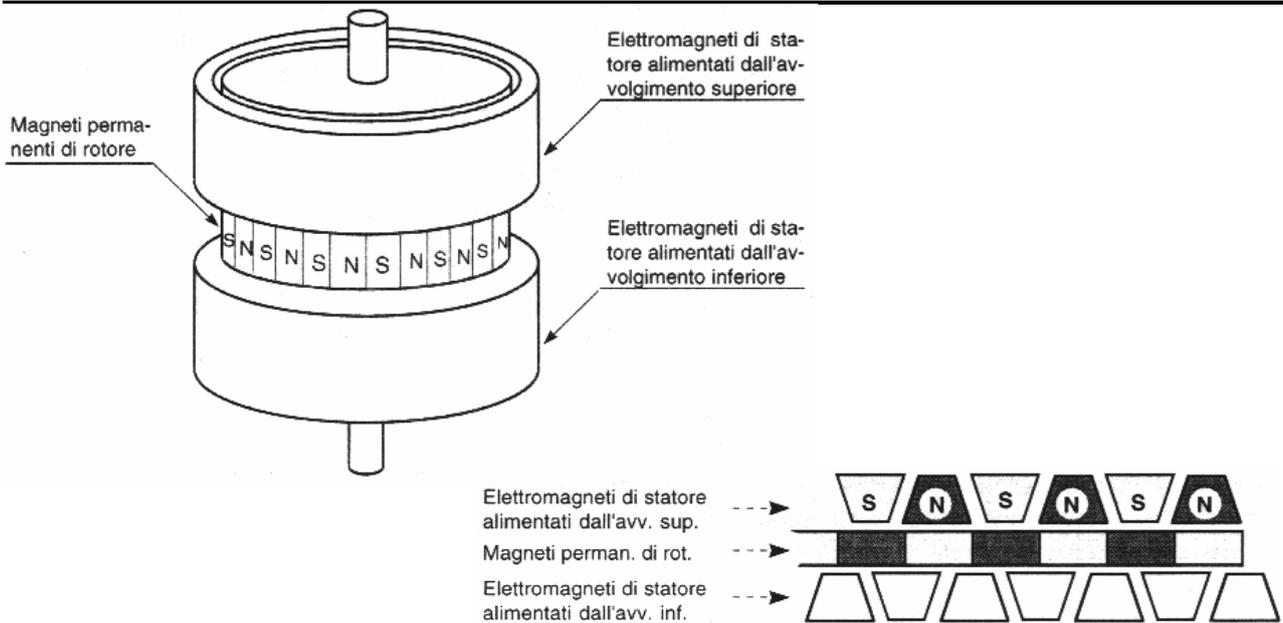
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a riluttanza variabile



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

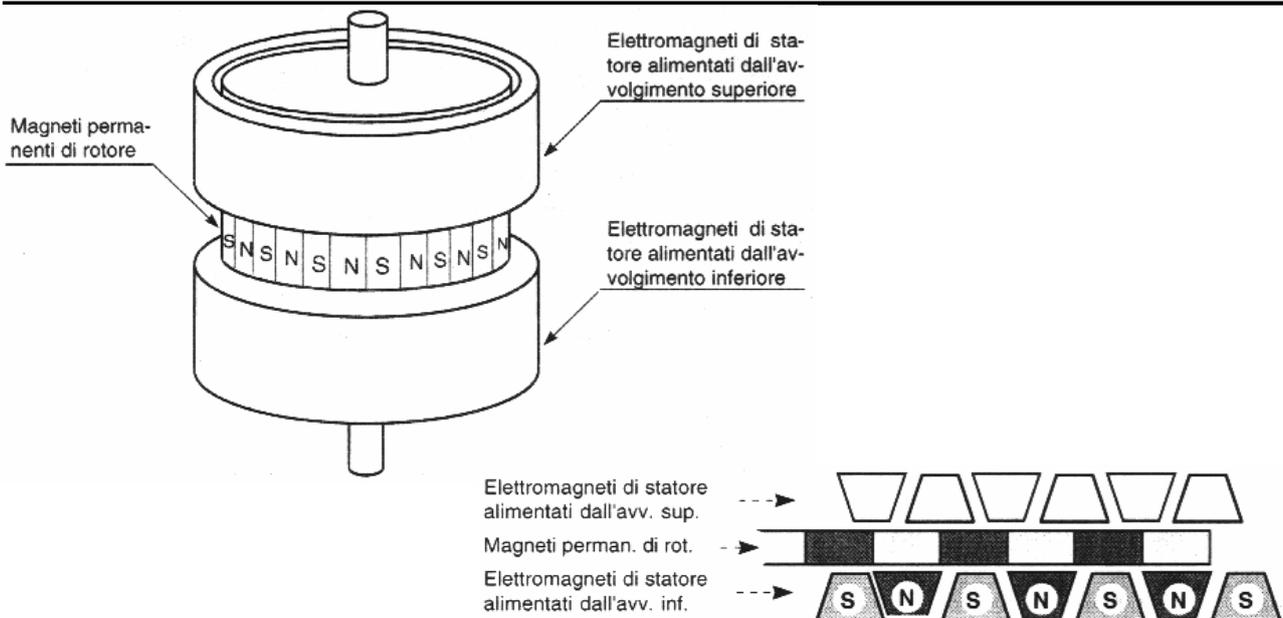
Motori passo-passo a magneti permanenti



Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

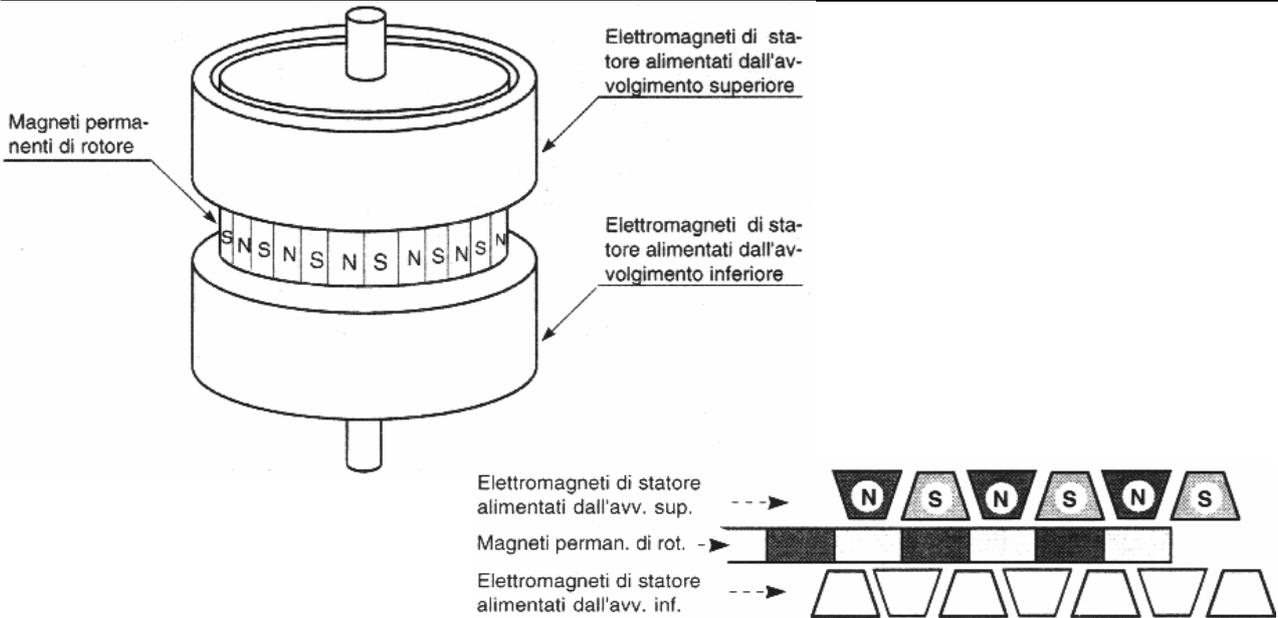
Motori passo-passo a magneti permanenti



Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo a magneti permanenti

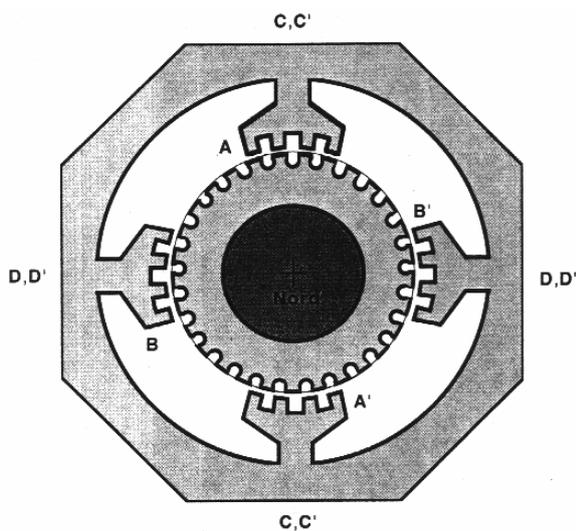


Alimentando alternativamente gli avvolgimenti superiore e inferiore di statore si ottiene una traslazione del rotore

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

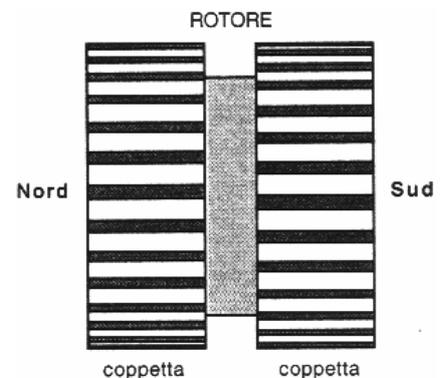
Motori passo-passo ibridi

Il rotore è a magnete permanente, ma la sua forma ricorda quella dei motori a riluttanza variabile



$$p = \frac{360^\circ n}{4} \quad \text{passo}$$

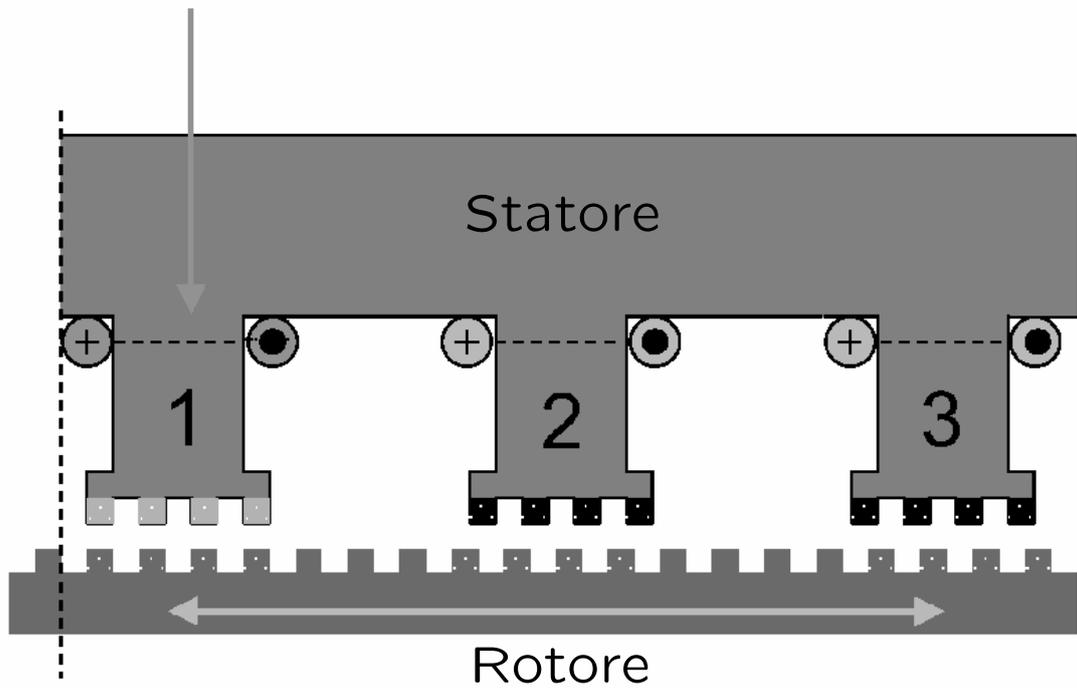
$$n = \text{numero denti}$$



Sono i più diffusi (80%), seguiti da quelli a magnete permanente (20%). Quelli a riluttanza variabile sono quasi scomparsi (ma il loro principio di funzionamento è simile a quello dei motori ibridi)

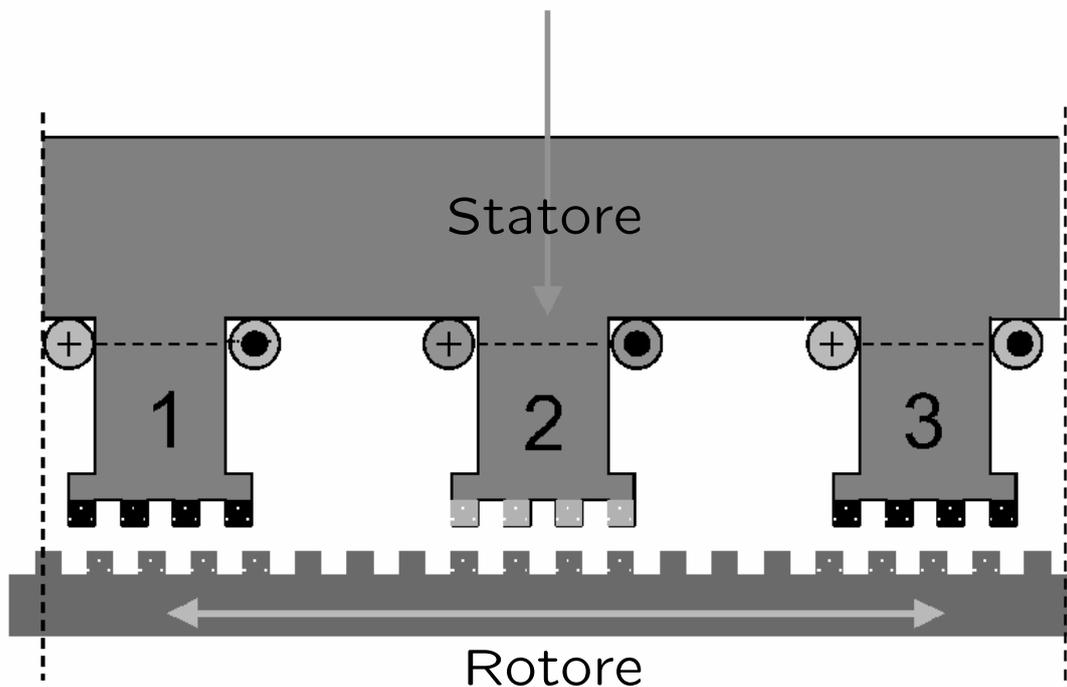
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo ibridi



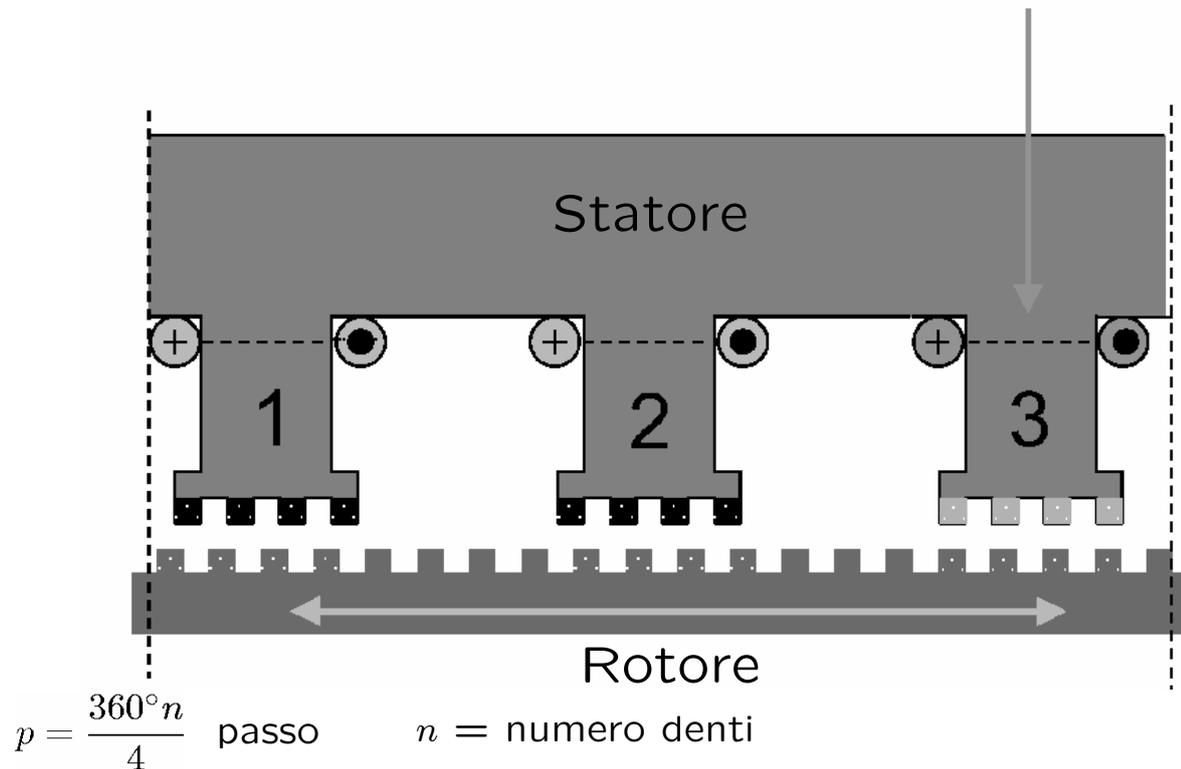
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo ibridi



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

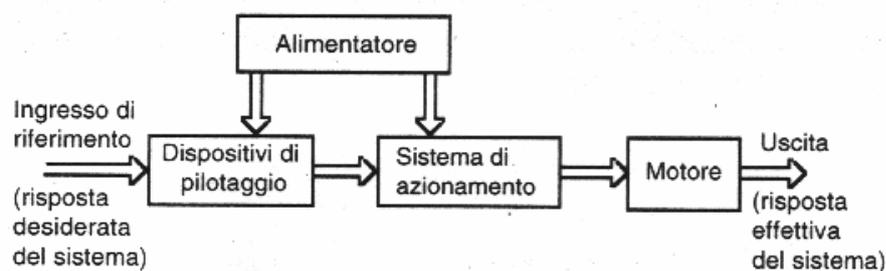
Motori passo-passo ibridi



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- Non hanno bisogno di **feedback**, e quindi di sensori di posizione e velocità



- I motori passo-passo (a magneti permanenti e ibridi), a differenza degli altri motori, sono in grado di mantenere il carico sviluppando da fermi una coppia di tenuta anche in assenza di alimentazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori passo-passo

- I motori passo-passo vengono utilizzati per applicazioni che richiedono:
 - controlli di posizione di basso costo dove sono richieste piccole potenze
 - moti incrementali
 - applicazioni che richiedano rotazioni di valore angolare prestabilito con alta velocità di esecuzione, arresti bruschi con posizionamenti precisi e coppie di mantenimento della posizione di arresto relativamente alte.

- Essendo a ingresso direttamente numerico, non richiede convertitori analogico/digitali nei sistemi di controllo digitale



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Lineari

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Approccio Direct Drive

- Problema:
 - spesso è più costoso il sistema di trasformazione del moto che l'attuazione stessa
 - le perdite per attrito diventano notevoli
 - non conviene avere un solo generatore di movimento e tanti sistemi di trasmissione/trasformazione
- Filosofia Direct-Drive:

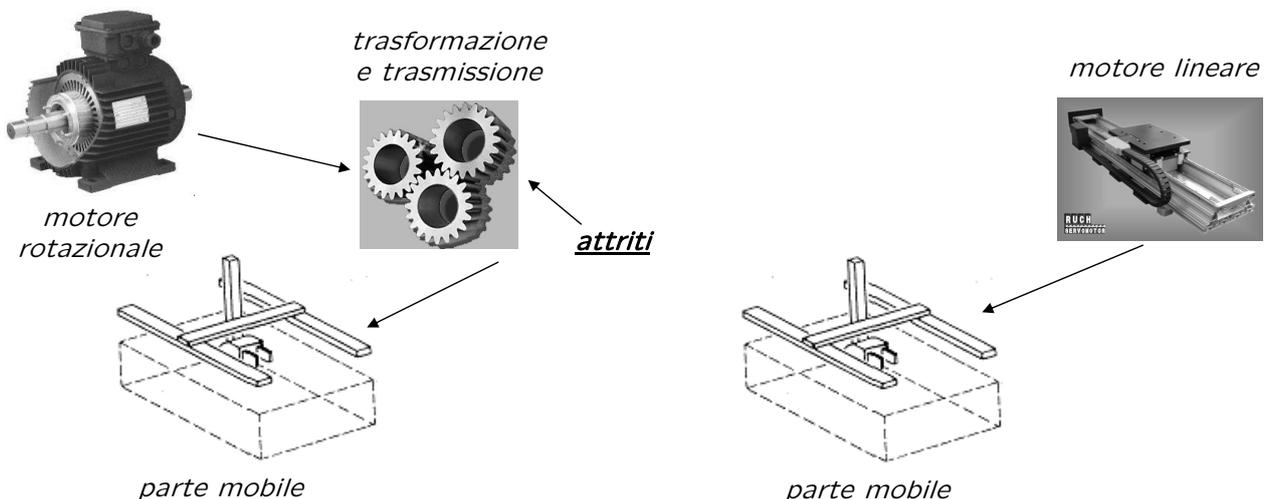
*“generare il movimento dove serve,
nella forma in cui serve”*

Si basa sull'uso di molti attuatori con movimenti diversi

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Lineari

- Motori lineari:
 - il moto generato è traslazionale
 - invece del rotore si ha un movente che si muove in linea retta
 - nessuna trasformazione cinematica per ottenere moti rettilinei

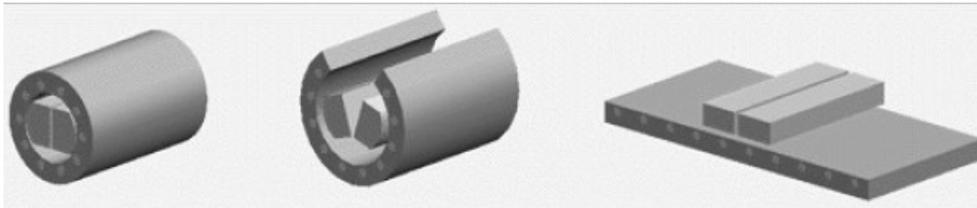


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Principi di Funzionamento

Gli stessi effetti elettromagnetici che fanno muovere i motori rotazionali sono alla base del movimento dei motori lineari

L'unica differenza è che rotore e statore di fatto sono "srotolati"



Anche in questo caso si differenziano motori a riluttanza variabile (passo-passo) e motori a riluttanza costante (asincroni, sincroni)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tecnologia

- **Passo-Passo:**

Pro: precisione, coppia a fermo, uso anche in catena aperta.

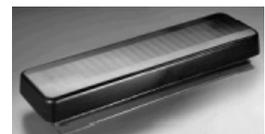
Con: coppie fortemente non lineari, velocità e spinte limitate.



- **Asincroni:**

Pro: elevate spinte e velocità, economici (no magneti permanenti)

Con: no coppia a fermo, complessità nel controllo e alimentazione



- **Sincroni (brushless):**

Pro: semplici, sufficiente spinta e velocità

Con: usano magneti permanenti

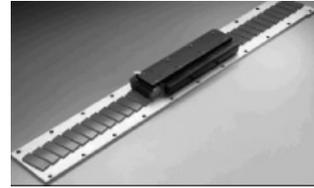
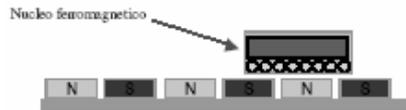


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Monolateri

- **Struttura:**

pista costituita da magneti permanenti su cui si muove un cursore con gli avvolgimenti e i cavi di alimentazione



- **Vantaggi:**

elevati valori di picco di spinta (15 kN), buona dissipazione del calore

- **Svantaggi:**

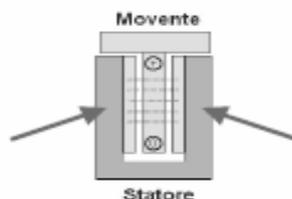
forza di attrazione e alta inerzia del movente, campo asimmetrico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Bilateri

- **Struttura**

Movente circondato da statore da entrambi i lati



- **Vantaggi**

Campo simmetrico, nessuna forza di attrazione, massa ridotta

- **Svantaggi**

Cattiva dissipazione, spinta <math><2\text{kN}</math>

Usato nelle macchine Pick and Place e nei robot cartesiani

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- **Struttura**

Il movente è un magnete permanente, che scorre in uno statore cilindrico alimentato ... oppure ...

Il magnete permanente è fisso ed il movente è alimentato



- **Vantaggi**

Ottimo sfruttamento campo magnetico, buon comportamento termico, bassi costi

- **Svantaggi**

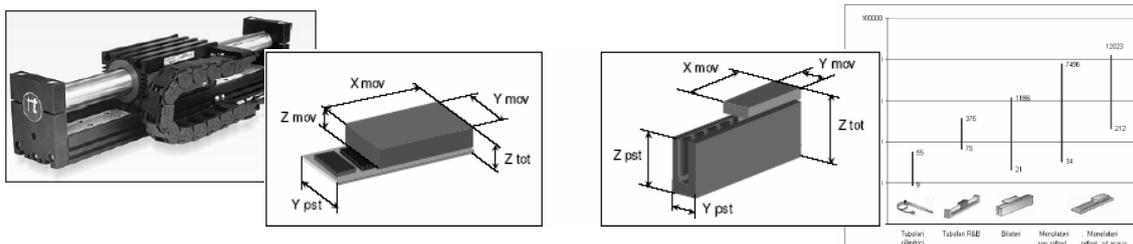
Corsa limitata, la spinta cala in fase di estensione

Usato in spingitori/pistoni elettrici

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Specifiche Principali

| | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| Corsa | i tubolari limitati a 2-3 m, gli altri estendibili |
| Velocità | fino a 10 m/sec |
| Accelerazione | fino a 20 g ($g=9.8 \text{ m/sec}^2$ accelerazione di gravità) |
| Massa | divisa in massa del movente e dello statore |
| Forza Cont. | forza che il motore può erogare in modo continuo |
| Forza di Picco | forza che il motore può erogare per brevi istanti |
| Temp. Max | massimo valore di temperatura di esercizio |
| Raffreddamento | ad aria, aria forzata o acqua |



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento

- Stesso approccio dei motori rotazionali (es. *Dimensionamento Motori*) con forze e traslazioni invece di coppie e rotazioni
- **N.B.** nel dimensionamento bisogna usare la forza continua:

$$F_{RMS} \leq F_{cont}$$

$$F_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T F^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove F_{cont} è la forza continua del motore, F_{RMS} è il valore efficace della forza e $F(t)$ è la risultante delle forze esterne ad ogni istante di tempo

- Inoltre deve essere verificata la seguente condizione sulla forza massima richiesta rispetto alla forza di picco del motore

$$F_{max} \leq F_{peak}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dimensionamento(2)

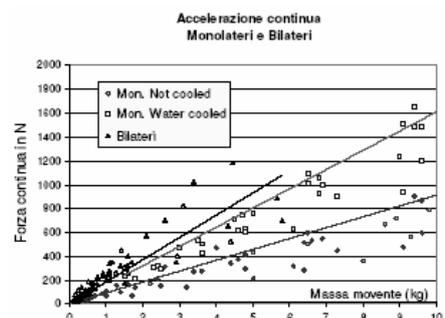
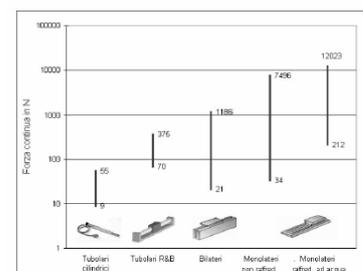
Il valore di spinta dipende dal tipo di motore.
Spesso il dato importante è l'accelerazione:

$$a_{th} = \frac{F_{cont}}{m_{mov}}$$

a_{th} : accelerazione teorica continua

Motore monolatero: ha la massima spinta ma la massa del movente è maggiore degli altri. Il motore che fornisce la max accelerazione è il bilatero.

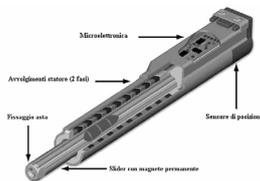
N.B.: vale nel caso in cui la massa del movente sia prevalente nel sistema.



Valori max di a_{th} : 19 g bilateri, 16.5 g monolateri raffreddati ad acqua, 9.3 g monolateri non raffreddati

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

- I motori lineari permettono di generare moti traslazionali senza bisogno di trasformazioni cinematiche: nè attriti nè componenti aggiuntive.
- Ancora poco diffusi → i prezzi sono elevati.
- In laboratorio di automatica è presente un motore lineare cilindrico *LINMOT* a disposizione per tesi e tirocini.
- Un'applicazione dei motori lineari:
→ automatizzare un calcio balilla



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Motori Elettrici

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di Posizione, Velocità, Accelerazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di posizione/velocità

POSIZIONE:

- Potenzimetro
- Trasformatore Lineare Differenziale (LDT)
- Encoder

VELOCITA'

- Dinamo tachimetrica

ACCELERAZIONE

- Dinamo tachimetrica

Grandezza in ingresso: spostamento lineare o angolare

Grandezza in uscita: grandezza elettrica analogica o digitale

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

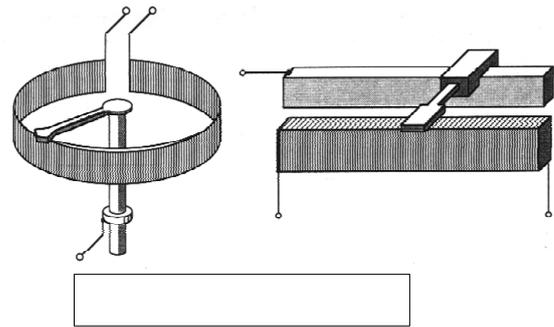
Potenzimetri

Grandezza misurata (ingresso): rotazione o spostamento lineare

Grandezza di uscita: tensione

Tipo di sensore: modulante

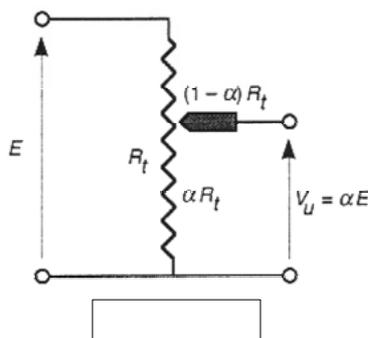
Il potenziometro è costituito da un cursore con contatto mobile e da un resistore posto su un supporto di materiale isolante.



La sagoma del materiale isolante può essere circolare per misurare spostamenti angolari o rettilinea per spostamenti lineari.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Potenzimetri



Grandezza caratteristica:

$$\alpha = V_u / E$$

Attenuazione

Tipi di potenziometro:

Lineare: α è funzione lineare di x (spostamento lineare) o θ (rotazione angolare):

$$\alpha(x) = Kx \text{ o } \alpha(\theta) = K\theta \Rightarrow V_u = KEKx \text{ o } V_u = KEK\theta$$

Non lineare: $\alpha(x)$ o $\alpha(\theta)$ funzione non lineare

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipico utilizzo di potenziometri lineari:
servomeccanismi di posizione.

Caratteristiche dei potenziometri:

- | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PRO | <ul style="list-style-type: none">• precisi• leggeri• poco ingombranti |
| CONTRO | <ul style="list-style-type: none">• Facile usura• Scarsa affidabilità• Funzionamento a basse frequenze |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduttori di posizione a induzione

Dispositivi costituiti da avvolgimenti elettrici accoppiati fra loro per effetto trasformatore.

Funzionano in regime stazionario o lentamente variabile.

Tipi di trasduttori a induzione:

- *Trasformatore differenziale lineare*
(spostamenti lineari)
- *Sincro*
(spostamenti angolari)
- *Resolver*
(spostamenti angolari e trasformazione di coordinate polari in coordinate cartesiane)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasformatore Differenziale Lineare

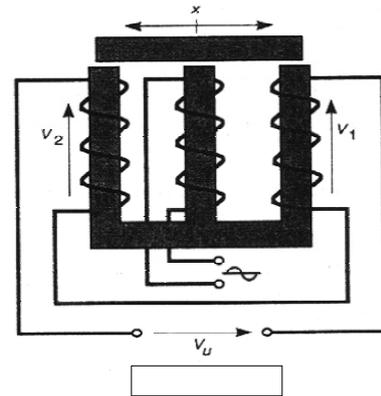
Grandezza misurata (ingresso): spostamento

Grandezza di uscita: segnale analogico modulato

Tipo di sensore: modulante (campo magnetico)
sensore (coppia di avvolgimenti)

Avvolgimento centrale detto di eccitazione. È alimentato in c.a.

Rami laterali secondari identici collegati tra loro e avvolti in senso opposto.

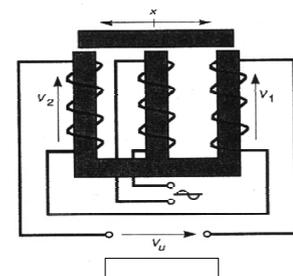


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasformatore Differenziale Lineare

Se la posizione della barra ferromagnetica è simmetrica rispetto ai secondari:

$$V_1 = -V_2 \Rightarrow V_U = 0$$



Se la barra non è centrata \Rightarrow flussi concatenati diversi \Rightarrow tensioni diverse nei due avvolgimenti secondari $\Rightarrow V_U \neq 0$

$$V_U = V_m(x) \sin(\omega t + \phi) \quad \phi = \begin{cases} 0 & \text{se } x > 0 \\ \pi & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

A causa di inevitabili asimmetrie sono presenti tensioni residue $\Rightarrow V_U$ mai completamente nulla.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasformatore Differenziale Lineare

Caratteristiche essenziali

PRO

- Sensibilità: $50 \div 100 \text{ mV}_{\text{out}} / (\text{mmV}_{\text{in}})$
- Linearità: $0.1 \div 0.5 \%$
- Risoluzione: $2 \div 20 \mu\text{m}$ (lineare)
- Campo di misura: $1 \div 10 \text{ cm}$

CONTRO

- Demodulazione dell'uscita
- Stabilità del generatore di riferimento

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder

Grandezza misurata: rotazione angolare

Grandezza di uscita: segnale digitale

Tipo di sensore: modulante (campo luminoso)
sensore (effetto fotoelettrico)

Tipi di encoder:

- *Incrementali*
- *Assoluti*

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

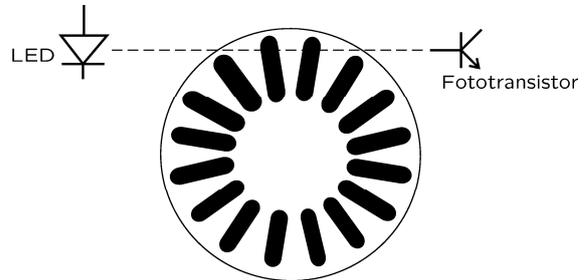
Encoder incrementale

Possano essere di due tipi:

- Magnetici
- Ottici

Encoder incrementali ottici:

Sul disco (di vetro o plastica) sono presenti N zone trasparenti.



In uscita al fototransistor si ottiene un treno di impulsi. Contando il treno d'impulsi si è in grado di determinare di quanto il disco è ruotato.

$$\text{Risoluzione angolare: } \frac{360^\circ}{N}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder incrementale

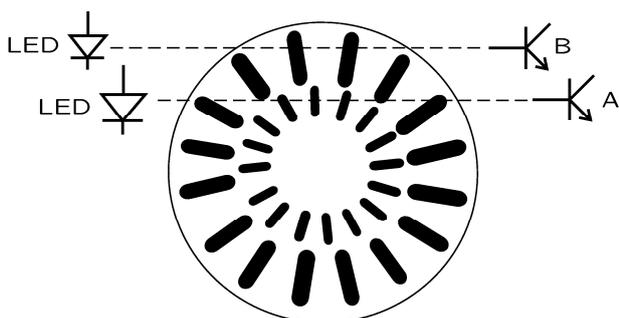
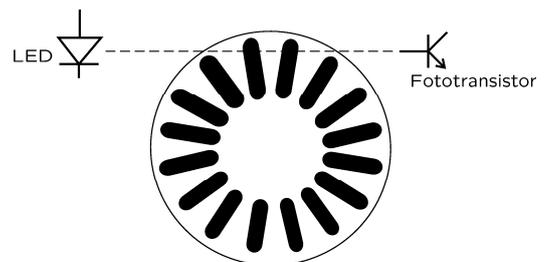
In questa configurazione l'encoder viene utilizzato per misurare la velocità di rotazione !

Velocità di rotazione:

$$n = \frac{f}{N} \quad \text{giri/secondo}$$

f = frequenza del segnale generato

N = numero dei fori

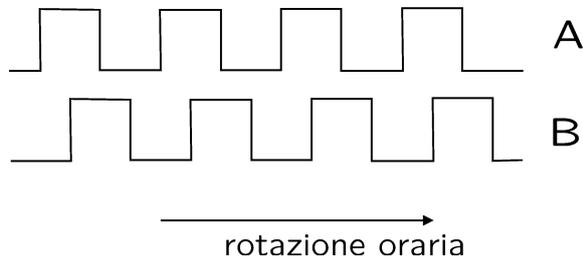


Per rilevare il verso di rotazione si considerano 2 ghiera concentriche di settori trasparenti. Le ghiera hanno lo stesso numero di settori ma i settori sono sfasati di un angolo corrispondente a mezzo settore.

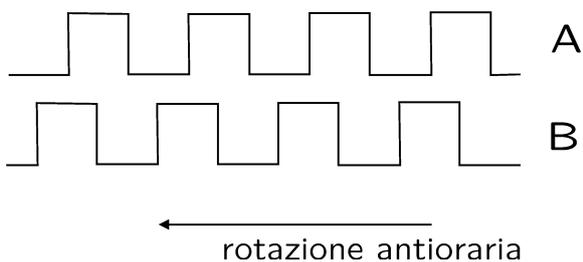
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder incrementale

Se l'encoder ruota in senso orario il treno di impulsi di A anticipa quello di B. Se la rotazione è antioraria B anticipa A



Per indicare il verso di rotazione con un segnale digitale si può utilizzare un Flip-Flop di tipo D.



Uscita alta corrisponde a rotazioni orarie, quella bassa a rotazioni antiorarie.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder incrementale

Pregi:

- costo contenuto
⇒ incremento di costo limitato con la risoluzione
- Affidabilità

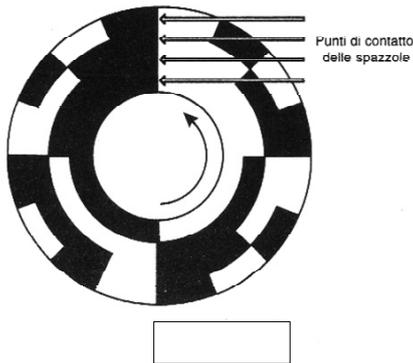
Difetti:

- Sensore incrementale
⇒ elettronica esterna di conteggio e discriminazione del verso di rotazione
- Necessita di azzeramento (sensore incrementale)
- Perde l'informazione di posizione in assenza di alimentazione

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder assoluto

Forniscono la posizione angolare assoluta dell'asse



Le combinazioni trasparente/opaco riproducono la numerazione binaria

Codici utilizzati negli encoders assoluti:

- Binario
- Gray

Problema: nel passaggio da 7 (0111) a 8 (1000) se la prima spazzola entra in conduzione prima che le altre tre escano di conduzione si presenta 15 (1111) e non 8.

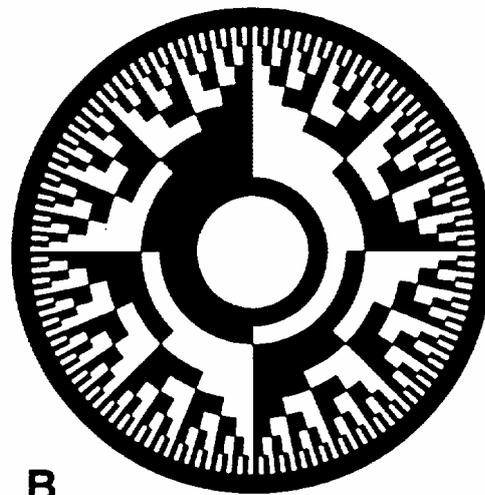
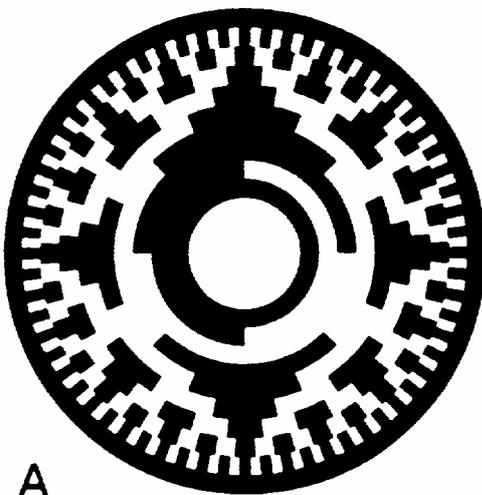
Soluzione: Utilizzo del codice Gray dove i numeri adiacenti differiscono di un solo simbolo.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder assoluto

A = Gray-code

B = Binary code



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Encoder assoluto

Pregi:

- uscita direttamente utilizzabile dall'unità di elaborazione
- non necessita di azzeramento (sensore assoluto)
- mantiene l'informazione di posizione anche in assenza di alimentazione

Difetti:

- Costo elevato
- Costo crescente con la risoluzione
⇒ il numero di bit utilizzati per la codifica ($\leq 12/14$)
- Sensore assoluto nel giro
⇒ elettronica esterna se utilizzato su più giri

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di velocità

Tipici sensori:

- Dinamo tachimetrica
- Giroscopi

Grandezza misurata (ingresso): velocità di rotazione

Grandezza di uscita: tensione

Tipo di sensore: autoeccitante

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dinamo tachimetrica

Motore a collettore usato al contrario: se fatto ruotare genera una tensione.

Tensione d'uscita:

$$V_u = K_t \Omega$$

K_t costante tachimetrica

Ω velocità angolare del rotore

Caratteristiche tecniche essenziali:

- linearità: 0.5÷1 %
- sensibilità: 5÷10V/1000 rpm
- ampiezza del ripple: 1÷2 %

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dinamo tachimetrica

Pregi:

- Sensore assoluto
- Costo contenuto
- Idoneo al funzionamento in ambienti ostili: all'interno di motori.

Difetti:

- La tensione d'uscita presenta una certa ondulazione residua (ripple): dipende dal numero di lamelle del collettore
- Corrente assorbita in uscita piccola (per evitare smagnetizzazioni)
- Usura delle spazzole
- Misura solo la velocità

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accelerometri

Grandezza misurata (ingresso): accelerazione lineare e inclinazione

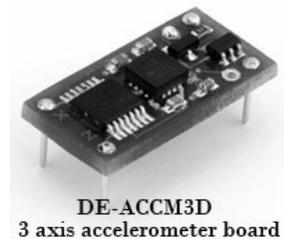
Grandezza di uscita: tensione

Principio di funzionamento

1. Misura l'accelerazione *dinamica* (es: vibrazione, shock) di una massa nota sospesa ad un elemento elastico

$$a = \frac{k}{m} \Delta x$$

Note k, m , si risale ad a misurando Δx con un sensore di posizione



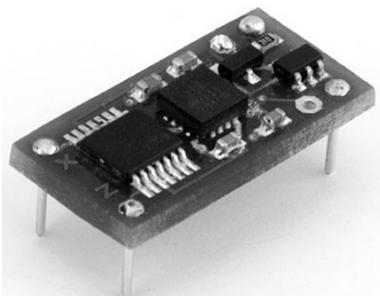
2. Per le accelerazioni di tipo *statico* (es: misura forza di gravità):

$$g \cos \theta = \frac{k}{m} \Delta x \quad (\text{inclinometro})$$

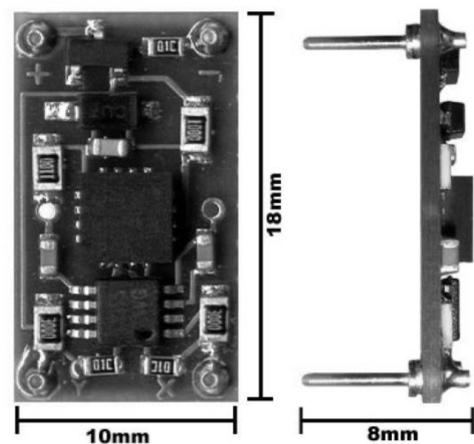
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accelerometri

Integrano al loro interno l'elettronica per il condizionamento del segnale (per amplificazione e filtraggio)



Accelerometro a tre assi x, y, z



Applicazioni: utilizzo molto ampio date le piccole dimensioni

(es: attivazione airbag)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accelerometri: Caratteristiche

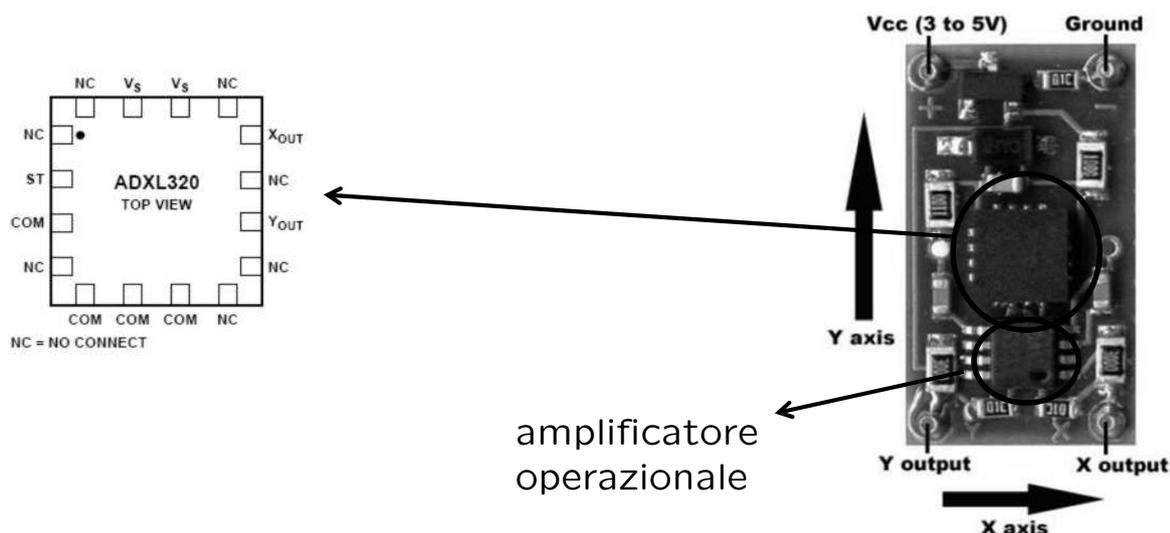
- *Numero di assi.* Spesso bastano 2 assi. Esistono accelerometri a 3 assi. Oppure coppia di accelerometri a 2 assi posti ortogonalmente)
- *Accelerazione massima.* $\pm 1.5g$ è sufficiente per misurare l'inclinazione tramite gravità. Per autoveicoli o robot $\pm 2g$. Esistono anche accelerometri fino a $\pm 5g$
- *Sensibilità.* Maggiore la variazione del segnale rispetto ad una variazione di accelerazione, più accurata la misura.
- *Banda.* Per misure di inclinazione va bene 50Hz (passa basso). Per misure di vibrazione, centinaia di Hz.
- *Impedenza di uscita.* Per effettuare propriamente la conversione A/D l'impedenza di uscita dovrebbe essere sotto i $10k\Omega$, quindi potrebbe essere necessario un buffer che diminuisca tale impedenza.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accelerometri: ADXL320

L' **ADXL320** della Analog Device è composto da un singolo chip, con sensibilità su due assi x e y .

Necessita del circuito di condizionamento che permette di sfruttare i segnali in uscita dal chip.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Accelerometri: ADXL320

Le caratteristiche principali dell'accelerometro:

Table 1.

| Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | Unit |
|------------------------------------------------------|----------------------|-------|----------|------|------------|
| SENSOR INPUT | | | | | |
| | Each axis | | | | |
| → Measurement Range | | | ±5 | | g |
| → Nonlinearity | % of full scale | | ±0.2 | | % |
| → Package Alignment Error | | | ±1 | | Degrees |
| → Alignment Error | X sensor to Y sensor | | ±0.1 | | Degrees |
| → Cross Axis Sensitivity | | | ±2 | | % |
| SENSITIVITY (RATIOMETRIC)² | | | | | |
| | Each axis | | | | |
| → Sensitivity at X_{out}, Y_{out} | $V_s = 3\text{ V}$ | 156 | 174 | 192 | mV/g |
| → Sensitivity Change due to Temperature ³ | $V_s = 3\text{ V}$ | | 0.01 | | %/°C |
| ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC) | | | | | |
| | Each axis | | | | |
| → 0 g Voltage at X_{out}, Y_{out} | $V_s = 3\text{ V}$ | 1.3 | 1.5 | 1.7 | V |
| → 0 g Offset Versus Temperature | | | ±0.6 | | mg/°C |
| NOISE PERFORMANCE | | | | | |
| → Noise Density | @ 25°C | | 250 | | µg/√Hz rms |
| FREQUENCY RESPONSE⁴ | | | | | |
| | | 0.002 | | 10 | µF |
| → C_x, C_y Range ⁵ | | | 32 ± 15% | | kΩ |
| → R_{FILT} Tolerance | | | 5.5 | | kHz |
| → Sensor Resonant Frequency | | | | | |
| SELF-TEST⁶ | | | | | |
| | | | | | |
| → Logic Input Low | | | 0.6 | | V |
| → Logic Input High | | | 2.4 | | V |
| → ST Input Resistance to Ground | | | 50 | | kΩ |
| → Output Change at X_{out}, Y_{out} | Self-test 0 to 1 | | 55 | | mV |
| OUTPUT AMPLIFIER | | | | | |
| | | | | | |
| → Output Swing Low | No load | | 0.3 | | V |
| → Output Swing High | No load | | 2.5 | | V |
| POWER SUPPLY | | | | | |
| | | | | | |
| → Operating Voltage Range | | 2.4 | | 5.25 | V |
| → Quiescent Supply Current | | | 0.48 | | mA |
| → Turn-On Time ⁷ | | | 20 | | ms |
| TEMPERATURE | | | | | |
| | | | | | |
| → Operating Temperature Range | | -20 | | 70 | °C |

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Maggiori informazioni

<http://www.dimensionengineering.com/DE-ACCM5G.htm>

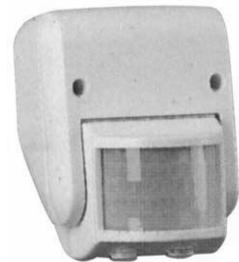
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL320.pdf

Attività sperimentale:

disponibili accelerometri montati su sensori wireless presso il **laboratorio di automatica** dell'Università di Siena.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

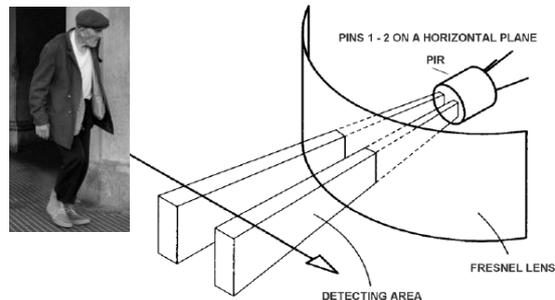
Sensori Piroelettrici



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Generalità

- I sensori piroelettrici sono anche detti PIR (*Passive InfraRed sensor*)
- Il sensore è in grado di percepire oggetti caldi in movimento (spettro di emissione nell'infrarosso: lunghezza d'onda compresa tra 700 nm e 1 mm)
- Distanza variabile fino a 20 m.

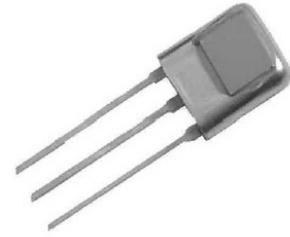


- Tipicamente utilizzati per rilevare il passaggio di persone/animali

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

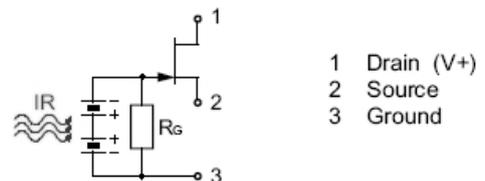
Principio di funzionamento

- Il PIR è composto da un transistor JFET sensibile alla radiazione IR e da un filtro ottico in uscita.
- Ha bisogno di una opportuna rete di polarizzazione (simile a quelle usate per MOSFET).
- La rete di polarizzazione è fondamentale per la stabilità del PIR rispetto a:



- temperatura
- radiazione solare
- umidità
- disturbi ambientali

Internal circuit and pinout:



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristiche

Le caratteristiche principali di un sensore piroelettrico sono:

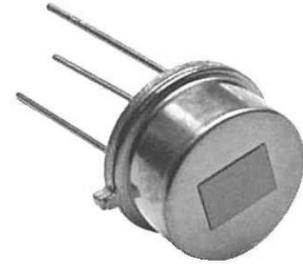
| Characteristics | Value | Unit | Test Conditions |
|----------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
| Element size: | 1.0 x 2.0 | mm | Nominal, each |
| Element spacing: | 1.0 | mm | Nominal |
| Optical wavelength | 5...25 | μm | 7...14 μm $\geq 70\%$ |
| Responsivity: (typ) | 2700 | V/W | 7...14 μm @ 1Hz |
| Common mode rejection ratio: (typ) | 15:1 (min. 1:7) | | 7...14 μm @ 1Hz |
| → Noise: (typ) | 5.1 | $\mu\text{V}/\text{root Hz}$ | 1.0 Hz rms, 1Hz |
| → Operating voltage: | 2.2...10 | VDC | V_D to Ground |
| → Offset voltage: | 0.3...1.2 | VDC | $R_S = 100 \text{ k}\Omega$ |
| Operating drain current: (recommended) | 0.2...10 | μA | |
| Thermal breakpoint f_T : (typ) | 0.2 | Hz | |
| Electrical breakpoint f_e : (typ) | 0.05 | Hz | |
| → Field of view: (horizontal) | 140 | degrees | from center between |
| → Field of view: (vertical): | 130 | degrees | sensing elements |
| → Recommended operating temperature: | -10...+50 | $^{\circ}\text{C}$ | -30...+70 $^{\circ}\text{C}$ with precautions |
| → Storage temperature: | -40...+80 | $^{\circ}\text{C}$ | change < 50 $^{\circ}\text{C}$ / minute |

La scelta di un particolare sensore PIR dipende dal contesto in cui il sensore deve operare

Possono essere di diversi tipi e forme

- **Passivi**

- I più utilizzati, stanno in ascolto di una onda IR nel loro campo visivo.



- **Attivi**

- Una parte del sensore invia un'onda, quando questa viene riflessa il PIR segnala la presenza di un oggetto.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

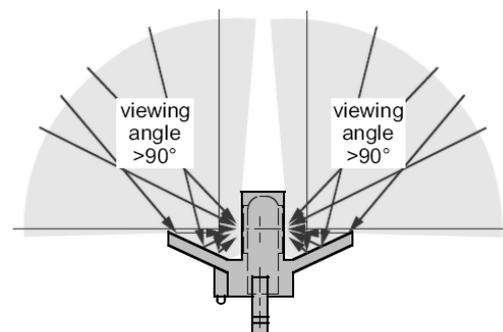
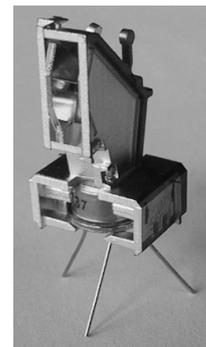
Lenti

Il PIR può essere dotato di lenti che focalizzano i raggi IR in ingresso/uscita al sensore.

Queste possono essere di diversi tipi in base alle applicazioni. Per avere una visuale maggiore o minore.

Si possono utilizzare lenti:

- di Fresnel, che incrementano la capacità di visuale;
- direttive, per orientare l'angolo di visuale.



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristica di guadagno

- L'intensità del segnale in uscita dal sensore dipende dall'angolo con cui il corpo caldo viene "visto".

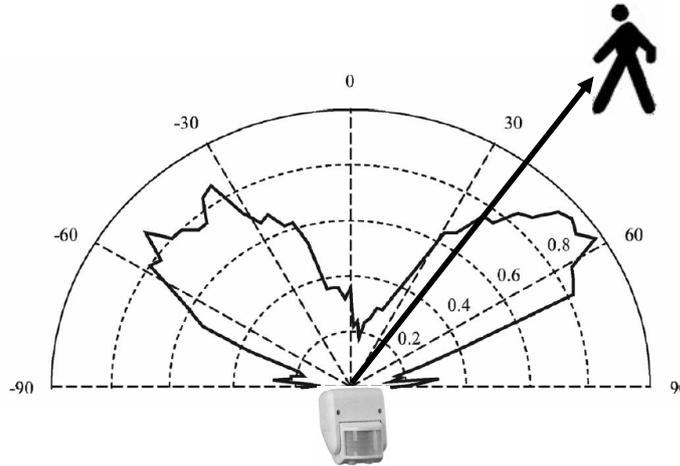


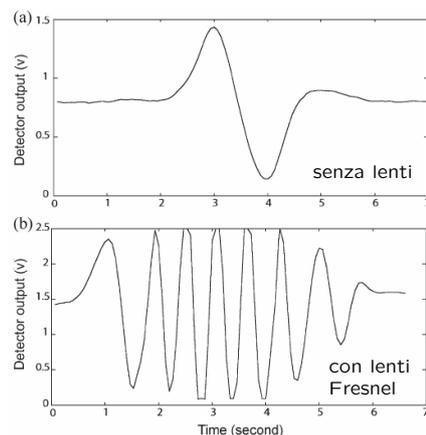
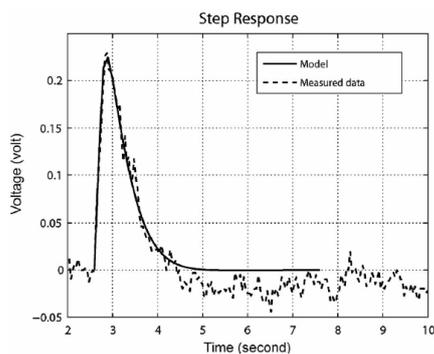
diagramma polare di visibilità
(sensore piroelettrico a due elementi privo di lenti)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristica dinamica

- Il segnale in uscita dal PIR è proporzionale alla **variazione** di temperatura sul cristallo piuttosto che alla temperatura stessa (filtraggio passa-alto)
- Ha però una massima frequenza di funzionamento (filtraggio passa-basso)
- Il comportamento è quello di un filtro **passa-banda** del IV ordine:

$$H(s) = \frac{U(s)}{\Phi(s)} = k_g \left(\frac{s^2 + 2\zeta_t \omega_t s}{s^2 + 2\zeta_t \omega_t s + \omega_t^2} - \frac{s^2 + 2\zeta_e \omega_e s}{s^2 + 2\zeta_e \omega_e s + \omega_e^2} \right)$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Il PIR è un ottimo sensore per rilevare il movimento di oggetti “caldi”, in particolare di persone.

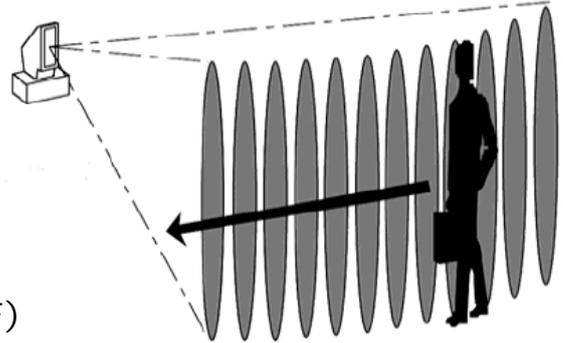
Opportunamente interfacciato può rilevare posizione e velocità di oggetti in movimento.

Caratteristiche tipiche del PIR:

- Alta sensibilità
- Basso consumo
- Basso rumore
- Insensibilità a temperatura e umidità

Un buon PIR deve avere:

- dinamica veloce.
- immunità alle Radio Frequenze (RF)
- immunità alla luce solare



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Maggiori informazioni

<http://www.kube.ch/pyroelectric/index.php>

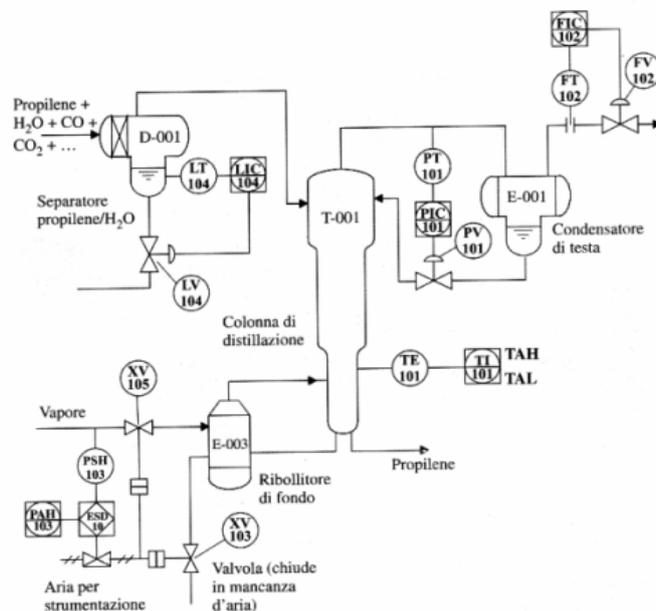
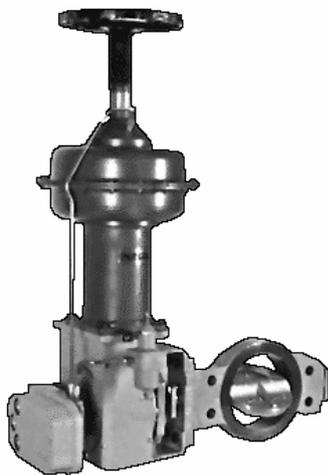
<http://www.disp.duke.edu/publications/hao-6.pdf>

Attività sperimentale:

progetto **human motion tracking** presso
il **laboratorio di automatica** dell'Università di Siena.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Valvole di Regolazione



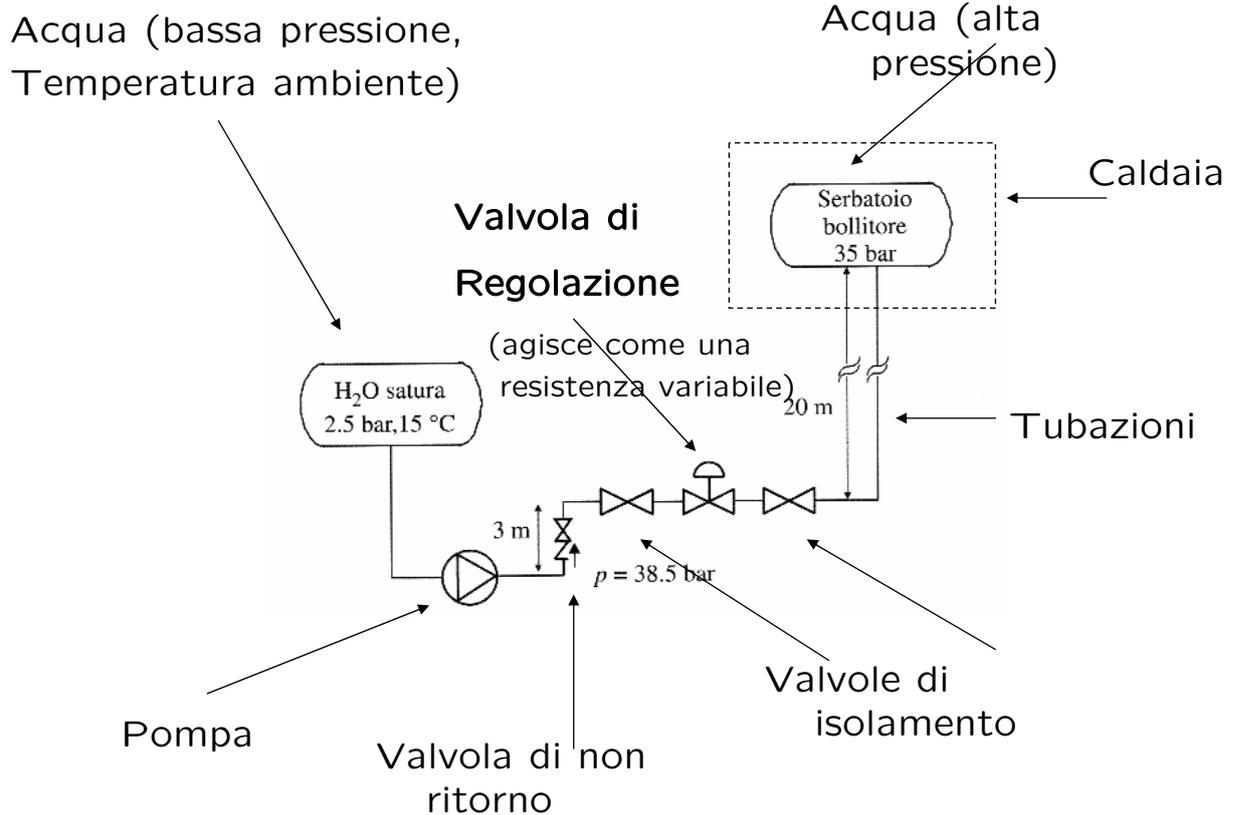
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Valvole di regolazione

- Sono attuatori che servono a modulare la portata di fluido (liquido o gassoso) nei circuiti idraulici
- Diffusissime nel controllo di processo industriale (es: chimico/petrochimico)
- Uso: controllo di livello (di liquidi), di pressione (di gas), di temperatura (negli scambiatori), di composizione chimica
- La loro scelta e dimensionamento influisce molto sulle prestazioni del sistema di controllo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Circuito idraulico - Esempio



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli

Per studiare il moto del fluido, si utilizza l'equazione di Bernoulli:

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = \text{cost}$$

ρ = densità (massa/volume)
 v = velocità media del fluido
 p = pressione del fluido
 g = accelerazione di gravità
 z = quota a cui si trova il fluido

• Ipotesi:

1. Condizioni stazionarie ($dE/dt=0$)
2. Pareti della tubazione: adiabatiche e rigide
3. Non si considera l'energia termica (si suppone indipendente da quella meccanica)
4. Densità ρ del fluido costante
5. Si trascurano gli attriti (interni al fluido e fra fluido e pareti), e quindi l'energia meccanica trasformata in calore per attrito

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Equazione di Bernoulli in presenza di perdite

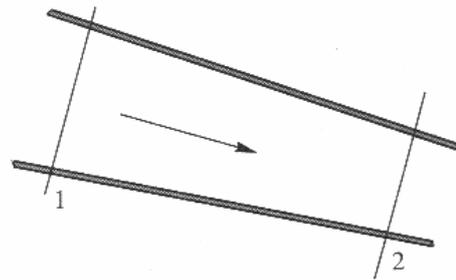
La valvola introduce una strozzatura, e quindi perdite per attrito (energia meccanica \rightarrow energia termica):

$$\frac{v_A^2}{2g} + z_A + \frac{p_A}{\rho g} = \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \alpha \frac{v_B^2}{2g}$$

(sperimentalmente proporzionali al quadrato della velocità)

Per le tubazioni: α si può ricavare dalla documentazione tecnica, che riporta le perdite per unità di lunghezza in funzione della portata

Le perdite di carico idrostatico vengono compensate dalle pompe



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

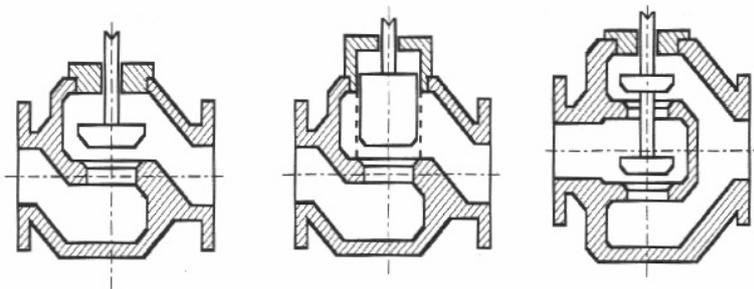
Valvole - Definizioni

- Otturatore: organo mobile che determina la sezione di passaggio del fluido
- Corsa: spostamento dell'otturatore dalla posizione di chiusura
- Corsa nominale: corsa corrispondente alla completa apertura
- Corsa relativa h : rapporto tra la corsa e la corsa nominale
 - $h=0$ (valvola chiusa), $h=1$ (valvola completamente aperta)
- Trim: insieme degli organi interni della valvola, che determinano le caratteristiche di efflusso
- Densità relativa: $G_f = \rho / \rho_0$, dove $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3 =$ densità dell'acqua

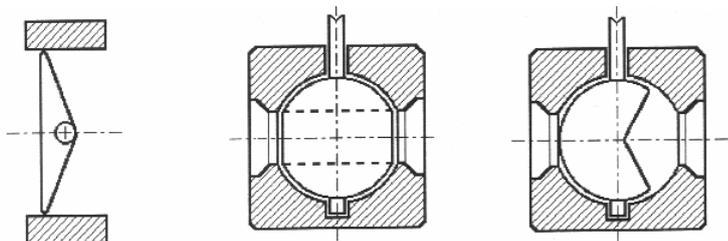
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Classificazione delle valvole

- **Valvole lineari:** l'otturatore trasla (corsa espressa in mm)
- **Valvole rotative:** l'otturatore ruota intorno ad un asse (corsa espressa in gradi)



Valvole lineari a globo



a disco
eccentrico

a sfera

a sfera
con incavo a V

Valvole rotative

Le valvole a globo hanno maggiore capacità di portata a parità di dimensioni, e quindi minor costo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Alcune Valvole

Valvola rotativa a disco
eccentrico (o a farfalla)



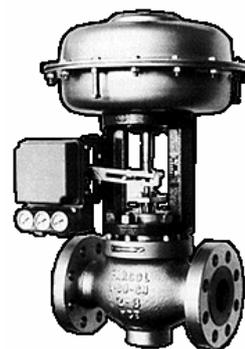
Con queste valvole è possibile effettuare regolazioni di portata con un'eccellente tenuta in posizione di chiusura ed elevati Δp in entrambe le direzioni.
Materiale: acciai al carbonio, inossidabili.

Valvola ON/OFF
(pneumatica)



Valvola pneumatica adatta a funzionamenti on-off. Usata nell'automatizzazione di impianti per la vulcanizzazione della gomma, per l'industria alimentare, per lo stampaggio di materie plastiche, ecc.

Valvola a globo



Caratteristica di compattezza e semplicità costruttiva.
Dimensioni: da 1/2" a 6".
Connessioni: filettate, flangiate, a saldare.
Otturatore: integrale con lo stelo. Servomotore: a diaframma pneumatico multimolla

http://www.parcot.com/italiano/P_Vreg.htm

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Coefficiente di efflusso

- Coefficiente di efflusso (o di portata) C_v di una valvola:

È la portata volumetrica di acqua a temperatura compresa fra 5 e 40 °C transitante attraverso la valvola con una caduta di pressione statica Δp pari a 1 psi = 6895 Pa.
- Affinché le caratteristiche di efflusso non si scostino di molto da quelle nominali occorre mettere un tratto di tubazione rettilinea a monte e a valle della valvola (rispettivamente 6 e 3 volte il diametro nominale)
- C_v viene espresso in galloni/minuto (1 gal \approx 3.785 litri)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Coefficiente di efflusso

- C_v dipende dalla corsa h , $C_v = C_v(h)$:
 $C_{vmin} = C_v(0)$ (chiusura) $C_{vmax} = C_v(1)$ (apertura)
- Coefficiente di efflusso nominale: $C_{vn} = C_{vmax}$
- Coefficiente di efflusso relativo / caratteristica intrinseca di portata:

$$\phi(h) = C_v(h) / C_{vn} \quad (\text{per } \Delta p = \text{cost.})$$
- Apertura: valore di $\phi(h)$ espresso in percentuale
- Rangeability intrinseca: $r = C_{vmax} / C_{vmin}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristiche intrinseche di portata

a. Caratteristica lineare:

$$\phi(h) = \phi_0 + \alpha h$$

b. Caratteristica esponenziale (o equipercentuale) :

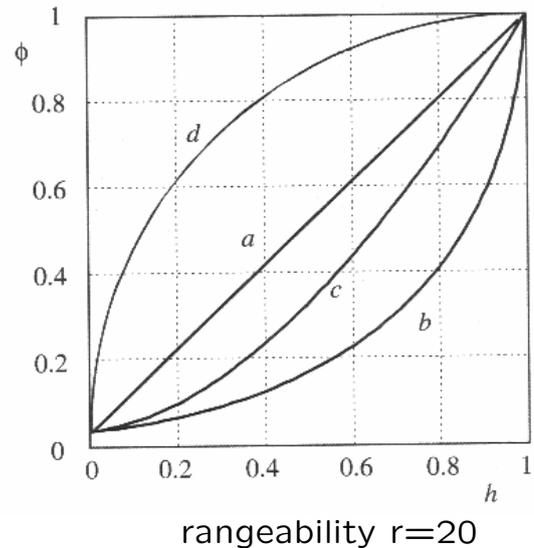
$$\phi(h) = \phi_0 e^{\beta h}$$

$$\frac{d\phi(h)}{dh} = \phi_0 \beta e^{\beta h} = \beta \phi(h) \quad \Rightarrow \quad \frac{d\phi(h)}{\phi(h)} = \beta dh$$

c. Caratteristica quadratica (o parabolica) :

$$\phi(h) = \phi_0 + \gamma h^2$$

d. Caratteristica ad apertura rapida (quick opening)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Caratteristiche intrinseche di portata

– Essendo: $\phi(0) = \frac{C_{vmin}}{C_{vn}} = \frac{C_{vmin}}{C_{max}} = \frac{1}{r}$

$$\phi(1) = \frac{C_{vmax}}{C_{vn}} = \frac{C_{vmax}}{C_{vmax}} = 1$$

si ha:

a. (lineare): $\phi(h) = h + \frac{1}{r}(1 - h)$

b. (quadratica): $\phi(h) = h^2 + \frac{1}{r}(1 - h^2)$

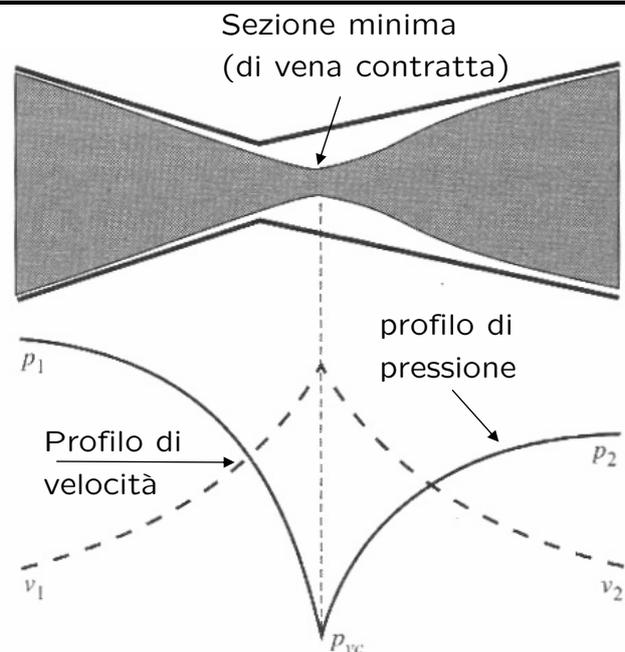
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Cavitazione e flashing

Per portata costante, laddove diminuisce la sezione aumenta la velocità

Dall'equazione di Bernoulli, l'aumento di velocità provoca una diminuzione della pressione

Se la pressione di vena contratta p_{vc} è minore della pressione di vapore p_v , si formano bolle di vapore

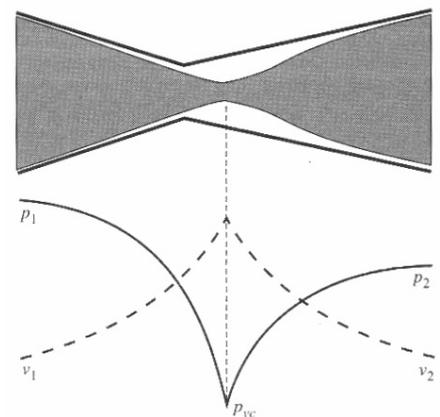


- $p_2 > p_v$: si ha cavitazione (le bolle collassano)
- $p_2 \leq p_v$: si ha flashing (la miscela vapore/liquido esce dalla valvola)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Cavitazione e flashing

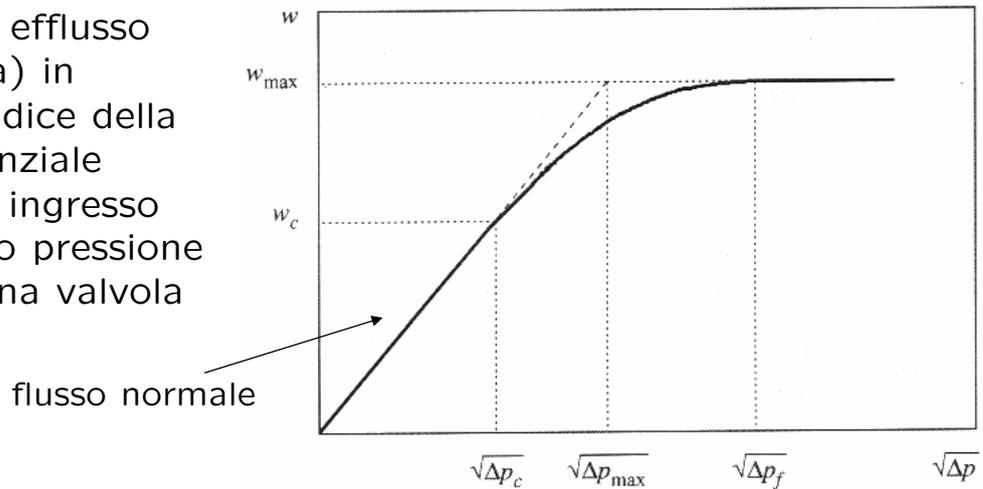
- La cavitazione provoca forti danneggiamenti alla valvola. Deve essere evitata.
- Il flashing provoca danneggiamenti alla valvola e rumorosità



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Dipendenza della portata dal salto di pressione

Caratteristica di efflusso (portata massica) in funzione della radice della pressione differenziale
 Δp = pressione in ingresso alla valvola meno pressione in uscita (per una valvola lineare)



Nelle condizioni di flusso normale, dall'equazione di Bernoulli si ha:

$$\frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} = \alpha(h) \frac{v^2}{2} \Rightarrow w = \rho A v = A \sqrt{\frac{2\rho}{\alpha(h)}} \sqrt{\Delta p}$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

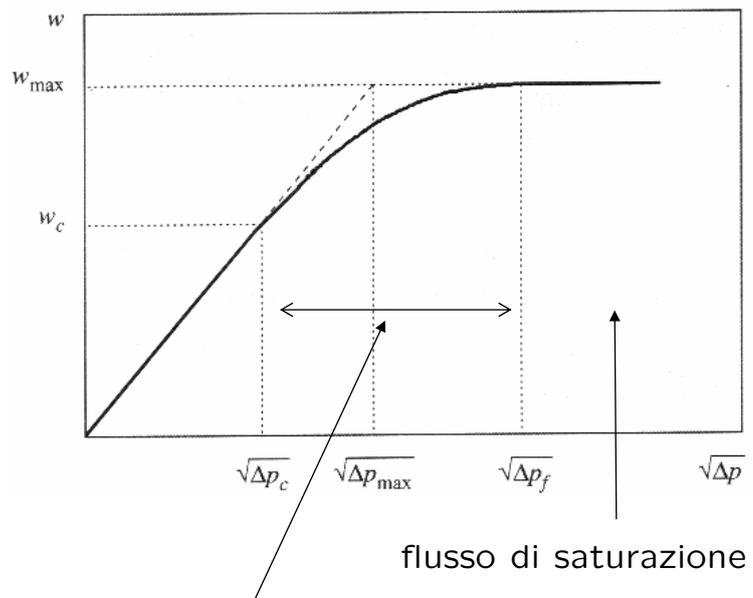
Dipendenza della portata dal salto di pressione

Sia Δp_c il salto di pressione per cui $p_{vc} = p_v$ (pressione di vena contratta = pressione di vapore)

Nella zona di flusso semicritico, $p_{vc} \leq p_v$, $p_2 \geq p_v$, si ha cavitazione

Sia Δp_f il salto di pressione per cui $p_2 = p_v$ (pressione di uscita = pressione di vapore)

Nella zona di flusso di saturazione, $p_{vc} \leq p_v$, $p_2 \leq p_v$, si ha flashing



flusso semicritico

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Scelta e dimensionamento

- Le valvole si utilizzano per regolare portate, livelli, temperature e pressioni
- Nelle regolazioni di portata, si cerca di avere la caratteristica della valvola il più lineare possibile per facilitare il controllo in retroazione.
- Esigenze contrastanti: maggiore il salto di pressione, maggiore è l'efficacia della valvola nel modulare la portata. D'altro canto, minore il salto di pressione richiesto, meno costosi sono i costi di pompaggio
- Regola euristica: utilizzare le valvole equipercentuali nelle regolazioni di pressione, lineari nelle regolazioni di temperatura e livello.
- Valvole on/off: hanno caratteristica quick/opening

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Scelta e dimensionamento

- Nel dimensionamento, si considera la caratteristica linearizzata a tratti:

- zona di flusso normale:

$$w = N_1 C_v(h) \sqrt{\Delta p G_f}$$

$$N_1 \approx 0.0007598 \text{ (dimensionale)}$$

- zona di flusso limite:

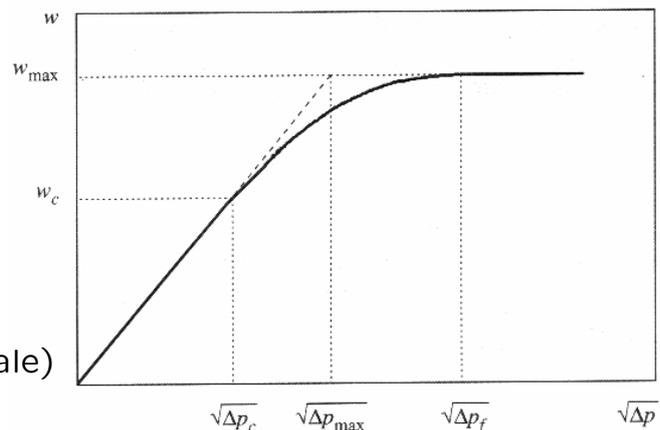
$$w = w_{\max}$$

$$\Delta p_c = K_c(p_1 - p_v)$$

$$\Delta p_{\max} = F_L^2(p_1 - F_F p_v)$$

$$\Delta p_f = p_1 - p_v$$

- K_c = coefficiente di incipiente cavitazione
- F_L = coefficiente di recupero
(K_c, F_L dipendono solo dalla geometria della valvola, quindi non dipendono dal fluido)
- F_F = coefficiente del rapporto della pressione critica per i liquidi, $F_F = p_{vc}/p_v$



Occorre dimensionare la valvola in modo che non si verifichi cavitazione, cioè che la valvola operi con $\Delta p \leq \Delta p_{\max}$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Attuatori e servoposizionatori

- Gli attuatori hanno il compito di posizionare lo stelo e l'otturatore in funzione del segnale di controllo
- 3 tipi: pneumatici, oleodinamici, elettromeccanici
- Gli attuatori elettrici per la regolazione continua sono costituiti da
 - Motore elettrico (es: brushless)
 - Riduttore di velocità
 - Sensori di posizione e/o velocità
 - Unità elettronica di potenza e controllo

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Valvole di Regolazione

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

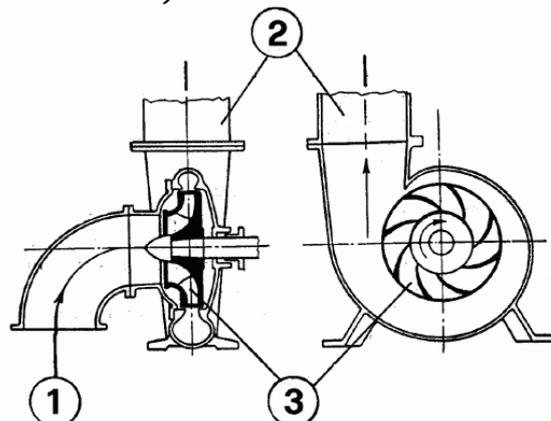
Pompe



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe centrifughe (*Centrifugal pumps*)

- Le pompe sono macchine idrauliche operatrici che, ricevendo energia meccanica da un qualsiasi motore, la trasmettono, nella misura consentita dal rendimento del gruppo pompa-motore, al liquido che le attraversa.
- Le pompe si possono classificare in due categorie: macchine a moto rotatorio (più diffuse) e a moto alternativo.

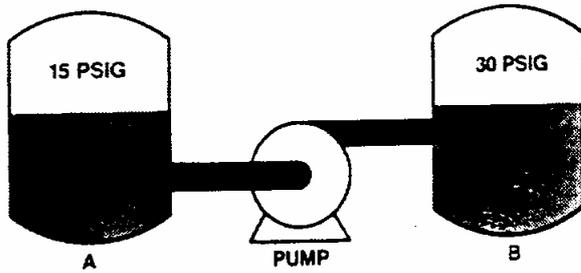


(1) Tubo di aspirazione; (2) Tubo di mandata;
(3) Girante

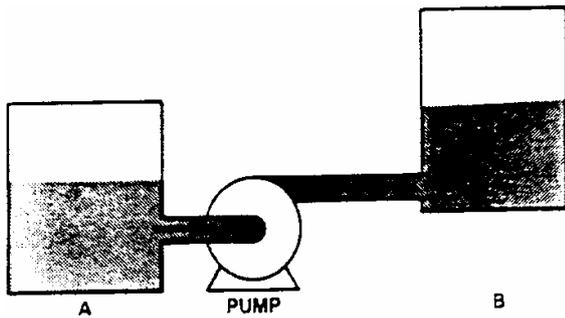
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe centrifughe (*Centrifugal pumps*)

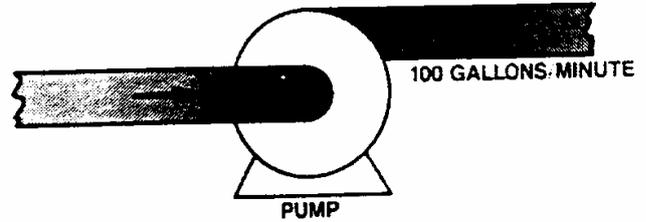
Utilizzo tipico:



Force Liquid into a Pressure Vessel



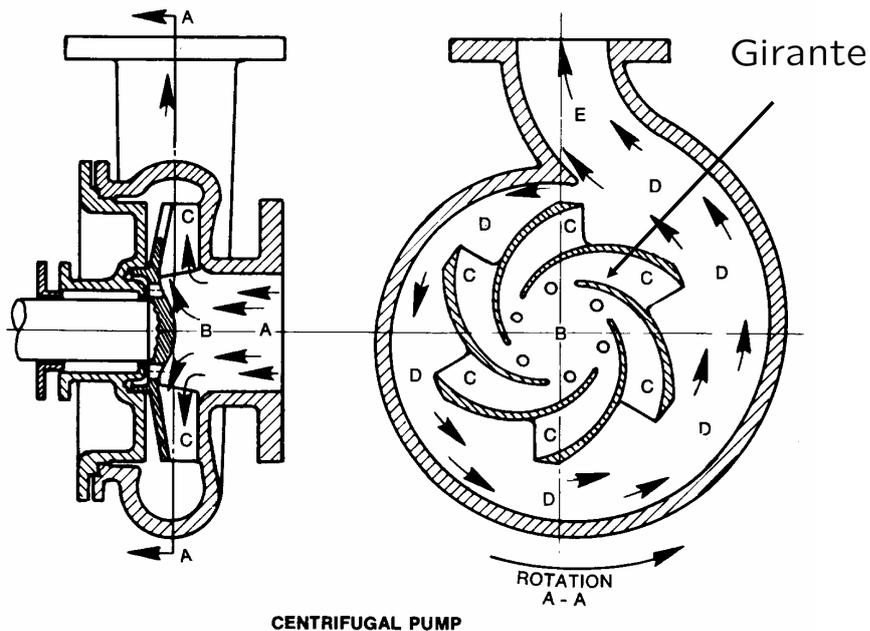
Raise Liquid to Another Level



Overcome Pipe Friction

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe centrifughe (*Centrifugal pumps*)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe centrifughe

– Grandezze fondamentali di una pompa:

- w = portata massica, q = portata volumetrica
- p_e = pressione del fluido alla flangia di aspirazione
- p_u = pressione del fluido alla flangia di mandata
- $H = H_u - H_e$ = prevalenza totale (in metri di colonna di liquido)

$$H_u = \frac{v_u^2}{2g} + z_u + \frac{p_u}{\rho g} \quad H_e = \frac{v_e^2}{2g} + z_e + \frac{p_e}{\rho g}$$

$$\Rightarrow H = H_u - H_e = \frac{v_u^2 - v_e^2}{2g} + z_u - z_e + \frac{p_u - p_e}{\rho g} \approx \frac{p_u - p_e}{\rho g}$$

$v_u \approx v_e \quad z_u \approx z_e$

- η = rendimento totale (rapporto fra potenza meccanica fornita al fluido e potenza elettrica fornita)
- n = velocità di rotazione dell'albero della pompa
- Condizioni nominali: $\eta = \eta_{\max}$ per $n = n_0$, $H = H_0$, $q = q_0$
- q = portata

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe centrifughe

– Curva caratteristica \approx parabola

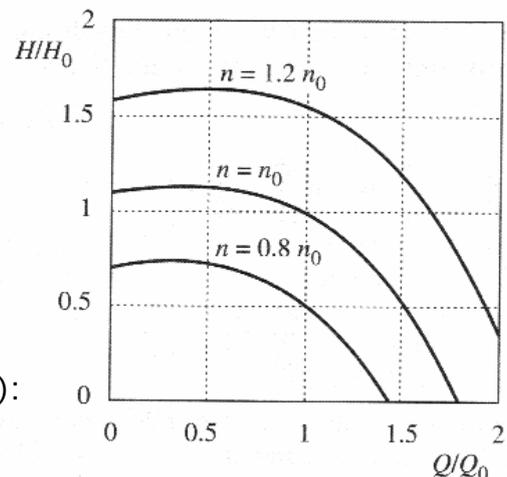
$$H = An^2 + Bq^2$$

in condizioni di portata $q=0$, $n=n_0$:

$$A = \frac{H_M}{n_0^2} \quad H_M = \text{prevalenza per } q=0$$

in condizioni nominali ($q=q_0$, $H=H_0$, $n=n_0$):

$$B = \frac{H_0 - H_M}{q_0^2}, \quad H_0 \approx (0.75 \div 0.90)H_M$$



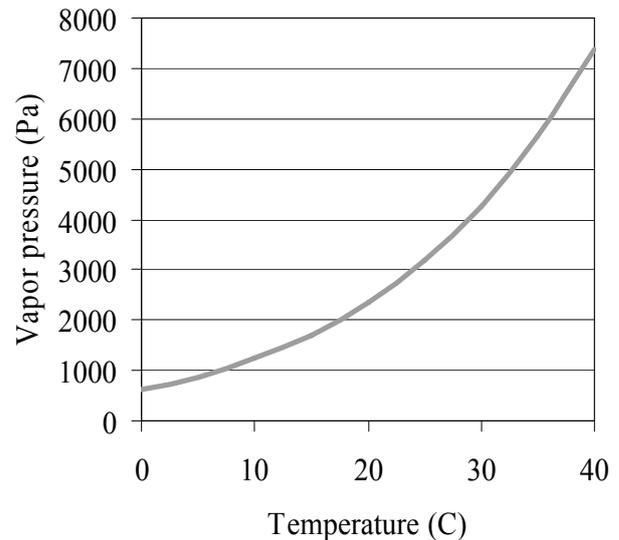
– Incremento di pressione Δp : $\Delta p = p_u - p_e = \rho g (An^2 + Bq^2)$

$$\Delta p = \rho g \left[H_M \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \frac{H_0 - H_M}{q_0^2} \frac{w^2}{\rho^2} \right] = k_{p1} \rho \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + k_{p2} \frac{w^2}{\rho}, \quad k_{p2} < 0$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Cavitazione

- Quando la pressione è minore della pressione di vapore si formano bolle di vapore
- Quando le bolle collassano, si sviluppano pressioni molto elevate (800 MPa)
- Corrosione delle parti interne della pompa, rumore
- Zona di pressione minima: all'entrata del liquido sulle pale della girante ("occhio della girante")



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

NPSH (*Net Positive Suction Head*)

- Per determinare se si sta verificando cavitazione, si utilizza la quantità:

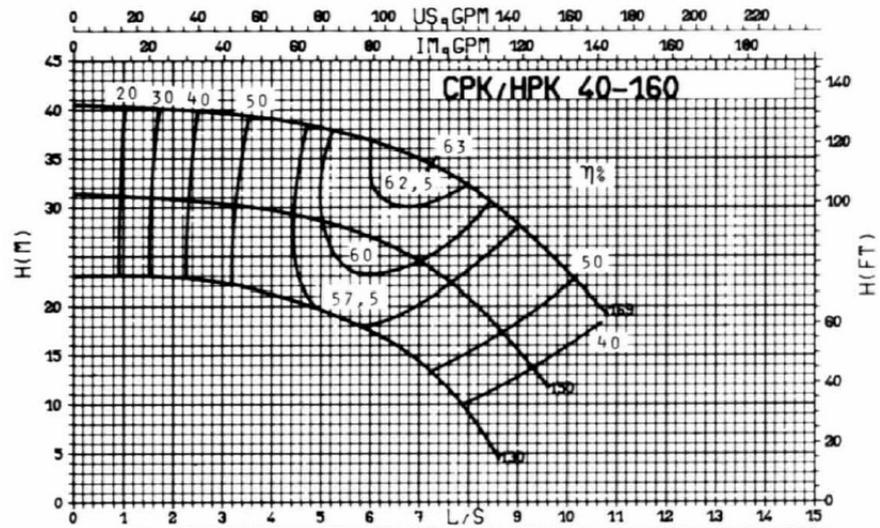
$$\text{NPSH} = \frac{p_e - p_{\min}}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g}$$

- p_{\min} = pressione nella zona a pressione minima
- v_e = velocità media del fluido alla flangia di aspirazione

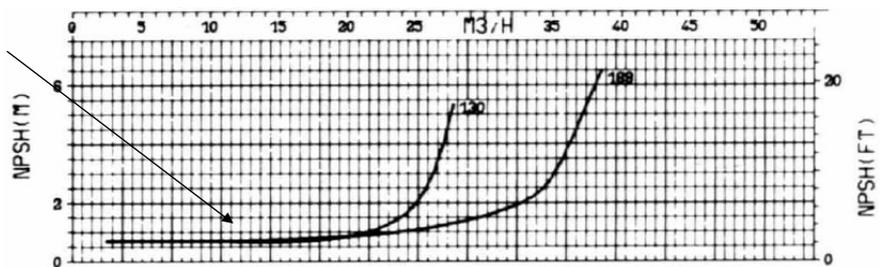
- Cavitazione: per $p_{\min} \leq p_v$, e quindi:
$$\text{NPSH} \geq \frac{p_e - p_v}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g}$$

- p_v = pressione di vapore del liquido alla temperatura media nella zona a pressione minima

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08



$$\text{NPSH} \approx \frac{p_e - p_{\min}}{\rho g}$$



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe volumetriche

- Modello semplificato:

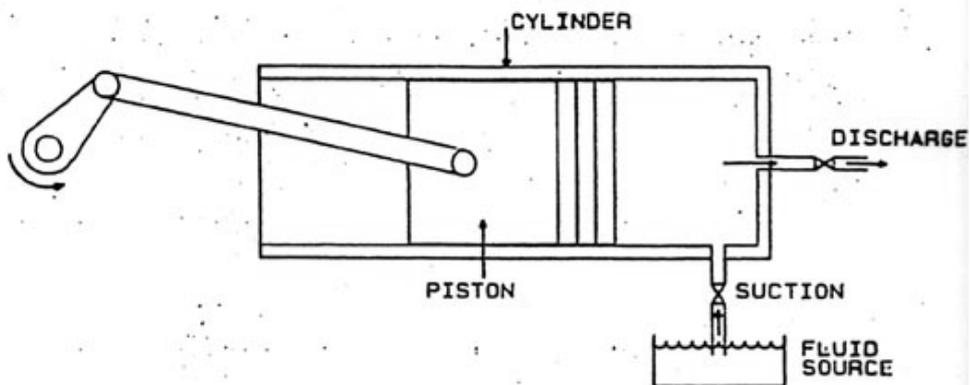


Figure 28-1. Reciprocating positive-displacement pump.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe volumetriche

- Inviano alla flangia di mandata sempre lo stesso volume di fluido ad ogni ciclo, indipendentemente dalla pressione del fluido
 - La portata volumetrica q è proporzionale alla velocità della pompa

$$q = \eta_v k_1 n$$

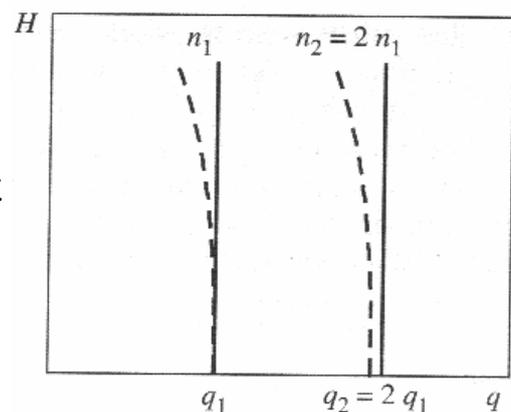
- n = velocità di rotazione dell'albero motore che aziona la pompa
- η_v = rendimento volumetrico (o grado di riempimento) = rapporto tra il volume effettivamente pompato ad ogni ciclo e il volume interno massimo occupabile. Diminuisce all'aumentare di H e n
- k_1 = costante che dipende dalle caratteristiche della pompa

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe volumetriche

- Caratteristica reale:
 - $q = \eta_v k_1 n$
- Caratteristica ideale: $\eta_v = \text{cost}$

$$q = k_p n$$

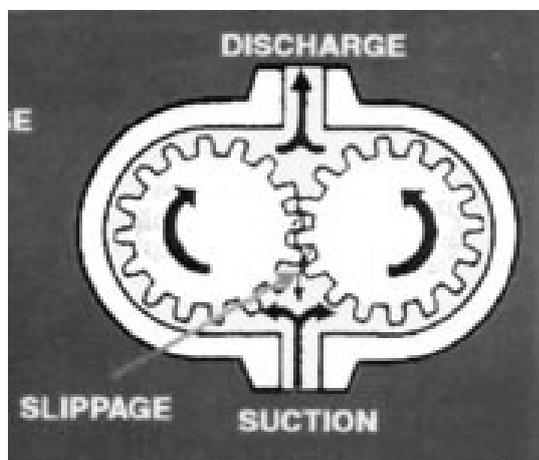


- Nota: q = portata volumetrica media

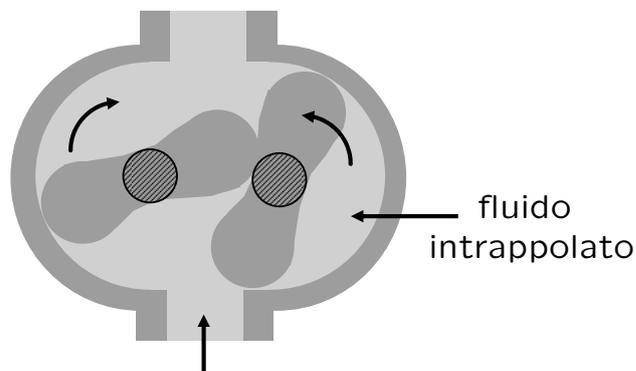
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe a ingranaggi (*gear pumps*)

- Fornisce un volume costante con la velocità di rotazione con piccole fluttuazioni di pressione



gear pumps

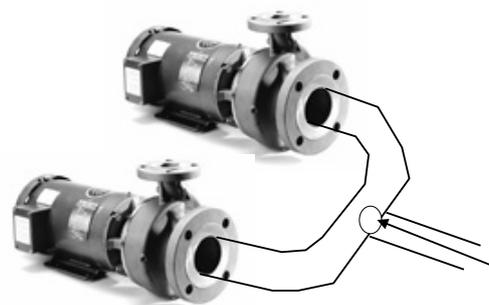


two-lobe rotary pumps

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe in parallelo e in serie

- Parallelo
 - Portata si somma
 - Prevalenza non cambia
- Serie
 - Portata non cambia
 - Prevalenza si somma



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Pompe

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Giroscopi, girobussole e sistemi di guida inerziale

(Ing. Stefano Di Cairano)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Giroscopi e Sistemi di Guida Inerziale

- Scopi:
 1. Fornire misurazioni di velocità e accelerazioni angolari
 2. Fornire misurazioni di posizione e velocità rispetto ad un sistema inerziale fissato
 3. Regolazione automatica e mantenimento della rotta

- Applicazioni:
 - Aeronautica, aerospazio, balistica
 - Navigazione
 - Robotica mobile
 - Sistemi di guida automatica

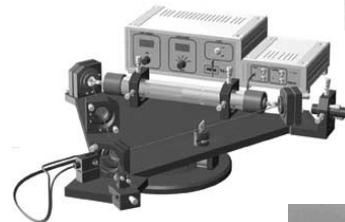
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipi di Giroscopi

–meccanici (basso costo, grandi dimensioni, scarsa precisione, soggetti ad usura).



–ad anello laser (alto costo, precisione eccellente, dimensioni contenute, non soggetti ad usura).



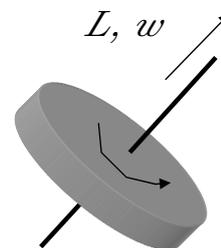
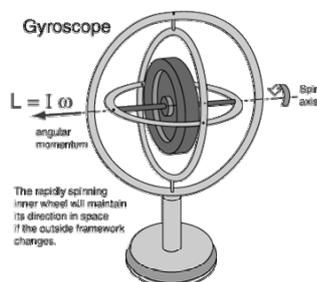
–microelettronici (poco costosi, bassa precisione, miniaturizzati, soggetti ad usura).



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Il Giroscopio Meccanico

Un disco rotante intorno ad un asse (spin) inserito in una sospensione cardanica



Il disco ruota intorno al suo asse con velocità angolare w dunque momento angolare $L=wI$ (I : momento di inerzia del disco)

Se il momento delle forze esterne è nullo L è costante

Anche se gli anelli di supporto si muovono, l'asse di spin resta lo stesso (funzione di Girobussola)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

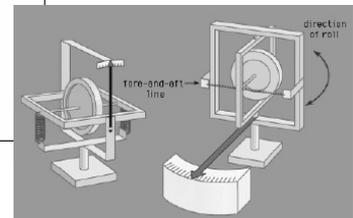
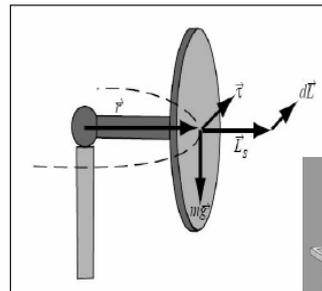
Moti di Precessione

Se il momento esterno è nullo l'asse di rotazione mantiene sempre lo stesso puntamento

Se si applica una forza F ortogonale all'asse di spin con coppia τ si genera un moto di precessione ortogonale al piano di F e w .
La frequenza di tale moto è:

$$\Omega = \frac{\tau}{I\omega}$$

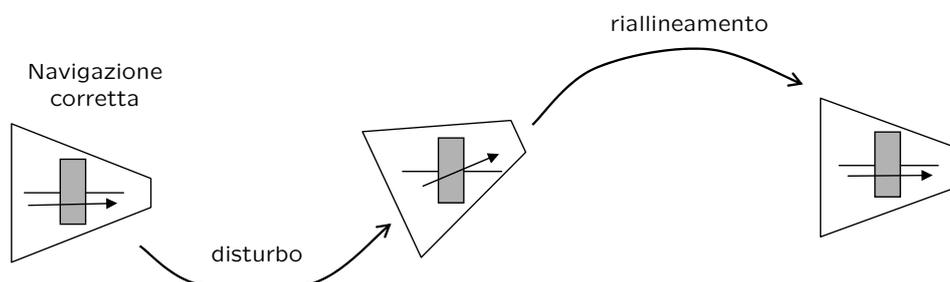
L'accelerazione di un veicolo può essere analizzata dalla precessione di un giroscopio posto su questo



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Girobussola

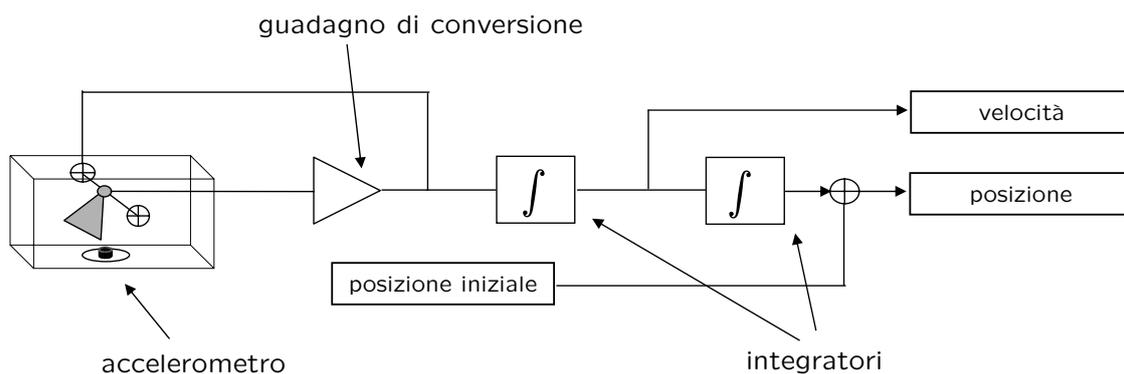
- giroscopio utilizzato per la localizzazione del Nord
- struttura imperniata sul veicolo e isolata: nessuna forza esterna sull'asse di spin
- l'asse di spin viene orientato verso nord e posto in rotazione
- anche se il veicolo cambia la sua orientazione l'asse di spin si mantiene verso Nord fornendo un riferimento costante



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Guida Inerziale

- Serve per ottenere una stima precisa della propria posizione e velocità rispetto ad un sistema inerziale fissato
- utilizza solo misurazioni interne
- si basa sulla costante misurazione dell'accelerazione lungo gli assi N-S e E-O e sulla doppia integrazione



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Giroscopi e Guida Inerziale

Vogliamo conoscere la nostra posizione attuale con l'uso di sole dati interni e delle informazioni sulla posizione iniziale

•Problema:

- se gli accelerometri sono solidali al veicolo misurano anche le componenti dovute a accelerazioni verticali
- gli accelerometri devono essere sempre paralleli al terreno

•Soluzione:

- usare le piattaforme giroscopiche



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Piattaforme Giroscopiche

Struttura:

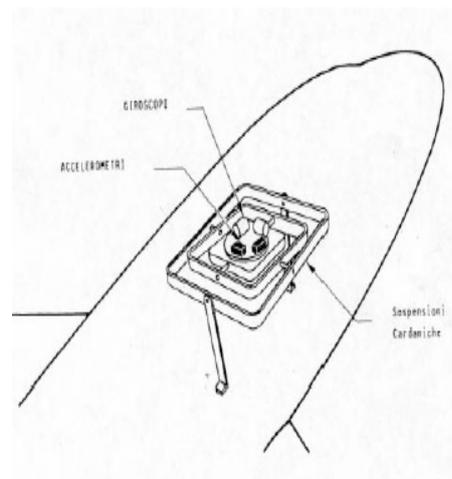
- Sospensione cardanica
- Giroscopi
- Accelerometri

In seguito a rotazione del veicolo:

- La piattaforma tenderebbe ad oscillare
- I giroscopi mantengono l'asse
- Con la differenza di orientazione si genera un segnale di errore per la stabilizzazione

Risultato:

- La piattaforma viene mantenuta parallela al suolo



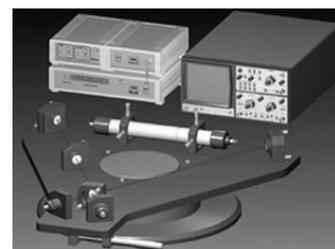
In caso di sistemi ad alte prestazioni si provvede anche all'eliminazione degli effetti della velocità del veicolo e della terra

Si applicano delle coppie all'asse di spin basandosi sulla misura del giroscopio per mantenerlo correttamente orientato

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Giroscopi Ottici

I giroscopi meccanici sono precisi ma ingombranti e soggetti ad usura



Con l'introduzione del Laser si è sviluppata una nuova classe di giroscopi: i Giroscopi ad Anello Laser (LRG- Laser Ring Gyros)



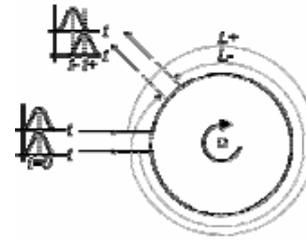
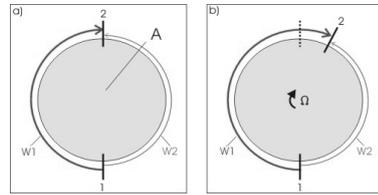
Nessuna componente in movimento: MTBF migliaia di anni



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Funzionamento dei RLG

Gli LRG si basano sull'effetto Sagnac, secondo cui due raggi di luce controrotanti su un anello cambiano di fase quando l'anello ruota



La variazione di fase è:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi RL}{c\lambda}\omega$$

c = velocità della luce, λ =lunghezza d'onda Laser, R =raggio, L =lunghezza percorso, ω =velocità angolare

I Giroscopi a Fibre Ottiche (FOG) permettono di aumentare L senza aumentare le dimensioni del dispositivo arrotolando la fibra

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

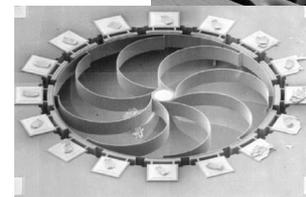
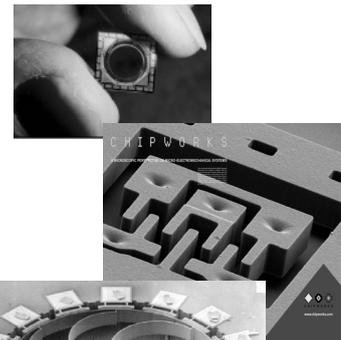
Giroscopi MEMS

MEMS: Micro-Electrical Mechanical Systems

- Integrano componenti elettroniche e meccaniche
- Miniaturizzati e a basso costo

Vari tipi di giroscopi basati su MEMS

- Tuning forks, vibrating shell ring
- Basati sulla legge di Coriolis, cioè sull'interazione fra moti circolari e lineari



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

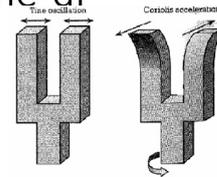
Giroscopi MEMS: Tecnica

Legge di Coriolis:

“Un corpo con velocità $v(t)$ in un riferimento con velocità angolare $\omega(t)$ riceve una forza laterale proporzionale $\omega(t)$.”

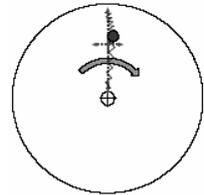
$$\vec{F}_{Co} = -m \vec{a}_{Co} \quad \vec{a}_{Co} = 2 \vec{\omega} \times \vec{v}$$

Misurando gli effetti di tale forza su un corpo in oscillazione si possono dedurre le caratteristiche di rotazione.



Esempio: Tuning forks

- le forche oscillano in una direzione
- la forza di Coriolis induce oscillazione nella direzione ortogonale
- l'ampiezza di questa oscillazione dipende dalla velocità di rotazione



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Performance dei Giroscopi

Parametri caratteristici dei giroscopi:

- Angle Random Walk (ARW): misura (efficace) del rumore sulla misura espresso in $^{\circ}/(\text{Hz} \times \text{hr})$
- Bias Drift (BD): errore a giroscopio fermo, $^{\circ}/\text{hr}$
- Input Range (IR): min e max valori misurabili, $^{\circ}/\text{sec}$, $^{\circ}/\text{sec}^2$
- Sensibilità (S): minima differenza avvertita, %, $^{\circ}/\text{sec}$, $^{\circ}/\text{sec}^2$
- Coefficiente di non-linearità (NL): distorsione I/O, (%)
- Banda passante (BW): frequenza max di variazione avvertita, Hz

Giroscopi LRG:

- ARW: <0.001 , BD: <0.01 , IR: >400 $^{\circ}/\text{sec}$, BW ~ 100

Giroscopi MEMS:

- ARW: >0.5 , BD: 10-1000, IR: 50-1000 $^{\circ}/\text{sec}$, BW >70

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Conclusioni

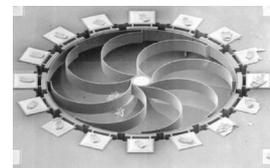
I giroscopi sono strumenti che permettono di misurare le caratteristiche dei moti rotazionali

Nella configurazione girobussola servono per la navigazione autonoma rispetto ad un sistema inerziale

Sono basati su principi differenti ottenendo differenti prestazioni e differenti costi

I giroscopi laser costano anche 10.000 \$, i MEMS meno di 100 \$

Possono costituire una valida scelta per la sensoristica di robot mobili di differenti dimensioni e scopi



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Giroscopi, girobussole e sistemi di guida inerziale

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08