



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

MISURE MECCANICHE TERMICHE E COLLAUDI

MISURE DI PORTATA

Prof. Marco Bogar

A.A. 2024-2025

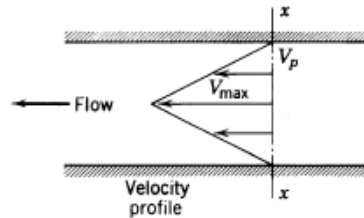
Introduzione

La portata è definita come la misura della quantità di fluido che attraversa una sezione A nell'unità di tempo. La portata corrisponde ad una classe di grandezze fisiche (quali una quantità chimica, una massa o un volume ad esempio). Si nota quindi come la portata sia legata alla velocità media del fluido:

$$\frac{\rho V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v_p dA \rightarrow \bar{v} = \frac{\int v_p dA}{A}$$

Inoltre:

$$\dot{m} = \rho A \bar{v} = \text{costante}$$



Introduzione

Nel tempo sono stati sviluppati uno svariato numero di strumenti per la misura della portata

Portata volumetrica

A caduta di
pressione variabile
e ad area costante

A turbina

Tubo di Pitot

A caduta di
pressione costante
e ad area variabile
(rotametri)

Laser

A distacco di vortici

A ultrasuoni

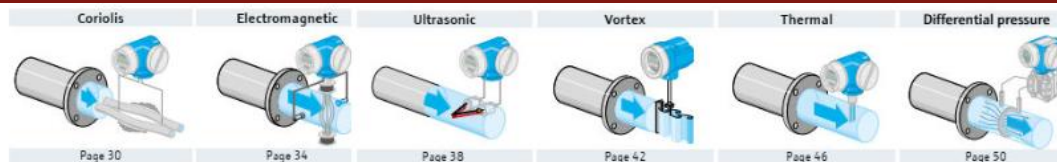
Elettromagnetici

Portata massica

Misuratori di
Coriolis

Misuratori
termici

Introduzione



Liquid applications

	Coriolis	Electromagnetic	Ultrasonic		Vortex	Thermal	Differential pressure
▪ Liquids in general (e.g. water)	✓✓	✓✓	Inline ✓✓	Clamp on ✓✓	✓✓	✓	✓✓
▪ 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

	Coriolis	Electromagnetic	Ultrasonic		Vortex	Thermal	Differential pressure
▪ 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

	Coriolis	Electromagnetic	Ultrasonic		Vortex	Thermal	Differential pressure
▪ 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

	Coriolis	Electromagnetic	Ultrasonic		Vortex	Thermal	Differential pressure
▪ 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

Introduzione

Tali strumenti possono operare in due principali regimi di funzionamento: le misure di portata dirette e indirette.

Nelle misure di portata **dirette**, la portata viene misurata direttamente:

- Come portata volumetrica $\dot{q} = A\bar{v} \left(\frac{m^3}{s} \right)$ (es. contatore del gas)
- Come portata massica $\dot{m} = \rho A\bar{v} \left(\frac{kg}{s} \right)$

Queste due grandezza sono facilmente relazionabili tra loro tramite la relazione tra densità, massa e volume: $\dot{m} = \rho \dot{q}$

Le misure di portata **indirette** sono invece riconducibili:

- Ad una misura di pressione differenziale, dalla quale si può ricavare l'energia cinetica del fluido ($E_k = \rho c^2 / 2$) e, conseguentemente, la portata
- Ad un conteggio
- Ad una misura di frequenza

Introduzione

Indipendentemente dal tipo di sensore impiegato, la misura della portata è disturbata dall'insieme dei seguenti fattori:

- velocità non omogenea del fluido all'interno della condotta a causa del percorso (presenza di curve, variazioni di diametro, ostacoli, raccordi,...)
- presenza di un gradiente di velocità lungo la sezione trasversale del tubo non omogeneo
- variazioni di densità e viscosità dovute alle variazioni della temperatura
- Impossibilità di taratura dei sensori

L'insieme di queste fonti di errore rendono difficili gli studi di bilancio di massa all'interno degli impianti

Introduzione

Un'ulteriore parametro da considerare nella misura della portata è infine il numero di Reynolds (Re), il numero adimensionale impiegato in fluidodinamica, ottenuto dal rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi:

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

oppure

$$Re = \frac{v L}{\nu}$$

Dove: v è la velocità del fluido, μ , ν e ρ sono rispettivamente la sua viscosità dinamica, viscosità cinematica e densità, mentre L è nota come lunghezza caratteristica del fenomeno considerato ed equivale a $2r$ se la sezione del condotto è circolare, o al diametro equivalente $D_e = 4S/P$, con S e P sezione e perimetro bagnato.

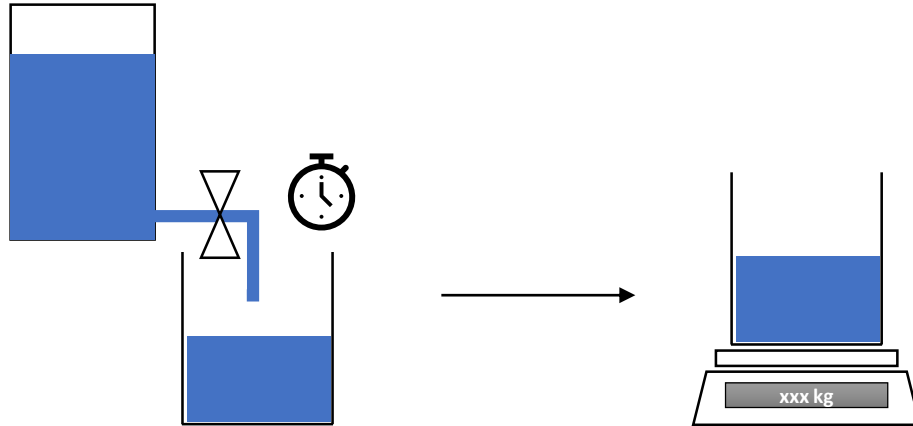
Re indica se il fluido si propaga in regime laminare o turbolento. In un condotto un fluido si considera in regime laminare se $Re < 2000$, turbolento se $Re > 10000$. Per valori intermedi si indica che il fluido si trova in regime di transizione.

La misura della portata

Poiché Il concetto di portata si lega alla legge di conservazione della massa:

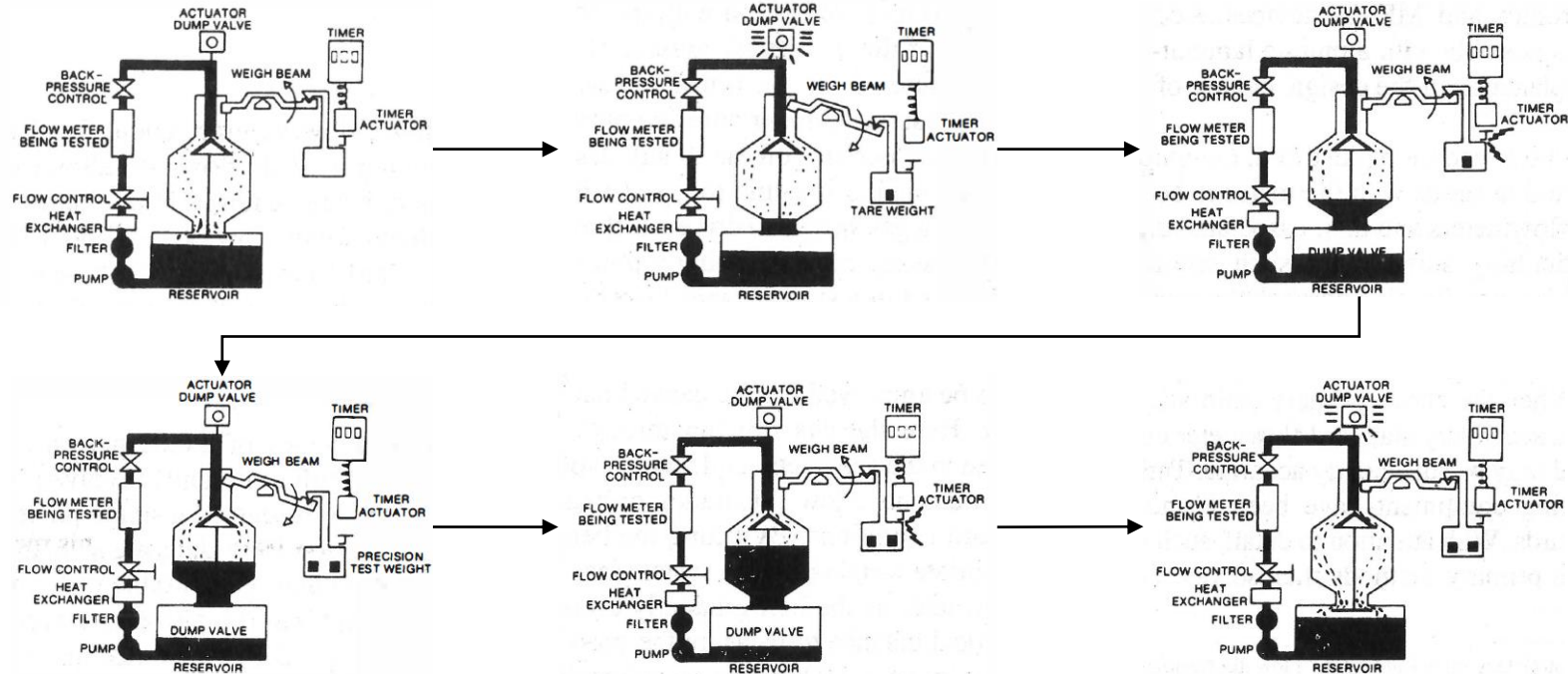
$$\frac{M_{in}}{\Delta t} = \frac{M_{out}}{\Delta t} \leftrightarrow \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \leftrightarrow \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{in} = \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{out}$$

Da questa definizione, si può illustrare il metodo più semplice ed efficace per la misura della portata nei fluidi (non universale, difficilmente applicabile ai gas ad esempio):



La misura della portata

Per quanto semplice questo concetto sta alla base dei metodi di calibrazione dei misuratori di portata



Misura di portata volumetrica



Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

Ad ostruzione e a flusso laminare
(area costante, misura di pressione differenziale)

A tubo di Pitot

Rotametri
(misuratori a caduta ad area variabile)

A turbina

Anemometri

A distacco di vortici

Misuratori ad ultrasuoni

Misuratori elettromagnetici

Misuratori ottici

Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

Ad ostruzione e a flusso laminare
(area costante, misura di pressione differenziale)

A tubo di Pitot

Rotametri
(misuratori a caduta ad area variabile)

A turbina

Anemometri

A distacco di vortici

Misuratori ad ultrasuoni

Misuratori elettromagnetici

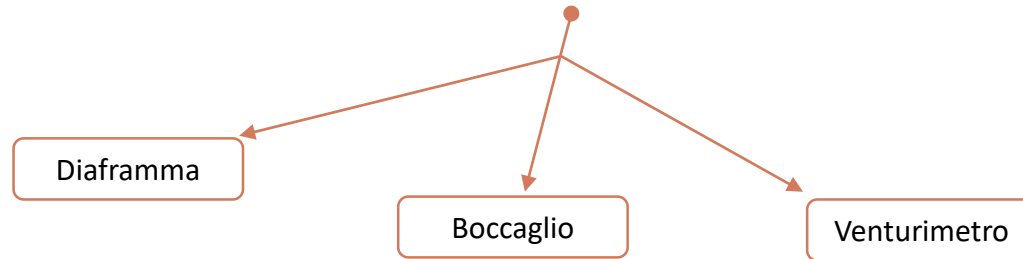
Misuratori ottici

Misuratori ad ostruzione (area costante, caduta di pressione variabile)

Metodo di misura comunemente usato, si fa uso di una restrizione dell'area libera di efflusso nella condotta che trasporta il fluido.

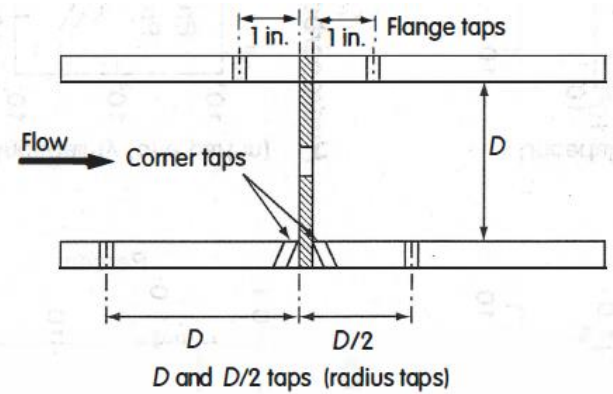
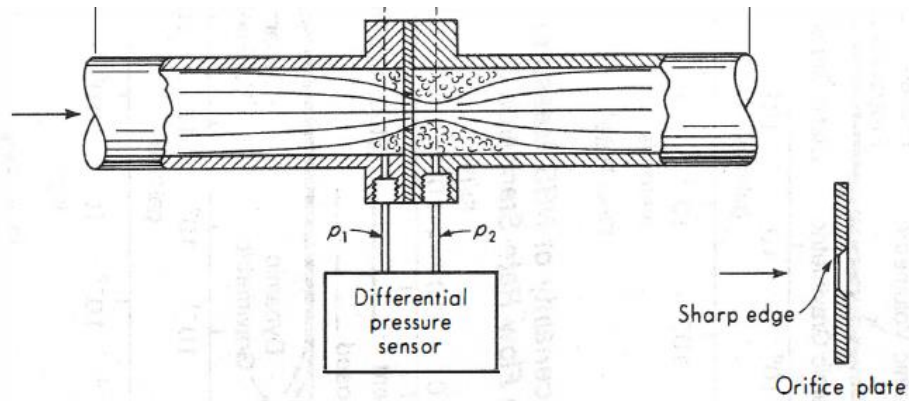
Questo restringimento del flusso causa una caduta di pressione che dipende dalla portata.

Rilevando la caduta di pressione, si risale quindi alla portata



Questo tipo di strumenti vengono solitamente inseriti in linea, in rami appositamente predisposti per la misura della portata.

Misuratore di portata a diaframma



Misuratore di portata a diaframma

Per fluidi incomprimibili, che si propagano lungo una sola direzione ed in assenza di attrito, scambi di calore o variazione di quota, dalla legge di conservazione della massa:

$$\dot{m} = \rho \bar{v}_1 A_{1,f} = \rho \bar{v}_2 A_{2,f} \rightarrow \bar{v}_1 = \bar{v}_2 \frac{A_{2,f}}{A_{1,f}}$$

Mentre, essendo per la legge di Bernoulli $p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{costante}$:

$$p_1 + \rho \frac{\bar{v}_1^2}{2} + \rho gh_1 = p_2 + \rho \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \rho gh_2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2) + \rho g \Delta h \Big|_{\Delta h=0} = \frac{\rho}{2} \bar{v}_2^2 \left(1 - \left(\frac{A_{2,f}}{A_{1,f}} \right)^2 \right)$$

$$Q = \bar{v}_2 A_{2,f} = \frac{A_{2,f}}{\sqrt{1 - (A_{2,f}/A_{1,f})^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Misuratore di portata a diaframma

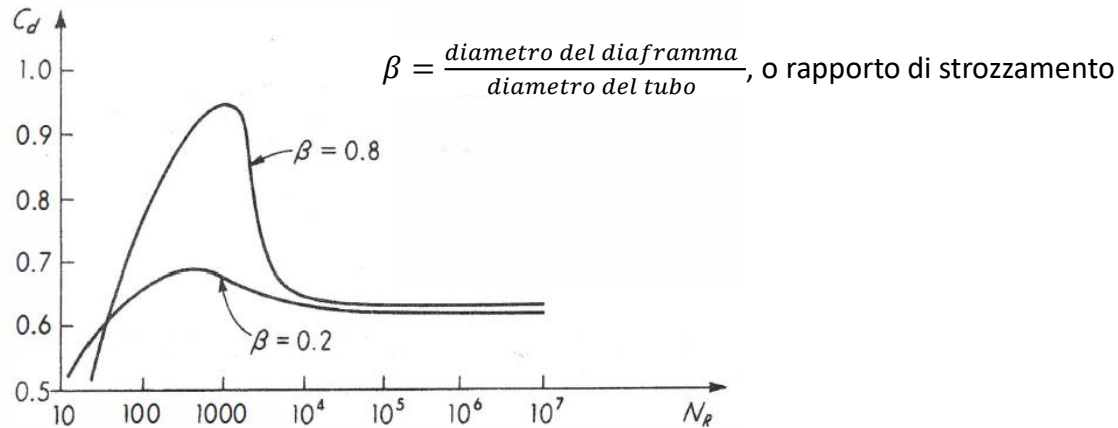
$$Q = \frac{A_{2,f}}{\sqrt{1 - (A_{2,f}/A_{1,f})^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Nella relazione caratteristica del misuratore di portata le aree $A_{i,f}$ rappresentano le aree della sezione trasversale del flusso ma non quella della sezione della condotta o del diaframma. È pertanto necessario introdurre il coefficiente di efflusso, C_d , che mette in relazione la portata reale e del dispositivo con quella teorica. In questo modo nella relazione per il calcolo della portata, si possono introdurre le sezioni (note) di condotta e disco del diaframma.

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

Misuratore di portata a diaframma

Il coefficiente di efflusso viene definito grazie un processo di taratura (univoco) e, per fluidi incompressibili, il suo valore è funzione sia del rapporto di strozzamento, β , sia del numero di Reynolds. Per fluidi comprimibili, il suo valore dipende dal numero di Reynolds, dal rapporto tra le pressioni e dall'esponente isoentropico del gas.

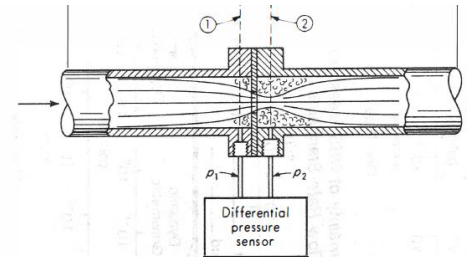


Misuratore di portata a diaframma – fluidi comprimibili

Per fluidi comprimibili l'equazione caratteristica dei misuratori a portata ($Q = f(C_d, A_1, A_2, \Delta p, \rho)$) non è più valida, in quanto la densità cambia tra i punti di misura 1 e 2. In condizioni isoentropiche, la portata (massica) può essere ottenuta dalla relazione:

$$Q_m = \frac{\alpha C Y_1 F_a d_2^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(p_1 - p_2) \rho_1}$$

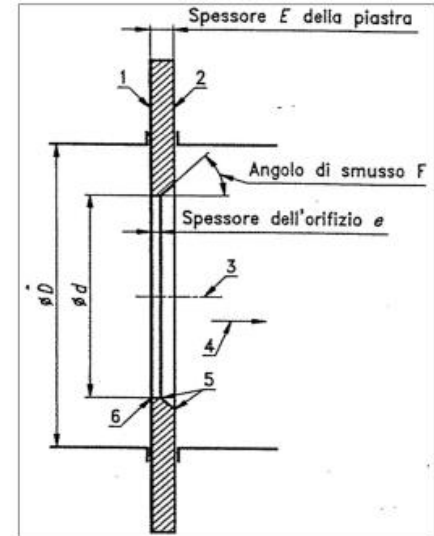
Dove: C è un coefficiente di efflusso ottenuto per via empirica (non ottenuto tramite un processo di taratura), α coefficiente specifico dello strumento, F_a tiene conto delle dilatazioni termiche del diaframma (tabulato, in base al materiale), ed Y_1 è un coefficiente di comprimibilità (unitario per i liquidi).



Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi

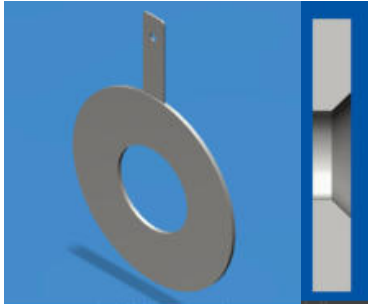
Le caratteristiche geometriche e di installazione dei diaframmi sono opportunamente normati (UNI EN ISO 5167) in relazione a:

- natura del fluido
- condizioni di flusso
- specifiche circuitali necessarie da rispettare a monte e a valle del diaframma
- geometrie dei condizionatori di flusso
- circolarità del condotto
- geometria del dispositivo
- disposizione delle prese di pressione

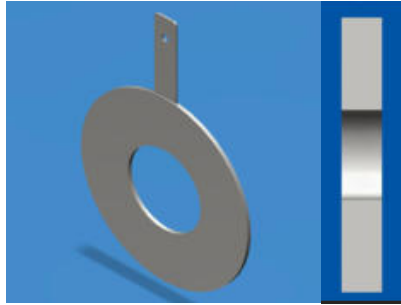


Misuratore di portata a diaframma – Diaframmi secondo la ISO 5167

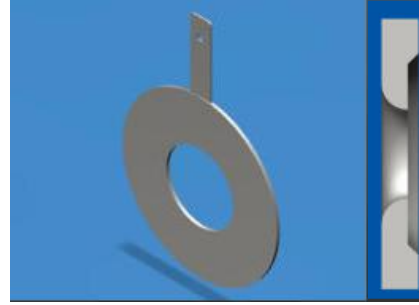
Diaframma classico



Diaframma simmetrico



Diaframma a quarto di cerchio



Impiegati in fluidi molto viscosi, su tubazione con piccoli diametri (> 25 mm) e su fluidi con basso numero di Reynold

Diaframma eccentrico



Impiegato in applicazioni in cui i fluidi possono avere solidi in sospensione, in caso di gas contenente liquidi e in caso di misura su tubazione orizzontale. Geometria di costruzione opposta (alto-basso) applicata su liquidi con gas (alto) o liquidi con solidi (basso).

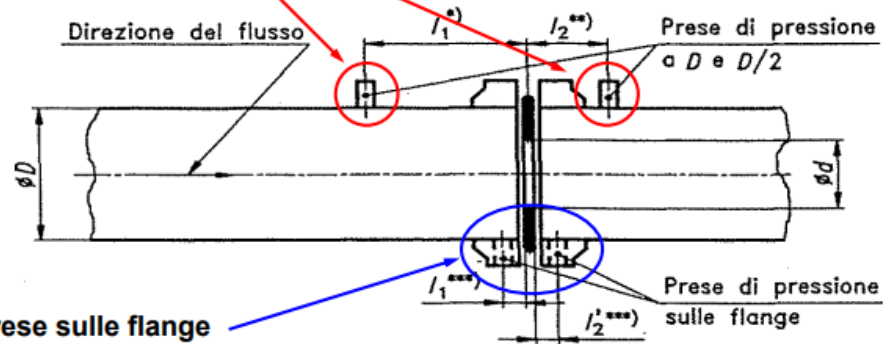


Impiegato in sostituzione dei diaframmi eccentrici, con fluidi a elevata concentrazione di solidi o di aria in sospensione. Il vantaggio consiste nell'elevata capacità di scarico.

Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione

➤ Prese a D e $D/2$

⇒ Più economico, non si devono modificare le flange



➤ Prese sulle flange

Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione

Prese di pressione

➤ Prese agli angoli

⇒ Anello portante con fessura anulare

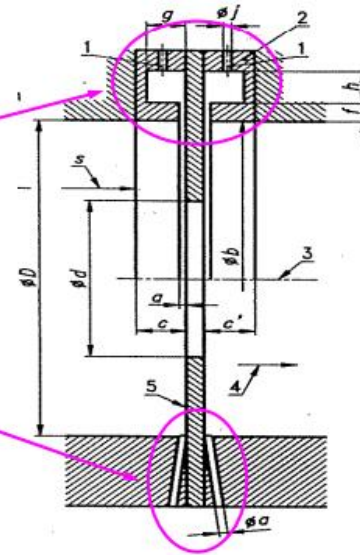
- ⇒ Sono più stabili, l'effetto di smorzamento non si presta per misure dinamiche

⇒ Prese singole

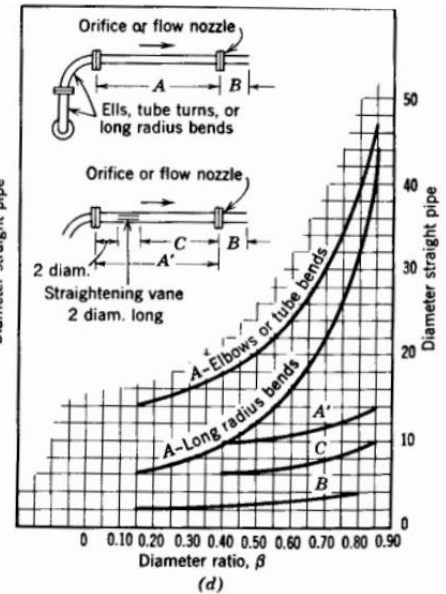
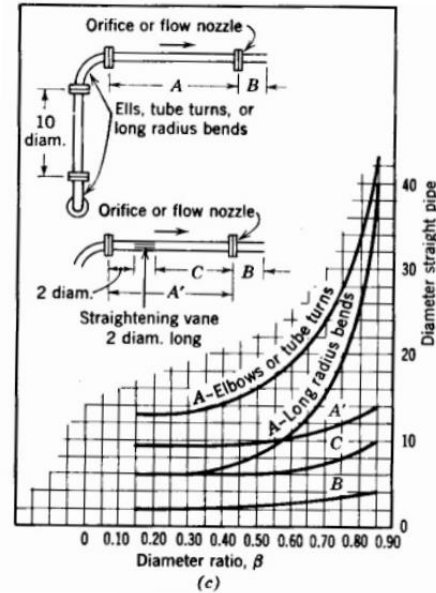
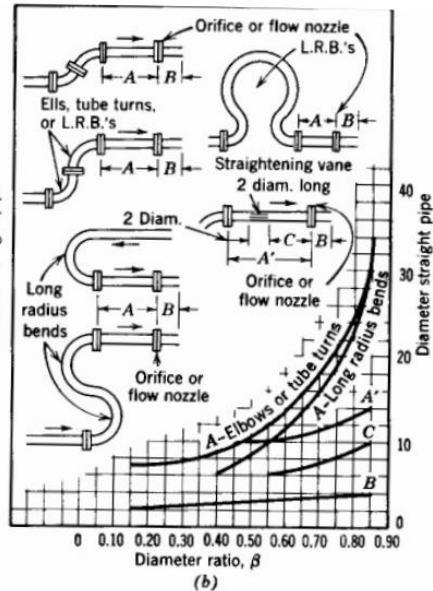
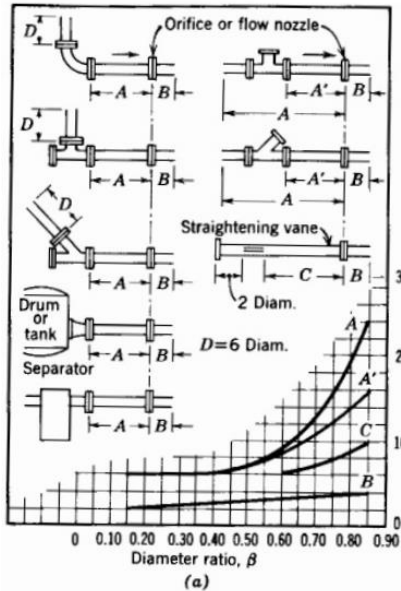
- ⇒ Sentono il ΔP maggiore → sistema più sensibile
- ⇒ Problemi di flusso non uniforme, discontinuità

La normativa dà indicazioni sulla incertezza
del coefficiente di efflusso:

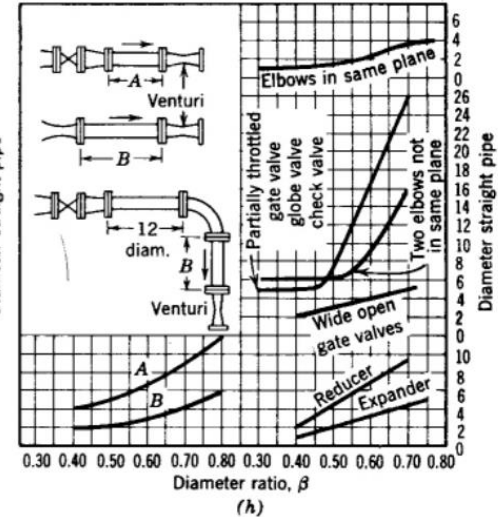
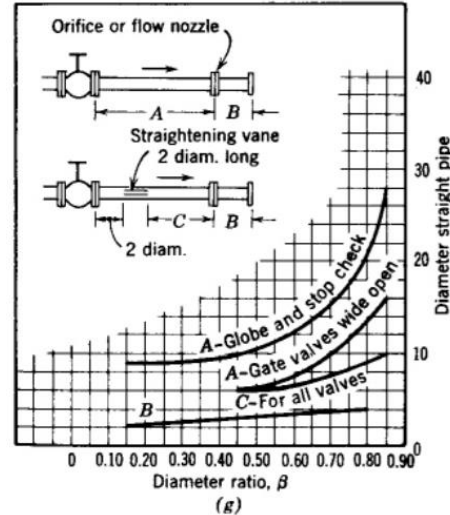
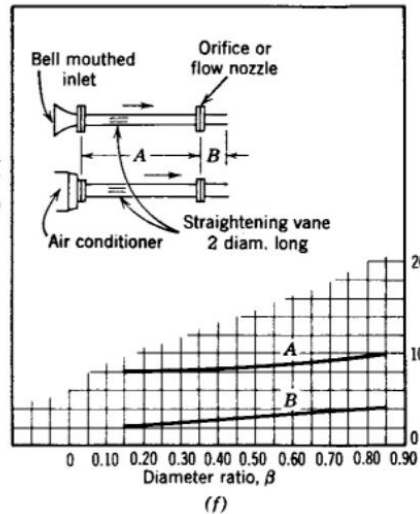
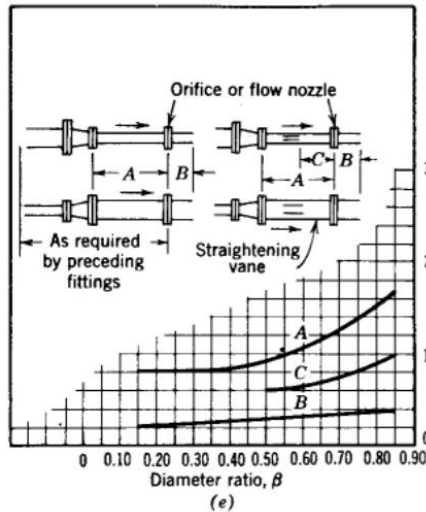
0.6% per $\beta \leq 0,6$ - $\beta\%$ per $0,6 < \beta < 0.75$



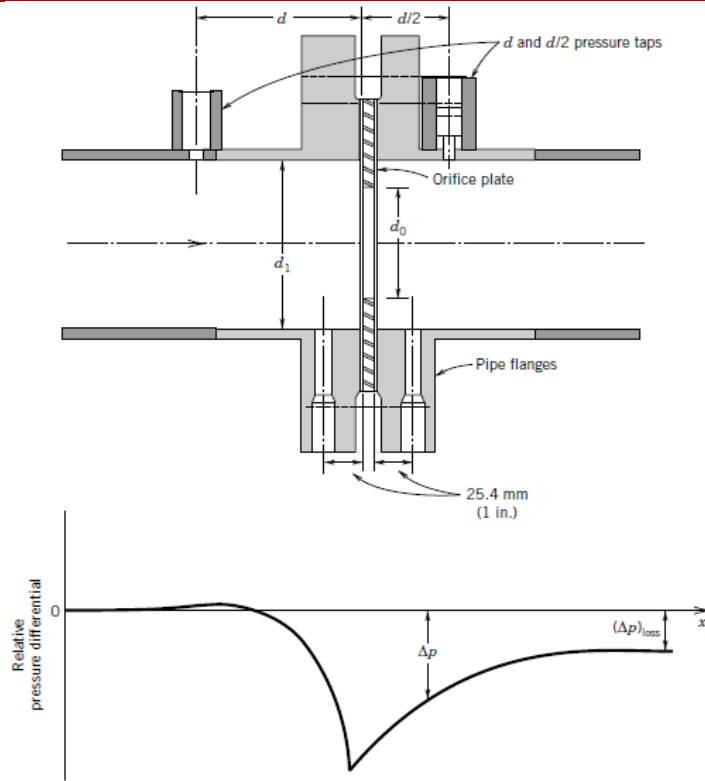
Distanze richieste per l'installazione di diaframmi, bocchagli e venturimetri



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



Misuratore di portata a diaframma – Prese di pressione



Il diaframma induce una perdita di carico permanente (la più elevata rispetto a qualsiasi altro misuratore di portata).
Tale difetto si può compensare aumentando la potenza di pompaggio.

In prima approssimazione la perdita di carico può essere calcolata in base alla variazione di pressione misurata ed al rapporto di strozzamento:

$$\Delta p_{loss} = \Delta p(1 - \beta^2)$$

Una considerazione finale per questa classe di strumenti è legata alla legge di funzionamento della misura:

$$Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

Solitamente uno strumento di misura risulta inaccurato per misure inferiori al 10% del suo fondo scala.

$$\varepsilon_Q \propto \sqrt{\varepsilon_{\Delta p}} = \sqrt{0.1} \cong 30\%$$

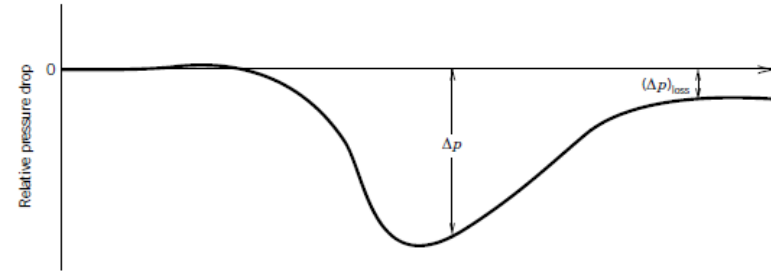
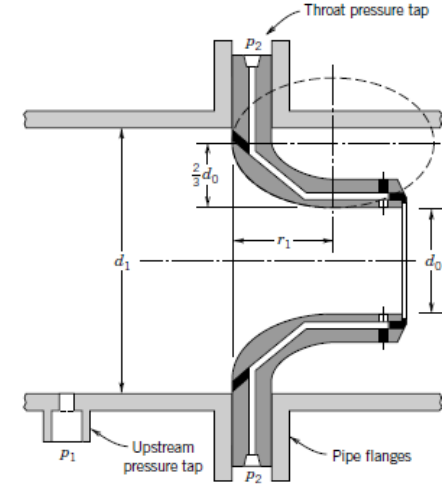
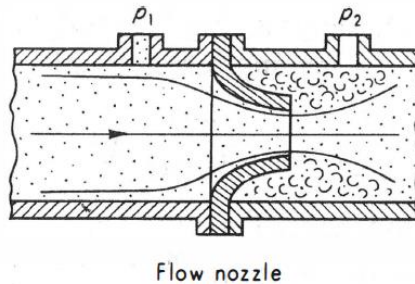
Questa non-linearità genera infine anche delle difficoltà nelle misure di portata variabile, dove il misuratore può rilevare una misura di portata in eccesso rispetto al valore reale.

Misuratore di portata a boccaglio

I boccagli sono più costosi dei diaframmi ma più economici dei venturimetri. Vengono spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità in quanto maggiormente stabili in funzione di temperatura ed elevate velocità di propagazione dei fluidi.

Il boccaglio, come il diaframma introduce una forte perdita di carico e presenta valori minori di rapporti di strozzamento.

Non possono infine essere usati quando il fluido misurato contiene una fase solida (es. pietrisco) in quanto si rischierebbe l'intasamento.



Misuratore di portata a tubo venturi

Progettati con variazioni di area meno repentine, hanno coefficienti di efflusso maggiori (fino a 0.99) rispetto a boccaglio e diaframma. Il lato divergente è più lungo di quello convergente per limitare le perdite di carico dovute all'allargamento della sezione. A causa delle ridotte perdite di carico sono preferiti quando si devono misurare elevate portate (es. acquedotti), dove incrementare la portata del flusso non è possibile o vantaggioso. Possono essere infine impiegati per misurare la portata dei ventilatori.

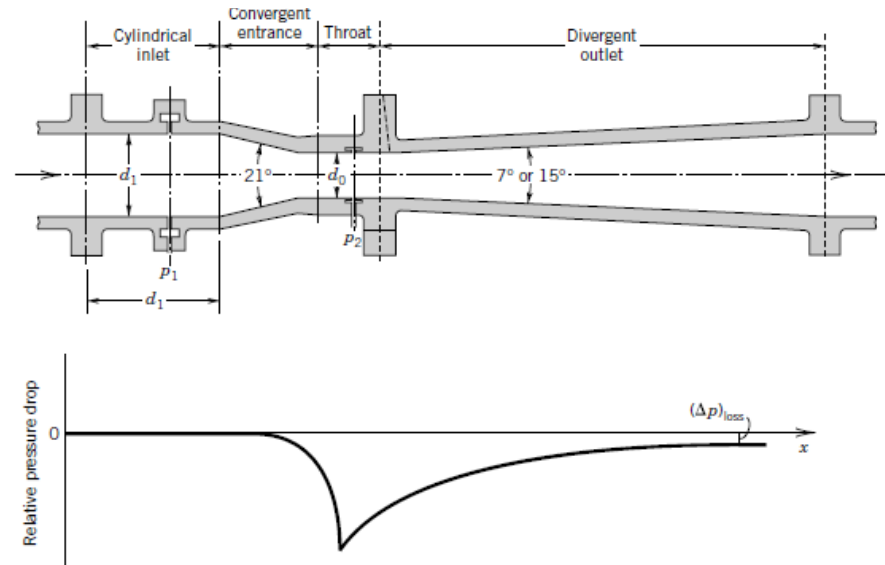
$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Vantaggi:

- geometria interna regolare, difficile l'intasamento (adatti per fluidi con solidi in sospensione)
- misure di ottima precisione su un vasto campo di portate (da poche unità 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



Misuratore di portata – comparazione di perdite di carico

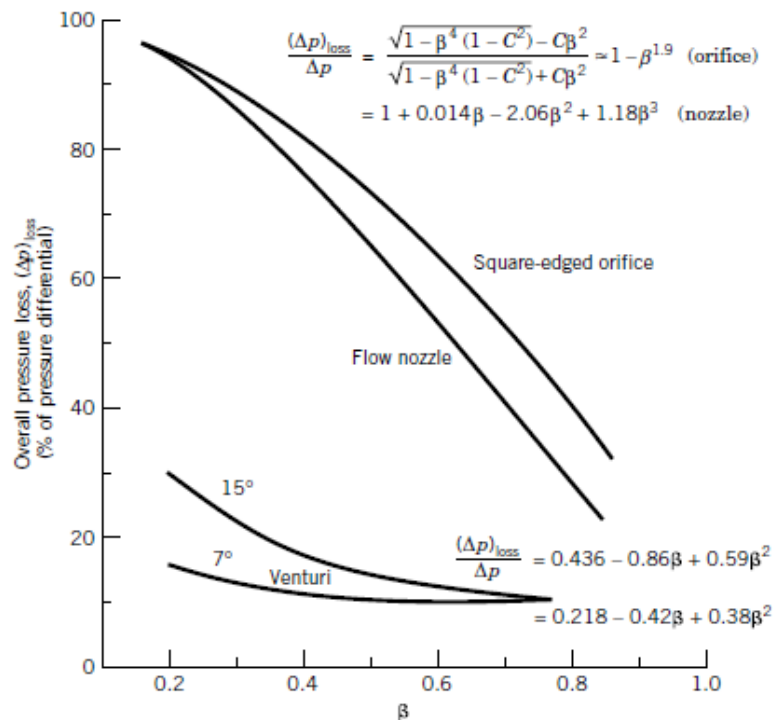


Figure 10.7 The permanent pressure loss associated with flow through common obstruction meters. (Courtesy of American Society of Mechanical Engineers, New York, NY; compiled and reprinted from reference 1.)

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

Gli elementi a flusso laminare sono progettati per lavorare nel regime di flusso laminare ($Re < 2000$). La forma più semplice per sostenere un flusso laminare è costituito da un capillare, ossia una conduttura di diametro piccolo. Considerati i limiti in termini di portata di un singolo capillare, per estendere l'intervallo di misura, elementi di misura sono rappresentati da assiami di capillari connessi in parallelo, interposti a dei raddrizzatori di flusso che eliminano o smorzano eventuali perturbazioni.

Per questo strumento di misura la portata si ottiene dalla relazione di Hagen-Poiseuille per il flusso viscoso di flussi incompressibili:

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

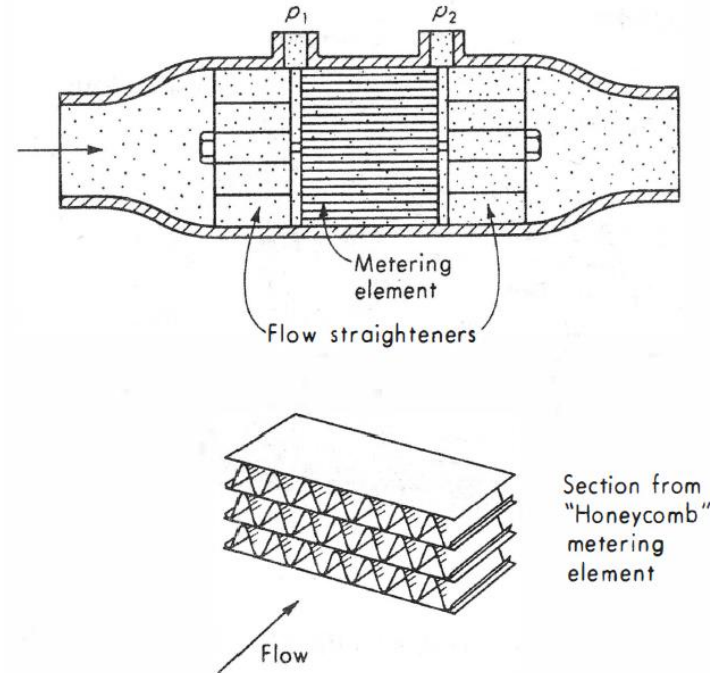
Dove D è il diametro interno del tubo, μ rappresenta la viscosità del fluido e L la distanza tra le prese di pressione.

Vantaggi:

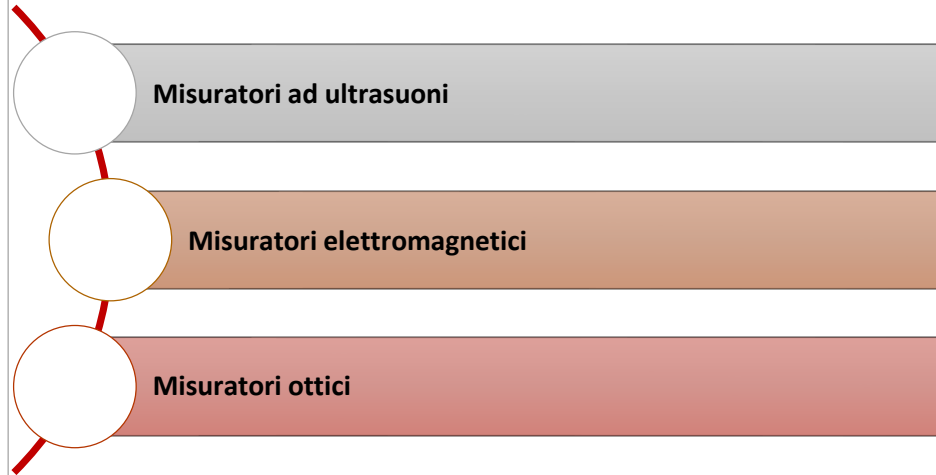
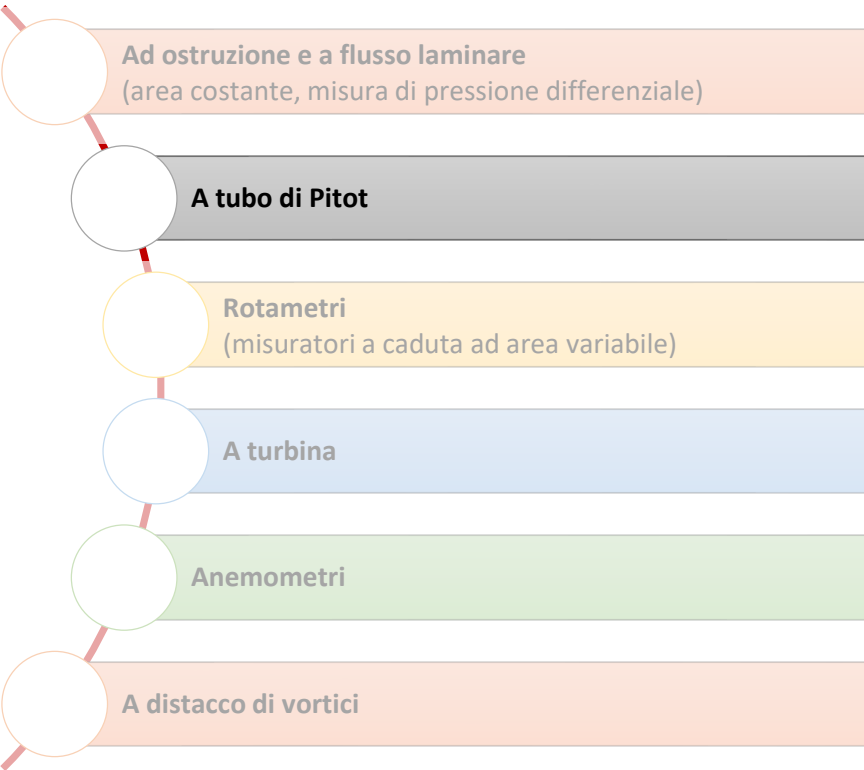
- Relazione lineare tra caduta di pressione e portata

Svantaggi:

- Elevate perdite di carico
- Facilità di intasamento
- Costi elevati



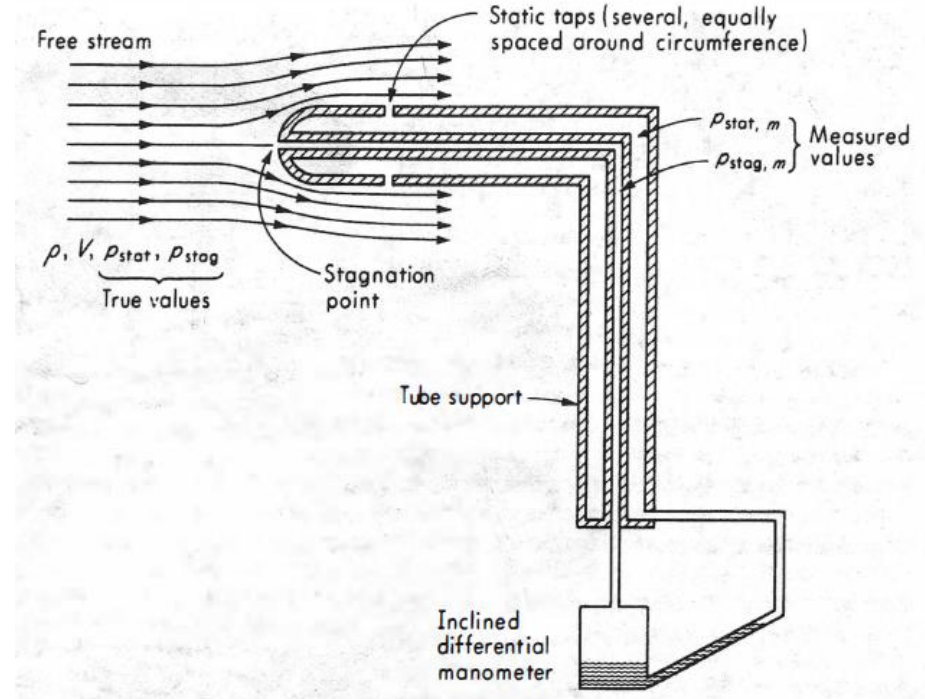
Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot è uno strumento comunemente impiegato per misurare il vettore velocità, in quanto consente di misurare sia la velocità che la direzione nelle quali un fluido si propaga. Considerato il legame tra velocità e portata, tale strumento può anche essere impiegato per misure di portata.

Il tubo di Pitot è costituito da una sonda con un foro frontale e da quattro fori laterali, tra loro equi-spaziati lungo la circonferenza del tubo. Il foro anteriore si trova in coincidenza con il cosiddetto punto di ristagno e misura la pressione totale (p_{stag}), mentre i quattro fori laterali misurano la cosiddetta pressione statica (p_{stat}).



Tubo di Pitot

Applicando il teorema di Bernoulli tra le sezioni relative al punto di ristagno (1) e di misura statica (2):

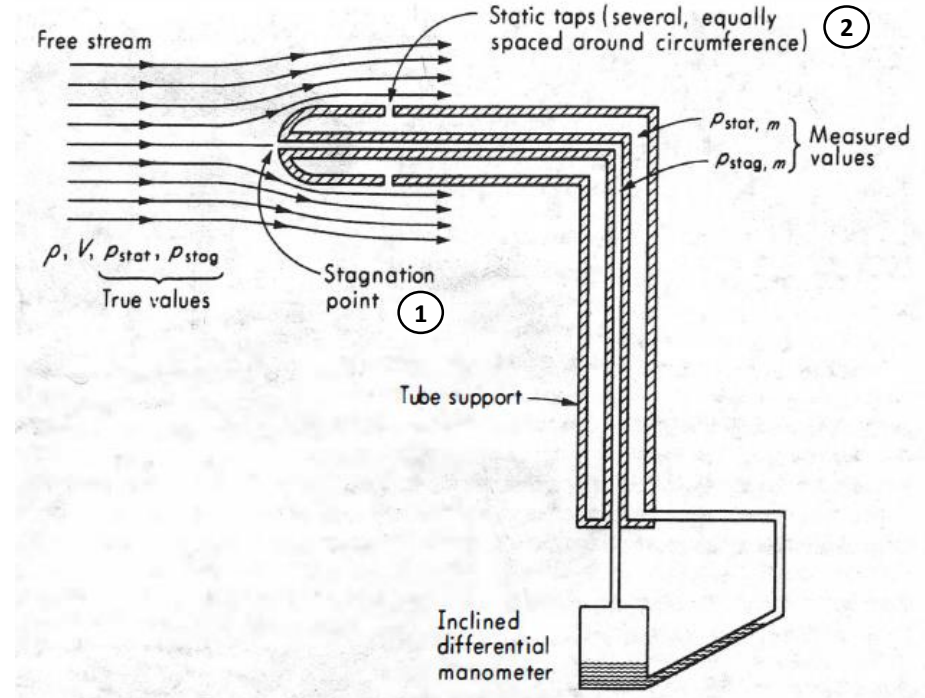
$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

Nel punto di ristagno $v_1 = 0$ e che la differenza di altezza è nulla ($z_1 \cong z_2$), si ottiene:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

Da cui:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot (sviluppato per misure di velocità puntuali) può quindi essere tarato per portate volumetriche, se specificatamente posizionato all'interno del condotto.

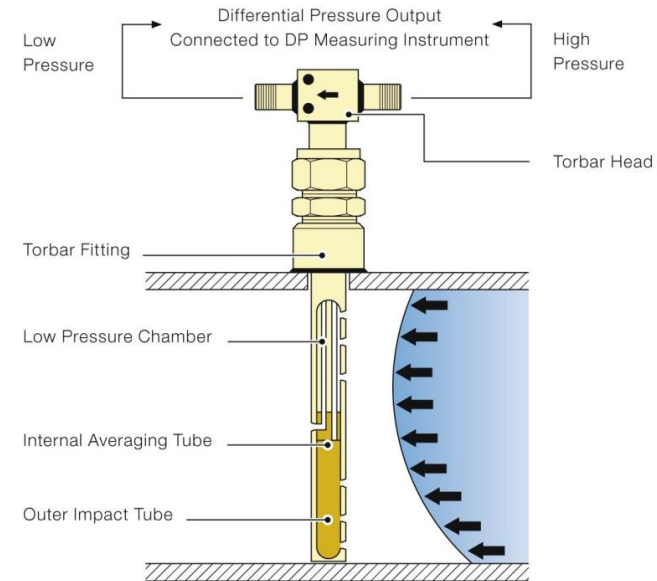
Considerato che la velocità di un fluido all'interno di una condotta può variare in base alla posizione della linea di flusso, si può ottenere la velocità media per mezzo di molteplici acquisizioni effettuate *scansionando* la sezione trasversale del condotto, dalla quale si può ricavare la misura totale di portata.

Il sistema di misura basati sul tubo di Pitot:

- Risulta adeguato per uso dal laboratorio
- Si presta per misure di gas che si propagano ad alta velocità
- È economico e di facile realizzazione
- Richiede la conoscenza della densità del fluido a priori

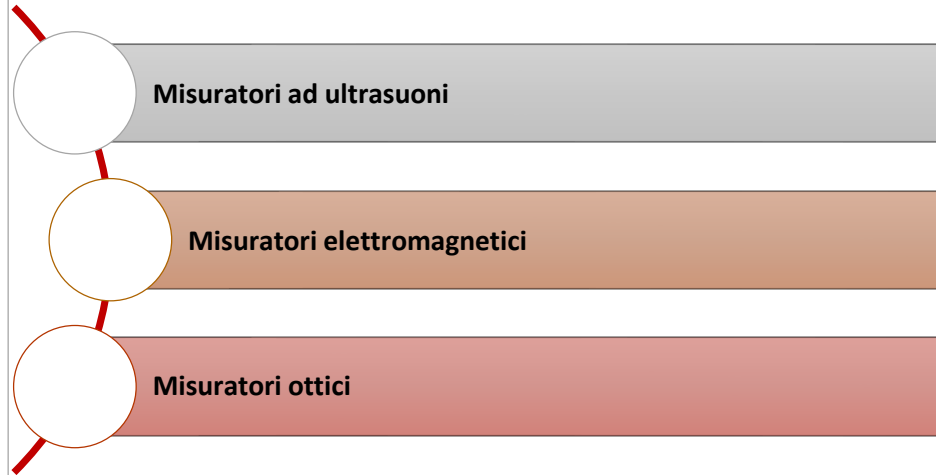
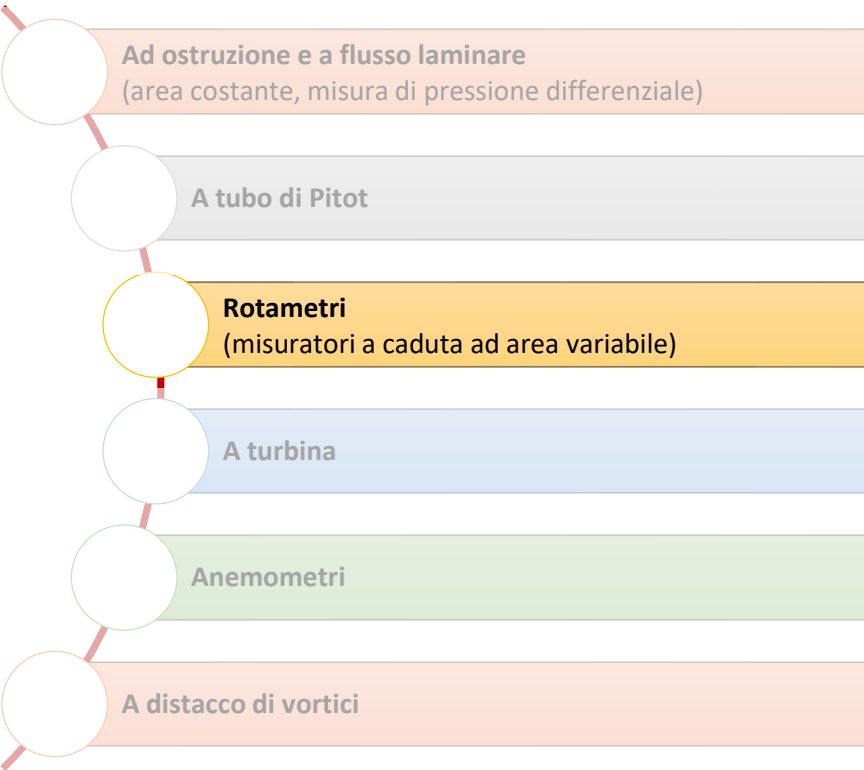
Tubo di Pitot *auto-mediante*

Sul mercato esistono poi tubi di Pitot auto-medianti, che presentano una successione di prese disposte lungo la lunghezza della sonda. In questo modo la distribuzione della pressione viene mediato lungo la direzione nella quale si sviluppa la sonda, permettendo di ottenere una media della misura.



<https://processandcontrolmag.co.uk/abb-self-averaging-flowmeter-offers-versatile-cost-effective-solution-for-gas-liquid-and-steam-measurement/>

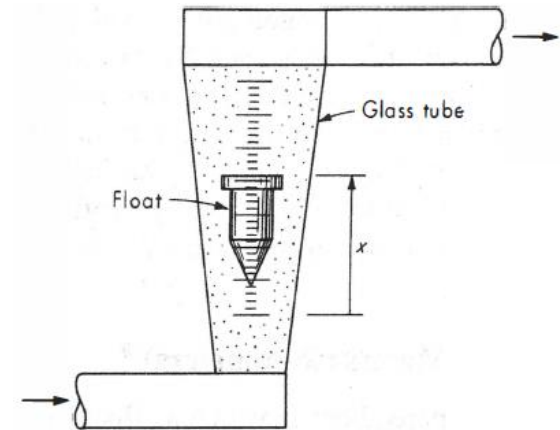
Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Il rotametro è composto da un tubo verticale avente forma conica nel quale fluisce il fluido oggetto di misura; al suo interno è poi inserito un galleggiante. Il fluido, percorrendo il rotametro investe il galleggiante, la cui posizione lungo la direzione verticale corrisponde ad un valore di portata che scorre nello strumento, inducendo una differenza di pressione localizzata, dovuta al restringimento della sezione di passaggio.

Vista la variazione continua della sezione del tubo si può pensare al rotametro come ad un diaframma ad area variabile.



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

La posizione del galleggiante lungo l'asse della condotta è determinata dal bilanciamento tra le forze:

- Di gravità ($\downarrow$), mg
- Di galleggiamento ($\uparrow$), $\rho g V$
- Di attrito viscoso ($\downarrow$), βv
- Di pressione differenziale ($\uparrow$), $\Delta p A$

Il tubo conico garantisce l'area variabile che compensa le variazioni di pressione dovute alla variazione di portata che cambiano l'azione della forza legata alla differenza di pressione sulla sezione (fissa) del galleggiante.

Progettando opportunamente la condotta si riesce a garantire che lo strumento sia in grado di lavorare in condizioni di linearità. Ciò conferisce ai rotametri un campo di misura accurato di circa 10:1, considerevolmente migliore rispetto ai diaframmi.

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Per fluidi incomprimibili, un modello semplificato del sistema permette di ricavare la portata come:

$$Q = \frac{C_d(A_t - A_g)}{\sqrt{1 - [(A_t - A_g)/A_g]^2}} \sqrt{2gV_g \frac{w_g - w_f}{A_g w_{ff}}}$$

Dove: C_d rappresenta il coefficiente di efflusso, A_t e A_g le aree, rispettivamente, di condotta e galleggiante, V_g il volume del galleggiante, e w_g e w_f i pesi specifici di galleggiante e fluido, rispettivamente.

Se la variazione del coefficiente di efflusso con la posizione del galleggiante può essere considerata piccola e $[(A_t - A_g)/A_g] \ll 1$, allora il calcolo della portata può essere linearizzato come:

$$Q = K(A_t - A_g)$$

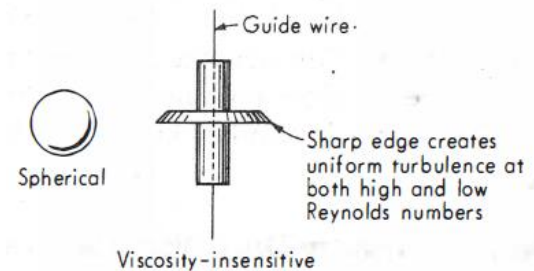
Se invece il tubo è progettato in modo che A_t vari linearmente con la posizione del galleggiante:

$$Q = K_1 + K_2 x$$

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

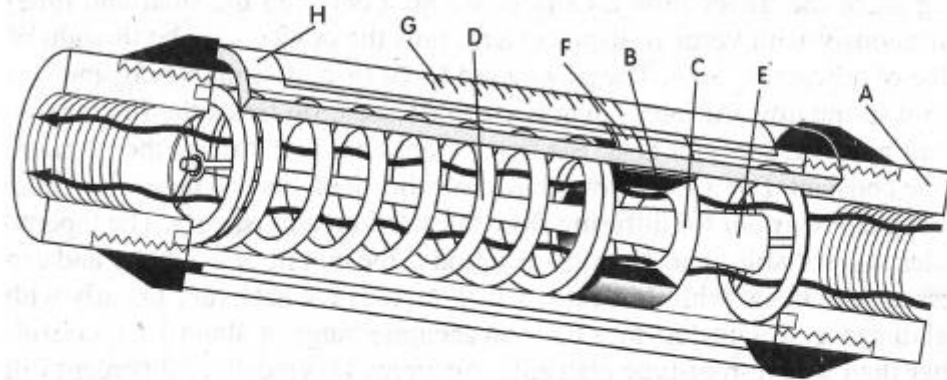
Se sferico, il galleggiante può essere semplicemente inserito nel tubo di misura. Ad ogni modo, il galleggiante può assumere anche altre forme che possono richiedere l'inserimento di una guida.

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



Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

In determinate condizioni possono essere invece impiegati tubi in metallo e la posizione del galleggiante è rilevata magneticamente e trasdotta elettricamente tramite un trasduttore di spostamento.



OPERATING THEORY

Enclosed within a high pressure casing (A), a high strength magnet (B) in tandem with the sharp-edged annular orifice disk (C), is pressed towards the zero flow rate position by a linear rate compression spring (D). A tapered metering pin (E) is positioned concentrically within the annular orifice disk and provides a variable-area opening that increases by the square of linear displacement of the orifice disk. Fluid flow

creates a pressure differential across the orifice disk, pressing the magnet/orifice disk duo against the compression spring. Flow rate is read by aligning the magnetically coupled follower (F) with the graduated scale (G) located within the environmentally sealed window (H). The variable-area orifice design provides pressure differentials and orifice displacements that are linearly proportional to fluid flow rate.

Misuratori a caduta ad area variabile (rotametri)

Impiego:

- Rilievo di piccole e medie portate nelle industrie chimica, petrolchimica, farmaceutica, alimentare, trattamento delle acque.
- Richiedono un'installazione verticale, con il flusso che si muove dal basso verso l'alto
- Richiedono una taratura rispetto a temperatura e pressione di esercizio
- Si applicano a fluidi monofasici
- Economici



Caratteristiche tecniche (Krohne)

Precisione: 1 – 2% FS

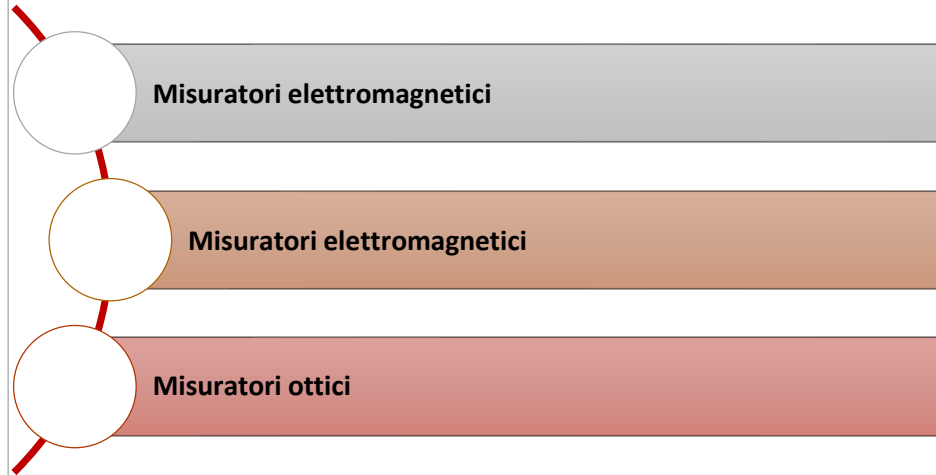
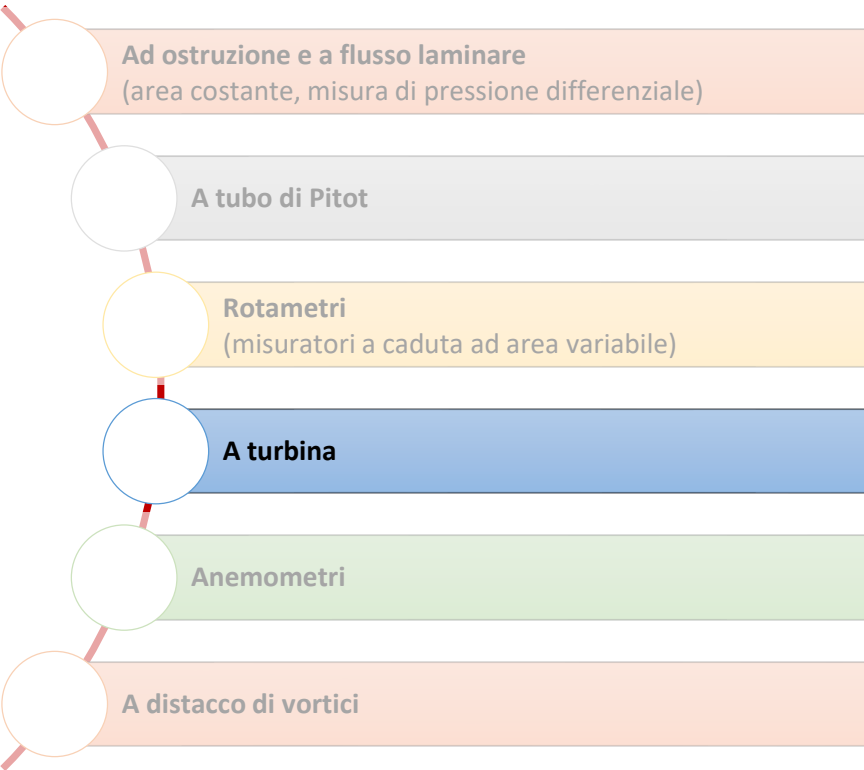
Portata: acqua: 0.4 – 10000 l/h

aria: 0.007 – 180 m³/h

Temperatura di processo: -40 – 100°C



Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

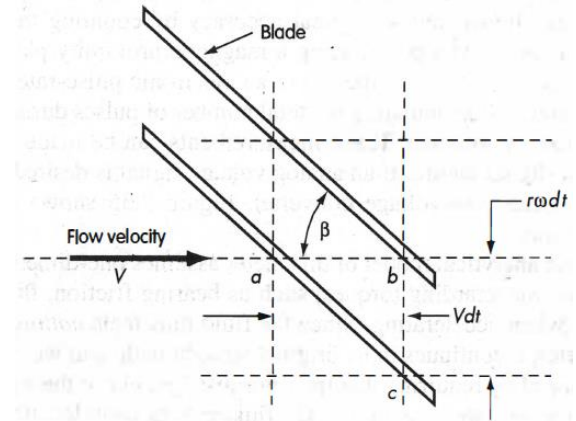


Misuratori a turbina

Fanno uso di una turbina inserita nella condotta di misura. Considerando un flusso monodimensionale ed un rotore che non dia coppie, il moto del fluido non viene perturbato dall'attraversamento dello strumento. Incidendo poi sulle pale della turbina, queste vengono traslate, mettendo in rotazione il rotore della stessa. Considerato che nell'intervallo di tempo infinitesimo dt il fluido si sposti dal punto a al punto b con velocità v e che contemporaneamente il rotore della turbina faccia spostare la pala dal punto c al punto b con velocità angolare ω . Considerato l'angolo di incidenza sulla pala β , e che $ab = cb$, e indicato con r il raggio delle pale del rotore:

$$v dt = \omega r dt \tan \beta$$

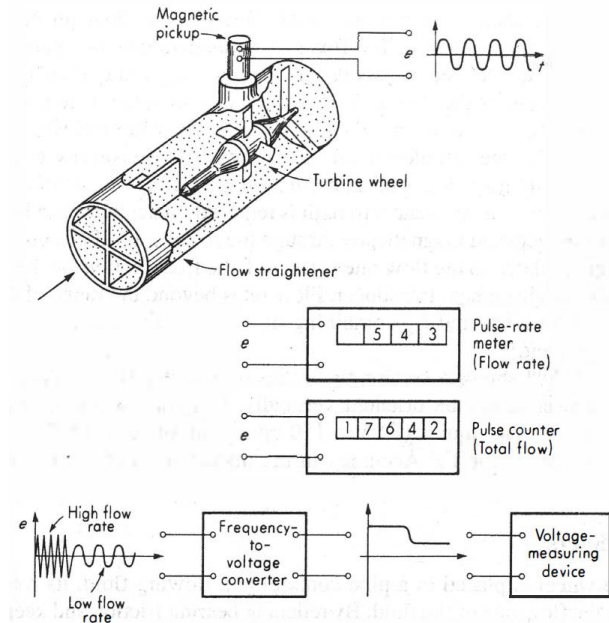
$$\omega = \frac{r}{v} \tan \beta$$



Misuratori a turbina

Pertanto, accoppiando la turbina con un contatore, è possibile misurarne il numero di giri alla quale la turbina ruota (solitamente tramite un convertitore frequenza/tensione) e, di conseguenza, ricavare per via indiretta velocità e portata del fluido.

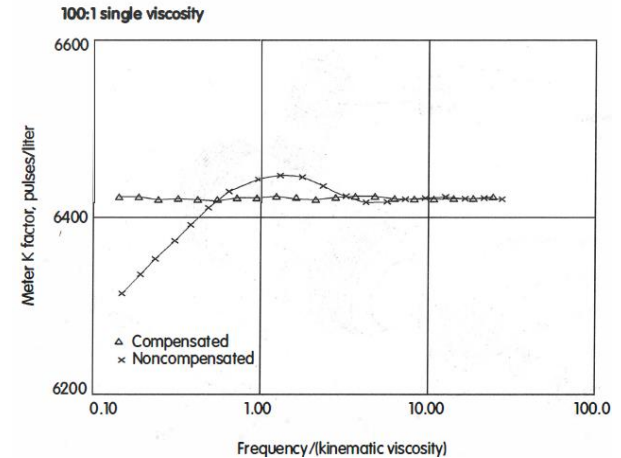
Tale tipo di dispositivo è caratterizzato da una funzione di trasferimento lineare a patto di ridurre al minimo l'attrito dei cuscinetti e le altre perdite in generale.



Misuratori a turbina

Il principale fenomeno che porta ad una riduzione della linearità in questo strumento di misura è dato dalla viscosità del fluido. Tale misuratore richiede pertanto venga effettuato un processo di taratura.

Il processo di taratura permette di introdurre un circuito di compensazione degli effetti legati alle variazioni di viscosità e temperatura, permettendo così di estendere l'intervallo di linearità del fattore K, che rappresenta la quantità di volume che attraversa il misuratore per ogni impulso.



Misuratori a turbina

Infine, l'introduzione di un secondo rotore può portare allo sviluppo di misuratori auto-taranti o, nel caso di rotori controrotanti, di misuratori con un intervallo di misure maggiormente esteso verso le basse portate.

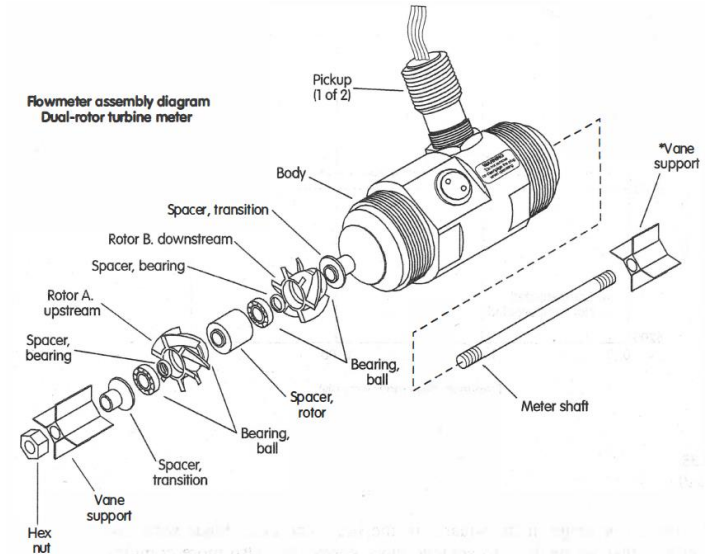
A titolo esemplificativo, si riportano infine le caratteristiche tipiche di questa classe di misuratori.

Campi di portata: 0.3 – 50 L/min

Viscosità: 0.5 – 1.5 cP

Temperatura: -20 – +80 °C

Pressione: fino a 10 bar a 20 °C



Misuratori ad elica (o ventola)

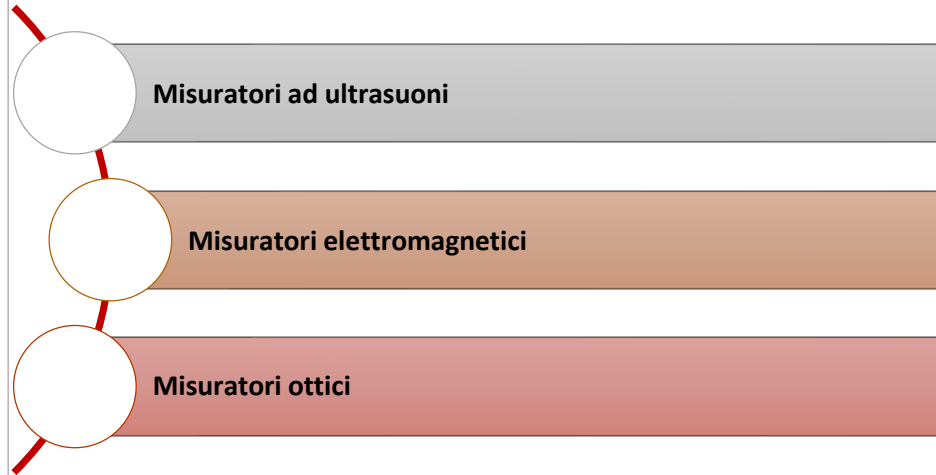
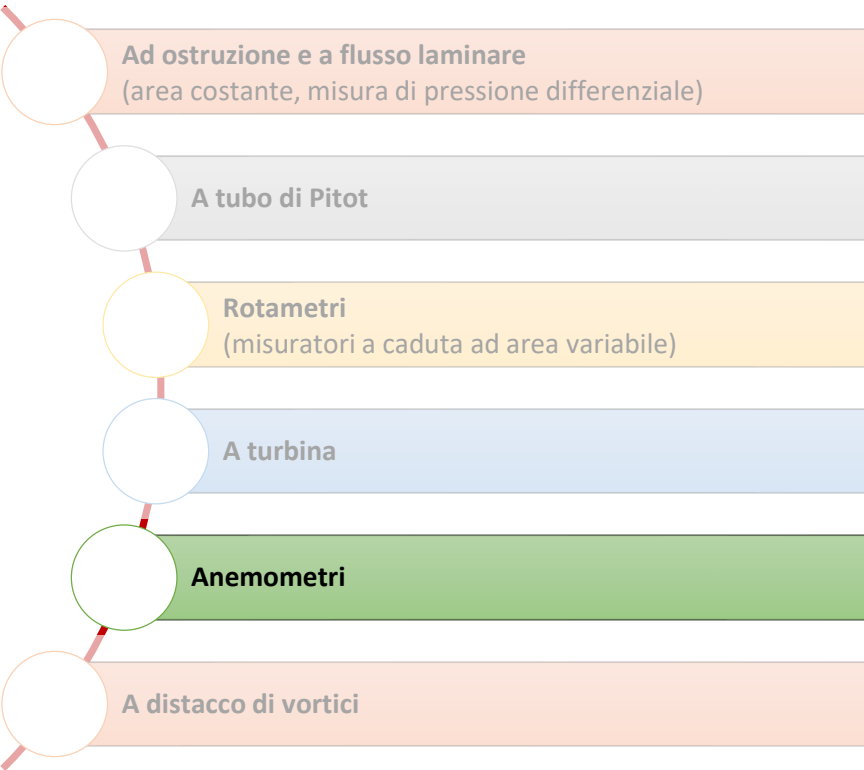
Per la misura di fluidi allo stato gassoso, sono misuratori di velocità puntuali, costituiti da un'elica sostenuta da un perno e collegato ad un anello di protezione, sul quale si innesta il manico.

Orientando 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 quantifica alla quale scorre il fluido.

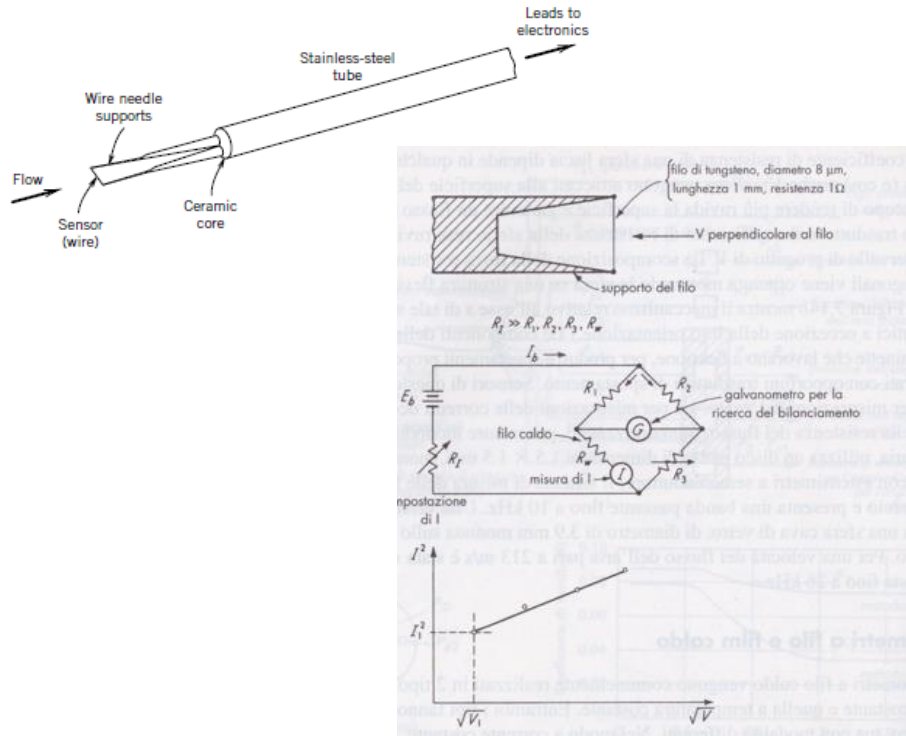
Questo dispositivo non trova grandi applicazioni industriali ma viene solitamente impiegato per il monitoraggio degli impianti di riscaldamento e condizionamento, sia all'interno che all'esterno delle bocchette di emissione.



Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



Anemometri a filo caldo



Modello a corrente costante

Il filo viene percorso da una corrente costante; in condizioni di equilibrio il calore prodotto al suo interno per effetto Joule viene bilanciato dalle perdite di calore dovute ai fenomeni convettivi alla sua superficie:

$$i^2 R = hA(T_{\text{wire}} - T_{\text{flow}})$$

h – coefficiente di scambio termico del sensore

A – area di scambio termico

Poiché il coefficiente convettivo del sensore è funzione della velocità della vena, la temperatura di equilibrio può anche essere usata per una misura indiretta della velocità del flusso.

La misura di temperatura viene quindi ricavata dal una misura della resistenza elettrica del filo

Modello a temperatura costante

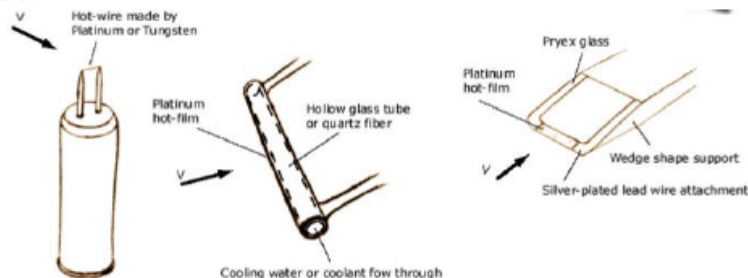
La temperatura è misurata a seguito di un bilanciamento della corrente che serve a mantenere costante la temperatura del sensore.

Anemometri 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**.

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.



Anemometri a filo caldo

Anemometro a filo caldo

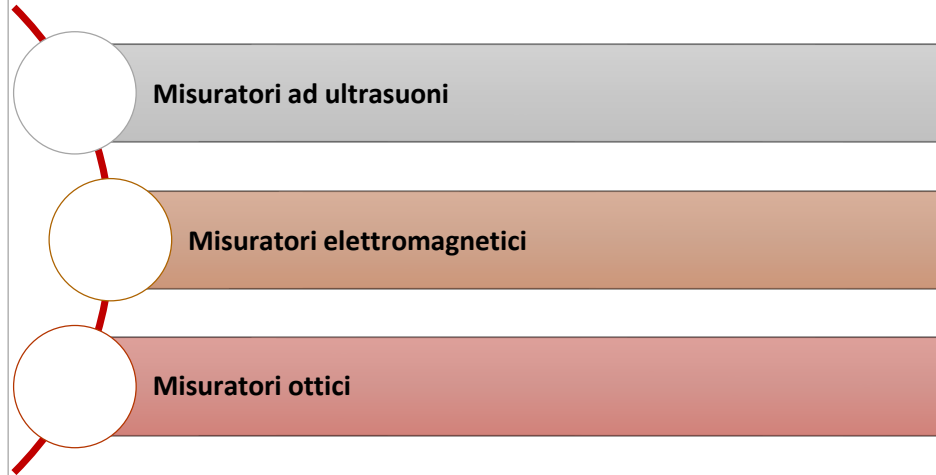
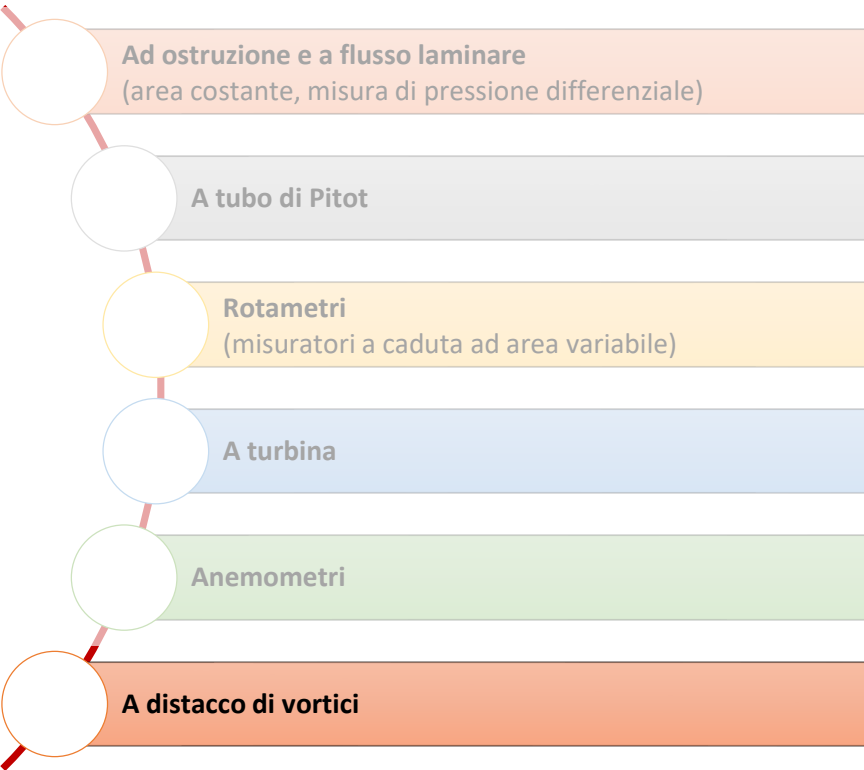
I **vantaggi** di questo tipo di strumento sono:

- **misura diretta** della portata 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 di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)



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.

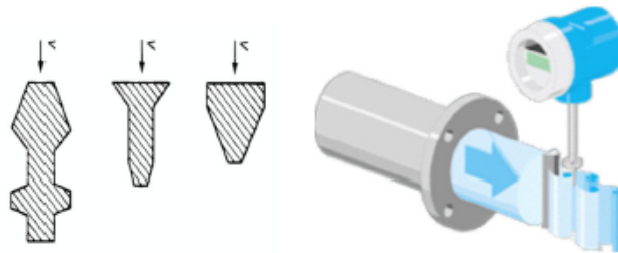
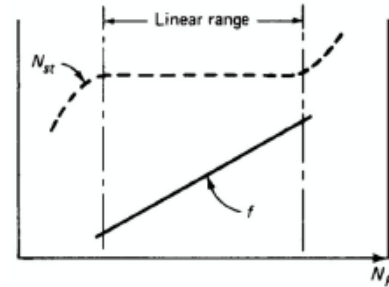
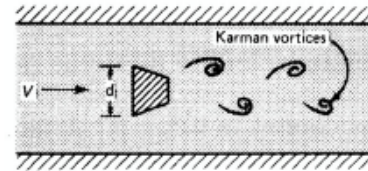
Se $Reynolds > 10000$ si ha formazione di vortici con frequenza di distacco:

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

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.

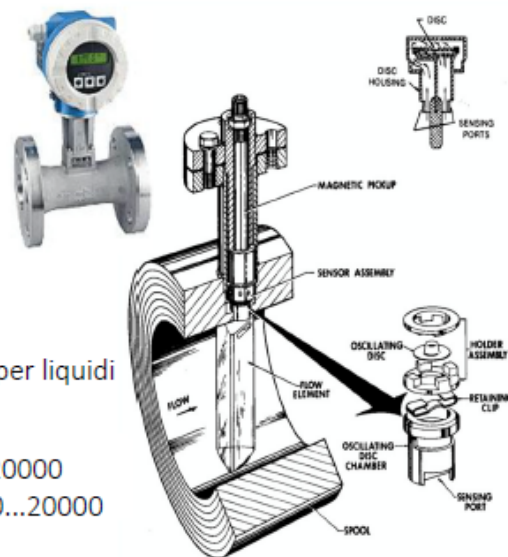
Quello in figura avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico

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

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



Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

Ad ostruzione e a flusso laminare
(area costante, misura di pressione differenziale)

A tubo di Pitot

Rotametri
(misuratori a caduta ad area variabile)

A turbina

Anemometri

A distacco di vortici

Misuratori ad ultrasuoni

Misuratori elettromagnetici

Misuratori ottici

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.

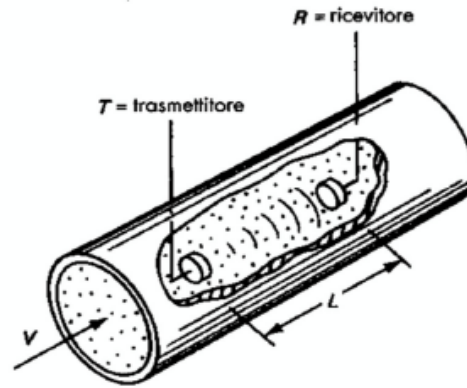
Vengono utilizzati brevi treni di onde sinusoidali (circa 10 MHz).

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.

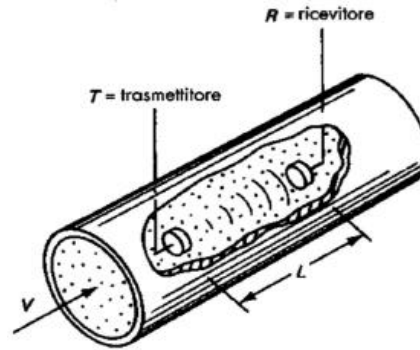
Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico ad esso proporzionale.



A tempo di
transito

Ad effetto
Doppler

Misuratori ad ultrasuoni a 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:

$$t = \frac{L}{c + v} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{v}{c^2} + \frac{v^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{v}{c} \right) \rightarrow \Delta t = \frac{Lv}{c^2}$$

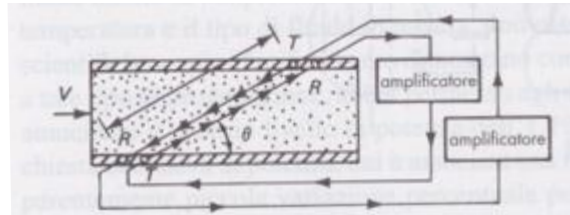
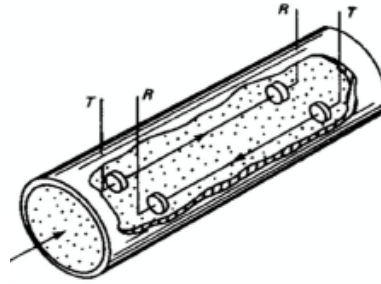
$L = \text{cost}$, c varia con la temperatura $\rightarrow$ errore significativo perché compare al quadrato, inoltre Δt è piccolo.

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

Misuratori ad ultrasuoni a tempo di transito

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

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \approx \frac{2Lv}{c^2}$$



$$\Delta f = \left| \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right| = \frac{2v \cos \theta}{L}$$

Misuratori ad ultrasuoni ad effetto Doppler

L'effetto Doppler consiste nella percezione apparente di una variazione di frequenza, rispetto alla frequenza originale emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso

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

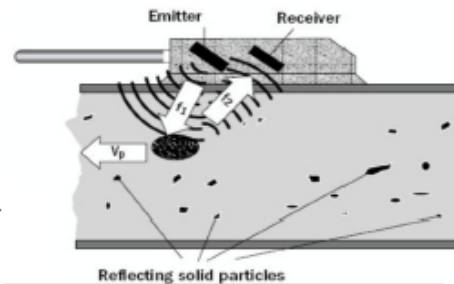
Non invasivo, non ci sono parti in movimento

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)

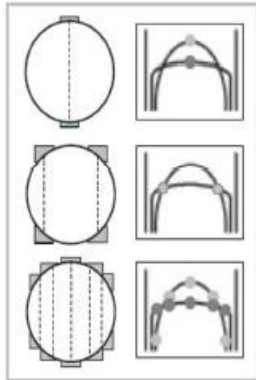


$$f_1 - f_2 = \Delta f = \frac{(2v_p f_1 \cos \alpha)}{c}$$

Misuratori ad ultrasuoni

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



- Permettono di misurare sia fluidi puliti che sporchi
- Approccio *clamp on* meno invasivo
- Impiegati in principio per liquidi si impiegano anche per gas (misura gas infiammabili nelle raffinerie) e vapore.

Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

Ad ostruzione e a flusso laminare
(area costante, misura di pressione differenziale)

A tubo di Pitot

Rotametri
(misuratori a caduta ad area variabile)

A turbina

Anemometri

A distacco di vortici

Misuratori ad ultrasuoni

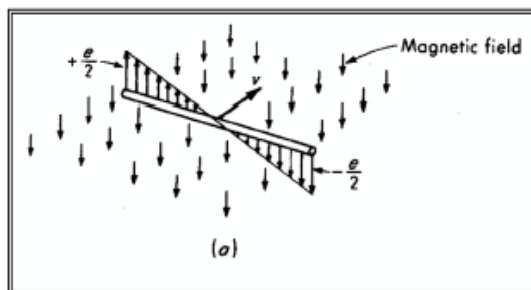
Misuratori elettromagnetici

Misuratori ottici

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 si genera una forza elettromotrice agente sulle particelle cariche del conduttore. Si induce così un gradiente di potenziale attraverso il 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

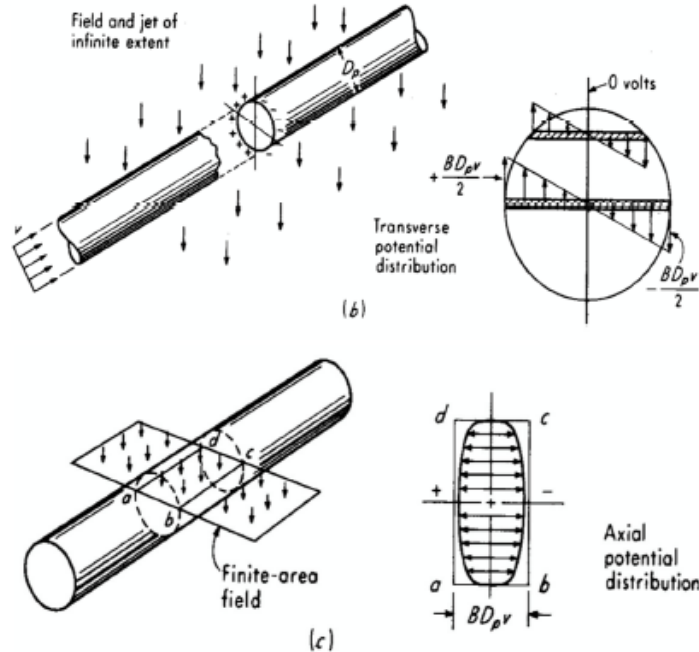
Il flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza R , genera una caduta di potenziale iR

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 fluido che attraversa il campo magnetico è conduttore, una forza elettromotrice verrà indotta sul cilindro metallico, la quale produrrà una differenza di potenziale massima (pari a $BD_P v$) ai lati diametralmente opposti del cilindro. Questo effetto è limitato all'area interessata e coperta dal campo magnetico.

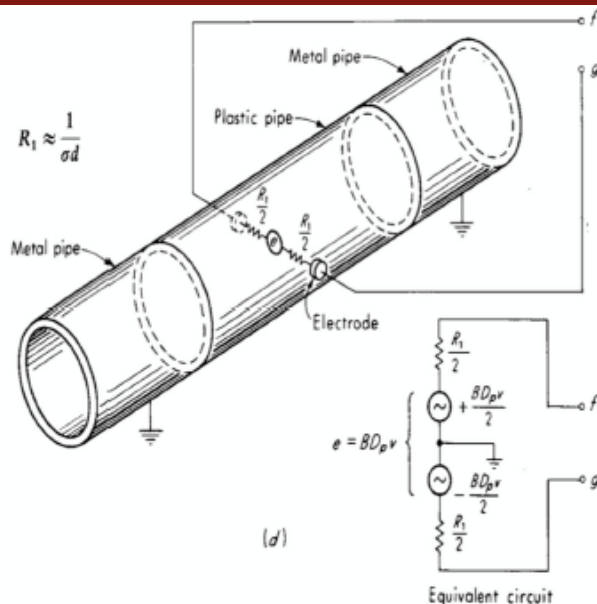


Misuratori elettromagnetici

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 ($\sigma \approx 1\mu\text{S/cm}$; alcuni dispositivi: $\sigma \approx 0.1\mu\text{S/cm}$)
Non hanno parti in movimento
Non alterano il campo di moto
Non portano strizioni di diametro quindi non aggiungono perdite



Caratteristiche tecniche (Yokogawa)

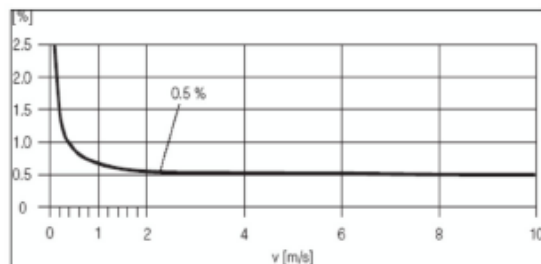
Errore: 0.5% o.r.

Portate: 0.2 - 1000 m³/h

Consumo: 10W

Uscita: 4-20 mA

Alimentazione: 200-240 VAC o 24 VAC/DC



Misuratori di portata volumetrica (interazione diretta con il fluido)

Ad ostruzione e a flusso laminare
(area costante, misura di pressione differenziale)

A tubo di Pitot

Rotametri
(misuratori a caduta ad area variabile)

A turbina

Anemometri

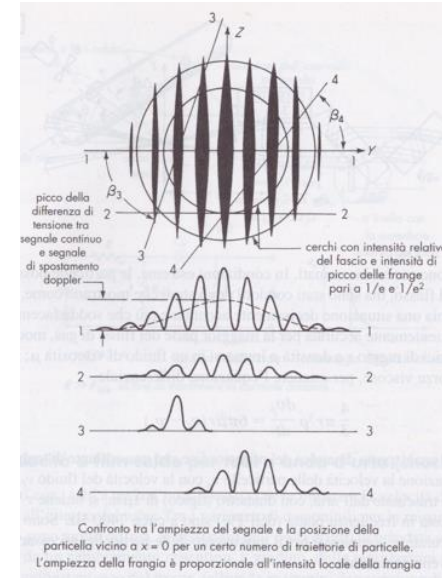
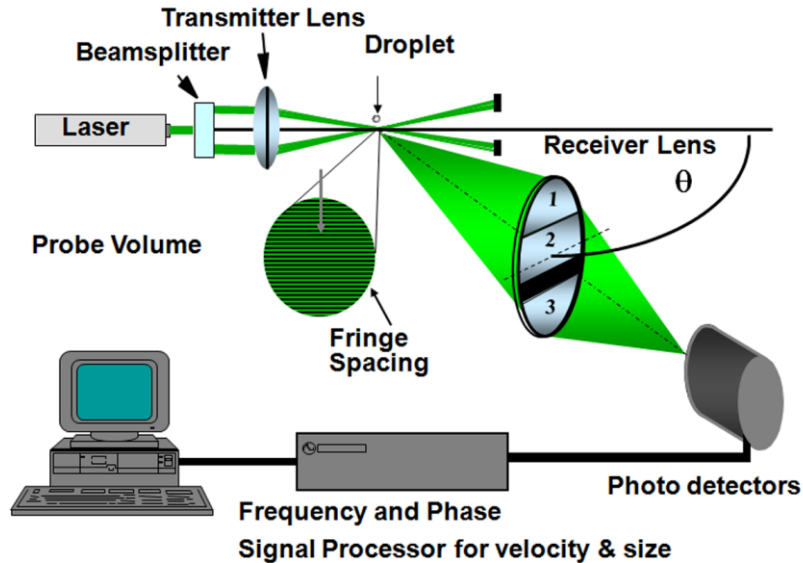
A distacco di vortici

Misuratori ad ultrasuoni

Misuratori elettromagnetici

Misuratori ottici

Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler



Misuratori di portata laser – Anemometro laser - doppler

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

- l'elevato costo
- 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.



Misure 2016 - Taccani

Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry

PIV (Particle Image Velocimetry):

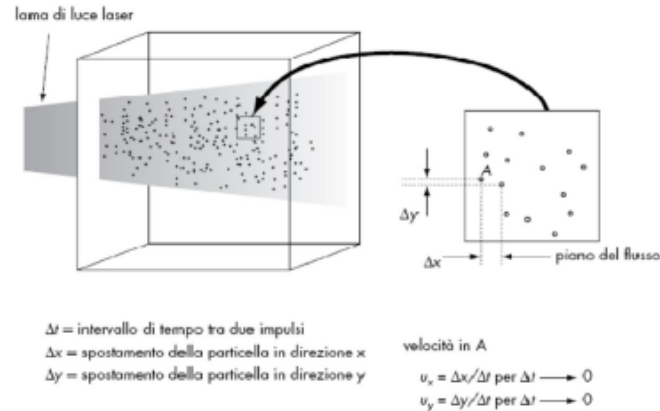
è una tecnica di misura di tipo quantitativo, più **sofistica** dell'anemometro laser-doppler, basata sulla **cross-correlazione di immagini digitali**.

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.

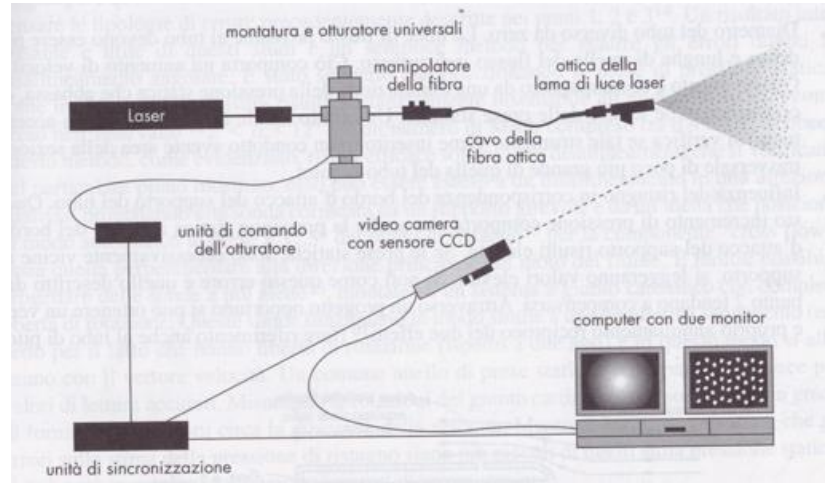
Si illumina la sezione da esaminare con **due impulsi consecutivi e ravvicinati di luce laser**, convertiti tramite un apparato ottico in **lame di luce**.

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

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



Misuratori di portata laser – Particle Image Velocimetry



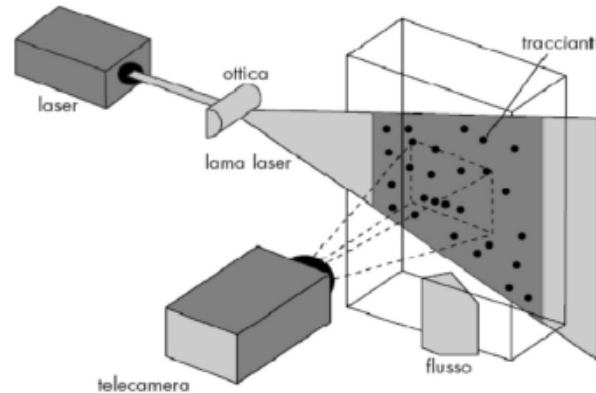
Misuratori di portata laser

Vantaggi:

- sistema molto preciso;

Svantaggi:

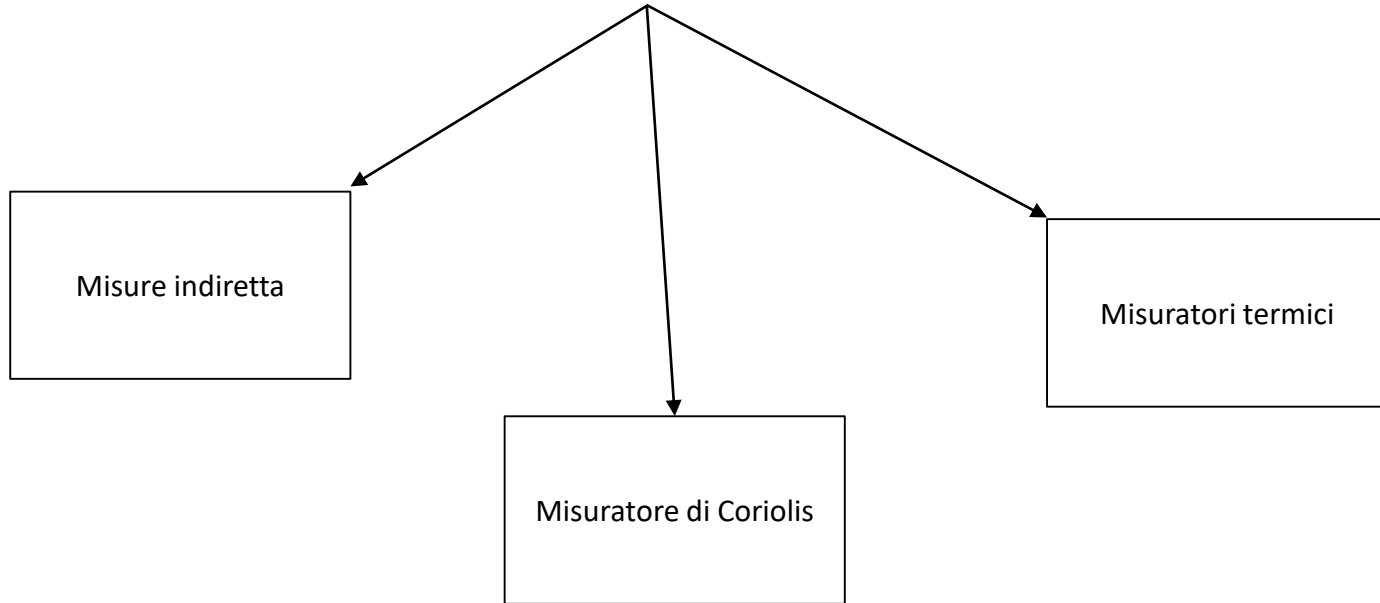
- molto costoso;
- la tubazione deve avere un accesso ottico trasparente;
- difficoltà riguardanti le concentrazione di particelle; poche particelle descrizione del campo di moto non esauriente mentre se le particelle sono troppe sarà difficile identificarle nelle immagini;
- non si possono misurare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



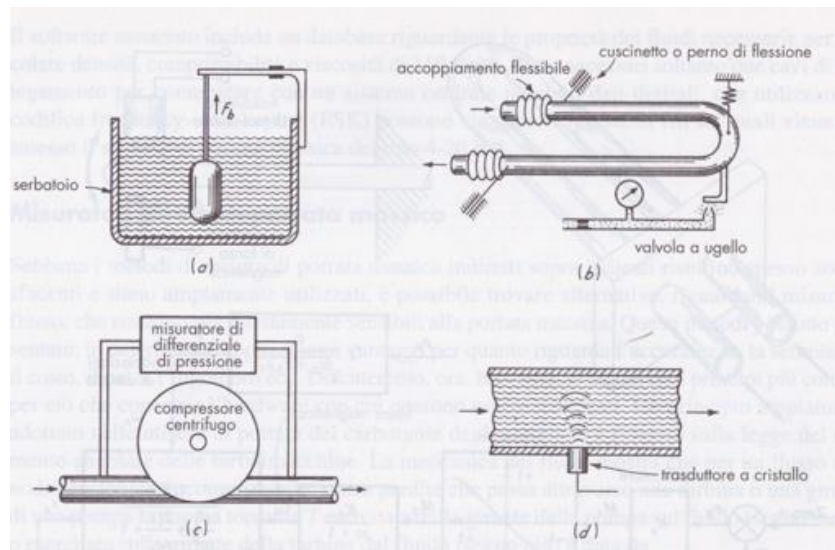
Misura di portata massica

Misuratori di portata massici

In certe applicazioni è più importante misurare la portata massica rispetto a quella volumetrica. La portata massica può essere ricavata da quella volumetrica, nota la densità dell'oggetto di misura, oppure la portata massica può essere misurata per via diretta.



Misure di portata volumetrica accoppiata a misure di densità



Misuratore massico di 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

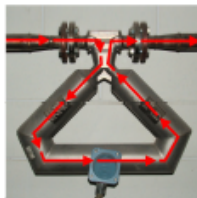
$$\vec{F}_C = -2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

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, $\times$ rappresenta il prodotto vettoriale e ω è la velocità angolare del sistema non inerziale, misurata rispetto a un sistema inerziale.

La forza di Coriolis è una forza apparente, a cui risulta soggetto un corpo quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto rotatorio rispetto a un sistema di riferimento inerziale

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)



Misuratore massico di Coriolis



Figura 2.32 – Deformazioni indotte nella tubazione di misura

Misuratore massico di Coriolis

I sensori di movimento installati nel tubo di Coriolis sono sensibili all'angolo di torsione θ .

Un elemento infinitesimo di massa del fluido (dM) avente densità ρ , induce una forza d'inerzia pari a:

$$dM(2\vec{\omega} \times \vec{v})$$

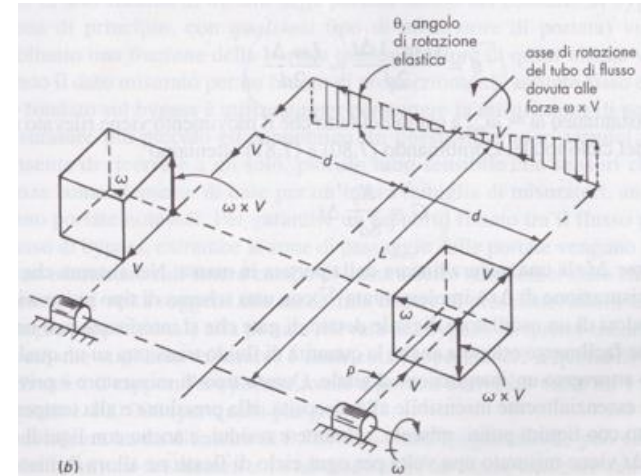
La forma a C del tubo fa sì che la velocità del fluido cambi segno tra ingresso ed uscita. Pertanto, una coppia di masse (una entrante e l'altra uscente) generano una coppia torsionale d'inerzia dT

$$dT = 2(2\vec{\omega} \times \vec{v})dM * d$$

Da cui

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

Dove G è la portata massica. Pertanto la coppia T oscilla alla velocità angolare ω che porta a torcere il tubo a C.



Misure di portata massica – Misuratore massico di Coriolis

In queste condizioni il sistema agisce come una molla di rigidezza K_S , il cui angolo di torsione θ è direttamente proporzionale alla portata massica:

$$\theta = \frac{4Ld\omega}{K_S} G$$

Sensori di spostamento installati ai lati del tubo rilevano il passaggio dell'oscillazione dello stesso. Il ritardo di attivazione tra i due sensori (dovuto all'oscillazione del tubo) risulta quindi proporzionale all'angolo di torsione:

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

Pertanto, dal tempo di sfasamento si può risalire al valore di portata massica:

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

Misuratore massico di Coriolis

Tipologie costruttive

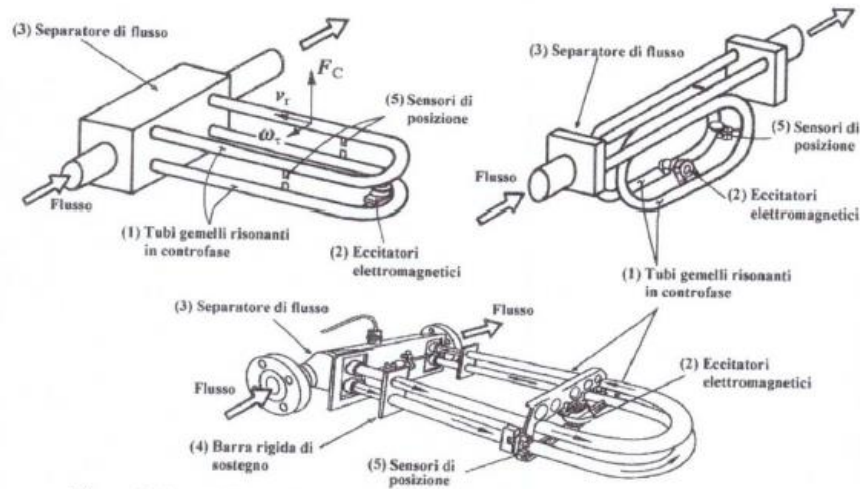
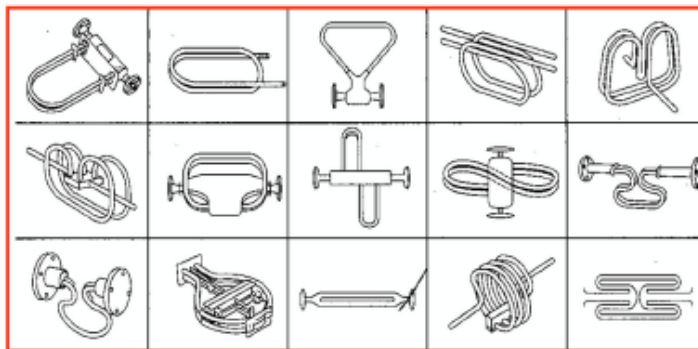


Figura 2.33 – Differenti tecnologie costruttive dei misuratori ad effetto Coriolis

Misuratore massico di 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.

Misuratore massico di Coriolis

Caratteristiche tecniche (Endress+Hauser Yokogawa)

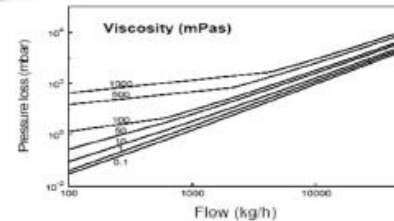
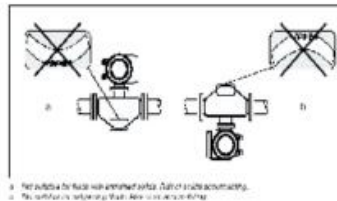
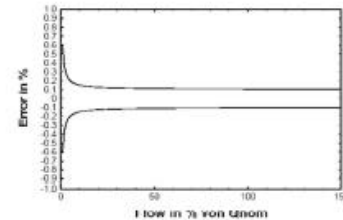
Range di portata: fino a 2200 t/h

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.



Misuratore massico termico

Principio di funzionamento (corrente costante)

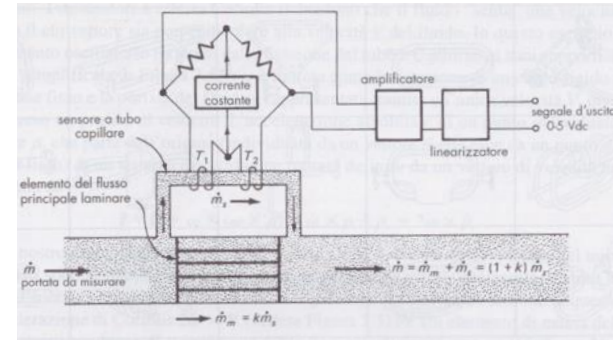
Il principio di funzionamento si basa sui principi della trasmissione di calore.

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 risultato viene poi moltiplicato per un fattore di proporzionalità (fisso e noto).

Sia la condotta di scorrimento che quella di misura sono progettate in modo da garantire un flusso laminare in modo da garantire la scalabilità del risultato di misura tramite il fattore di proporzionalità, considerato che la caduta di pressione è proporzionale per tutti gli elementi costitutivi del flusso laminare.



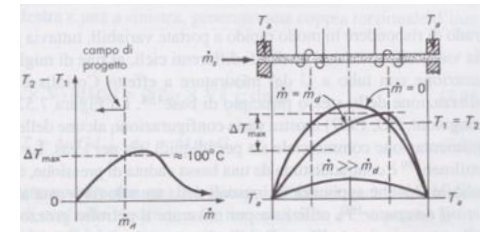
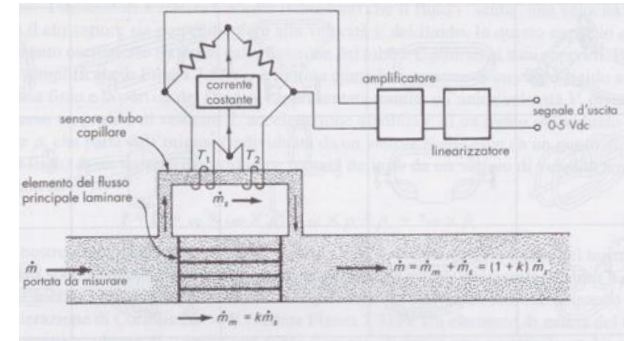
Misuratore massico termico

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.

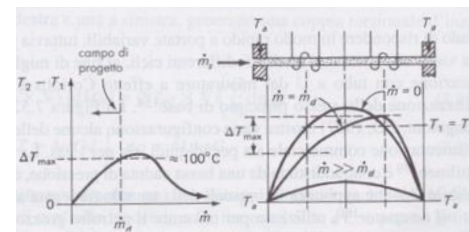
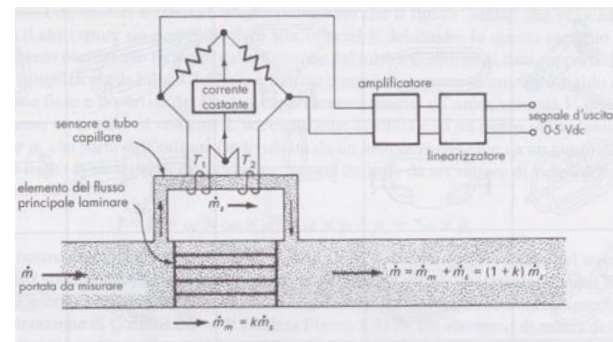


Misuratore massico termico

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 ($T_1 - T_2 = 0$).

- Facciamo fluire una portata $\dot{m}$
- Il flusso, inizialmente a temperatura T_a , riceve calore dal tubetto, si scalda e lasciando la prima zona si porta via energia secondo: $\dot{m}c_p T_1$
- T_1 diminuisce (vedi grafico)
- La diminuzione di T_1 è proporzionale a $\dot{m}$
- 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).



Misuratore massico termico – un esempio commerciale

Caratteristiche tecniche (temperatura costante)

https://www.youtube.com/watch?v=-VUL0xWUeY&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.

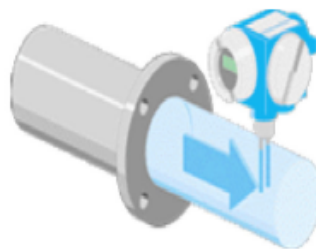
Maggiore è la portata che fluisce, maggiore è la quantità di calore asportata dal fluido e maggiore è la corrente da spendere per mantenere la differenza di temperatura tra le due PT100 costante.

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

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**



Misuratore massico termico – un esempio commerciale

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: $< 3\text{ W}$



Caratteristiche tecniche (Honeywell)

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

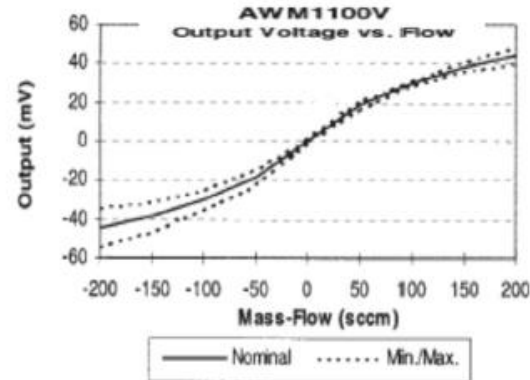
Range di portata: $-600 \dots +1000\text{ sccm}$

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

Uscita: mV

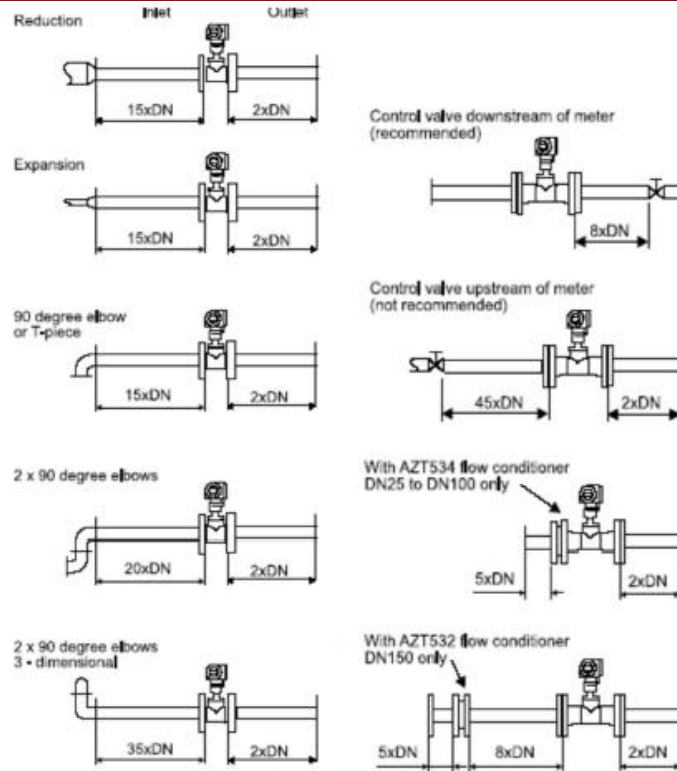
Alimentazione: 8-15 VDC

Consumo: 30 mW

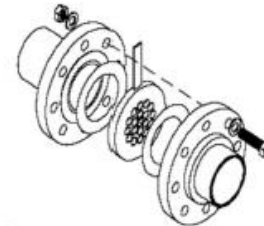


Misure 2016 - Taccani

Misuratore massico termico: installazione



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



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".