

## *Sensori per misure sui fluidi*

### 15.1. Introduzione

I *fluidi* in moto vanno dai gas a bassa densità, ai liquidi, ai plasmi, ma i sensori utilizzati per misurare *portata* e *velocità* di questi fluidi trovano utilizzazione anche per misurare grandezze relative al moto di alcune sostanze solide quali per esempio il grano o la sabbia. I sensori in genere danno informazioni sulla velocità alla quale un certo volume di fluido passa attraverso una determinata area o sulla velocità alla quale la massa del fluido si muove o sulla quantità totale di fluido che è passata in un determinato intervallo di tempo.

I campi di applicazione di tali sensori sono i più disparati e vanno da quello industriale a quello medico a quello dei reattori nucleari. Proprio la vastità dei settori di applicazione non consente di avere un'unica tipologia di sensore o di far ricorso a un unico principio fisico. Esiste una gran varietà di sensori per misure sui fluidi e sono impiegati diversi principi fisici, in modo da fornire, caso per caso e per tutte le diverse esigenze, una soluzione soddisfacente dal punto di vista sia delle caratteristiche sia del costo.

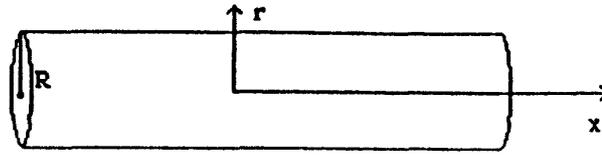
Le misure più frequenti che si eseguono sui fluidi sono quelle di portata e di velocità. Si distinguono due valori di *portata*: quella *volumetrica* (misurata in  $\text{m}^3/\text{s}$ ); quella *ponderale* (misurata in  $\text{kg}/\text{s}$ ). Molto spesso la portata è calcolata per via indiretta dalla misura della velocità del fluido e della sezione del condotto, attraverso il quale si ha il passaggio del fluido. Note la portata volumetrica e la densità del fluido è immediato risalire alla portata ponderale mediante semplice prodotto. Nel caso dei gas è in genere necessario misurare la densità del fluido, per risalire alla portata ponderale, anche se ne è noto il valore.

Se si indica con  $v_m$  la *velocità media* di un fluido in moto in un condotto di superficie trasversale  $S$ , la portata volumetrica è data da:

$$[15.1] \quad q = v_m S$$

per cui, se è nota la superficie  $S$ , risulta equivalente misurare la portata volumetrica o la velocità media del fluido. Nel caso di moto laminare, in base all'*equazione di Poiseuille*, in un tratto cilindrico del condotto la

FIGURA 15.1  
 Coordinate all'interno di un condotto



velocità massima è funzione della viscosità  $\mu$  e della pressione  $p$  del fluido:

$$\begin{aligned}
 [15.2] \quad v_{\max} &= \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{4\mu} & v(r) &= v_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \\
 v_m &= \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{8\mu} = \frac{v_{\max}}{2}
 \end{aligned}$$

In fig. 15.1 sono indicate le coordinate all'interno del condotto cui si riferiscono le precedenti equazioni. Con  $R$  si è indicato il raggio del condotto cilindrico.

Le equazioni di moto laminare sono valide finché si possono trascurare gli effetti inerziali. Quando ciò non è più possibile il moto diventa turbolento. Il tipo di moto in un condotto può essere ricavato calcolando il *numero adimensionale di Reynolds*, che per condotte cilindriche risulta:

$$[15.3] \quad R_e = 2 \frac{\rho v_m}{\mu}$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido. L'esperienza ha mostrato che per  $R_e > 4.000$  il moto è sempre *turbolento*, per  $R_e < 2.000$  il moto è *laminare*. Nel campo tra 2.000 e 4.000 il moto può essere sia laminare sia turbolento o una combinazione dei due. Questi valori di  $R_e$  non sono validi per tutti i fluidi, ad esempio per il sangue  $R_e < 1.000$  assicura che il moto sia laminare e per  $R_e > 2.000$  il moto è turbolento. In genere i sensori sono in grado di fornire indicazioni sul tipo di moto nel condotto, ma poiché la turbolenza può essere causata da sbalzi, deformazioni delle superfici, brusche strozzature, i sensori dovrebbero essere posti lontani da gomiti, giunti e valvole. A volte i sensori richiedono che il flusso al loro interno sia laminare, per cui è necessario aggiungere al condotto una ulteriore sezione, dove il moto si stabilizzi prima che il fluido entri nel sensore.

## 15.2. Sensori per la misura diretta della portata

Questo tipo di sensore si basa sulla definizione di portata volumetrica. Allo scopo si predispongono delle vasche aventi volume noto, identi-

FIGURA 15.2  
Sensore a gravità

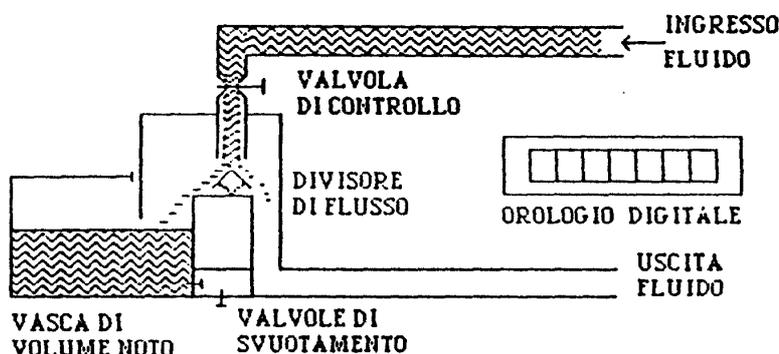
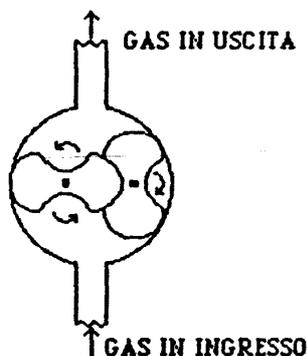


FIGURA 15.3  
Pompa di Root

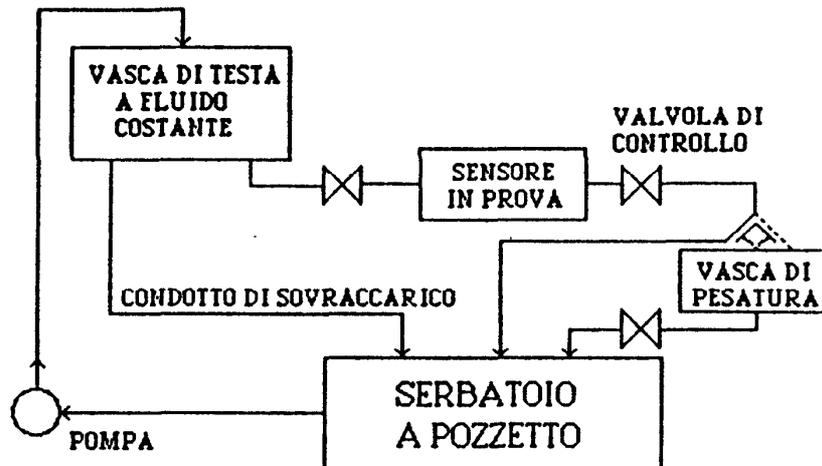


che, riempite dal fluido che quindi è restituito al condotto. Il prodotto tra numero di vasche, il volume e il tempo medio di riempimento delle vasche stesse fornisce il valore della portata. Questi sensori sono affetti da un errore sistematico, dovuto alla perdita di carico e quindi di portata, causata dal riempimento delle vasche. L'errore è funzione della densità, della viscosità del fluido e della variazione di pressione a monte e a valle dell'orifizio attraverso cui il fluido entra nella vasca:

Si usano sensori diversi secondo che si tratti di liquidi o di gas. Nel caso di liquidi il *dispositivo* più semplice per il riempimento della vasca è quello *a gravità*, mostrato in fig. 15.2, mentre per i gas si utilizza un sensore tipo *pompa di Root*, mostrato in fig. 15.3.

Nella pompa di Root vi sono due capsulismi che ruotano quando vi è un flusso di gas. Per ogni ciclo di rotazione passa attraverso il sensore un volume di fluido noto con precisione. Quindi il volume di gas che attraversa il sensore in un determinato intervallo di tempo è funzione del numero di cicli dei rotori. In questo tipo di sensore bisogna assicurare la minima dispersione tra i capsulismi e le pareti del contenitore, rendendo

FIGURA 15.4  
 Sensore a gravità per la taratura di un sensore in prova



minima la distanza tra questi. È anche importante che la resistenza al flusso di gas, da parte dei capsulismi, sia minima. In tal caso risulta piccola l'energia fornita dal gas per il moto dei capsulismi e la differenza di pressione tra ingresso e uscita del sensore. Il sensore è usato a pressioni fino a 8.000 kPa, ma la temperatura non deve eccedere 60 °C. Le portate sono nel campo compreso tra  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  e  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , con livelli di incertezza intorno allo 0,5%.

Vi sono diverse altre possibili soluzioni. Sensori per la misura diretta della portata in genere si utilizzano per tarare quelli di maggiore utilizzazione pratica. Per mantenere costante la pressione si ricorre a sistemi a circuito chiuso con controllo di pressione. In fig. 15.4 è mostrato un sistema di taratura basato sul *sensore a gravità*. Con questo tipo di sensore si possono tarare dispositivi per portate sino a  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressioni fino a 500 kPa, con incertezze inferiori allo 0,2% del fondo scala. In questi sistemi oltre all'accuratezza bisogna porre molta cura alla linearità della risposta. Poiché spesso i sensori primari sono usati con aria o acqua, bisogna verificare che i livelli di accuratezza, forniti dal costruttore, siano conservati al variare delle caratteristiche del fluido che poi attraverserà realmente il sensore una volta installato nell'ambiente operativo. Fattori di influenza da controllare sono le dimensioni del condotto, la pressione, la temperatura, in quanto alterano la densità del fluido, specie se questo è un gas. In particolare per i gas anche l'umidità può essere una grandezza d'influenza non trascurabile, mentre per i liquidi bisogna controllare la presenza di aria al loro interno.

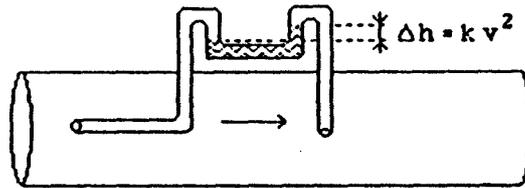
### 15.3. Sensori di portata a pressione differenziale

Applicando il *principio di conservazione di energia* al moto stazionario lineare di un fluido ideale non comprimibile, si perviene all'*equazione di Bernoulli*:

$$[15.4] \quad h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = k$$

dove  $h$  è l'altezza geometrica,  $p$  la pressione,  $\rho$  la densità,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $v$  la velocità e  $k$  una costante. Il tubo di flusso di sezione  $S$  deve essere abbastanza sottile da potersi confondere con un *filetto fluido*, ipotesi che permette di considerare  $h$  costante sulla sezione.

FIGURA 15.5  
Schema di un sensore di portata a pressione differenziale



Una semplice applicazione è quella mostrata in fig. 15.5. In base all'eq. [15.4], indicate con  $p_1$  la pressione nel tubo in direzione parallela al moto del fluido e con  $p_2$  quella in direzione normale, si ha:

$$p_1 = p + \rho \frac{v^2}{2} + \rho gh$$

$$p_2 = p + \rho gh$$

per cui in definitiva:

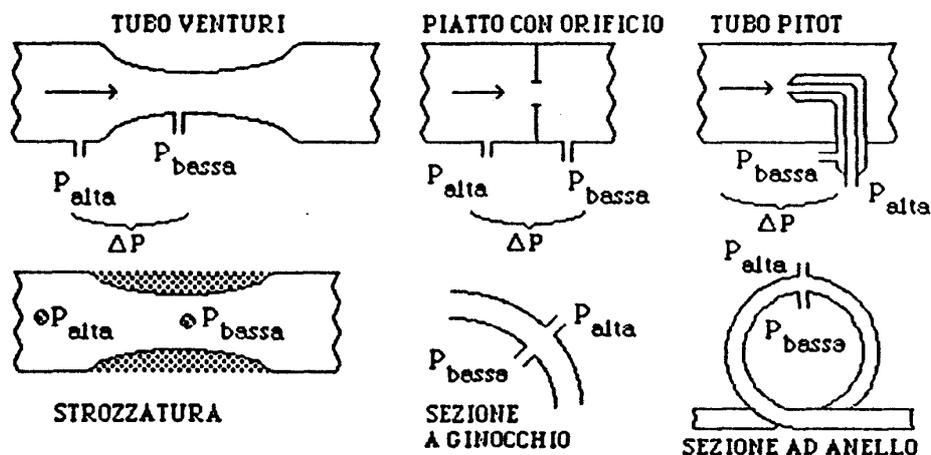
$$[15.5] \quad v^2 = \frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)$$

si è così ricondotta la misura di velocità a quella di una differenza di pressione.

Vi sono molti sensori di portata basati sul principio della pressione differenziale utilizzati per misure di portate sia di gas sia di liquidi. Nel seguito si esamineranno i più noti.

Nei *sensori a differenza di pressione* il fluido è costretto a fluire in un condotto attraverso un restringimento, in modo che vari la sua velocità e si crei una differenza di pressione proporzionale alla portata. La *differenza di pressione* si può ottenere in diversi modi, come illustrato schematicamente in fig. 15.6. Poiché la portata volumetrica è la stessa lungo il condotto, se questo si restringe, ovvero diminuisce la sezione, si ha un aumento di velocità e in accordo una diminuzione della pressione, per il principio di conservazione dell'energia. La differenza di pressione

FIGURA 15.6  
Sensori a differenza di pressione



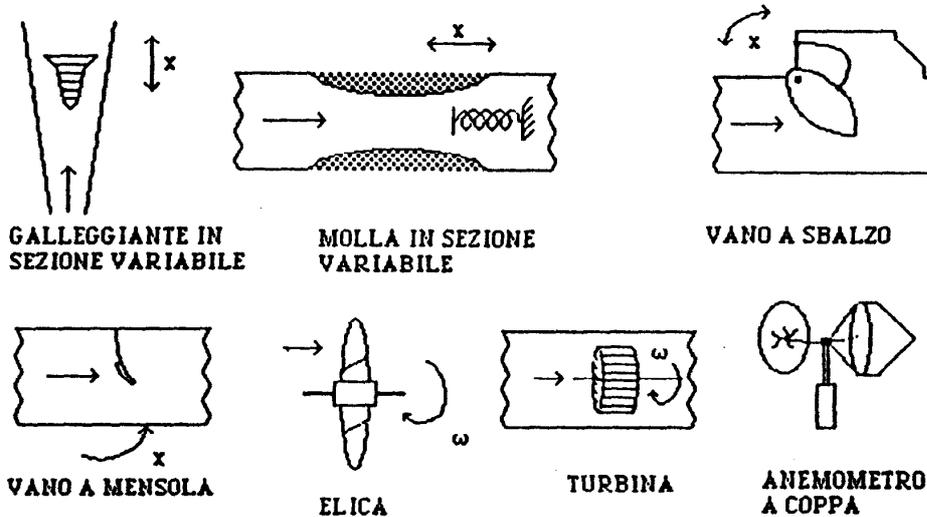
si misura mediante un sensore differenziale di pressione. La portata volumetrica è proporzionale alla *radice quadrata* della differenza delle pressioni.

Il basso costo, l'elevata affidabilità, la facilità di installazione rendono i sensori a differenza di pressione molto diffusi in ambito industriale. Molti costruttori forniscono insieme con il sensore il misuratore di differenza di pressione e il sistema di presentazione dei risultati. Per la presenza della radice quadrata nella relazione tra portata e differenza di pressione, molto spesso il trasduttore è dotato di un sistema elettronico di *linearizzazione della risposta*. Il sensore di differenza di pressione può essere montato mediante tubi o far parte di un blocco unico. In genere il trasduttore di portata è dotato di un sensore di temperatura e di un sensore di pressione assoluta, specie se si vuol determinare la portata ponderale di un gas. Nei nuovi sensori il calcolo della portata volumetrica o ponderale e le varie correzioni sono eseguite da un microprocessore e il risultato presentato su un display. I sensori di portata a pressione differenziale hanno *dimensioni* comprese in un'ampia gamma e possono essere utilizzati per condotti di diametro sia di pochi centimetri sia di diversi metri. Gli svantaggi, facilmente intuibili, sono quelli di dover mantenere le parti in cui diminuisce la pressione libere da detriti e residui solidi. Il metodo non è utilizzato per liquidi altamente viscosi o per particolari sostanze.

#### 15.4. Sensori meccanici di portata

Un oggetto posto in un fluido in movimento è soggetto a una forza che lo fa muovere nella stessa direzione del flusso. L'oggetto si muoverà o si infletterà o ruoterà con una velocità proporzionale alla portata. Su questo principio si basano molti sensori di portata, che utilizzano al loro

FIGURA 15.7  
Sensori meccanici di portata



interno elementi sensibili allo *spostamento lineare* o *angolare*, per rilevare l'entità dell'effetto causato dalla portata del fluido.

In fig. 15.7 sono mostrati alcuni di questi sensori. Uno dei loro limiti è che richiedono al fluido in moto una certa energia per muovere l'elemento sensibile, il che determina una *resistenza al moto*, che in taluni casi può essere intollerabile. Questi sensori d'altra parte hanno il vantaggio di un più *ampio campo di misura* rispetto a quelli basati sul metodo a differenza di pressione. Lo spostamento dell'elemento sensibile è facilmente convertibile in un segnale elettrico, sfruttando i sensori di spostamento precedentemente esaminati.

Molto più utilizzati rispetto ai *sensori a spostamento lineare* sono quelli *a rotazione* e in particolar modo quelli *a turbina*. In questi in genere si utilizza un sensore magnetico, basato sull'effetto elettrodinamico, per misurare la velocità angolare. Piccoli magneti permanenti ruotano solidalmente con le pale della turbina eccitando per ogni giro del rotore una bobina fissa esterna e dando quindi luogo a una serie di impulsi. Gli impulsi sono inviati a un contatore digitale tarato direttamente in portata. Si possono misurare portate di gas da  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . I *tempi di risposta* sono dell'ordine dei millisecondi, in quanto si rende piccolo il momento di inerzia del rotore e trascurabile lo smorzamento. I sensori a turbina possono essere utili per rilevare transitori e variazioni impulsive del flusso.

Anche negli *anemometri a coppa* si utilizzano sensori magnetici per misurare la velocità di rotazione. Versioni più recenti utilizzano sistemi a magnetostrizione per aumentare la sensibilità di misura, ma non rispondono bene a brusche variazioni della portata. Sono stati realizzati anche sistemi *a giroscopio* o *a doppia turbina* con diverse velocità di rotazione o *a differenza di fase*.

### 15.5. Sensori termici di portata

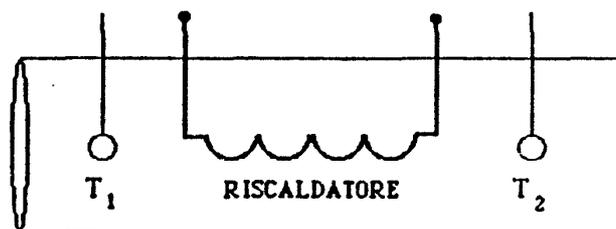
La quantità di calore trasferita tra due punti in un fluido in movimento è proporzionale alla portata ponderale. Il primo sensore termico di portata fu descritto da C. C. Thomas nel 1911 e gli ultimi sviluppi nel progetto di tali sensori non alterano sostanzialmente il prototipo iniziale. Come mostrato in fig. 15.8 un riscaldatore è immerso in un fluido e due sensori di temperatura sono posti da parti opposte rispetto al riscaldatore, in modo che questo riscaldi il fluido che passa attraverso i due sensori. La portata ponderale è legata sia alla quantità di calore  $Q$  ceduta dal riscaldatore sia alla differenza tra le temperature  $T_2$  e  $T_1$ , misurate dai due sensori, attraverso la seguente relazione:

$$[15.6] \quad P_p = \frac{Q}{c(T_2 - T_1)}$$

dove  $c$  è il calore specifico del fluido.

Inizialmente come sensori di temperatura si utilizzavano termocopie, oggi sostituite da sensori termoresistivi. Poiché il calore ceduto dal riscaldatore deve aumentare notevolmente al crescere del diametro del condotto per assicurare una buona sensibilità, il metodo è limitato a condotti con diametro relativamente piccolo. Si può ovviare all'inconveniente predisponendo un raccordo parallelo a rapporto costante, con sezione di diametro molto più piccolo di quello del condotto principale. Questa soluzione è stata utilizzata per i gas. Un altro modo di superare l'inconveniente è quello di riscaldare il fluido solo in prossimità della superficie del condotto, quasi sempre dall'esterno, solo che in tal caso la relazione che lega portata, quantità di calore e differenza di temperatura non è semplice come quella scritta precedentemente.

FIGURA 15.8  
Schema semplificato di un sensore termico



Un altro sensore termico di portata molto utilizzato è quello a *riscaldamento del condotto*, come mostrato in fig. 15.9. In assenza di moto del fluido (in genere gas) la temperatura dei due sensori è la stessa. Come il fluido passa nel condotto, diminuisce la temperatura nel punto 1 e aumenta quella nel punto 2. Questa differenza di temperatura è tanto



funzionamento su citati. Quasi sempre il trasduttore conta di due sensori di temperatura dei quali uno, non riscaldato, serve per compensare l'effetto delle variazioni della temperatura ambiente. Nel circuito di fig. 15.10a si regola la corrente fin tanto che nel sensore non circoli un valore stabilito come ottimo per il funzionamento della termoresistenza. All'aumentare della velocità del fluido, il sensore si raffredda per il calore asportato per convezione, con legge di variazione proporzionale approssimativamente alla radice quadrata della velocità del fluido. La variazione di resistenza sbilancia il ponte e fa sorgere una tensione elettrica in uscita, legata alla portata che si vuol misurare.

Nel circuito di fig. 15.10b la variazione di resistenza squilibra il ponte. La tensione di squilibrio è amplificata e incrementa la tensione di alimentazione del ponte finché non si ristabilisce l'equilibrio. Questo sarà raggiunto quando il sensore di temperatura avrà riacquisito il valore di resistenza che aveva a ponte in equilibrio (temperatura costante).

Le variazioni della tensione di alimentazione sono quindi proporzionali alle variazioni della portata, che ha causato l'asportazione di calore dal sensore termico. Vi è anche un sensore per la compensazione dell'effetto di variazioni di temperatura ambiente (che ha la stessa funzione di quello utilizzato per la compensazione dell'effetto termico negli estensimetri). La risposta in frequenza arriva a coprire le centinaia di kilohertz.

Questi tipi di sensore sono a volte usati anche per i liquidi, in quanto hanno dimensioni molto ridotte e quindi una risposta in frequenza in una banda abbastanza ampia, tempi di risposta molto ridotti (10  $\mu$ s) e risultano quindi particolarmente indicati per misure di profili di velocità del liquido in condotti, canali e per analisi di velocità del liquido in microstrutture quando si sia in presenza di turbolenze.

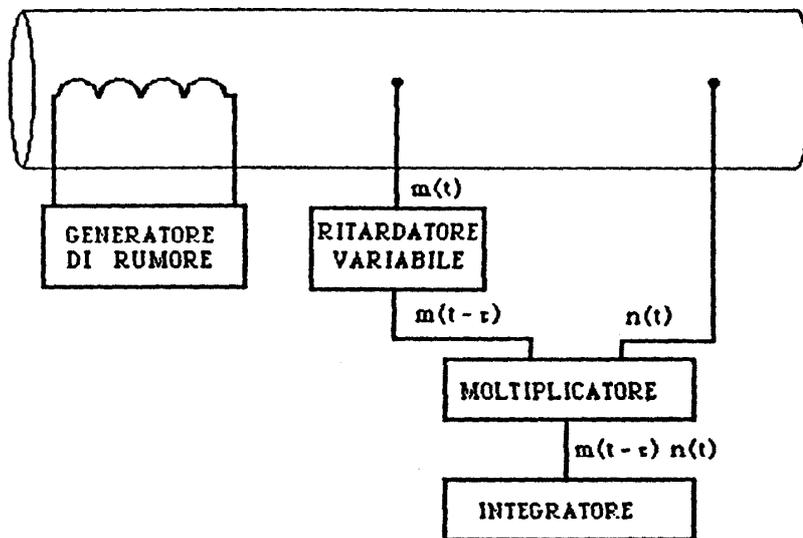
Negli ultimi anni si sono affermati anche dei *sensori termici* di portata a *correlazione mutua* ("cross-correlation"). Una delle possibili soluzioni prevede che in un conveniente punto del condotto sia posto un riscaldatore energizzato da un generatore di segnale che fornisce un segnale di rumore pseudo-random. Questo cede al fluido quantità di calore relativamente piccole in una sequenza temporale che simula un riscaldamento aleatorio.

In pratica, molto spesso, il generatore è binario e fornisce solo due possibili valori di quantità di calore, in una sequenza temporale continua di tipo aleatorio. Esso prende il nome di generatore PRBS (Pseudo-Random-Binary-Sequence).

A valle del riscaldatore vi sono due sensori di temperatura, con tempi di risposta molto ridotti, in modo che ambedue ricevano le stesse fluttuazioni termiche; ma in tempi differenti. I segnali disponibili ai morsetti dei sensori di temperatura contengono informazioni sul riscaldamento del fluido, ma in modo non chiaramente correlato al rumore introdotto. Solo attraverso una tecnica di correlazione dei due segnali è possibile risalire alla quantità di calore trasmessa.

In fig. 15.11 è schematizzato un possibile assemblaggio di componenti che consentono di effettuare la correlazione mutua dei due segnali. Un sistema automatico introduce un ritardo variabile,  $\tau$ , tra i due segnali

FIGURA 15.11  
 Sensore a correlazione mutua



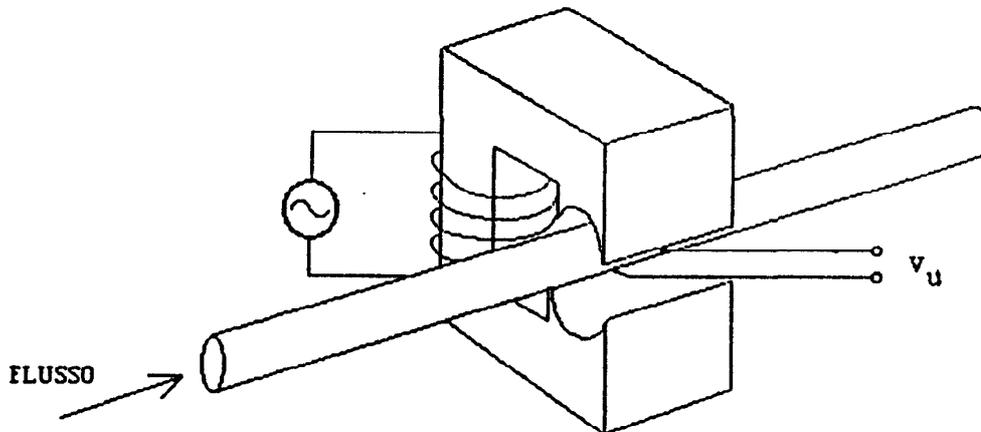
$m(t)$  ed  $n(t)$ , prelevati dai due sensori di temperatura. I due segnali vengono quindi moltiplicati e ne viene fatta la media in un certo intervallo di tempo  $t$ . Si ottiene così la funzione di correlazione mutua  $C(\tau)$  in funzione di  $\tau$ . Da questa funzione è poi possibile ricavare lo spettro del segnale, che contiene una serie di informazioni utili sulla velocità del fluido. In particolare è possibile ricavare il tempo di transito che particelle solide impiegano per passare da un sensore all'altro; infatti questo è il valore del ritardo che fa assumere un valore di picco alla funzione  $C(\tau)$ .

Nei gas con particelle in sospensione si può anche evitare l'uso di un generatore di segnale aleatorio e si possono valutare i segnali con condensatori la cui capacità varia in presenza di sospensioni solide, per le variazioni della permittività.

### 15.6. Sensori elettromagnetici di portata

Sensori di questo tipo si basano sul principio che in un fluido conduttivo che attraversi un campo magnetico si induce una f.e.m. proporzionale alla velocità del fluido per effetto elettromagnetico. Il campo magnetico è creato da un elettromagnete eccitato con corrente alternata o continua pulsante. Come mostrato in fig. 15.12 due elettrodi posti sulla superficie del condotto sono utilizzati per rilevare il valore assunto dalla f.e.m., che si ricorda è proporzionale al valore  $B$  dell'induzione magnetica, alla distanza  $l$  tra gli elettrodi e alla velocità  $v$  del fluido. Non è necessario che il fluido sia molto conduttivo, sono sufficienti conduttività comprese tra 0,1 e 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**FIGURA 15.12**  
**Schema di un sensore elettromagnetico di portata**



*Sensori elettromagnetici* sono utilizzati correntemente per liquidi quali sodio, soluzioni saline, acqua di mare, sangue, mercurio e naturalmente acqua. Le parti che richiedono più cura nella progettazione sono la bobina eccitatrice e gli elettrodi. La superficie del tubo deve essere diamagnetica e consentire l'isolamento degli elettrodi. Il materiale migliore da questo punto di vista è la plastica. Nei sensori da cui è richiesta una elevata accuratezza, il sistema di misura è tarato sul posto. I livelli di tensione agli elettrodi sono bassi, ma l'alimentazione dell'elettromagnete in c.a. permette di avere un ottimo SNR, in quanto è facile l'amplificazione ed eventuali potenziali termoelettrici ed elettrochimici, essendo in continua, non alterano la misura.

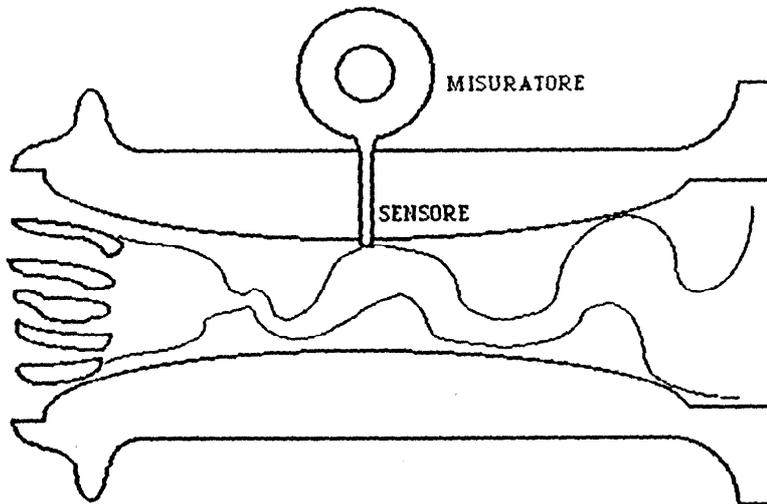
Il campo di applicazione va da condotti del diametro di 3 mm a quelli con diametro da 2 m. In genere questi sensori non risentono della presenza di sostanze solide in sospensione.

### 15.7. Sensori a fluido oscillante

Introducendo un ostacolo nel fluido in moto si possono creare dei vortici e quindi un moto oscillatorio funzione della portata volumetrica. Su questo principio si basano i *sensori a fluido oscillante* come quello schematicamente indicato in fig. 15.13.

La frequenza con la quale il cuore del vortice attraversa un dato punto della superficie del condotto è proporzionale alla portata volumetrica. La frequenza è rilevata mediante un sensore, dotato di un ottimo tempo di risposta, come per esempio un sensore piezoelettrico. Il misuratore è tarato direttamente in portata volumetrica. Il vortice assume una figura detta di von Karman e varia con il tipo di ostacolo inserito.

FIGURA 15.13  
Schema di un sensore a vortice



### 15.8. Sensori di fluido a effetto Doppler

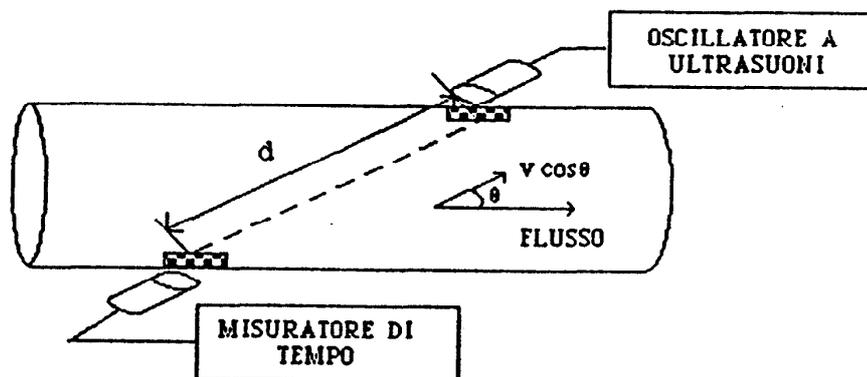
Sotto il nome di *sensori di fluido a effetto Doppler* sono raggruppati quelli che si basano sia sull'effetto da cui prendono il nome sia sulle alterazioni che subisce una radiazione che si propaghi in un mezzo fluido in moto. Così mentre i sensori basati sull'effetto Doppler inviano il segnale in uscita a un misuratore di *frequenza*, in grado di rilevarne le variazioni proporzionali alla velocità del moto, in altri sensori si misura il *tempo di transizione* dell'energia irradiata attraverso il fluido in movimento. Il tempo di transizione dipende infatti sia dalla velocità di propagazione dell'energia sia dalla velocità del fluido nella stessa direzione. In genere i metodi basati sulla misura del tempo di transizione non consentono di ottenere gli stessi livelli di risoluzione dei metodi basati sulla misura della variazione di frequenza. Le *radiazioni* che si utilizzano in questi sensori sono di diverso tipo e precisamente a *ultrasuoni* o nel campo di frequenze *radar* o provenienti da *laser*, con soluzioni differenti soprattutto per i valori diversi di lunghezza d'onda.

#### 15.8.1. Sensori a ultrasuoni

I maggiori vantaggi dei *sensori a ultrasuoni* sono legati al fatto che il moto del fluido all'interno di un condotto non è alterato, se non in misura trascurabile, dalla presenza del sensore, in quanto non sono create ostruzioni o modifiche nel condotto stesso. Ciò permette di avere indicazioni anche sul reale profilo della velocità del fluido.

La prima proposta di utilizzare gli ultrasuoni nelle misure di portata

FIGURA 15.14  
 Schema di un sensore a ultrasuoni



di un fluido risale a più di quaranta anni fa, ma solo negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico ha consentito l'applicazione di questa tecnica a livello industriale. In ogni caso i sensori disponibili in commercio sembrano ancora a uno *stato iniziale di sviluppo* e ne è conferma il fatto che in recenti convegni scientifici siano state avanzate proposte tese a migliorare i metodi di misura basati sugli ultrasuoni.

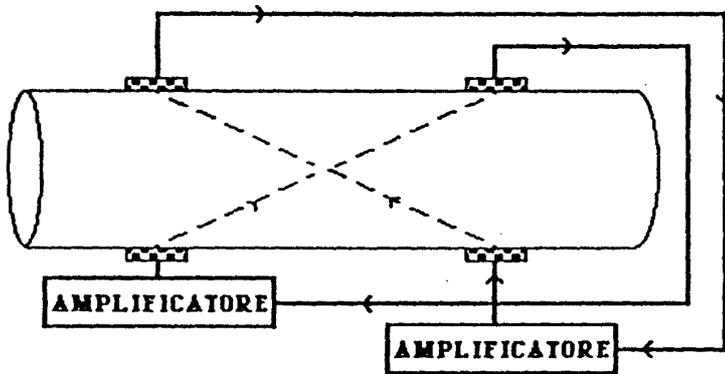
Un semplice modo di realizzare un sensore a ultrasuoni, che però non consentirebbe di sfruttare i succitati vantaggi del metodo, potrebbe essere quello di predisporre due cristalli piezoelettrici all'interno del condotto allineati nella direzione del flusso, uno per la trasmissione e uno per la ricezione della radiazione. La radiazione irradiata dal cristallo trasmettitore, con una frequenza in genere intorno ai 10 MHz, impiega, per raggiungere il ricevitore, un certo tempo di transito, legato alla velocità del fluido. Altri limiti di questo sistema sono legati alla scarsa risoluzione del metodo, dovuta al valore molto piccolo del tempo di transito, e alla dipendenza della misura dalla velocità dell'onda acustica, variabile con la temperatura.

Una soluzione realizzata praticamente è quella mostrata nella fig. 15.14. Quando il fluido nel condotto è fermo, il tempo di transito che un'onda irradiata dal trasmettitore impiega per raggiungere il ricevitore è funzione semplicemente della distanza,  $d$ , tra trasmettitore e ricevitore e della velocità,  $v_u$ , dell'onda acustica nel fluido:

$$t_0 = \frac{d}{v_u}$$

Se invece il fluido è in movimento con velocità uniforme su tutta la superficie del condotto, il tempo di transito dipenderà anche dalla componente,  $v_r$ , della velocità del fluido lungo la congiungente trasmettitore ricevitore, secondo una relazione che, nell'ipotesi la velocità del fluido risulti molto minore della velocità di propagazione dell'onda acustica, è data da:

FIGURA 15.15  
Schema di un sensore "single-around"



$$t = \frac{d}{v_u \pm v_r}$$

dove il segno più o meno dipende dalla concordanza o meno delle due velocità. Ipotizzando, come nel caso della figura che valga il segno meno, si ha:

$$\Delta t = t - t_0 = d \frac{v_r}{v_u(v_u - v_r)} = d \frac{v_r}{v_u^2} \quad v_r = \frac{v_u^2}{d} \Delta t$$

Il metodo è affetto da errori dovuti alla non contemporaneità delle misure dei tempi di transito  $t_0$  e  $t$ , influenzati dalle variazioni di temperatura che alterano la velocità di propagazione dell'onda acustica. Un'altra causa di errore è legata al fatto che la velocità del fluido nel condotto ha un profilo che bisogna portare in conto per poter risalire alla velocità media e quindi alla portata relativa a una superficie normale all'asse del condotto, differente da quella su cui giace la congiungente trasmettitore-ricevitore. La portata avrà quindi un'espressione del tipo:

$$q = k S v_r$$

dove  $k$  è un coefficiente correttivo che porta in conto il modo in cui è stata misurata la velocità media  $v_r$ . Per esempio, nel caso di un moto laminare con una distribuzione di velocità parabolica,  $k$  è pari a  $4/3$ . Nel caso invece di moto turbolento in tubi circolari, per  $k$  è stata proposta una espressione del tipo  $1 + 0,19 Re^{-0,1}$ . Le soluzioni commerciali di questi sensori in genere hanno dei limiti per quanto riguarda il diametro del condotto (intorno a 150 mm), non sono adatte per i gas, inoltre nei fluidi organici come l'olio può essere richiesta la predisposizione di una opportuna finestra nel condotto per facilitare la trasmissione degli ultrasuoni e infine possono insorgere errori oltre che per variazioni di temperatura anche per la presenza di contaminazioni nel fluido.

Un metodo leggermente differente dal precedente fu messo a punto

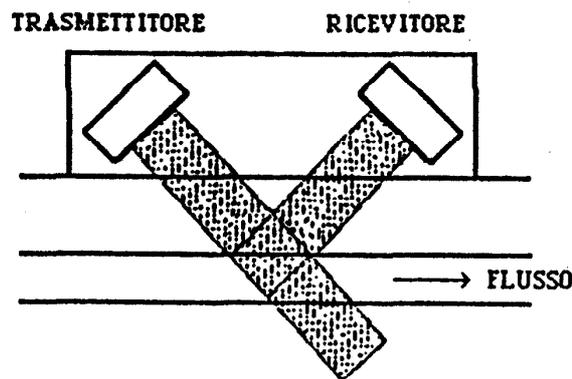
al National Bureau of Standards (NBS, oggi National Institute of Standards and Technology) allo scopo di incrementare la precisione delle misure. Il metodo, schematicamente mostrato in fig. 15.15, prende il nome "sing-around" e consente incertezze dell'ordine di una parte su 5.000. È immediato, sulla base di quanto visto in precedenza, calcolare i tempi di transito, dei due dispositivi incrociati e quindi la differenza delle frequenze dei due segnali disponibili sui ricevitori, opportunamente amplificati:

$$t_1 = \frac{d}{v_u + v_r} \quad t_2 = \frac{d}{v_u - v_r}$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2v_r}{d}$$

dove  $\Delta f$  risulta indipendente dalla velocità di propagazione dell'onda acustica nel fluido, evitando gli inconvenienti sopra citati. In questo caso valori limite per il diametro del condotto sono di 250 mm, se si vogliono raggiungere elevate accuratèzze. Naturalmente l'accuratèzza della misura è tanto più alta quanto maggiore è la velocità del fluido.

FIGURA 15.16  
Schema di un sensore acustico a effetto Doppler

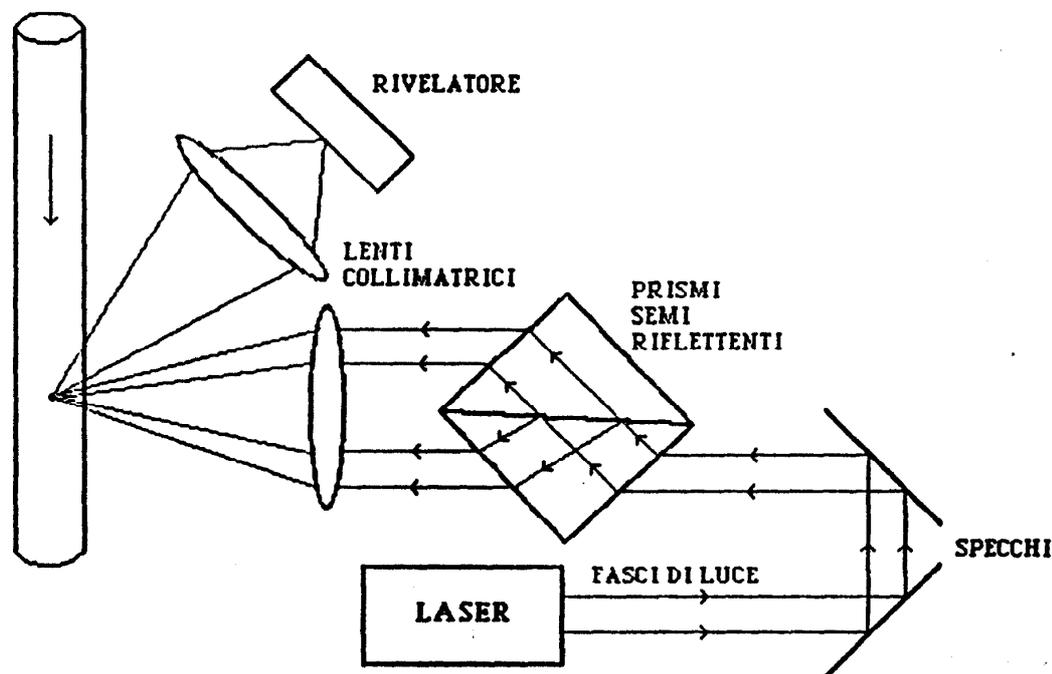


Più recentemente si sono sviluppati, come accennato in precedenza, i metodi basati sull'effetto Doppler. In fig. 15.16 è mostrato un dispositivo di questo tipo applicato alla misura della velocità del sangue nelle vene. In questo caso si utilizza una patina di gel per accoppiare acusticamente i cristalli con le arterie. Gli ultrasuoni sono correntemente usati per rilevare la presenza di perdite nei fluidi in condotti. Per esempio i gas che passano in piccoli orifizi tendono a risuonare nel campo compreso tra 30 e 40 kHz. I rivelatori ultrasonici sono in grado di evidenziarli anche a distanza considerevole.

#### 15.8.2. Sensori a laser

Essi prendono anche il nome di LDV (Laser Doppler Velocimeter) e

FIGURA 15.17  
Sensore a laser



il prototipo fu realizzato alla NASA nel 1964 dove fu utilizzato per misure di portata in uno spazio tridimensionale all'interno dei jet della famiglia dei Saturno V. Solo dopo il 1970 furono sviluppate nuove tecniche combinate elettro-ottiche per ottenere una soluzione commercialmente proponibile. L'uso degli LDV richiede molta *esperienza da parte dell'operatore*. La vendita non ha avuto grossi incrementi in questi anni, a causa dell'*alto costo del sensore*. La diffusione si è avuta limitatamente a dipartimenti e istituti di ricerca nelle università e in grandi laboratori, in un certo senso come avviene per l'anemometro a spira calda. L'*avvento dei microprocessori* ha portato alla realizzazione di una *terza generazione di LDV*, che sono più facili da usare e molto meno costosi dei precedenti, anche se il costo è ancora di un ordine di grandezza superiore a quelli a turbina o a vortice.

Il funzionamento di un LDV presuppone che il fluido contenga *piccole particelle di impurità*, il che si verifica sempre a meno che non si siano prese particolari precauzioni. Infatti è sufficiente in genere che le impurità abbiano un diametro di  $1\ \mu\text{m}$  perché il sensore ottico funzioni ovvero sia in grado di rilevare direzione e velocità del moto della particella. Come è noto, la luce riflessa da queste particelle subisce una variazione di frequenza in dipendenza della velocità della particella. Dalla misura della variazione di frequenza è quindi possibile risalire alla velocità e alla portata del fluido.

La fig. 15.17 mostra in modo schematico come da una sorgente laser si separi un fascio per avere due sorgenti coerenti che interferiscono otticamente nel punto in cui si vuol misurare la velocità. Un sensore quindi

tramite un rivelatore è in grado di dare informazioni sulla frangia circolare dovuta all'interferenza dei due fasci. Se il mezzo in cui avviene l'interferenza è in movimento nel campo di esplorazione ottica, il sensore rileverà variazioni delle frange e fornirà in uscita un segnale variabile. Il periodo del ciclo di variazione è una misura della velocità. Un sistema di elaborazione dati a microprocessore è necessario per avere misure accurate di portata in quanto i segnali a disposizione sono molto piccoli. Spesso è necessario iniettare nel fluido bolle d'aria o particelle solide colloidali per migliorare la sensibilità della misura.

Vi sono diversi tipi di sistemi ottici utilizzati negli LVD. Il sistema di elaborazione richiesto è complesso e inizialmente si basava su un misuratore di variazione di frequenza, mentre la tendenza corrente è quella di verificare attraverso il microprocessore se sia preferibile misurare le variazioni di frequenza o quelle di periodo in modo da migliorare accuratezza e sensibilità.

Gli LDV hanno molte caratteristiche positive. Forniscono una misura assoluta della velocità indipendentemente dalla natura del fluido. L'incertezza è dell'ordine dello 0,1% e può essere ottenuta senza taratura in loco. Le misure della velocità sono praticamente in tempo reale, così che possono essere usate per studi di turbolenza. Oltre all'alto costo questi sensori hanno un ulteriore svantaggio che è quello di richiedere una finestra nel condotto per far sì che passi il fascio di luce proveniente dal laser. Infine richiedono molta esperienza da parte dell'operatore, il che raramente accade.