
Sensori di portata



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

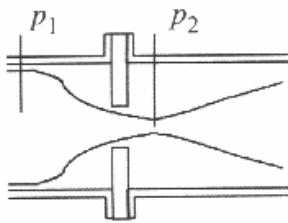
Tipi di sensore di portata (flussimetri, *flowmeters*)

- 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*)

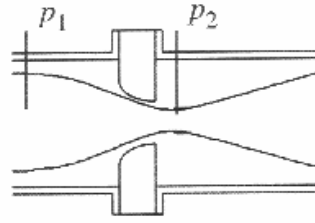
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

A strozzamento (*Obstruction meters*)

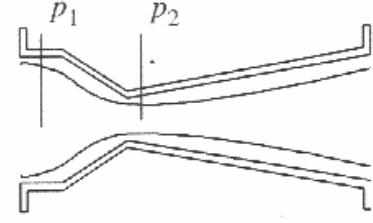
- Dischi forati, boccagli e venturimetri
 - Lo strozzamento provoca una caduta di pressione. Dalla misura di tale pressione, tramite l'equazione di Bernoulli, si risale alla portata volumetrica (e quindi massica)



disco forato
(*orifice meters*)



boccaglio
(*flow nozzle*)



venturimetro
(*Venturi meter*)

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

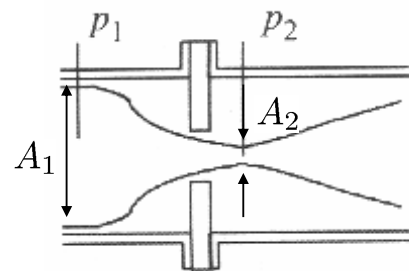
A strozzamento (*Obstruction meters*)

- Applichiamo l'equazione di Bernoulli:

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

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

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



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

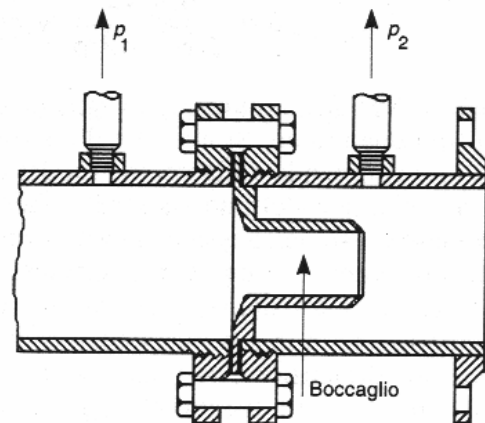
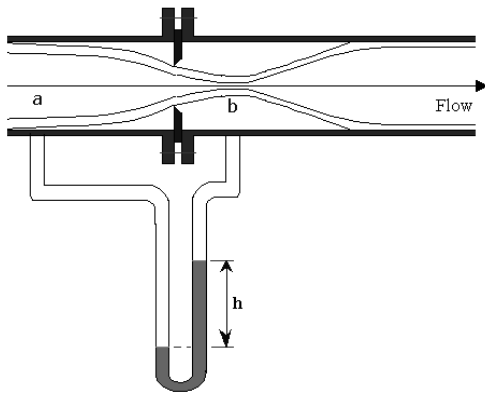
- Tenendo conto delle perdite $\alpha \frac{v_2^2}{2}$ causate dalla strozzatura:

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

- 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*)

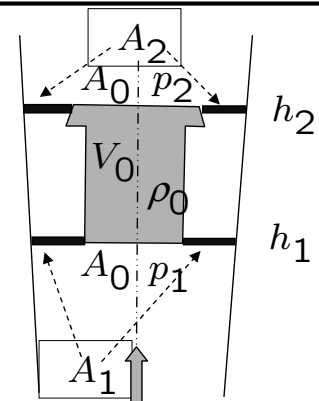


- Rangeability=3:1, accuratezza=3-5%
(perché A_2 varia con la portata)
- Ripetibilità=buona
(ma ritaratura frequente per via delle incrostazioni)
- Difetto: introducono perdite di carico

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

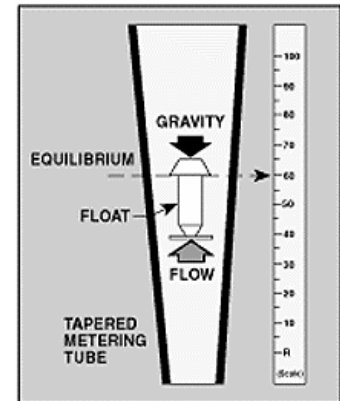
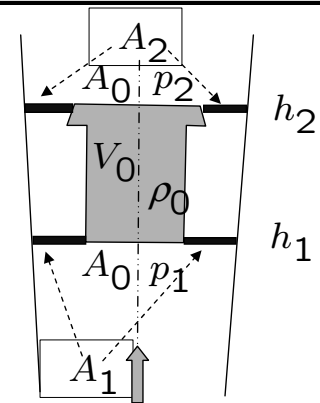
A sezione variabile (*Variable-area flowmeters*)

- 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%)

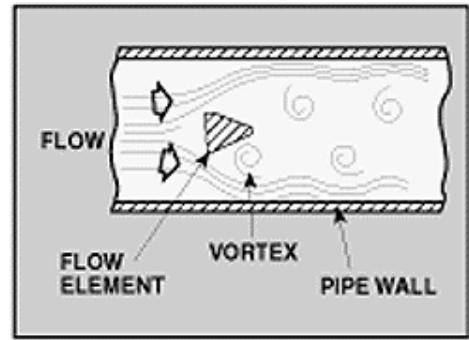


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

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

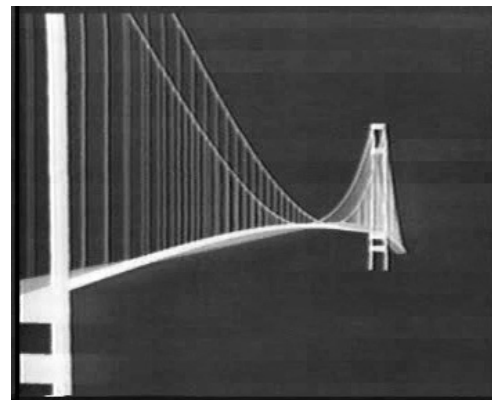
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

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 $e = vdB$

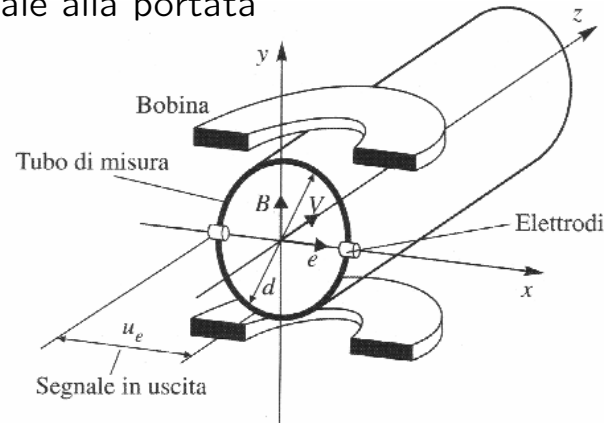
- Il fluido agisce da conduttore

- Il campo magnetico viene generato da una bobina

- La tensione è direttamente proporzionale alla portata

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

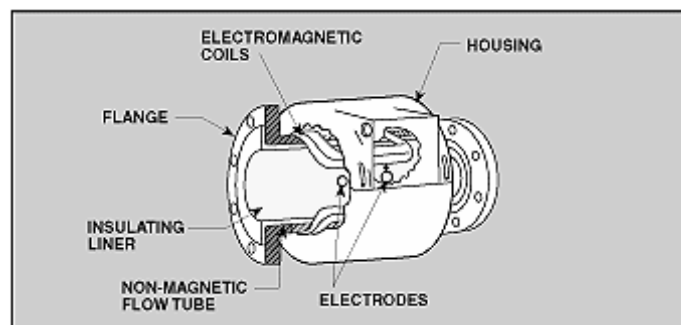
- La tensione viene misurata da due elettrodi interni al tubo



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

Elettromagnetici (*Electromagnetic flowmeters*)

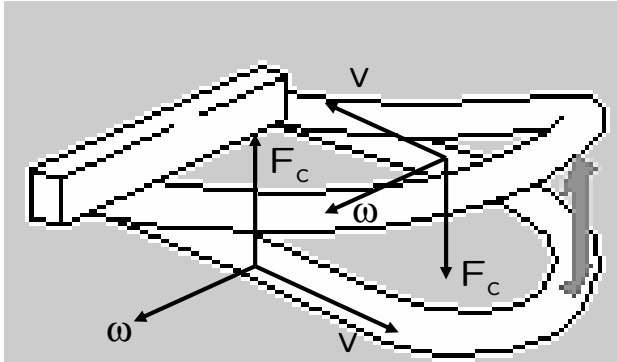
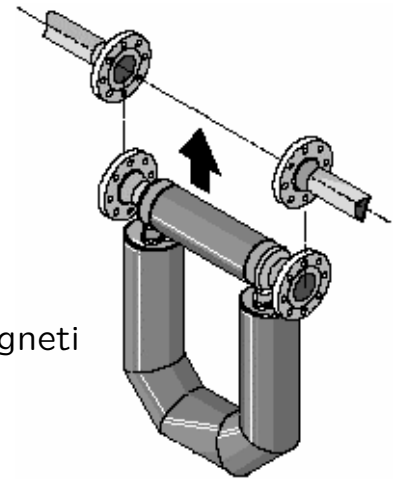
- Perdite di carico: trascurabili
- Accuratezza: ottima (fino a 0.5%)
- Rangeability: 50:1 fino anche a 100:1
- Estremamente robusti e affidabili (no parti in movimento)
- Limiti di misura: 0.005÷30000 kg/s



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

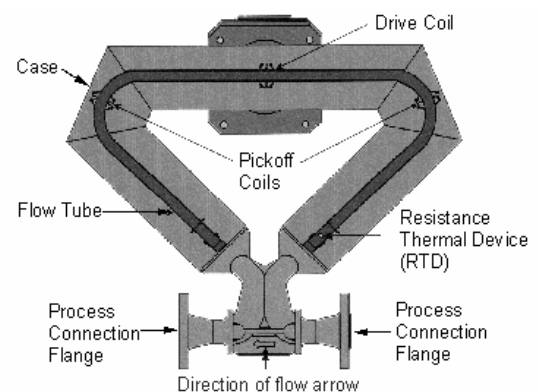
Sensori massici (*Coriolis mass flowmeters*)

- 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

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

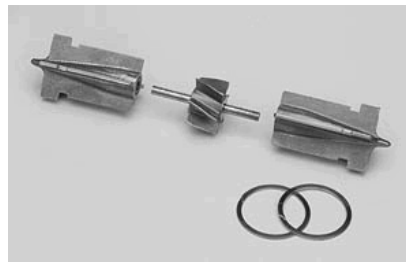
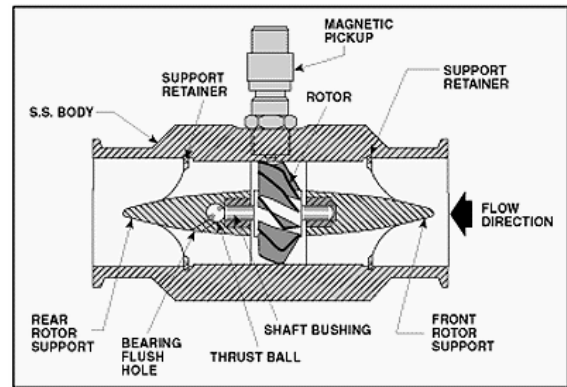


- Accuratezza: fino a $\pm 0.25\%$ della portata
- Rangeability: 100:1
- Ripetibilità: $\pm 0.15\%$ della portata
- Perdite di carico: contenute
- Limiti di misura: 0.001÷20 Kg/s
- Piuttosto cari (€4000 - €5000)

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 $\frac{p_D}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h$

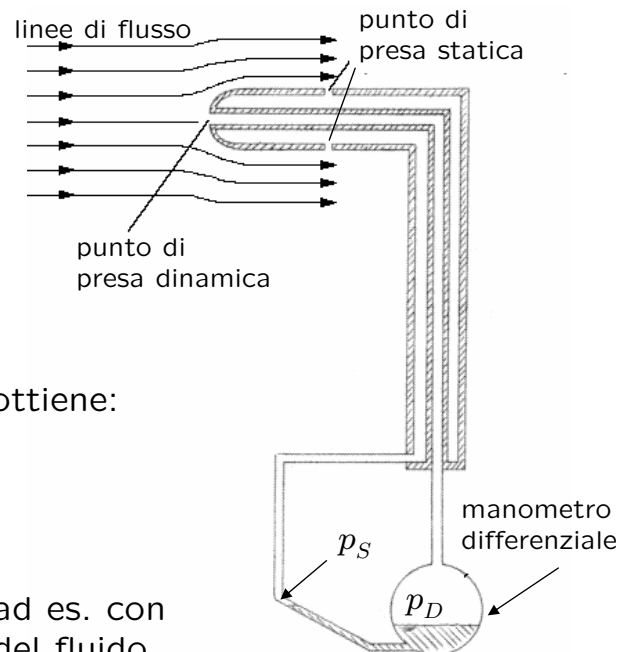
- Al punto di presa statica, il carico idrostatico vale $\frac{p_S}{\rho g} + h$

- 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