

Corso di misure meccaniche, termiche e collaudi

Misure di portata

Prof. Rodolfo Taccani



Introduzione

Misuratori di portata in volume:




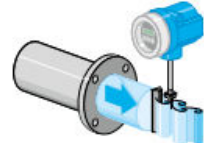
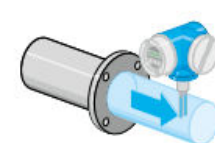
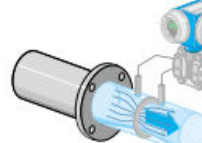

- misuratori ad area costante e a caduta di pressione
- tubi di pitot per misure medie
- misuratori a caduta di pressione costante e ad area variabile (rotametri)
- misuratori a turbina
- misuratori ad elica (o ventola)
- misuratori elettromagnetici
- misuratori ultrasonici
- misuratori a distacco di vortici
- anemometro a filo caldo
- misuratori laser

Misuratori di portata in massa:

- misuratori “Coriolis”
- misuratori “termici”

Introduzione



	Coriolis	Electromagnetic	Ultrasonic		Vortex	Thermal	Differential pressure
							
	Page 30	Page 34	Page 38		Page 42	Page 46	Page 50
			Inline	Clamp on			
Liquid applications							
▪ Liquids in general (e.g. water)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
▪ Very low flow rates (< 2 l/h)	✓✓	✓✓	✗	✗	✗	✗	✗
▪ Very high flow rates (> 100 000 m³/h)	✗	✓✓	✓✓	✓✓	✗	✗	✓✓
▪ Non-conductive liquids	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
▪ Viscous liquids (> 50 cP)	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓	✓
▪ Cryogenic fluids (e.g. liquified natural gas)	✓✓	✗	✗	✓	✓✓	✗	✓✓
▪ Hygienic applications	✓✓	✓✓	✗	✓✓	✗	✓	✗
Gas/steam applications							
▪ Gas flow in general (e.g. natural gas, air)	✓✓	✗	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
▪ Wet/dirty gases (e.g. biogas)	✗	✗	✓✓	✗	✓	✓	✗
▪ Low flow rates (< 20 l/min)	✓✓	✗	✓✓	✗	✗	✓✓	✓✓
▪ High flow rates	✓✓	✗	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
▪ Steam	✓	✗	✗	✗	✓✓	✗	✓✓
Special applications							
▪ Slurries, suspended solids	✓	✓✓	✗	✗	✓	✗	✓
▪ Liquid/liquid mixtures (e.g. oil/water)	✓✓	✓	✗	✗	✓✓	✓	✓
▪ Liquid/gas mixtures (e.g. water/air)	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓
▪ Corrosive liquids (e.g. acids, alkalis)	✓✓	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓	✓✓
▪ Corrosive gas flows (e.g. HCl vapor)	✓✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓✓
▪ Applications in mining (e.g. ore slurry)	✗	✓✓	✗	✗	✗	✗	✗
▪ Bidirectional metering (forward/reverse)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✗	✗	✓✓
▪ Measurement from outside without process interruption	✗	✗	✗	✓✓	✗	✗	✗
Range of applications							
▪ Nominal diameters	DN 1 to 400	DN 2 to 3000	DN 15 to 4000		DN 15 to 300	DN 15 to 1500	DN 10 to 12 000
▪ Process pressure	max. 400 bar	max. 40 bar	Depending on sensor		max. 250 bar	max. 40 bar	max. 420 bar
▪ Process temperature	-196 to +350 °C	-40 to +180 °C	-40 to +200 °C		-200 to +450 °C	-40 to +130 °C	-200 to +1000 °C

[Emerson]

Definizioni

In idraulica portata di una corrente fluida, relativa ad una generica sezione trasversale, è la quantità di fluido (in volume o in massa) che passa attraverso quella sezione nell'unità di tempo.

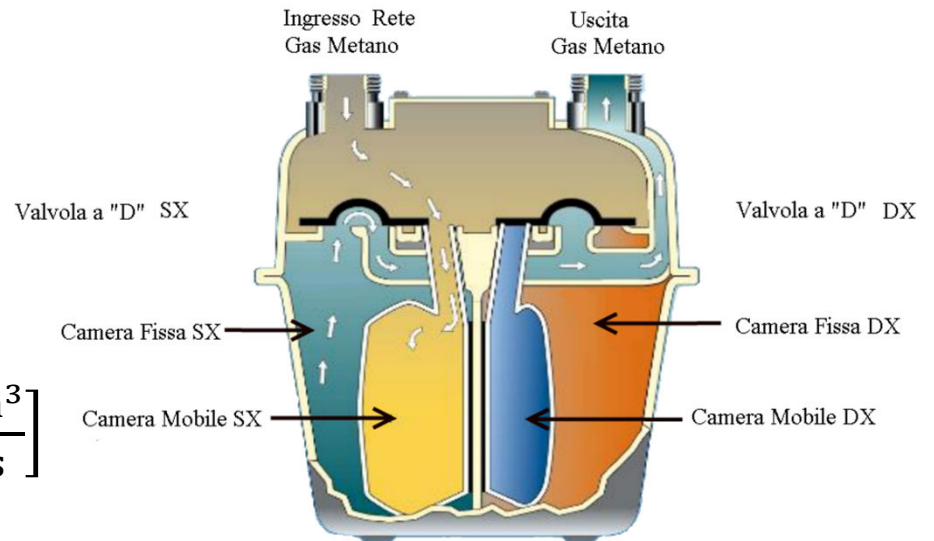
Misure dirette:

- Portata volumetrica: $Q = A \cdot v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

esempio: con il contatore del gas a membrana misuro direttamente la variazione di volume nell'unità di tempo

- Portata massica: $G = A \cdot v \cdot \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$

esempio: misurazione della variazione del peso di un serbatoio tramite cella di carico nell'unità di tempo.



Definizioni

Misure indirette:

- Caduta di pressione: dalla quale si ricava l'energia cinetica del fluido e conseguentemente la portata (es. venturimetro).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho c^2$$

Fattori che rendono difficoltose le misure di portata:

- in un condotto la **velocità del fluido non è omogenea**;
- il **gradiente di velocità non è omogeneo**;
- la **distribuzione di velocità** nel condotto è condizionata dal **percorso** (curve, variazioni di diametro, ostacoli determinano turbolenze);
- **dipendenza dalla temperatura**;
- difficoltà (o impossibilità) di **taratura dei sensori**.

Ecco perché molto spesso è difficile chiudere i bilanci di massa negli impianti.

Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds (Re) è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{oppure:} \quad Re = \frac{v L}{\nu}$$

dove:

v : velocità media del fluido

μ = viscosità dinamica,

ν = viscosità cinematica: $\nu = \eta / \rho$, ρ - densità del fluido,

L = lunghezza caratteristica (equivale al diametro $2r$ se la sezione del condotto è circolare; se la sezione non è circolare è il cosiddetto diametro equivalente $De = 4S/P$ dove S è l'area sezione e P il perimetro bagnato).

Esso può indicare se un fluido sia in regime laminare o turbolento. In un condotto un fluido viene considerato in regime laminare se il valore numerico di Re è inferiore a 2000, turbolento se superiore a 10000. Se $2000 < Re < 10000$ si è in regime di transizione.

Misuratori ad area costante e a caduta di pressione variabile

Si crea una strizione dell'area libera di efflusso nella condotta che trasporta il fluido.

Questo restringimento causa una caduta di pressione che dipende dalla portata; misurando la caduta di pressione è possibile risalire alla portata.

Diaframma – Boccaglio – Venturimetro

Diaframma

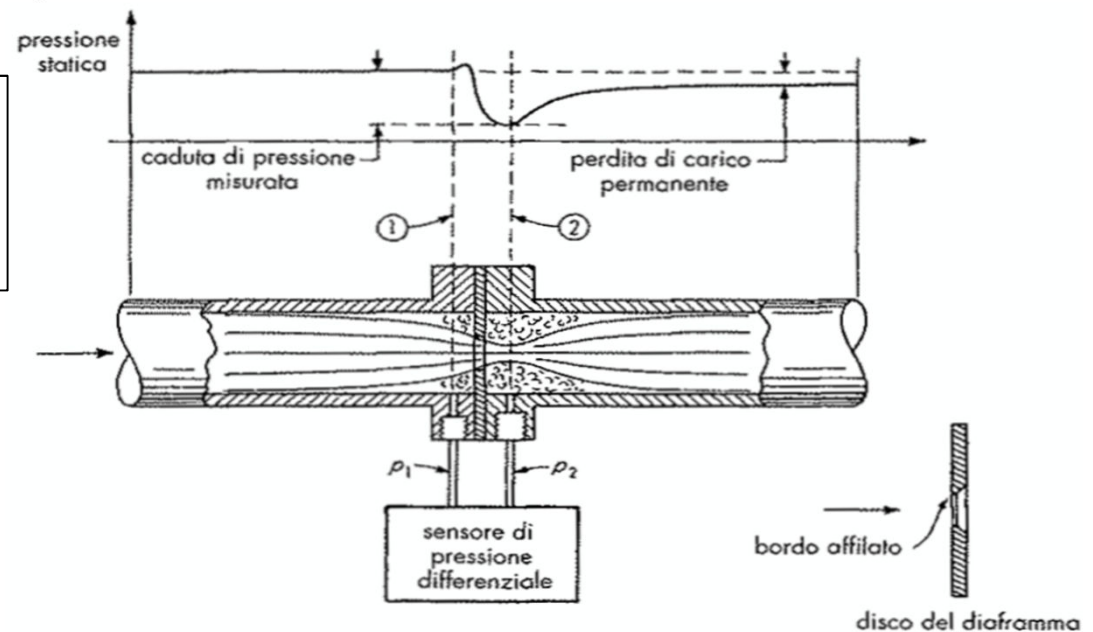
È l'elemento più usato, semplice, di basso costo

$$Q_t = \frac{A_{2f}}{\sqrt{1 - (A_{2f}/A_{1f})^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

A_{1f} , A_{2f} = area della sez. trasversale dove si misurano p_1 e p_2 , [m²]

ρ = densità del fluido, [kg/m³]

p_1 , p_2 = pressioni statiche, [Pa]



Diaframma

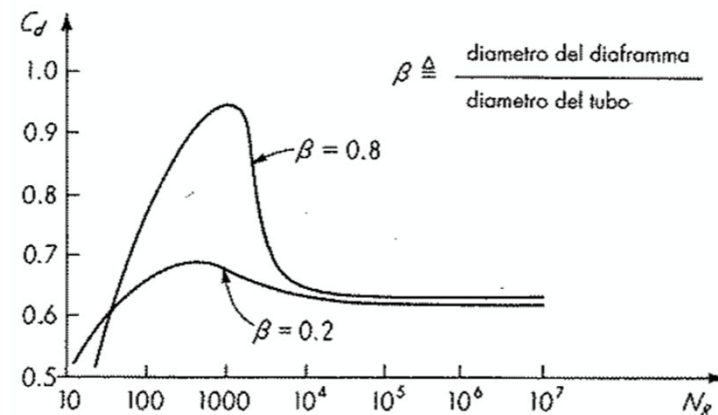
Le aree A_{1f} e A_{2f} sono le aree della sezione trasversale del flusso e non l'area della sezione del tubo o del diaframma.

Per una valutazione corretta della portata abbiamo bisogno di coefficienti correttivi (variano al variare della portata).

Si definisce un coefficiente di efflusso C_d che mette in relazione la portata reale attraverso il dispositivo con quella teorica:

$$Q_a = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Dove Q_a è la portata reale di flusso



Per un flusso incomprimibile C_d varia solo con il numero di Reynolds

Per un fluido comprimibile C_d dipende da Reynolds, dal rapporto delle pressioni e dall'esponente isoentropico del gas.

Si definisce un coefficiente ε di comprimibilità.

Fluido incomprimibile $\varepsilon = 1$ Fluido comprimibile $\varepsilon < 1$

Diaframma

Per un fluido comprimibile la portata è data dalla relazione:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho_1}$$

Per un diaframma il coefficiente di efflusso è dato da:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,75} + \\ + 0,0900L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337L_2\beta^3$$

Si vede la dipendenza dalla geometria e dalla velocità (Re)
→ si procede in modo iterativo (converge in 2-3 iterazioni).

Il coeff. di efflusso è molto sensibile alle condizioni del bordo del foro che guarda verso monte, l'usura può comportare una variazione significativa → va cambiato periodicamente.

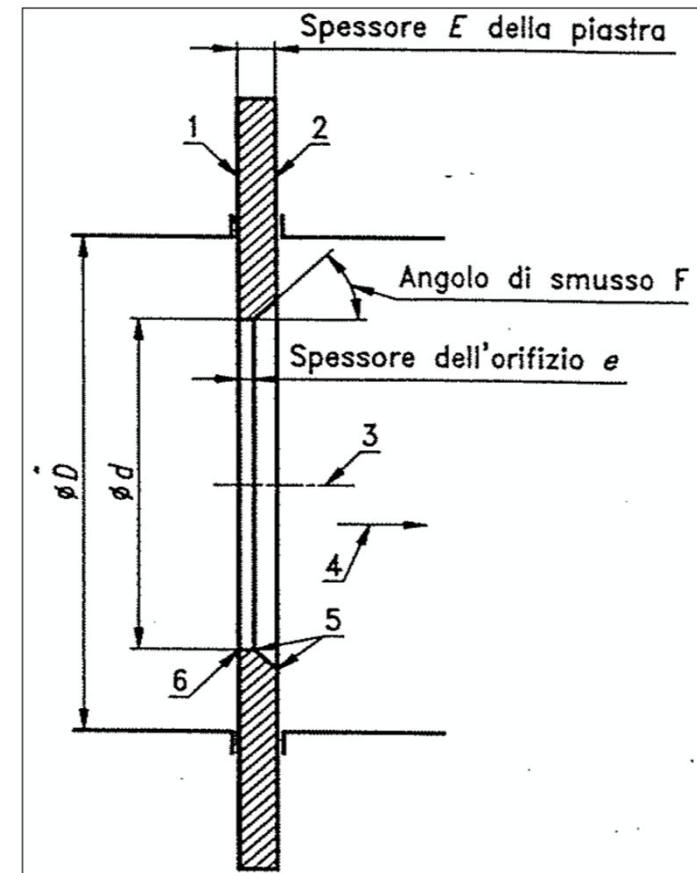
Coefficiente di comprimibilità $\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35 \beta^4) \frac{\Delta p}{kp_1}$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Rapporto di strozzamento} \quad \alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Diaframma

Esiste una normativa ([UNI EN ISO5167](#)) che regola le caratteristiche geometriche e l'installazione dei diaframmi e che da indicazioni riguardo:

- Natura del fluido
- Condizioni di flusso
- Tratti minimi rettilinei a monte e valle
- Geometrie dei condizionatori di flusso
- Circolarità del condotto
- Geometria del dispositivo
- Prese di pressione



Diaframma

Prese di pressione

- **Prese a D e D/2**

Più economico, non si devono modificare le flange

- **Prese sulle flange**

- **Prese sugli angoli**

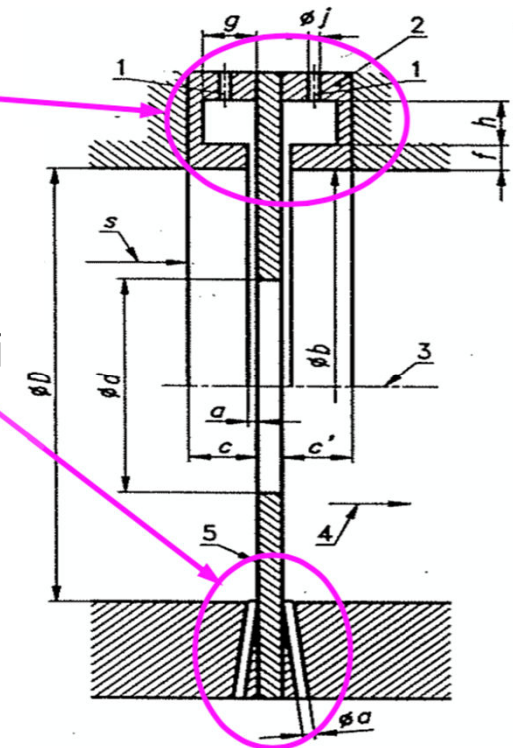
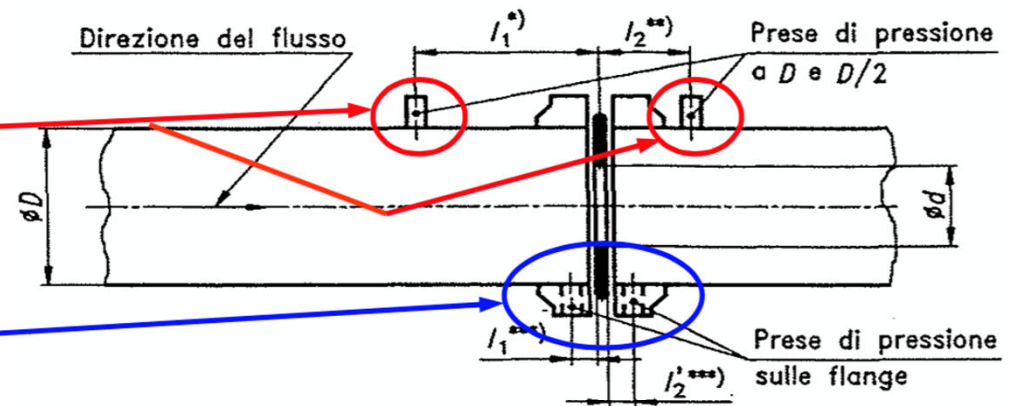
Prese singole

Sentono il ΔP maggiore \rightarrow sistema più sensibile

Problemi di flusso non uniformato, discontinuità

Anello portante con fessura anulare

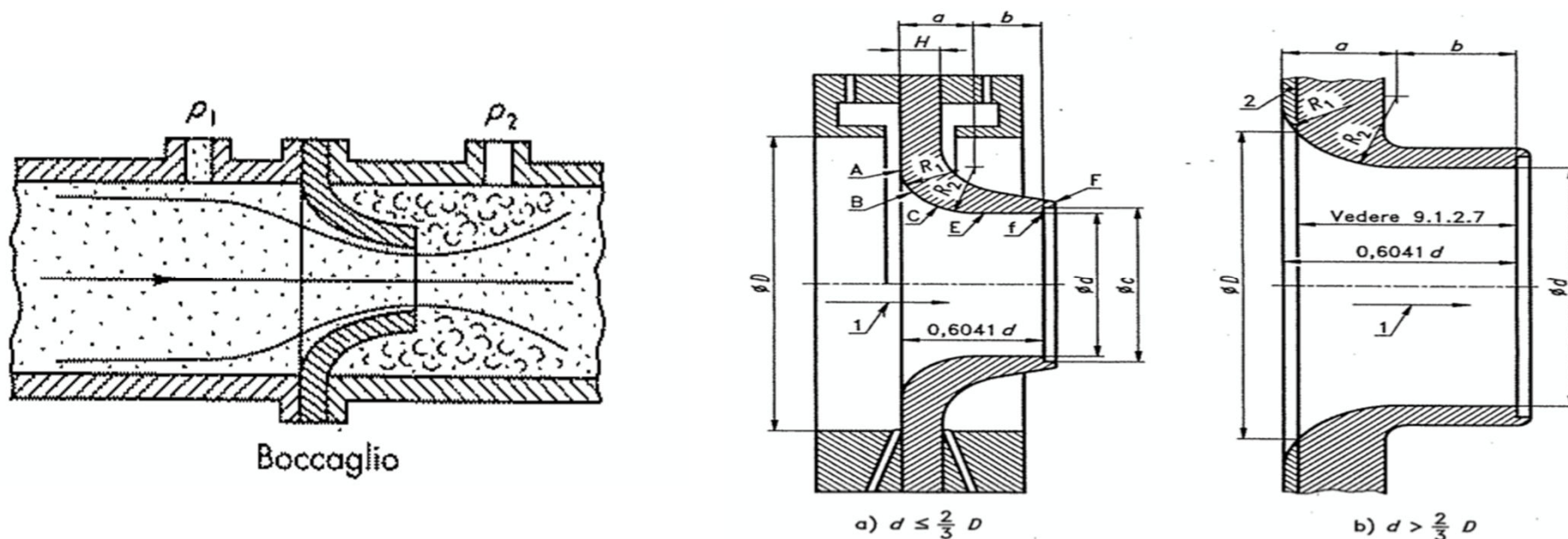
Sono più stabili, l'effetto di smorzamento non si presta per misure dinamiche



Boccaglio

I boccagli sono più costosi dei diaframmi ma più economici dei venturimetri. Vengono spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità (più stabili rispetto ai diaframmi).

Il boccaglio, come il diaframma introduce una forte perdita di carico ma a differenza del venturimetro non possono essere usati quando il fluido misurato contiene una fase solida (es. pietrisco) in quanto si rischierebbe l'intasamento.



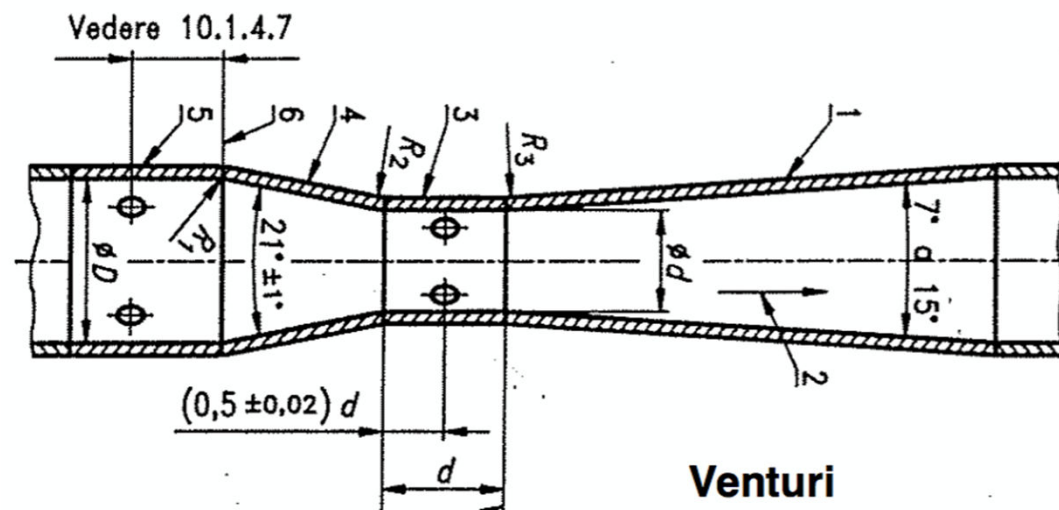
Venturimetro

Variazioni di area meno repentine, hanno coefficienti di efflusso maggiori (fino a 0.99) rispetto a boccaglio e diaframma.

Possono avere una perdita di carico molto bassa quindi sono preferiti quando ci sono grosse portate, negli acquedotti ad esempio, dove si può ottenere grossi risparmi sul pompaggio o per misurare la portata dei ventilatori.

Il divergente è più lungo del convergente per limitare le perdite di carico per allargamento di sezione, notoriamente più elevate di quelle per imbocco.

Tra le sezioni di monte e di valle del tubo convergente viene inserito un manometro differenziale a mercurio.



Venturimetro

Dal teorema di Bernoulli deriva la formula per il calcolo della portata:

$$Q = K \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} \qquad K = \frac{\sqrt{2} A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}}$$

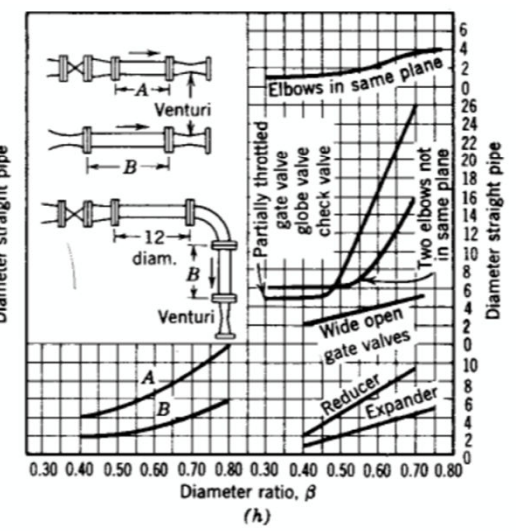
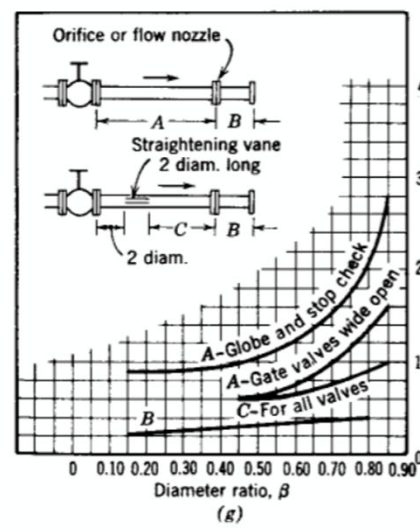
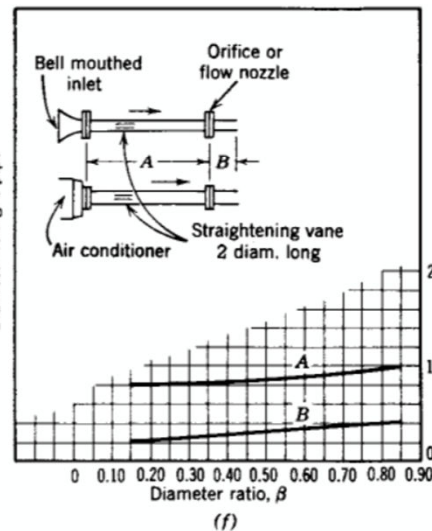
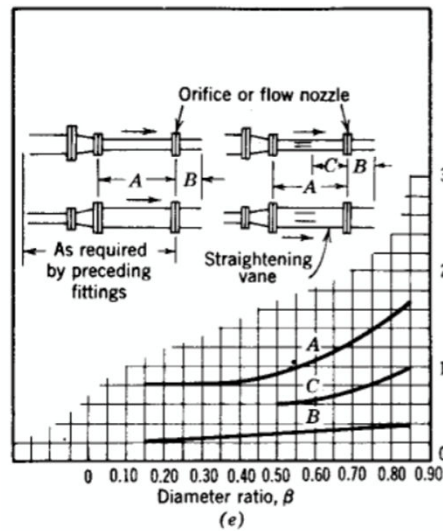
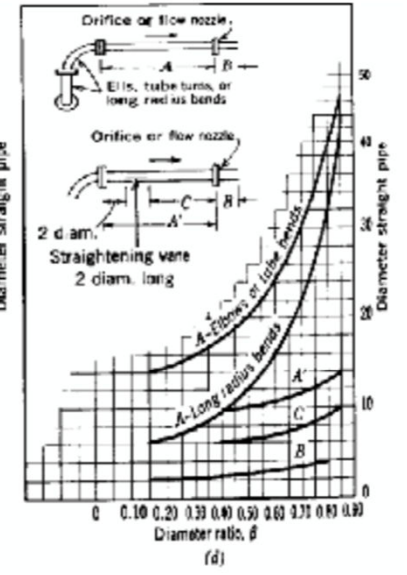
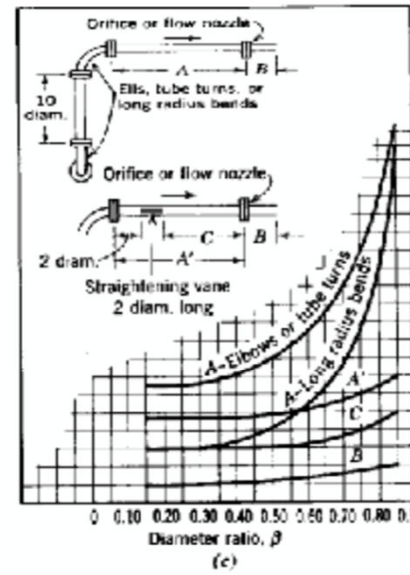
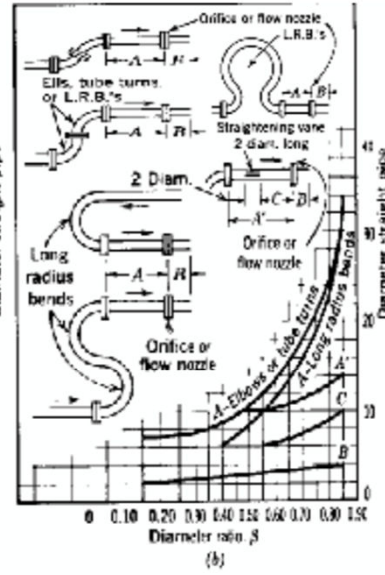
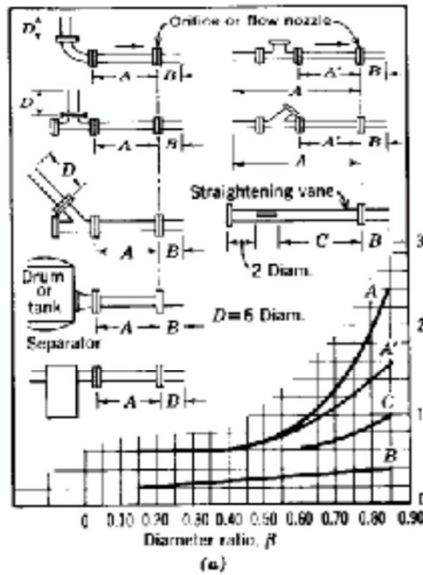
Vantaggi:

- geometria interna regolare, difficile l'intasamento (misurazioni su fluidi con solidi in sospensione);
- misure di ottima precisione;
- vasto campo di portate (da poche a molte migliaia di m³/h).

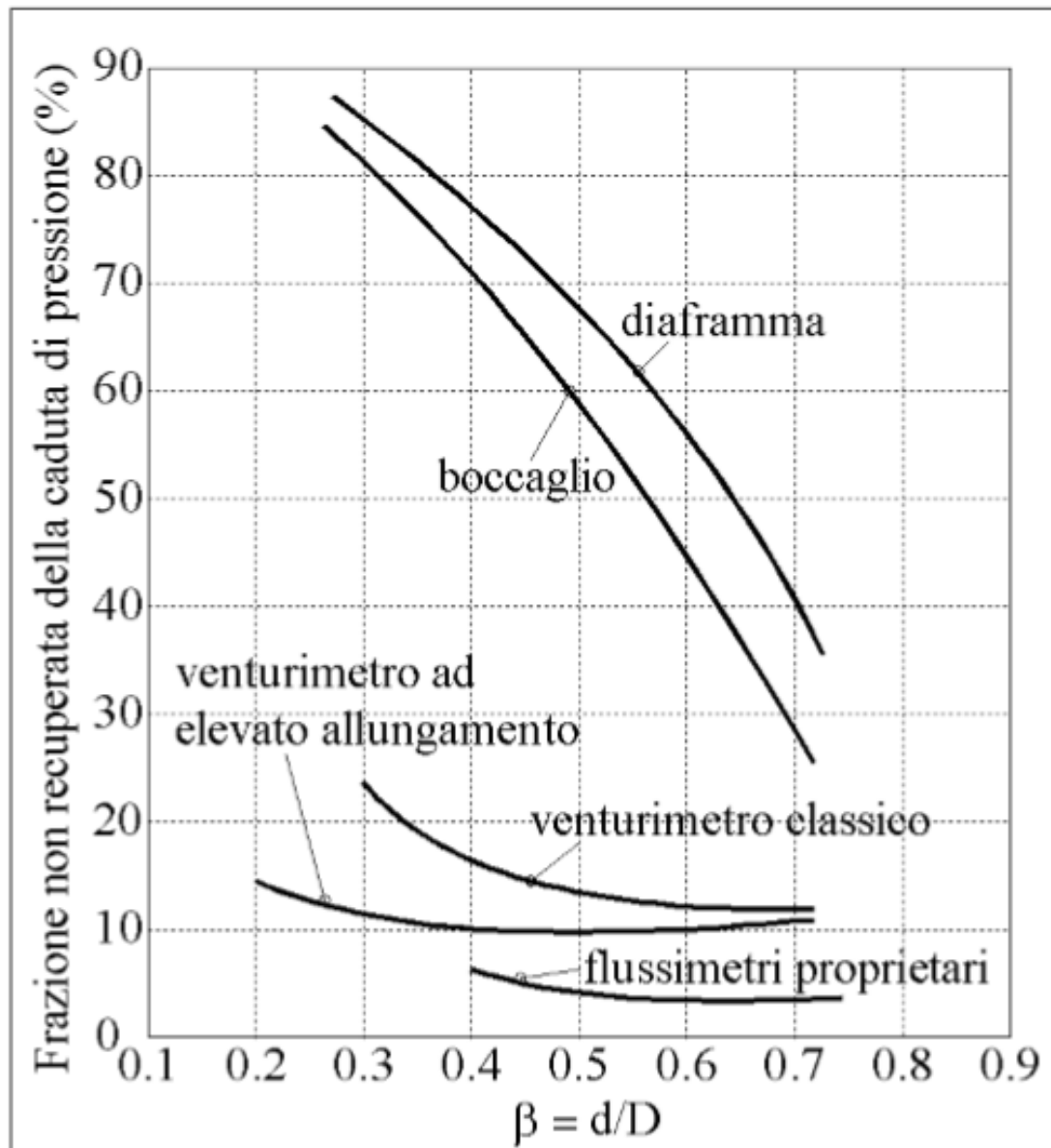
Svantaggi:

- notevole distanza tra le prese di pressione (presa di alta pressione a 7÷10 diametri a valle della strozzatura);
- sistema costoso e ingombrante.

Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, bocchagli e venturimetri



Misure con caduta di pressione



Misuratori ad area costante e caduta di pressione variabile: elementi a flusso laminare

Sono progettati per operare nel regime di flusso laminare $Re < 2000$.

La forma più semplice di un elemento a flusso laminare è un tubo di piccolo diametro (capillare).

Per $Re < 2000$ la relazione di Hagen-Poiseuille per il flusso viscoso per fluidi incompressibili dà:

$$Q_a = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} \cdot \Delta p$$

Q = portata volumica [m^3/s]

D = diametro interno del tubo [m]

μ = viscosità del fluido [$N \cdot s/m^2$]

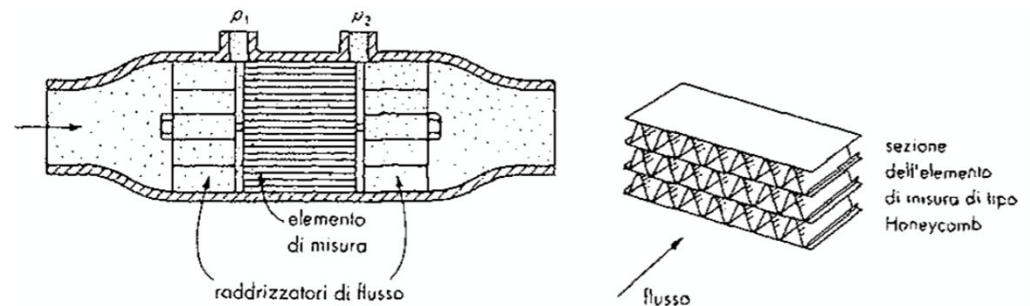
L = lunghezza del tubo tra le prese di pressione [m]

Δp = perdita di carico [Pa]

Il singolo tubo capillare può trattare solo piccole portate per Re tali da mantenere il flusso in campo laminare.

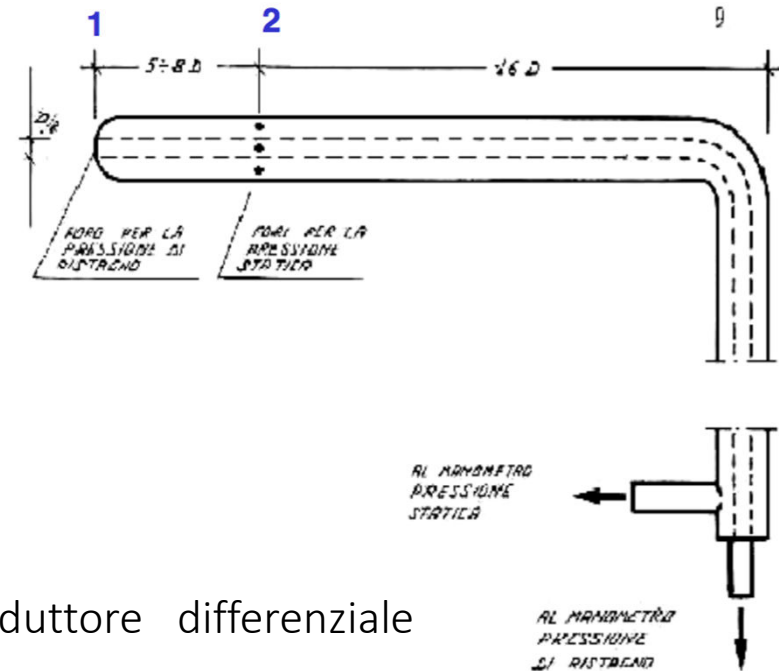
Per portate maggiori si possono utilizzare più capillari in parallelo, tubi grandi riempiti di piccole sfere, elementi tipo honeycomb

- ↑ relazione lineare tra la portata e la caduta di pressione
- ↓ intasamento a causa di fluidi sporchi
- ↓ costo elevato
- ↓ elevate perdite di carico



Tubo di Pitot

Lo strumento più comune per la misura della velocità di un flusso è il tubo di Pitot, costituito da una sonda con un foro frontale per la pressione totale e 4 fori laterali, a distanza opportuna dalla testa della sonda, per la misura della pressione statica. I due segnali di pressione vengono portati all'esterno tramite due tubi concentrici (quello interno per la pressione totale).



Il collegamento ad un manometro o trasduttore differenziale consente di calcolare il modulo della velocità.

Applicando Bernoulli tra la sez. 1 e la sez. 2 avremo:

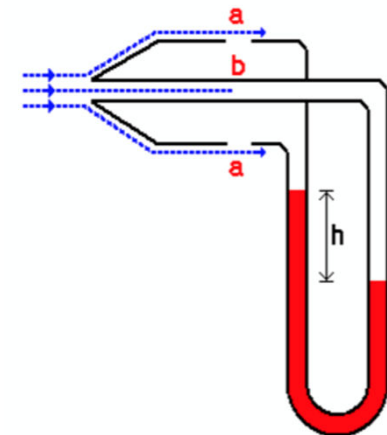
$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho_F} = 0$$

Considerando inoltre, che la velocità interna (u_1) è quella del liquido di ristagno, perciò nulla, e che non vi è differenza di altezza ($z_2 = z_1$) ottengo un'equazione di Bernoulli del tipo:

$$\frac{u_2^2}{2} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_F}$$



$$u_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_F}}$$

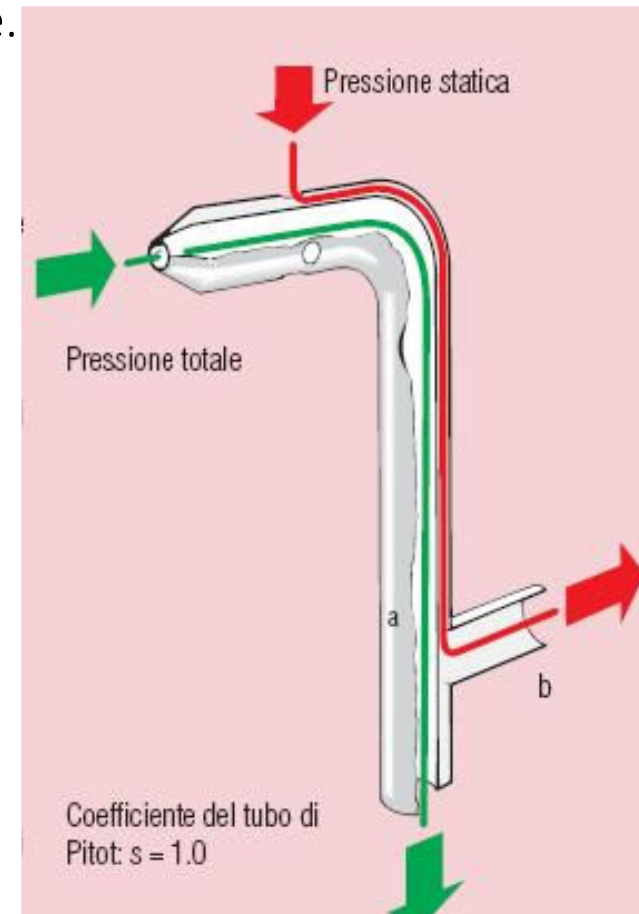


Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot usato per misure puntuali può essere utilizzato per portate volumetriche.

Si suddivide l'area del flusso totale in tanti anelli di area costante, con diversi affondamenti del Pitot si misura la velocità locale al centro delle aree e si somma le singole portate per ottenere quella totale.

- Va bene come strumento da laboratorio;
- si presta molto bene a misure di velocità molto elevate degli aeriformi;
- è necessario conoscere la densità del fluido per risalire alla velocità;
- è un sistema economico (attorno ai 200€) e di facile realizzazione.



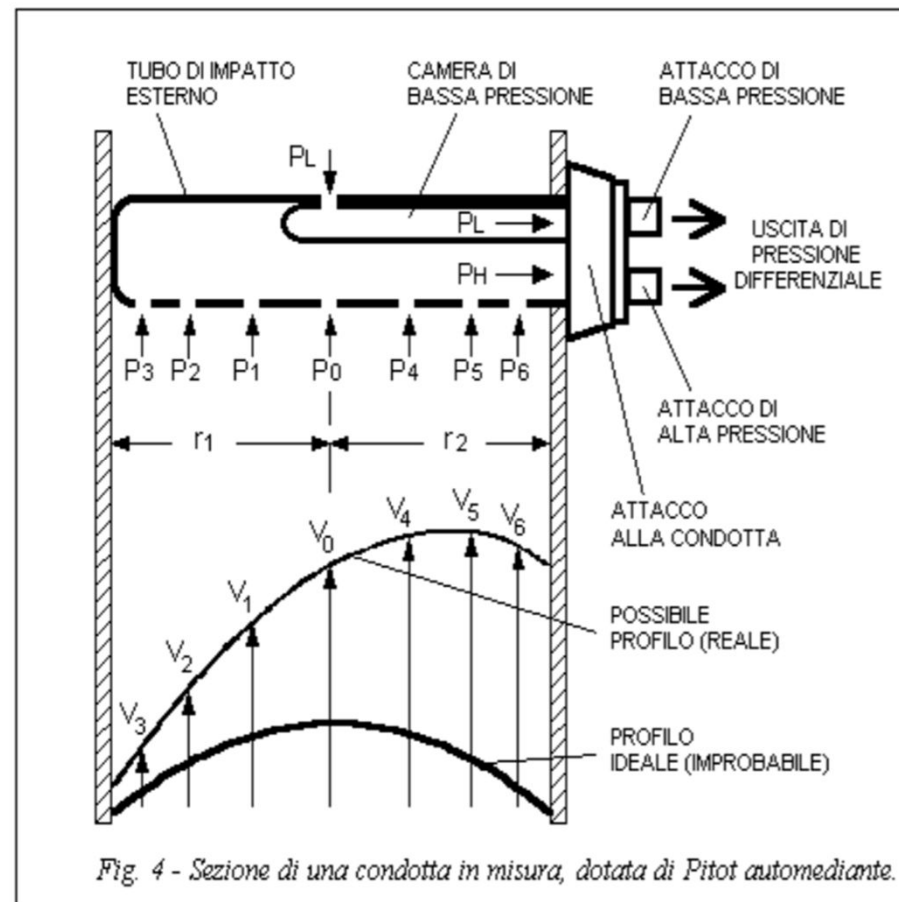
Tubo di Pitot per misure medie

In alternativa si può usare un tubo di pitot “automediante”.

Il tubo è dotato di un determinato numero di forellini (prese di pressione), disposte lungo la sua lunghezza, in modo che le pressioni generate da ognuno di essi

(imputabili alle diverse velocità componenti il profilo), vengano ad essere mescolate dentro il tubo, determinando così una pressione mediata per la misura.

Il valore statico viene rilevato da un foro disposto a valle del senso di flusso. (precisione. 1 – 2%)



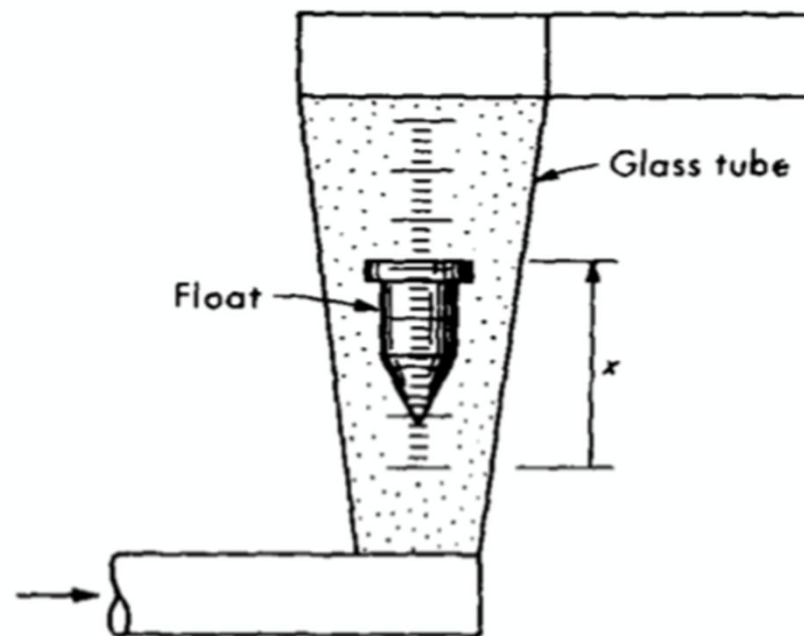
Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Principio di funzionamento

Un rotametro è composto da un tubo verticale con forma conica, in cui un galleggiante assume una determinata posizione lungo la direzione verticale, corrispondente ad una data portata che scorre nel tubo.

Il fluido, percorrendo il rotametro dal basso verso l'alto investe il galleggiante e l'oltrepassa.

Il galleggiante crea una perdita di pressione localizzata dovuta al restringimento della sezione di passaggio.



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Principio di funzionamento

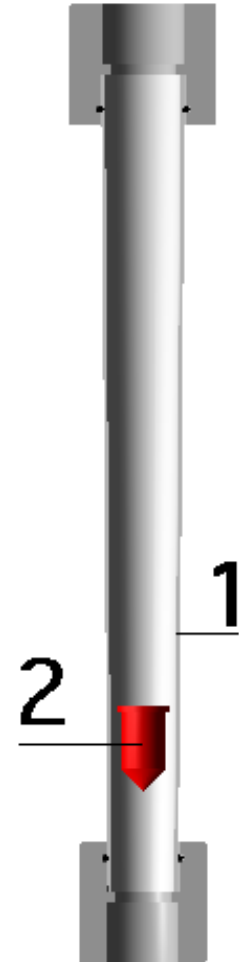
Per una certa portata, quando si bilanciano le forze verticali di pressione differenziale, di gravità, di viscosità e di galleggiamento, il galleggiante rimane in equilibrio.

- Forza gravità – forza di galleggiamento = cost
- la forza diretta verso l'alto data dalla caduta di pressione (ΔP) * l'area della sezione trasversale del galleggiante = cost
- area galleggiante = cost $\rightarrow \underline{\Delta P = \text{cost}}$

Per un'area di passaggio del flusso fissata, ΔP varia con la il quadrato della portata, quindi, per mantenere il $\Delta P = \text{cost}$ al variare della portata, l'area deve variare.

L'area del misuratore varia con continuità con lo spostamento verticale.

La posizione del galleggiante è l'uscita del misuratore; può essere resa lineare con la portata facendo variare l'area della sezione del tubo in modo lineare con lo spostamento verticale.



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Per un fluido incomprimibile si ottiene il seguente risultato:

$$Q_t = \frac{C_d(A_t - A_f)}{\sqrt{1 - [(A_t - A_f)/A_t]^2}} \cdot \sqrt{2gV_f \frac{w_f - w_{ff}}{A_f w_{ff}}}$$

Q = portata volumetrica, m^3/s

C_d = coefficiente di efflusso

A_t = area del tubo, m^2

A_f = area del galleggiante, m^2

V_f = volume del galleggiante, m^3

w_f = peso specifico del galleggiante, kg/m^3

w_{ff} = peso specifico del fluido, kg/m^3

Se la variazione di C_d con la posizione del galleggiante è piccola e se $[(A_t - A_f)/A_t]^2$ è sempre molto minore di uno, allora abbiamo: $Q = K(A_t - A_f)$

Se il tubo è costruito in modo tale che A_t vari in modo lineare con la posizione del galleggiante x abbiamo: $Q = K_1 + K_2x$

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Il galleggiante viene realizzato in materiali differenti per ottenere la differenza di densità.

Alcune forme, come la sfera, non richiedono guide, altre sono mantenute in posizione centrale da fili di guida.

I tubi in genere sono realizzati in vetro ad alta resistenza per permettere l'osservazione diretta della posizione del galleggiante.

Quando è necessaria una resistenza maggiore si usano tubi in metallo e la posizione viene rilevata magneticamente.

Se si desidera un segnale elettrico correlato alla posizione del galleggiante si usa un trasduttore di spostamento.

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

- Usati per piccole e medie portate
- Industria chimica, petrolchimica, farmaceutica, alimentare, trattamento acque
- Necessitano un'installazione verticale (flusso dal basso verso l'alto).
- Richiedono una taratura rispetto a pressione e temperatura standard di riferimento.
- Con opportune correzioni possono essere poi usati in condizioni di esercizio differenti.
- Applicazioni a fluidi monofasici
- Economici (100 – 300€ a seconda della precisione)



Caratteristiche tecniche (Krohne)

Precisione: 1 – 2% FS

Portata: acqua: 0.4 – 10000 l/h

aria: 0.007 – 180 m³/h

Temperatura di processo: -40 – 100°C

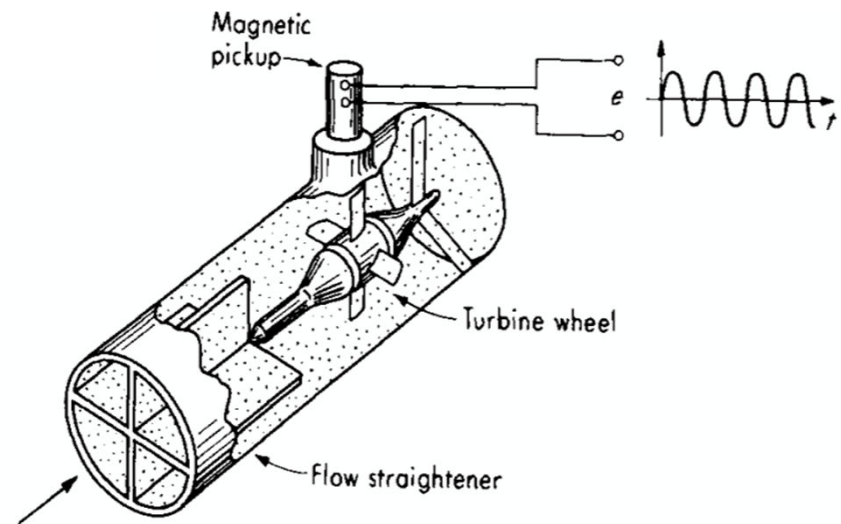


Misuratori a turbina

Principio di funzionamento

Se si inserisce una turbina in un tubo contenente fluido in movimento la velocità di rotazione della turbina dipenderà dalla portata del fluido.

Riducendo l'attrito dei cuscinetti e mantenendo le perdite al minimo si può progettare una turbina la cui velocità vari linearmente con la portata.



La velocità si ottiene misurando la frequenza con cui le palette della turbina passano per un determinato punto usando un dispositivo magnetico di prossimità.

Se si vuole un segnale analogico in uscita gli impulsi possono essere inseriti in un convertitore frequenza-tensione.

Caratteristiche tecniche tipiche

Campi di portata: min 0,3 l/min ... max 60 l/min

Viscosità: 0,5 ÷ 1,5 cP

Condizioni di esercizio:

- Temperatura: -20°C ÷ + 80° C
- Pressione: max 10 bar per fluidi a T=20°C



Misuratori ad elica (o ventola)

Le eliche o ventole misurano un flusso gassoso.

Sono misuratori puntuali di velocità, costituiti da un'elica sostenuta da un perno, collegato ad un anello di protezione, sul quale viene innestato il manico.

Per effettuare la misura, si orienta lo strumento in modo che l'asse di rotazione dell'elica sia **parallelo alla direzione del moto del fluido**.

Attraverso un **contascatti analogico o digitale** si registra il moto dell'elica: in questo modo lo strumento fornisce in uscita direttamente la velocità.

Questo dispositivo, detto anche **anemometro a ventolina**, non trova grandi applicazioni industriali; viene utilizzato solitamente per misurare la velocità negli **impianti di riscaldamento e di condizionamento**, sia all'interno dei condotti che all'esterno delle bocchette di emissione.



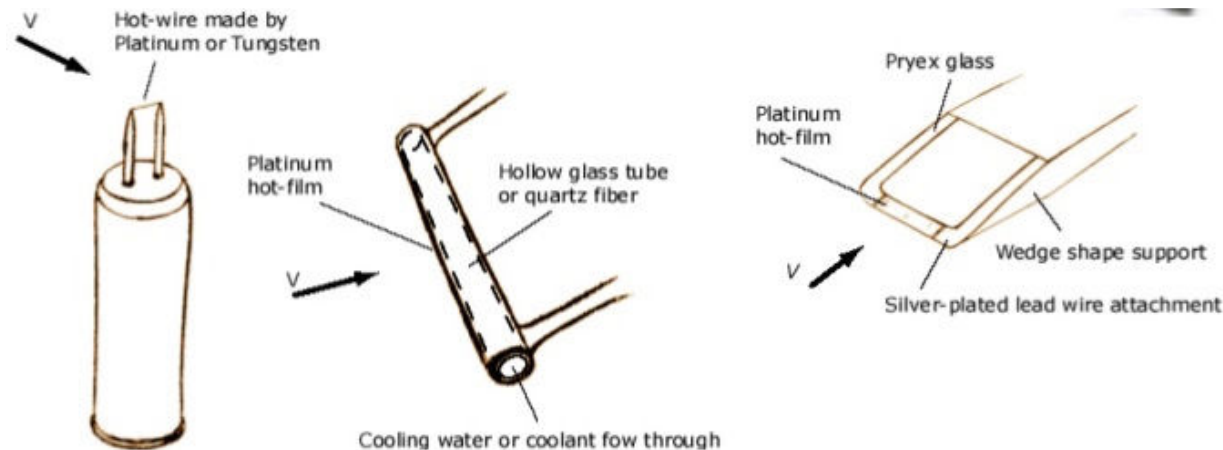
Anemometro a filo caldo

Gli anemometri a filo caldo sono usati sia per la **ricerca in fluidodinamica**, sia per misure e controlli di flussi d'aria nel campo del **condizionamento dell'aria**, della **qualità dell'aria**, e dell'**igiene industriale**.

Il sensore è costituito da un **filo (platino)**, **film** o una **resistenza** che viene riscaldata ad una **temperatura superiore a quella del flusso** in cui si trova. Mediante la **differenza di temperatura** tra l'aria che scorre intorno al tubo e il filamento si riesce a ricavare la **velocità**.

I sistemi di misura per la ricerca in fluidodinamica utilizzano 1, 2 o 3 sensori molto sottili in grado di seguire anche flussi ad elevata turbolenza nel campo tridimensionale.

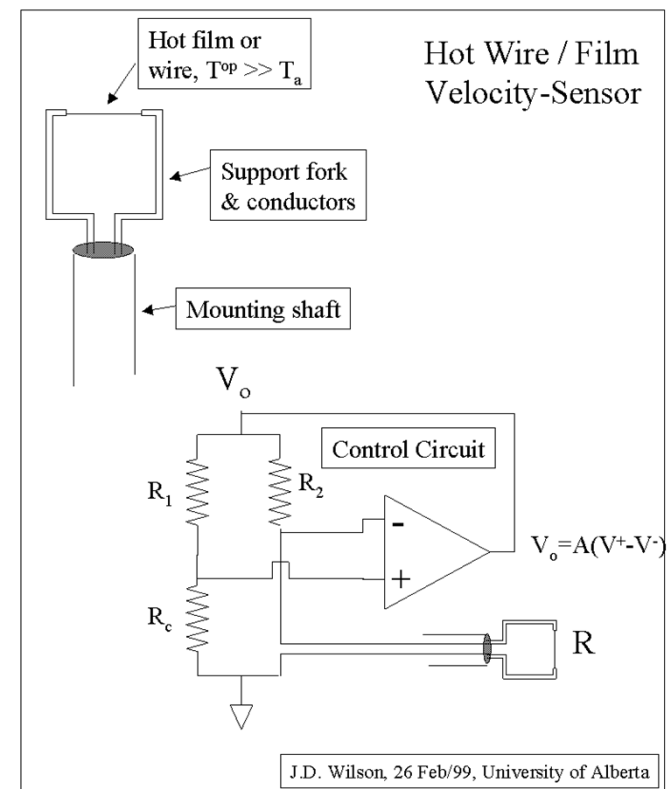
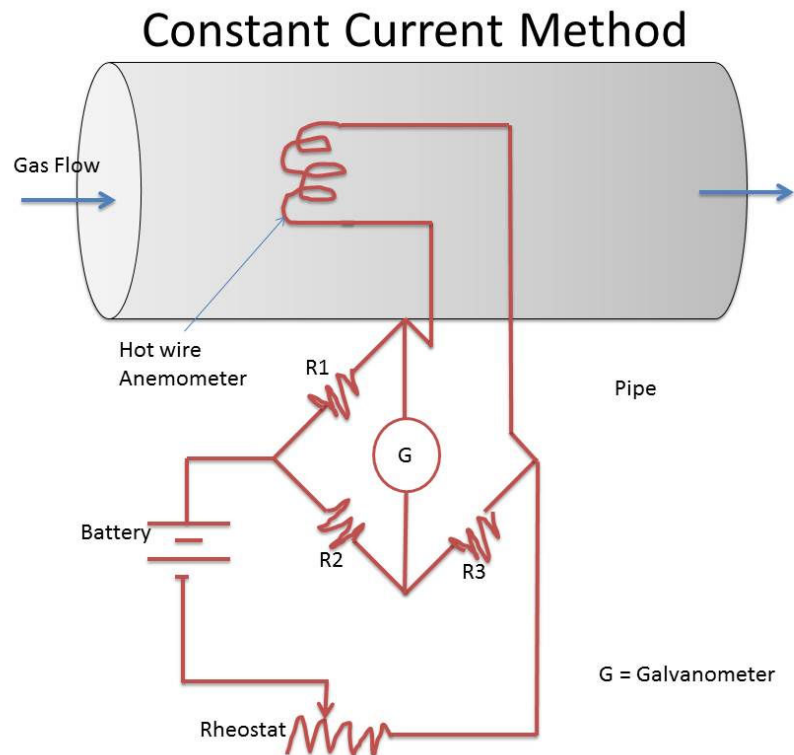
Nel campo della misura industriale si predilige invece un sensore più robusto che misura la velocità media.



Anemometro a filo caldo

Esistono due tipologie:

- **CCA:** anemometro a **corrente costante**. Misura quindi la differenza di temperatura dovuta al flusso d'aria e da questa risale alla portata;
- **CTA:** anemometro a **temperatura costante**. Cioè un **circuito a ponte** mantiene il sensore ad una temperatura costante, qualunque sia la velocità. All'aumentare della velocità del flusso, la potenza richiesta sarà maggiore, quindi la **potenza dissipata è direttamente proporzionale alla portata**.

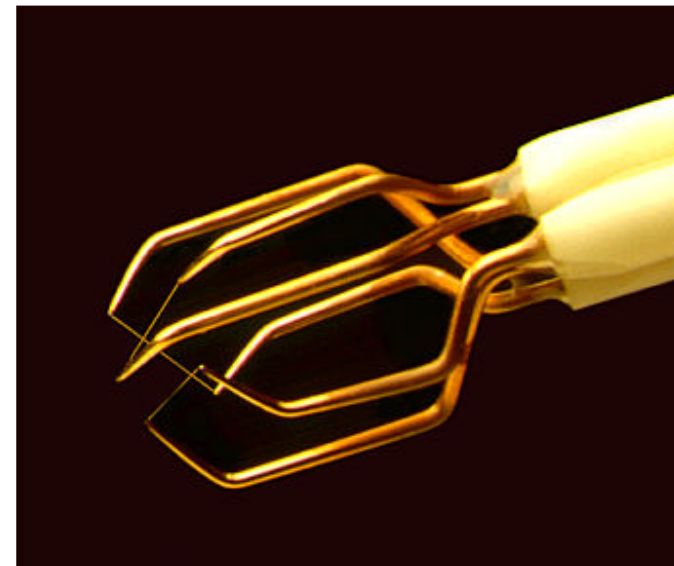


Anemometro a filo caldo

I **vantaggi** di questo tipo di strumento sono:

- **misura diretta** della portata massica senza bisogno di effettuare correzioni sulla pressione o sulla temperatura;
- sensibilità alle **basse velocità**;
- **accuratezza e ripetibilità** delle misure;
- **risposta veloce** ai cambiamenti di velocità e di temperatura;
- insensibilità alle componenti trasversali della velocità.

Gli anemometri a filo caldo sono **molto delicati**. Le sue varianti a film o a piastrina (resistenza), sono più robuste ma hanno una risposta più lenta.

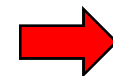
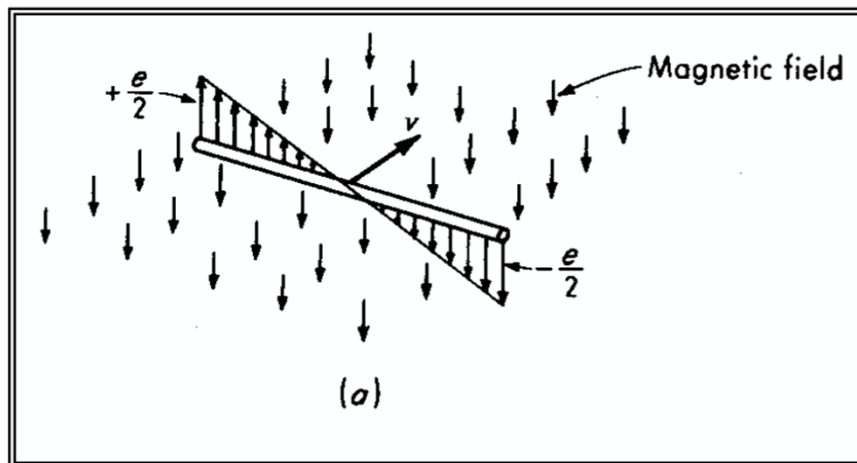


Misuratori elettromagnetici

Principio di funzionamento

I misuratori di portata elettromagnetici si basano sul principio di induzione.

Se un conduttore di lunghezza l si muove con una velocità trasversale v attraverso un campo magnetico di intensità B verranno prodotte delle forze sulle particelle cariche del conduttore che muoveranno le cariche positive e negative verso le estremità del conduttore.



Gradiente di potenziale attraverso il conduttore

$$e = B l v$$

B : densità del flusso di campo

l : lunghezza del conduttore

V : velocità del conduttore

Collegando le estremità ad un circuito esterno la tensione indotta produrrà un flusso di corrente i

Il flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza R , genera una caduta di potenziale iR

Ai terminali del conduttore avremo una tensione $e - iR$

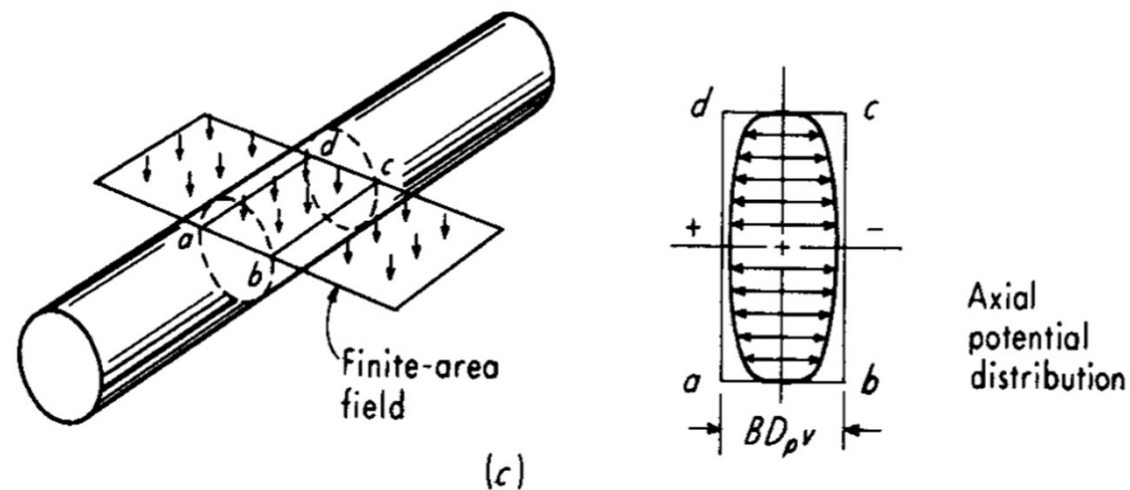
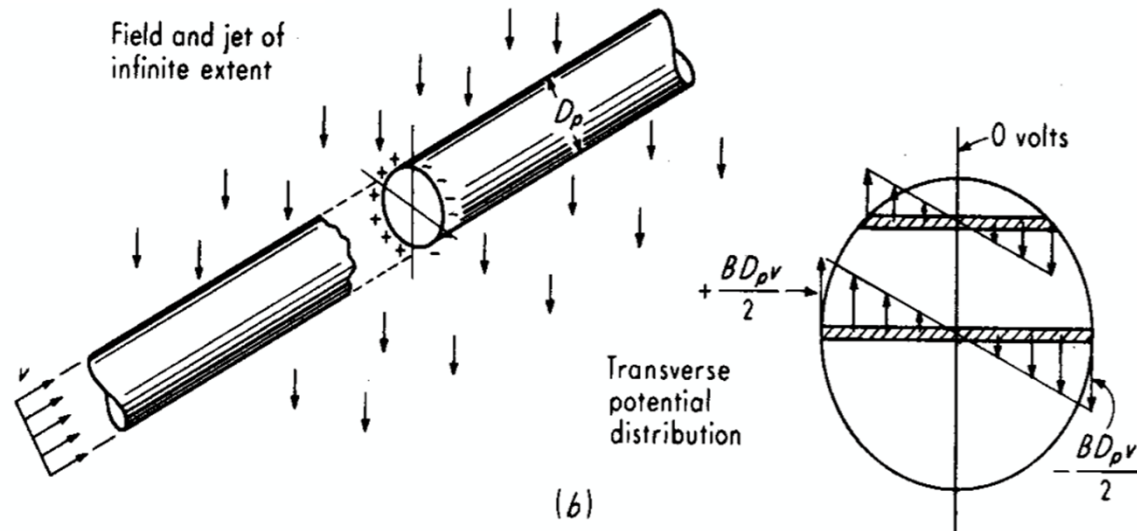
Misuratori elettromagnetici

Consideriamo un flusso cilindrico di fluido conduttore con profilo di velocità uniforme che attraversa un campo magnetico

Se il liquido è conduttore avremo uno spostamento degli ioni positivi e negativi ai lati del getto

$$e = BDv$$

In realtà il campo magnetico è di estensione limitata.

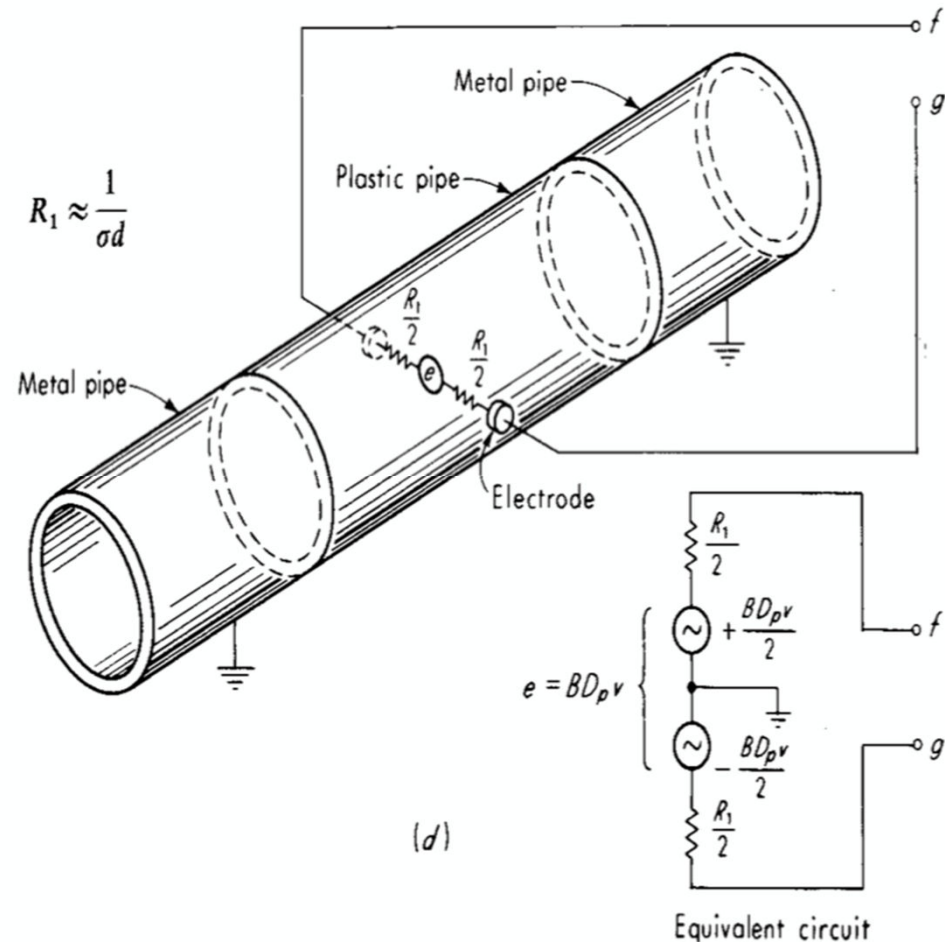


Misuratori elettromagnetici

Condotta non magnetica in materiale non conduttore.

Due elettrodi posti nei punti a massima differenza di potenziale.

Essendo il fluido conduttore ci sarà un percorso di conduzione tra i due elettrodi che forniscono un segnale in tensione.



Il segnale in tensione risulta proporzionale alla velocità del fluido

È stato dimostrato che e corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo simmetrico rispetto al centro del tubo.

Misuratori elettromagnetici

Applicazioni e vantaggi

Sono utilizzati da più di 50 anni

Possono misurare la velocità di un qualsiasi fluido conduttore ($> 1 \mu\text{S}/\text{cm}$)

Non hanno parti in movimento

Non alterano il campo di moto

Non portano strizioni di diametro quindi non aggiungono perdite



Caratteristiche tecniche (Yokogawa)

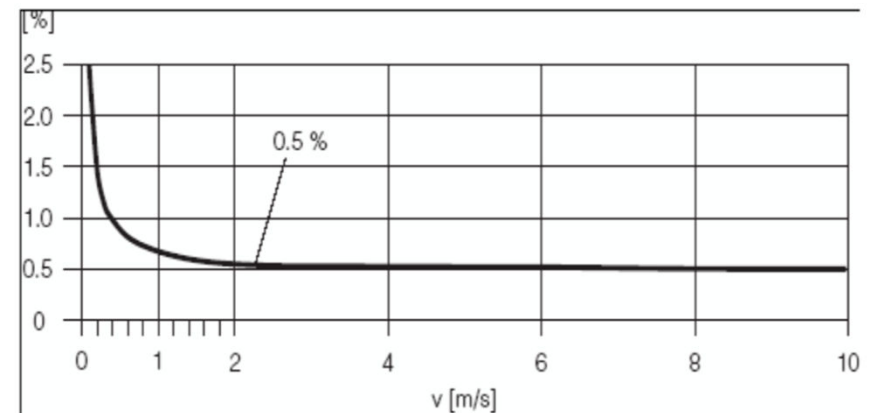
Errore: 0.5% o.r.

Portate: 0.2 - 1000 m³/h

Consumo: 10W

Uscita: 4-20 mA

Alimentazione: 200-240 VAC o 24 VAC/DC



Misuratori ad ultrasuoni

Principio di funzionamento

Il principio operativo si basa sulla modalità di propagazione di un disturbo di pressione attraverso un fluido.

La velocità con cui si propagano i disturbi dipende infatti dalle caratteristiche del fluido e dalla sua velocità.

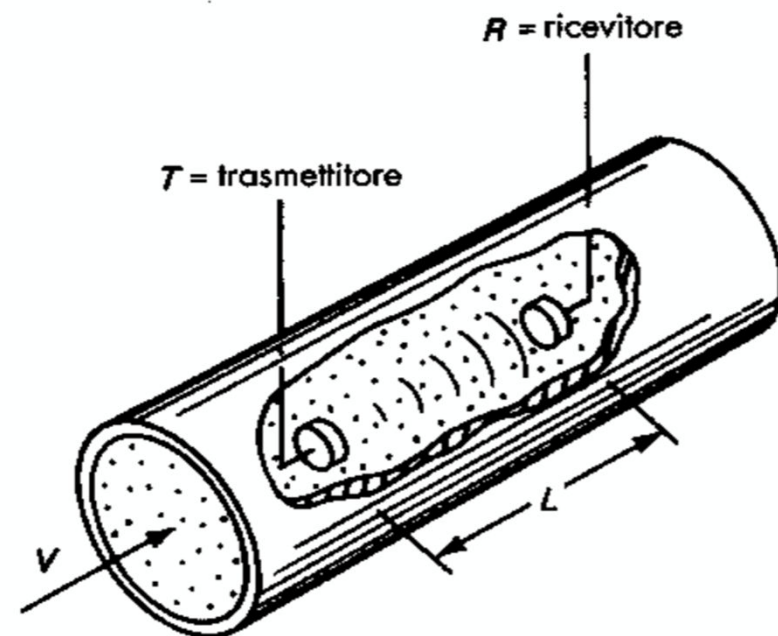
Vengono utilizzati brevi treni di onde sinusoidali (circa 10 MHz).

Comunemente si usano trasduttori a cristalli piezoelettrici. Al cristallo trasmettitore viene data energia elettrica sotto forma di brevi impulsi di tensione ad alta frequenza che mettono in vibrazione il cristallo.

La vibrazione viene comunicata al fluido e si propagherà attraverso di esso.

Il cristallo ricevitore è esposto alle fluttuazioni e risponde vibrando.

Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico ad esso proporzionale.



Misuratori ad ultrasuoni

1. **Doppler**: misura la variazione di frequenza degli impulsi riflessi dalle particelle sospese nel flusso.
2. **Tempo di transito**: misura la differenza di tempo necessaria ad attraversare diagonalmente il flusso.

Doppler

Un emettitore manda un treno di onde alla frequenza f_1 (circa 1 – 5 MHz) con angolo α ($\lambda=c/f_1$).

Le onde colpiscono le particelle che si muovono a velocità v_p .

Le particelle che si allontanano dall'emettitore vedono una lunghezza d'onda $\lambda_p = (c - v_p \cos(\alpha))/f_1$.

Il ricevitore vede una lunghezza d'onda:

$$\lambda_p = \frac{(c - 2v_p \cos(\alpha))}{f_1} \quad f_2 = \frac{(f_1 \cdot c)}{(c - 2v_p \cos(\alpha))}$$

Misurando la differenza di frequenza abbiamo una misura della velocità del flusso.

Si misura la velocità delle particelle, non del liquido

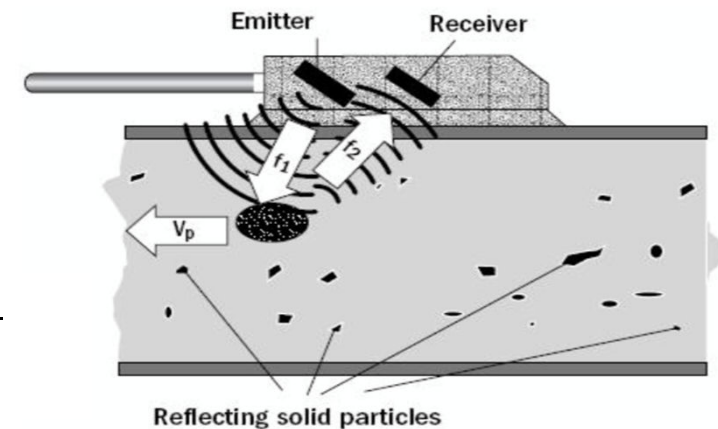
Non invasivo, non ci sono parti in movimento

Ci deve essere un numero sufficiente di particelle riflettenti nel flusso

Le particelle devono avere diametro grosso per avere una buona riflessione

La velocità del suono delle particelle deve essere nettamente differente da quella del liquido.

Per avere una misura corretta necessita di molti diametri a monte (20 D)



$$f_1 - f_2 = \Delta f = \frac{(2v_p f_1 \cos \alpha)}{c}$$

Misuratori ad ultrasuoni – Tempo di transito

Con velocità di flusso nulla il tempo t_0 di passaggio degli impulsi risulta:

$$t_0 = \frac{L}{c} \quad \begin{array}{l} L = \text{distanza tra trasmettitore e ricevitore} \\ c = \text{velocità del suono} \end{array}$$

Se il fluido si muove con velocità V il tempo di passaggio t diventa:

$$t = \frac{L}{c + V} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{V}{c^2} + \frac{V^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{V}{c} \right) \quad \boxed{\Delta t = t - t_0 = \frac{LV}{c^2}}$$

$L = \text{cost}$, c varia con la temperatura \rightarrow errore significativo perché compare al quadrato, inoltre Δt è piccolo.

ad esempio in H_2O : se $V = 3.05 \text{ m/s}$, $L = 305 \text{ mm}$ e $c \approx 1520 \text{ m/s} \rightarrow \Delta t = 0.4 \mu\text{s}$

Si può usare una configurazione come quella in figura: un sistema oscillante che utilizza gli impulsi

ricevuti per triggerare quelli trasmessi

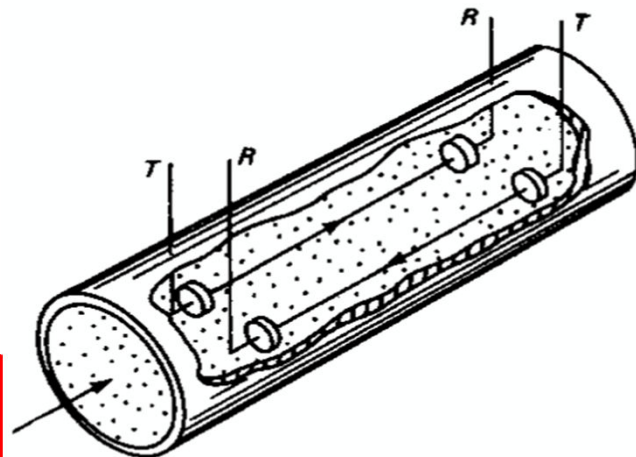
t_1 : tempo nella direz. del flusso

t_2 : tempo nella direz. opposta

Δt è doppio rispetto a prima

Rimane la dipendenza da c^2

$$\boxed{\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV}{c^2 - V^2} \approx \frac{2VL}{c^2}}$$



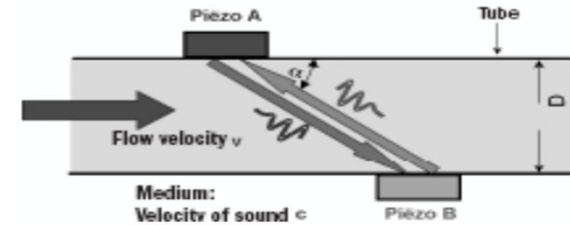
Misuratori ad ultrasuoni

La misurazione della differenza di frequenza è stata usata per molti anni ma adesso è stata rimpiazzata da metodi basati su misure dirette dei due tempi di volo e sulla seguente rielaborazione dei dati:

$$T_{A \rightarrow B} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c + v \cos \alpha)} \quad T_{B \rightarrow A} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c - v \cos \alpha)}$$

La differenza tra i due tempi diventa:

$$\Delta T = T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B} = v \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B} \cdot \sin(2\alpha)}{D}$$



$$v = \frac{D}{\sin(2\alpha)} \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B}}{T_{B \rightarrow A} T_{A \rightarrow B}}$$

Examples of transit times, transit time differences:		
Inside tube diameter:	100 mm	Transit time difference ΔT : 91.29 ns
Angle of incidence α :	45°	For resolution 0.5%: time resolution <500 ps needed!
Process product	water	The transit time measurement of ...
Sound velocity	1480 m/s	$T_{A \rightarrow B} = 95.4949 \mu\text{s}$ und
Flow velocity	1 m/s	$T_{B \rightarrow A} = 95.5862 \mu\text{s}$ muss sehr genau sein!
Transit time with the current	95.49 μs	
Transit time against the current	95.59 μs	

Si può usare la somma totale del tempo di transito per determinare la velocità del suono:

$$\sum T = T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B} = \frac{1}{c} \cdot \frac{2D}{\sin \alpha}$$

$$c = \frac{2D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{T_{B \rightarrow A} + T_{A \rightarrow B}}$$

Limiti sulla quantità di gas o di particelle solide presenti nel liquido

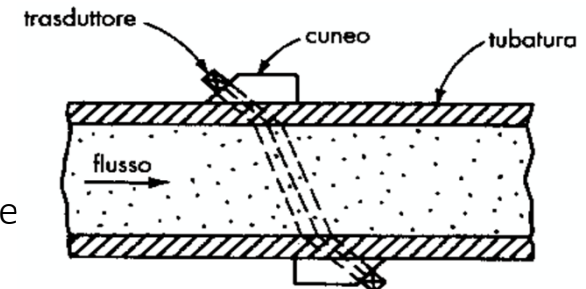
Limiti sulla viscosità del liquido

Misuratore ultrasonico tipo “clamp-on”

Installazione più semplice

No problemi si sporcia

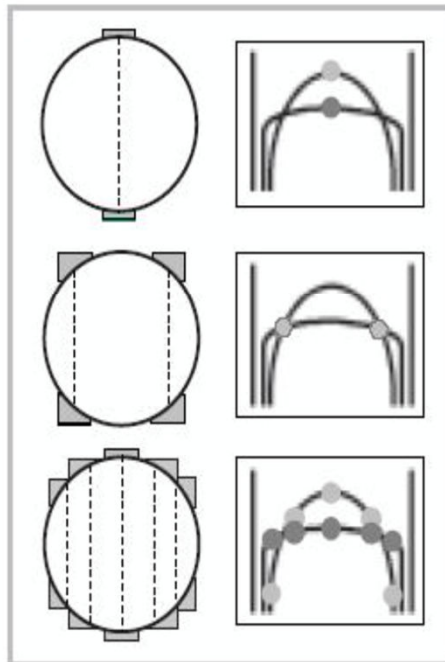
Variazioni del percorso del “raggio acustico” per slittamento se dilatazioni termiche



Misuratori ad ultrasuoni

Larger number of measuring paths - greater measuring accuracy at varying Reynolds number

Fig. 9 shows on the left in each case the position of the measuring paths, and on the right a longitudinal section through the tube with implied laminar and turbulent flow profiles in the tube centreline. The values sensed by the measuring beams at laminar flow are marked with dots on the respective profile line.



Single-beam ultrasonic flowmeters, at the top in Fig. 9, are used mostly for turbulent flows, e.g. for water. They show an error of measurement of approx. 30% at the transition from turbulent to laminar flow.

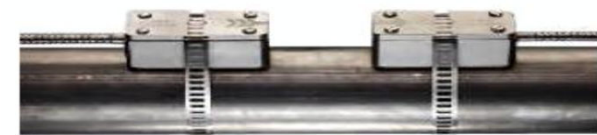
Dual-beam ultrasonic flowmeters, Fig. 9 (centre), show an error of measurement of only 0.5% at this turbulent/laminar transition. They have been used for more than 15 years for process measurements. They are also used for monitoring officially calibrated differential-pressure flowmeters that are subject to wear from the dirt particles in crude oil and then have noticeable measurement errors.

The ALTOSONIC V ultrasonic volumetric meter with 5 measuring paths (at the bottom in Fig. 9) senses

the flow profile so well that it can completely compensate for its effects on measuring accuracy and also, given changes from "laminar" to "turbulent", stays well within its allowable error of measurement of $\pm 0.15\%$.

Sensibilità al profilo del flusso

Si possono usare più traiettorie e mediare i risultati ottenuti



Misuratori a distacco di vortici

Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno di distacco di vortici (karman vortex) a valle di un corpo solido dai bordi smussati immerso in una vena fluida investito da un flusso stazionario.

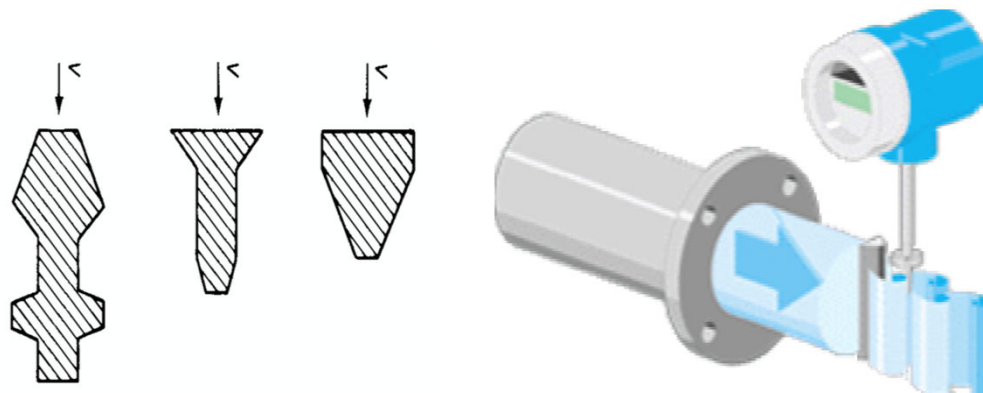
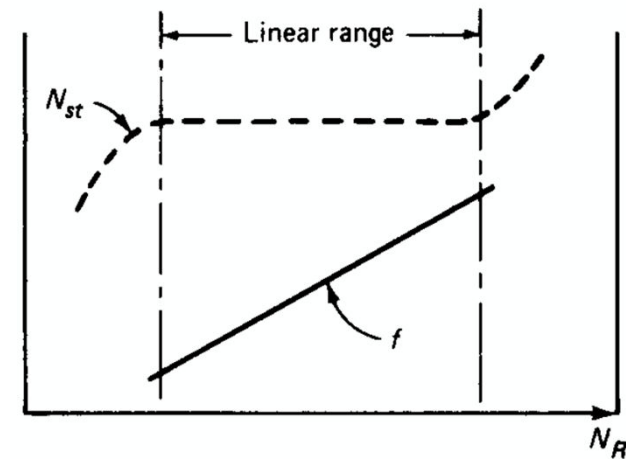
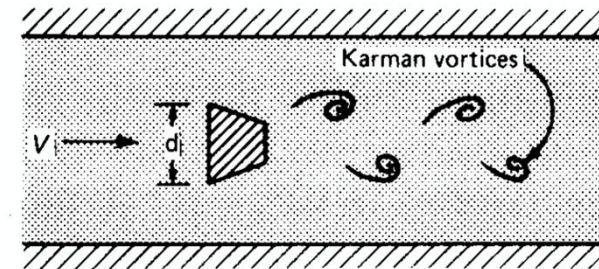
Se Reynolds > 10000 si ha formazione di vortici con frequenza di distacco:

$$f = \frac{(N_{st} V)}{d}$$

Per opportune forme del corpo $N_{st} = \text{cost}$ su un vasto intervallo di Reynolds

Quindi f proporzionale a V

Ci sono diverse forme per i corpi da cui si ha il distacco di vortici.



Misuratori a distacco di vortici

Per la misura della frequenza si possono usare materiali piezoelettrici, piezoresistivi, si può monitorare l'interruzione, dovuta al passaggio dei vortici, di fasci ultrasonici.

Quello in figura avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico

Applicazioni e vantaggi

Misure volumetriche di vapore, gas e liquidi

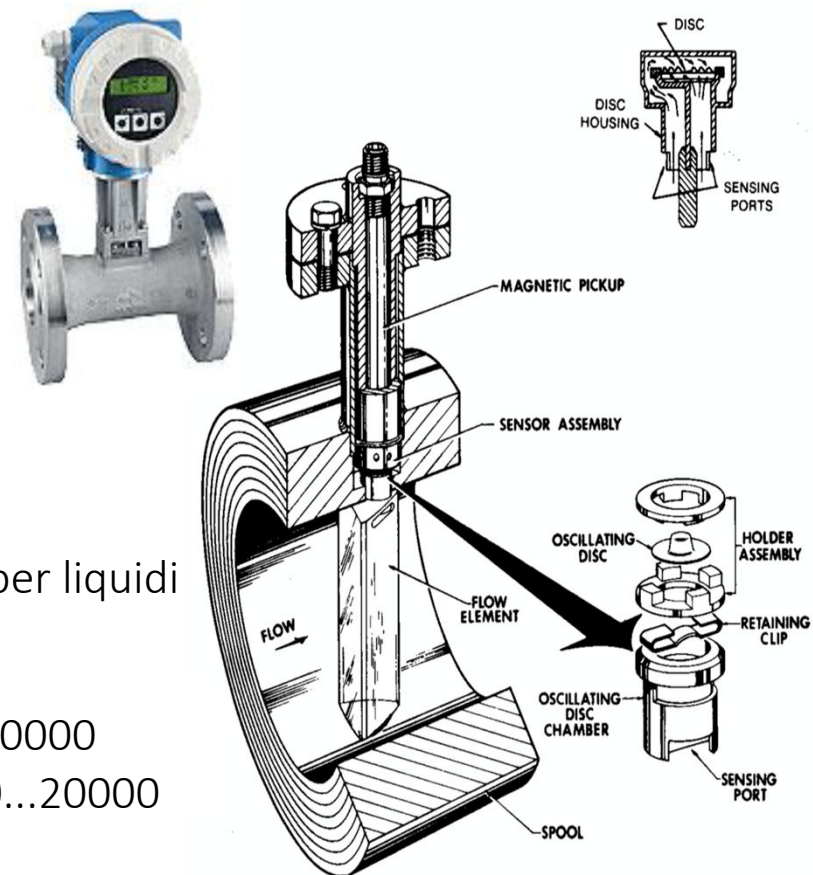
Non hanno bisogno di ricalibrazione

Minime perdite di pressione

Campo d'impiego 15:1 per gas e vapore, 40:1 per liquidi

Errore: Liquidi: $< 0.75\% \text{ o.r. } Re > 20000$
 $< 0.75 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$

Gas/vapore: $< 1\% \text{ o.r. } Re > 20000$
 $< 1 \text{ o.f.s } Re \text{ tra } 4000 \dots 20000$



Misuratori di portata laser

Anemometro laser - doppler:

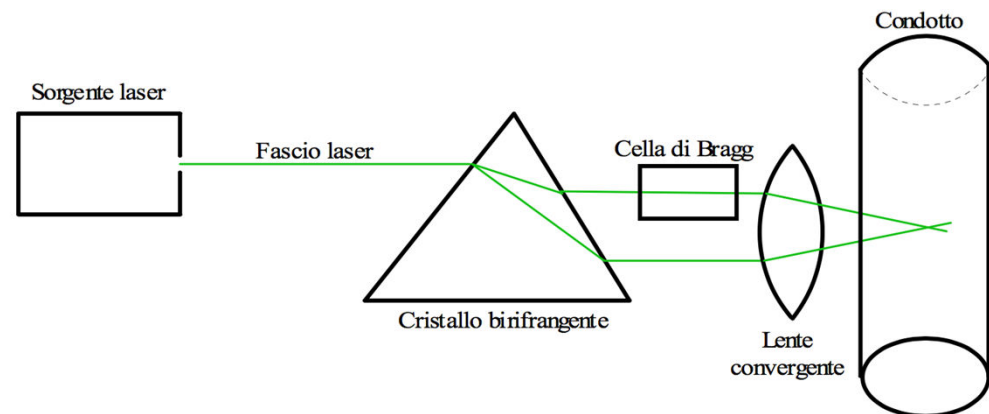
è uno strumento per la misura della velocità puntuale di un fluido. Lavora con **due sorgenti laser perfettamente in fase**.

Un **sistema di lenti** focalizza i due fasci laser facendoli convergere in un punto all'interno del fluido di cui si vuole misurare la velocità.

Nel punto in cui i due fasci laser interagiscono si creano frange di interferenza, ovvero **bande alternativamente buie e luminose** dovute all'interferenza rispettivamente distruttiva e costruttiva della luce laser.

Se si pone in questa zona il fluido che scorre, le **impurità** presenti nel liquido verranno **illuminate e oscurate**, in corrispondenza delle frange chiare e scure.

Tramite un **cannocchiale**, focalizzato nella zona di interferenza, si ottengono in uscita dei segnali di intensità proporzionale alla luce ricevuta dal cannocchiale. **Maggiore è la velocità del fluido maggiore sarà il susseguirsi degli impulsi.**

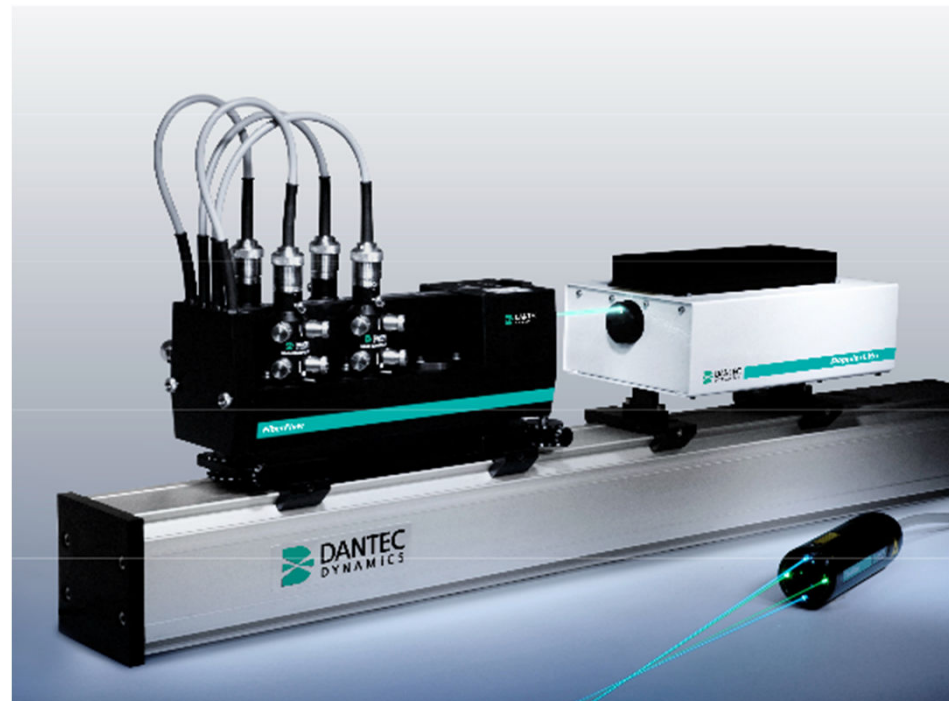


Misuratori di portata laser

I principali **svantaggi** di questo sistema di misurazione sono:

- l'elevato costo (anche 50.000€);
- il fatto che per effettuare la misura è necessario che fluido e condotto siano perfettamente trasparenti.

Nonostante ciò è uno strumento di **altissima precisione** nella misura della velocità, poiché riesce ad analizzare un'**area ristrettissima** (praticamente puntiforme) del condotto dal momento che la misura viene effettuata nel punto d'intersezione dei raggi laser.



Misuratori di portata laser

PIV (Particle Image Velocimetry):

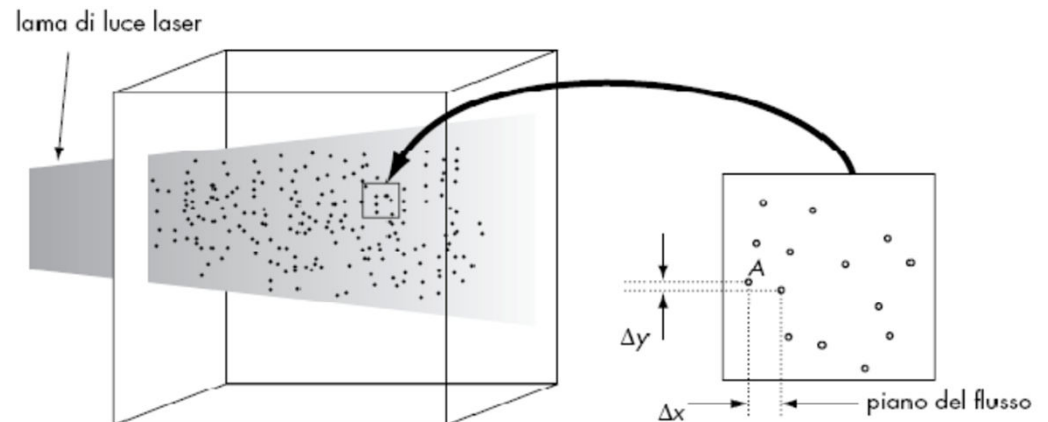
è una tecnica di misura di tipo quantitativo, più **sofistica** dell'anemometro laser-doppler, basata sulla **cross-correlazione di immagini digitali**.

Il **flusso viene inseminato** con delle **particelle traccianti** (seeding) con densità più prossima possibile a quella del fluido da studiare (spesso si usano vapori di olio), in modo da seguirne quanto più possibile il moto.

Si illumina la sezione da esaminare con **due impulsi consecutivi e ravvicinati di luce laser**, convertiti tramite un apparato ottico in **lame di luce**.

Le **particelle rifrangono la luce**, che viene catturata da una **telecamera**, con l'aiuto di un **sincronizzatore**.

Si ottengono così **due immagini della posizione**.



Δt = intervallo di tempo tra due impulsi

Δx = spostamento della particella in direzione x

Δy = spostamento della particella in direzione y

velocità in A

$$u_x = \Delta x / \Delta t \text{ per } \Delta t \rightarrow 0$$

$$u_y = \Delta y / \Delta t \text{ per } \Delta t \rightarrow 0$$

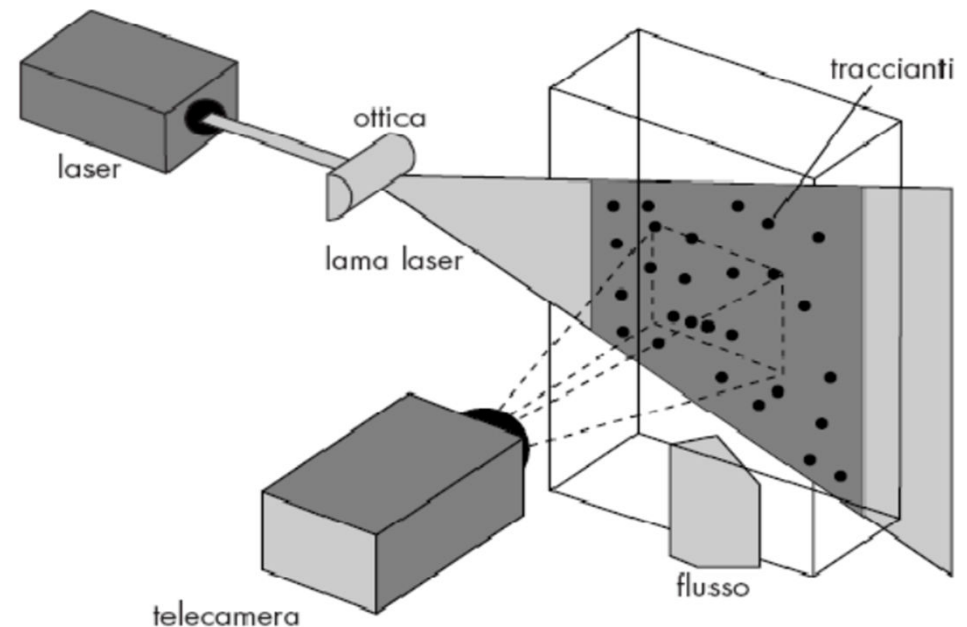
Misuratori di portata laser

Vantaggi:

- sistema molto preciso;

Svantaggi:

- molto costoso;
- la tubazione deve avere un accesso ottico trasparente;
- difficoltà riguardanti la concentrazione di particelle; poche particelle descrizione del campo di moto non esauriente mentre se le particelle sono troppe sarà difficile identificarle nelle immagini;
- non si possono misurare le componenti di velocità ortogonali al piano laser (campo di velocità solo bidimensionale);



Misuratori massico Coriolis

Principio di funzionamento

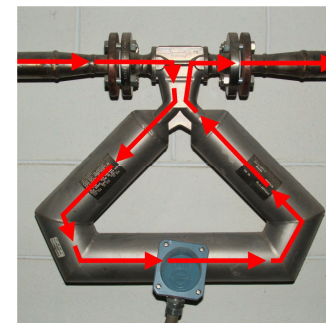
Il principio di funzionamento si basa sulla generazione controllata di forze di Coriolis. La forza di coriolis è presente ogni qualvolta abbiamo la sovrapposizione di un moto rotatorio e di una traslazione

$$\vec{F} = -2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

F_c è la forza di Coriolis, m è la massa del corpo che si muove con velocità v rispetto al sistema di riferimento non inerziale rotante, \mathbf{X} rappresenta il prodotto vettoriale e ω è la velocità angolare del sistema non inerziale, misurata rispetto a un sistema inerziale.

Il tubo è mantenuto in vibrazione flessionale stazionaria con un regime sinusoidale (alla frequenza propria di 50 – 80 Hz, modellandolo come una mensola) da un sistema elettromagnetico retroazionato (lavora sempre alla frequenza propria della mensola e quindi con richiesta di potenza minima).

Il fluido deve sentire una velocità angolare ω il cui vettore sia perpendicolare alla velocità v del fluido
(in questo caso è un movimento oscillatorio prodotto dalla flessione del tubo a C attorno ai suoi supporti). (Video Emerson)



Misuratori massico Coriolis

ω è vista come la rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso e la velocità del fluido è rappresentata da V assunta costante sul profilo.

Un elemento di massa dM causa una forza: $dM(2 \omega \times V)$

V cambia di segno tra un ramo e l'altro quindi si genera una coppia torsionale d'inerzia dT :

$$dT = 2(2 \omega \times V)(dM)d = 2(2 \omega \times V)(G/V d\rho)d$$

$$T = \int_0^L dT = 4\omega Gd \int_0^L d\rho = 4Ld\omega G$$

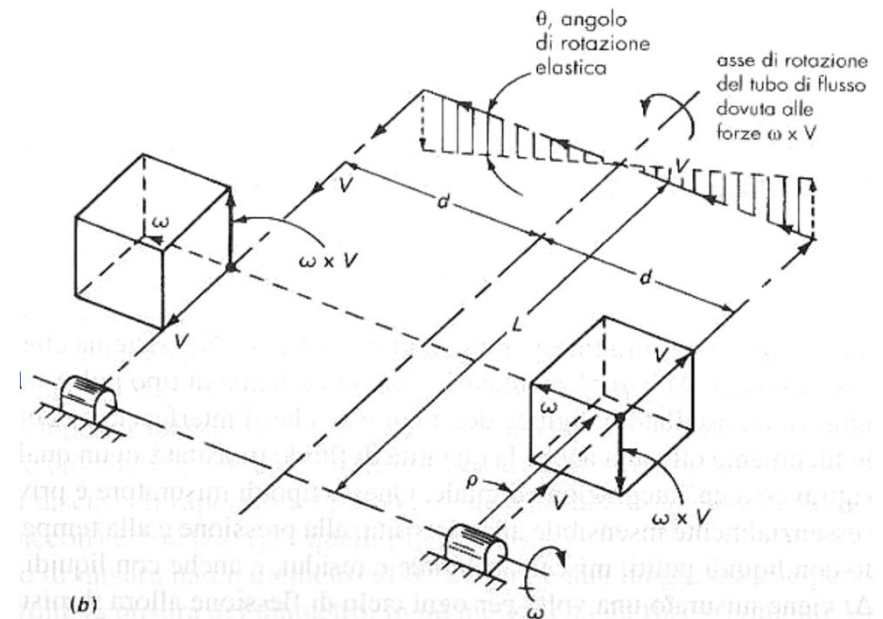
G : portata di massa, ricordando che $T=Ks \cdot \theta$

K_s : modulo elastico condotto

$$\theta = \frac{4Ld\omega}{K_s} G \quad \text{Per piccoli spostamenti}$$

I trasduttori di spostamento generano un impulso quando la tubatura passa in corrispondenza della loro posizione

Quindi attraverso la misura del Δt tra un impulso e l'altro abbiamo una misura lineare della portata in massa.



Deformazione del tubo

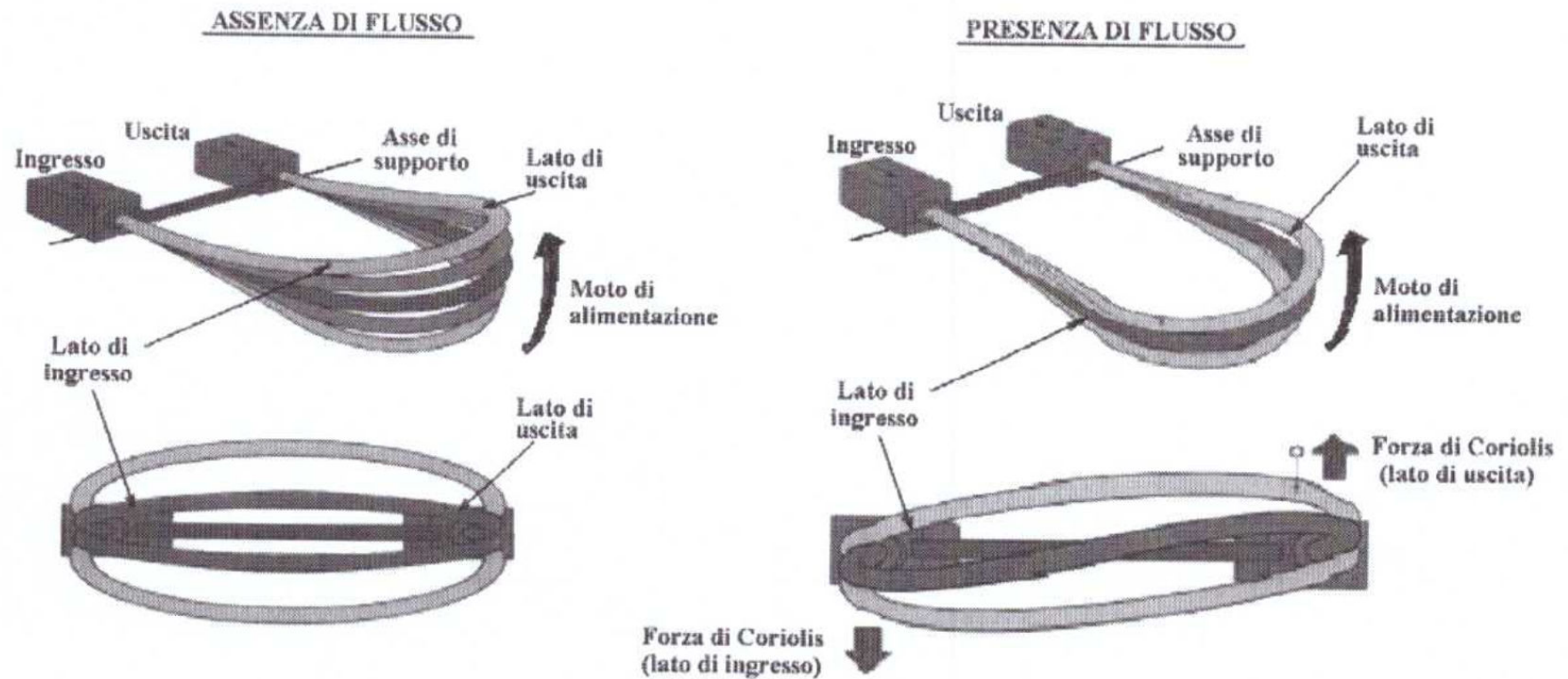


Figura 2.32 – Deformazioni indotte nella tubazione di misura

Tipologie costruttive

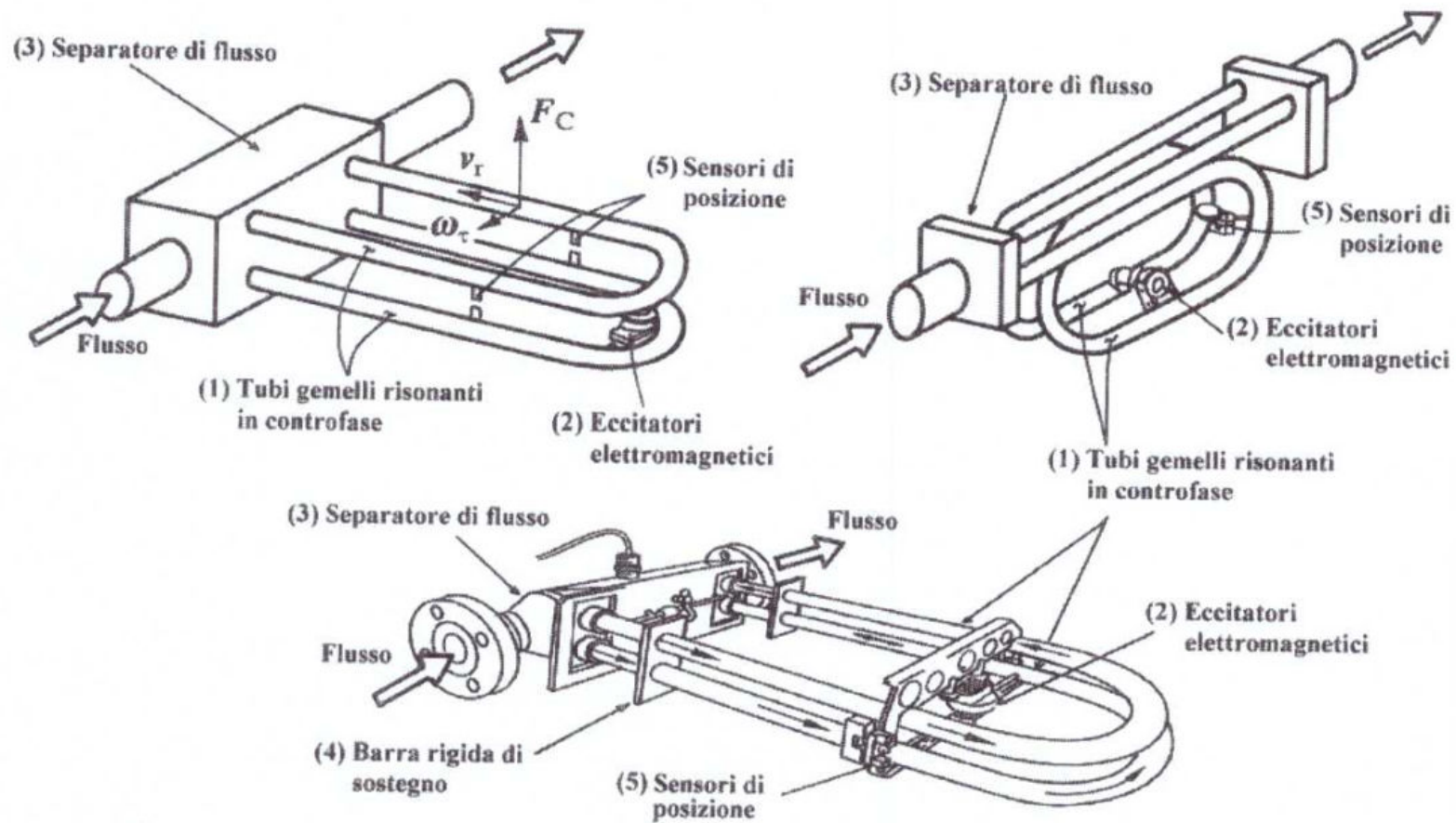


Figura 2.33 – Differenti tecnologie costruttive dei misuratori ad effetto Coriolis

Misuratori massico Coriolis

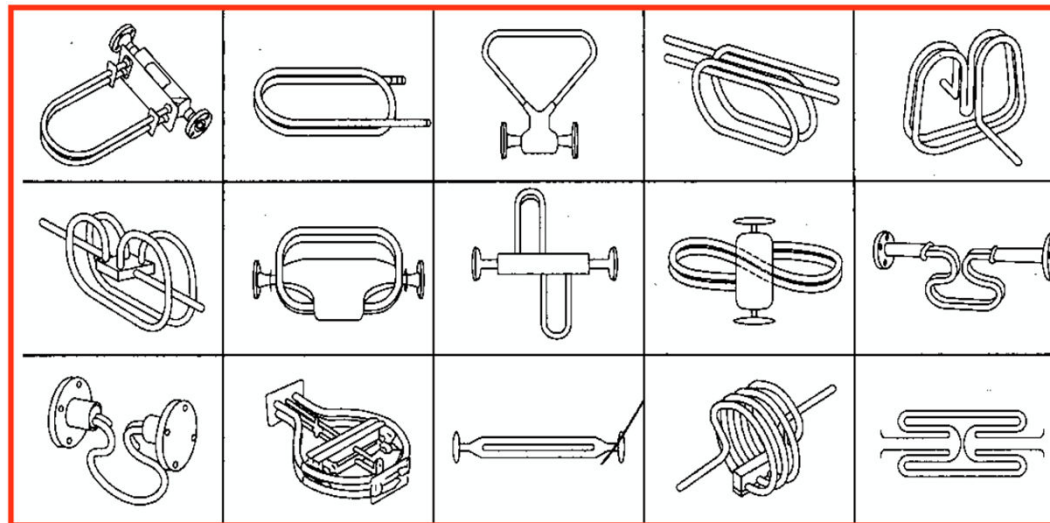
A causa di θ ci sarà un Δt tra i due segnali:

$$\theta = \frac{L\omega\Delta t}{2d}$$

Combinando le due equazioni (1) e (2):

$$G = \frac{K_S}{8d^2} \Delta t$$

Possibili geometrie dei misuratori Coriolis



- Privo di ostruzioni
- Insensibile alla viscosità, alla pressione e alla temperatura
- Si può usare con liquidi puliti, miscele, schiume, residui e liquidi contenenti gas.

Misuratori massico Coriolis

Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser Yokogawa)

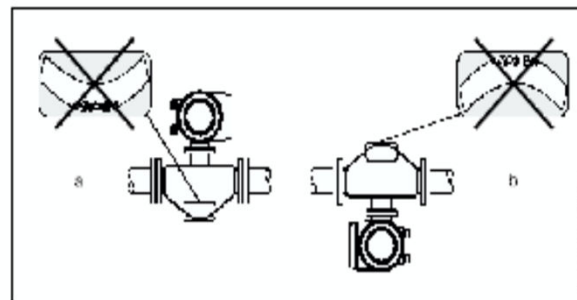
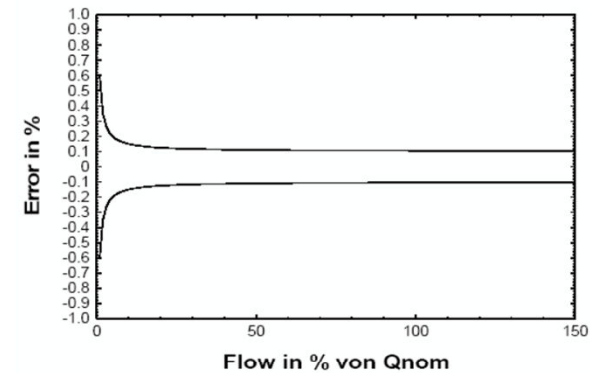
Range di portata: fino a 2200 t/h

Range di temperatura: -40 a 150°C (possibilità di elettronica separata -200°C a 150°C).

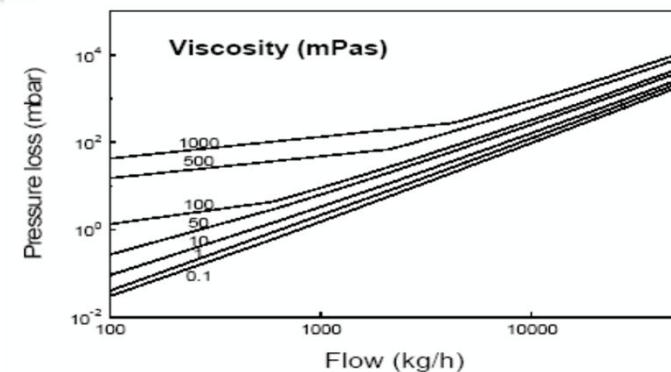
Uscita: 4 – 20 mA

Alimentazione: 220 VAC

Errore: Liquidi: $\pm 0.1\%$ o.r.
Gas: $\pm 0.5\%$ o.r.



a: Not suitable for fluids with entrained solids (risk of solids accumulating).
b: No suitable for gas/liquid. Must be installed vertically.



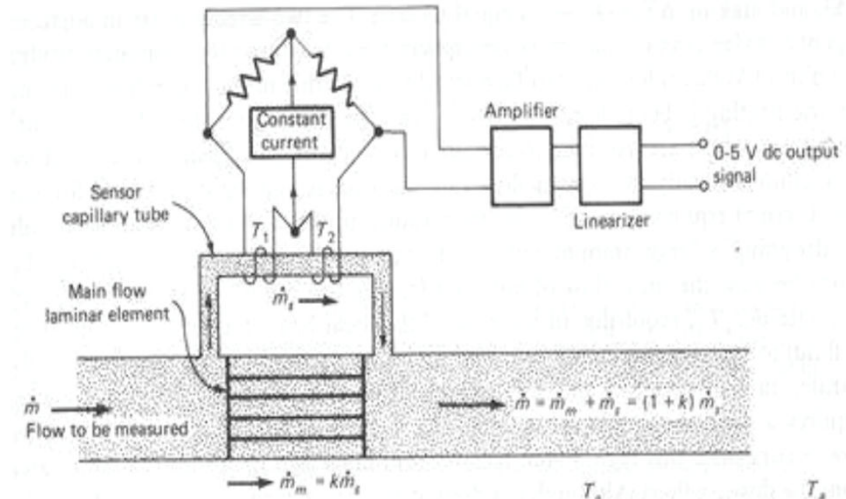
Misuratori massico termico

Principio di funzionamento (corrente costante)

Il principio di funzionamento si basa sui principi della trasmissione di calore.

Il misuratore riportato in figura sfrutta il sistema del bypass.

Viene misurata solo una frazione della portata totale, in questo modo possiamo fare misure di portata maggiore con un misuratore più piccolo ed economico



Il tubo capillare ha diametro di 0.787 mm e lunghezza tra 50 e 100 volte il diametro (portata = 20 cm³/min).

Entrambe le zone sono progettate per avere flusso laminare Vengono usate canalette sottili di sezione rettangolare.

Ci sono due avvolgimenti elettrici posti attorno alla superficie esterna del sensore a tubi che fanno sia da riscaldatori (heater) che da sensori di resistenza-temperatura e forniscono una quantità di calore costante al tubo per qualsiasi valore di portata.

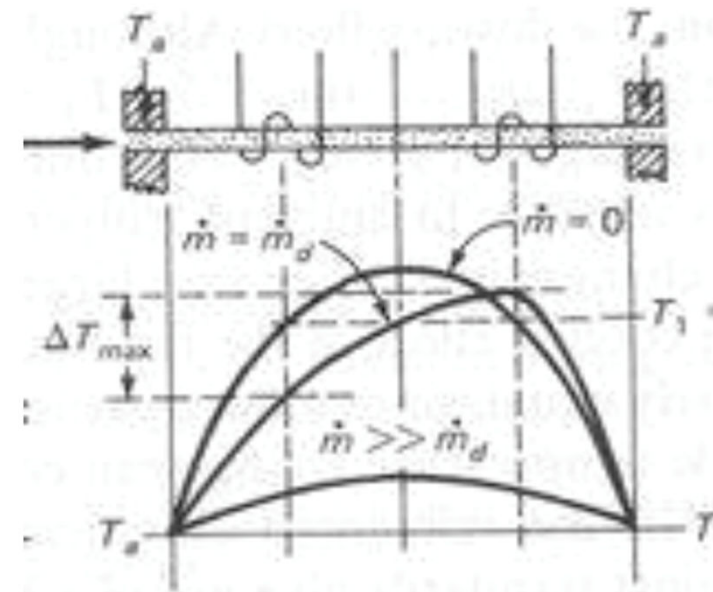
I due avvolgimenti sono su due lati adiacenti di un circuito a ponte e le resistenze del ponte sono tali che questo sia bilanciato per una portata nulla.

Misuratori massico termico

Per una portata nulla il sistema è “termicamente simmetrico”.

Tutto il calore fornito dalle resistenze elettriche viene utilizzato per bilanciare la perdita di calore del tubo verso lo spazio circostante che si suppone rimanga a temperatura T_a ($T_1 - T_2 = 0$).

In fig è rappresentata la temperatura del tubo alle varie portate.



- Facciamo fluire una portata m
- Il flusso, inizialmente a temperatura T_a , riceve calore dal tubetto, si scalda e lasciando la prima zona si porta via energia secondo: $m c p T_1$
- T_1 diminuisce (vedi grafico)
- La diminuzione di T_1 è proporzionale a m
- Il ponte si squilibra, si genera un nuovo equilibrio termico.
- T_2 resta circa costante perché riceve e perde più o meno la stessa quantità di calore dal fluido che scorre.
- Se la portata \gg della portata di progetto l'effetto di raffreddamento del fluido rende T_1 e T_2 molto basse e simili (si raffreddano entrambe).
- La portata in massa è legata a T_1 ma è meglio utilizzare il segnale $T_2 - T_1$ (reso disponibile dal circuito a ponte) perché dà uscita nulla per portata nulla e rende lo strumento meno sensibile alla temperatura esterna (T_1 e T_2 risentono nello stesso modo della variazione di T_a).

Misuratori massico termico

Caratteristiche tecniche (temperatura costante)

https://www.youtube.com/watch?v=-VULOxWfUeY&feature=emb_rel_end

Il flusso passa su due termoresistenze PT100

Una è usata come sensore di temperatura di riferimento e legge la temperatura del fluido

l'altra funziona da heater; facendo variare la corrente al suo interno, è mantenuta ad una differenza di temperatura costante rispetto alla prima.

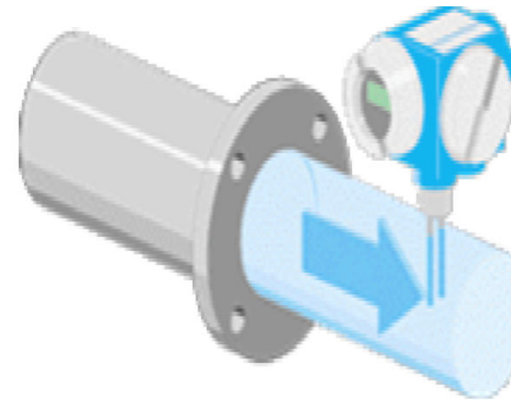
Maggiore è la portata che fluisce, maggiore è la quantità di calore asportata dal fluido e maggiore è la corrente da spendere per mantenere la differenza di temperatura tra le due PT100 costante.

$$Q = mc_p \Delta T = RI^2$$

Misurando la corrente richiesta per mantenere il profilo voluto ho una misura della portata m che sta fluendo.

Migliora la linearità e il tempo di risposta.

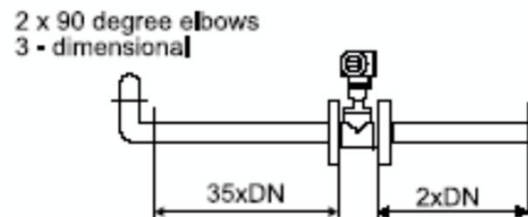
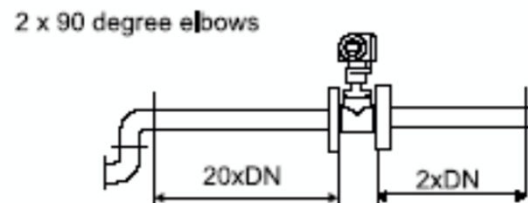
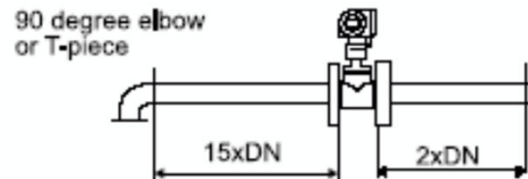
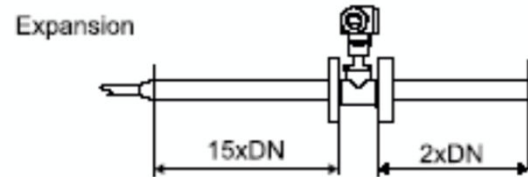
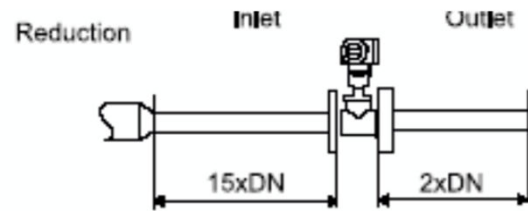
Flanged version,
DN 15...150



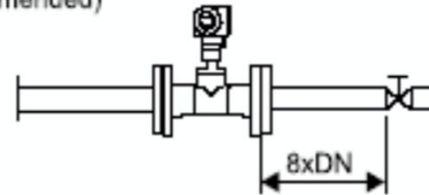
Insertion version for
large pipe diameters, DN
80...1000



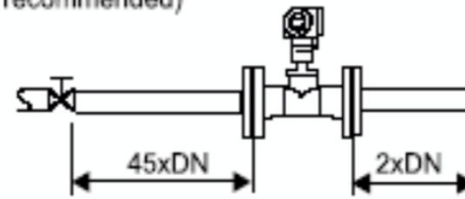
Misuratori massico termico: installazione



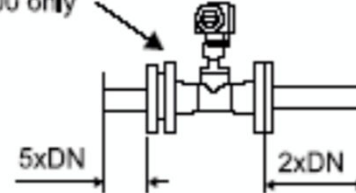
Control valve downstream of meter
(recommended)



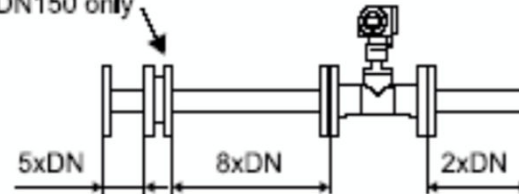
Control valve upstream of meter
(not recommended)



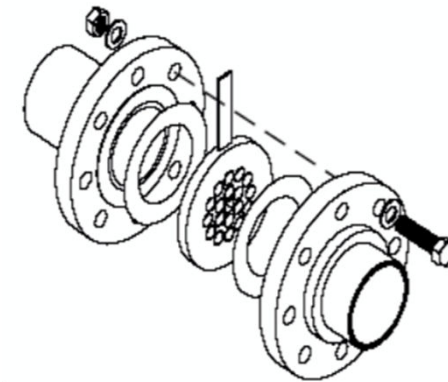
With AZT534 flow conditioner
DN25 to DN100 only



With AZT532 flow conditioner
DN150 only



Quando il diametro del tubo è largo e ci sono problemi di spazio di può usare un condizionatore di flusso che consente di ridurre i diametri a monte



Misuratori massico termico

Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser)

Errore: $\pm 2\% R \pm 0.5\% FS$

Range di temperatura: $-10 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$

Rangeability: 100 : 1

Uscita: 4 – 20 mA

Aliment.: 20 – 30 VDC

Consumo: $< 3W$



Caratteristiche tecniche (Honeywell)

Errore: $\pm 1\%$ o.f.s.

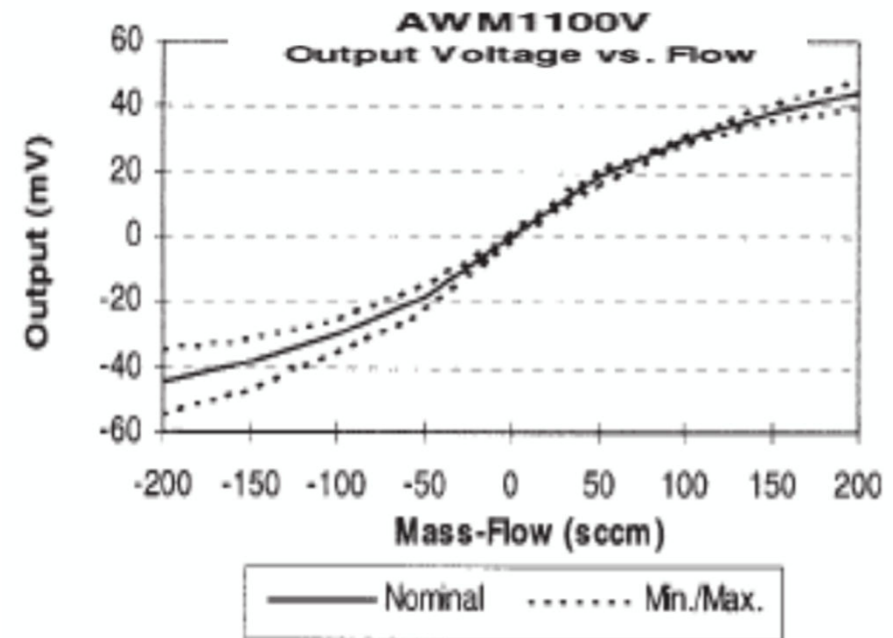
Range di portata: $-600 \dots +1000 \text{ sccm}$

Range di temperatura: $-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$

Uscita: mV

Alimentazione: 8-15 VDC

Consumo: 30 mW



Fonti

- Si ringrazia Federico Ustolin per il supporto dato nella preparazione della presentazione
- Prof. M. De Lucia – Università di Firenze
- Prof. C. Cinelli – Università di Firenze
- Paul G. Honchar, “Diaphragm Meters Applications, Installations and Maintenance”;
- Echo Energy Solutions s.r.l. – “Misure della velocità dell’aria ambiente”;
- Naumchik I.V., Kinzhagulov I.Yu., Kren A.P., Stepanova K.A. (2015). "Mass flow meter for liquids.". Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 15 (5): 900–906;
- Sandro Longo, Marco Petti, “Misure e Controlli Idraulici”, McGraw-Hill, 2006;
- PCE Instruments;
- Giuseppe Leo Guizzi, Università degli studi di Roma Tor Vergata, “Misure, controllo e diagnostica dei sistemi energetici”;
- Instrumentation and control engineering – “Hot wire anemometer”;
- Purdue University – School of Aeronautics and Astronautics, “AAE 520 Experimental Aerodynamics – Hot-wire anemometer”;
- Dante Dynamics - “The Laser Doppler Anemometer for two velocity component measurements”;
- R. Montanini, Università degli studi di Messina – Appunti del corso di Misure meccaniche e termiche, “Misure di portata e di velocità dei fluidi”.