

FIGURA 7.39
Misuratore di portata volumetrico del tipo elica (si ringrazia Fluidyne Instrumentation, Oakland, C.

sto fatto attraverso l'utilizzo di uno schema con controllo attivo in retroazione, in cui l'albero del misuratore è pilotato da un servo motore elettrico, la cui tensione di alimentazione viene ricavata dall'uscita di un trasduttore di pressione differenziale collegato a cavallo del misuratore. Quando questa pressione differenziale non vale zero, il motore accelera o rallenta, finché la pressione non torna a zero; quindi, il misuratore "insegue" la portata impressa senza estrarre energia dal flusso.

Misuratore a pompa

Una pompa volumetrica a corsa variabile, se adeguatamente progettata, può funzionare contemporaneamente sia come elemento che dà origine a una portata, sia per misurarla. Il principio, anche in questo caso, è essenzialmente quello di una macchina volumetrica, eccetto che per le perdite di trafilamento e per la comprimibilità. La macchina fornisce una determinata portata di fluido a una certa velocità. In molte pompe di questo tipo, la velocità operativa è fissa e la portata si può modificare cambiando la corsa della pompa, di solito attraverso una qualche forma di regolazione meccanica. Dato che queste pompe vengono usate spesso in sistemi di controllo automatizzati, molte vengono progettate per accettare segnali in ingresso di tipo pneumatico o elettrico, che regolino la corsa della pompa in maniera lineare. La portata di un sistema del genere può essere regolata con una accuratezza dell'ordine dell'1%.

Misuratori di portata elettromagnetici

I misuratori di portata elettromagnetici¹¹⁰ sono un'applicazione del principio dell'induzione, mostrato in Figura 7.40a. Se un conduttore di lunghezza l si muove con una velocità trasversale v attraverso un campo magnetico di intensità B , verranno prodotte delle forze sulle particelle cariche del conduttore, che muoveranno le cariche positive verso una estremità del conduttore e le cariche negative verso l'altro capo. Quindi, si viene a creare un gradiente di potenziale attraverso il conduttore e ci sarà una differenza di potenziale e tra le due estremità. La relazione quantitativa tra le variabili è data dalla ben nota equazione

$$e = Blv \quad (7.63)$$

dove

- $B \triangleq$ densità del flusso di campo, $\text{Wb/m}^2 = \text{V s/m}^2$
- $l \triangleq$ lunghezza del conduttore, m
- $v \triangleq$ velocità del conduttore, m/s

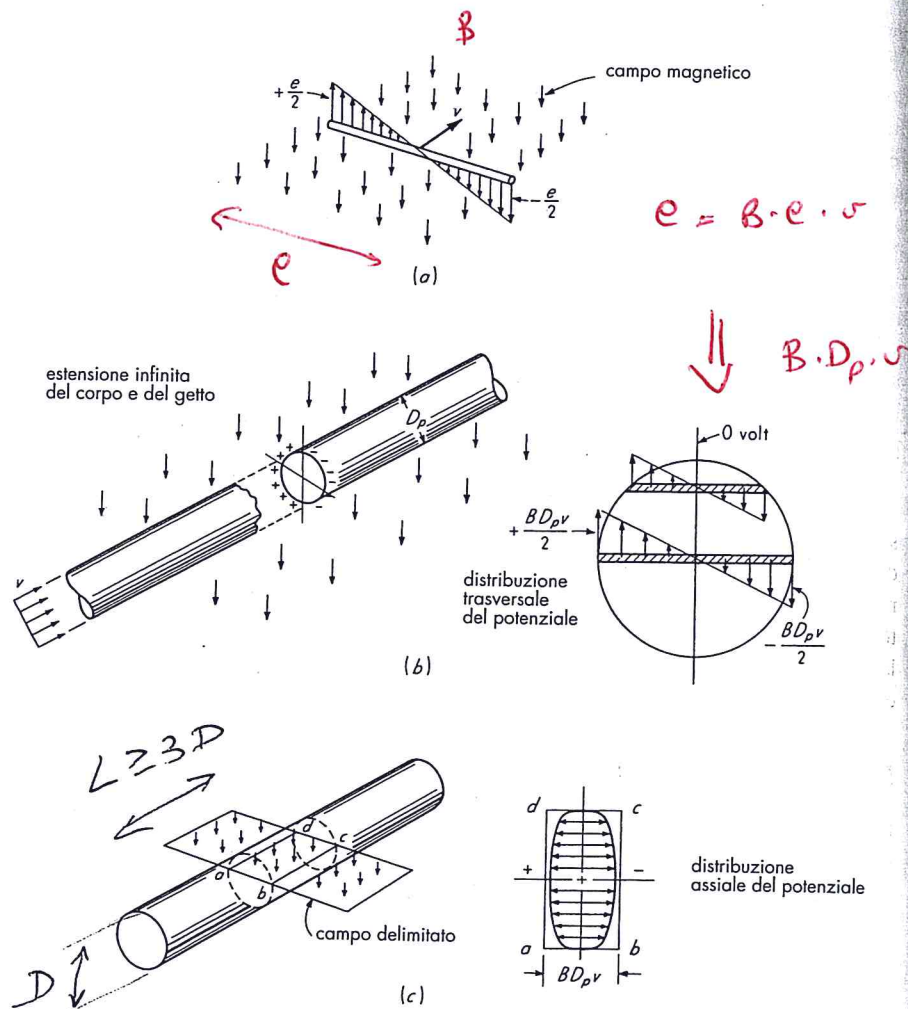
Se le estremità del conduttore vengono collegate a un qualche circuito esterno che sia stazionario rispetto al campo magnetico, la tensione indotta, in generale, produrrà un flusso di corrente i . Questo flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, che ha una resistenza R , causa una caduta di potenziale iR , cosicché la tensione ai terminali del conduttore mobile diventa $e - iR$.

¹¹⁰ J. A. Shercliff, "The Theory of Electromagnetic Flow Measurement", Cambridge University Press, New York, 1962.

$$F = q \cdot v \times B$$

←

FIGURA 7.40
Misuratore di portata
elettromagnetico.



Ora si consideri un flusso cilindrico di fluido conduttore con un profilo di velocità uniforme, che attraversa un campo magnetico, come in Figura 7.40b. In un liquido conduttore, gli ioni positivi e negativi vengono spostati ai lati opposti del getto, formando una distribuzione di potenziale, come mostrato. La massima differenza di potenziale si trova ai capi di un diametro orizzontale e vale $BD_p v$. In una situazione reale, il campo magnetico è di estensione limitata, come mostrato in Figura 7.40c; quindi, non viene indotta alcuna tensione nella parte del getto che risulta esterna al campo. Dal momento che anche questa parte di fluido è comunque un conduttore, tende in qualche misura a "cortocircuitare" le tensioni indotte nella sezione esposta al campo; quindi, la tensione risulta ridotta rispetto al valore $BD_p v$. Se il campo magnetico è sufficientemente lungo, questo effetto sarà piccolo al centro della lunghezza della zona interessata dal campo magnetico. Una lunghezza di circa 3 diametri di solito è sufficiente¹¹¹.

In un misuratore reale (si veda la Figura 7.41¹¹²), il "getto" è contenuto all'interno di una tubatura con flusso stazionario. La condotta deve essere non magnetica per permettere al campo magnetico di attraversare il fluido, inoltre normalmente questa è realizzata in materiale non conduttore (plastica, per esempio), così da non fornire un cammino di cortocircuito tra i potenziali indotti, positivo e negativo, sulla superficie del fluido. Questa condotta che non conduce ha due elettrodi posti nei punti in cui si ha la massima differenza di potenziale. Questi elettrodi forniscono, quindi, un segnale in tensione a un apparato esterno di lettura o registrazione. Mentre la Figura 7.40 mostra un profilo di velocità uniforme, è stato dimostrato matematicamente¹¹³ che e corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo che sia simmetrico rispetto al centro del tubo. Dato che è impossibile costruire l'intera condotta con mate-

¹¹¹ T. C. Hutcheon, "Electrical Characteristics of the Magnetic Flow Detector Head", *Instrum. Eng.*, p. 1, aprile 1964.

¹¹² *Tech. Bull.* 10D-14, Fischer and Porter Corp., Warminster, PA, 1977.

¹¹³ A. Kolin, "An Alternating Field Induction Flowmeter of High Sensitivity", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 16, p. 109, maggio 1945; N. C. Wegner, "Effect of Velocity Profile Distortion in Circular Transverse-Field Electromagnetic Flowmeters", NASA TN D-6454, 1971.

riale non
duttore (
fluido st
questo p
Questa r
stenza c
dalla tec
mente. I
siasi circ
Il ca
stante¹¹¹.

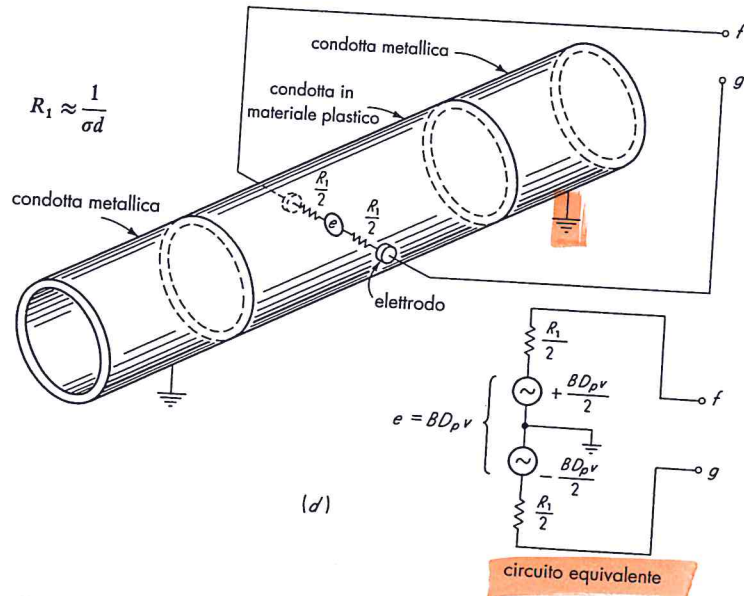


FIGURA 7.40 Misuratore di portata elettromagnetico. (Conclusion)

EFFETTO DI CARICO

riale non conduttore, è necessario accoppiare un tratto corto di tubatura in materiale non conduttore (il misuratore stesso) a un impianto tradizionale con tubazioni metalliche. Essendo il fluido stesso conduttore, ci sarà un percorso di conduzione tra gli elettrodi. In Figura 7.40d, questo percorso è mostrato suddiviso in due parti uguali $R_1/2$ collegate al segnale $e = BD_p v$. Questa resistenza non è semplice da calcolare, dato che comprende una distribuzione di resistenza continua all'interno di corpi complessi. In ogni caso, tale resistenza può essere stimata dalla teoria e successivamente alla costruzione di un apparato, può essere misurata direttamente. Il valore di questa resistenza interna della sorgente determina l'effetto di carico di qualsiasi circuito esterno connesso agli elettrodi.

Il campo magnetico usato in questo genere di misuratore di portata può essere sia costante¹¹⁴, sia alternato: come conseguenza il segnale in uscita è del tipo dc o ac, rispettiva-

114 H. M. Hammac, "An Application of the Electromagnetic Flowmeter for Analyzing Dynamic Flow Oscillations", NASA TM X-53570, 1967.

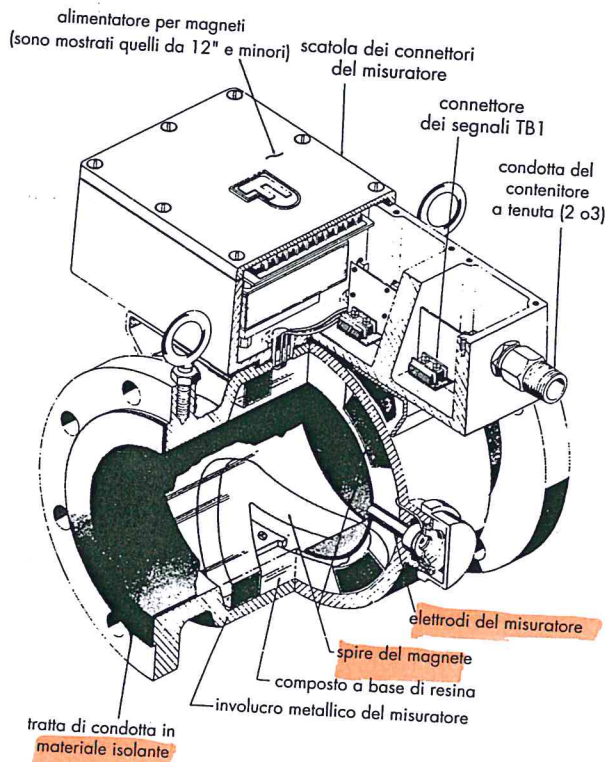


FIGURA 7.41 Dettagli costruttivi del misuratore di portata magnetico.

niforme, gli ioni di un diaframma nella fluidi indotte $BD_p v$. Se ella luntre di so-

io di una ettere al materiale unito tra i che non le. Que- a o regi- mostrato simme- on mate-

EFFETTI
DI
DISTURBO

mente. Per molti anni, i sistemi ac (50 o 60 Hz) sono stati i più comuni, a causa dei loro minori effetti di polarizzazione agli elettrodi; perché non causano distorsioni nel profilo di velocità del fluido dovute agli effetti magneto-idrodinamici; perché si può usare un filtro passa-alto per eliminare le derivate di tensione lente e spurie che si vengono a creare per opera degli effetti di natura termoelettrica (termocoppie) e per azione galvanica; perché si possono usare amplificatori ac a elevato guadagno la cui deriva è minore di quelli del tipo dc, a parità di guadagno. Tutti questi vantaggi sono prevalsi sul principale svantaggio, ossia che i potenti campi ac delle spire inducono segnali ac spuri nel circuito di misura. Per eliminare questo errore, è necessario periodicamente fermare il flusso per ottenere una condizione di tubo pieno a velocità nulla e quindi regolare un controllo di bilanciamento per ottenere una lettura di zero.

Nel 1975 circa, furono disponibili sul mercato i primi misuratori industriali che utilizzavano un campo "dc interrotto" e attualmente il mercato è diviso principalmente tra questi due tipi. Nel misuratore dc interrotto, un campo magnetico continuo è commutato a onda quadra, tra il valore di funzionamento e lo zero, con frequenza che può andare da 3 a 6 Hz. Quando il campo è nullo, ogni uscita che compare è considerata come errore; quindi, memorizzando questo errore e sottraendolo dall'uscita complessiva dallo strumento, quando il campo viene successivamente applicato, si ottiene il vantaggio di un "autoazzeramento" che corregge gli errori di zero diverse volte al secondo. Tra i vantaggi aggiuntivi si ha un risparmio di energia fino al 75% e un cablaggio più semplice. Per alcune applicazioni si ha lo svantaggio di una costante di tempo più lenta, di circa 7 s (i sistemi a 60 Hz hanno una costante di tempo di circa 2 s).

Per un sistema ac a 60 Hz, con una portata di acqua di rubinetto di 380 dm³/s in un tubo di 75 mm di diametro, e vale circa 3 mV rms. La resistenza tra gli elettrodi è data dalla teoria approssimativamente come $1/(\sigma d)$, dove $\sigma \triangleq$ conducibilità del fluido e $d \triangleq$ diametro degli elettrodi. Per l'acqua di rubinetto, $\sigma \approx 200 \mu\text{S/cm}$; quindi se $d \approx 0.64$ cm, ci sarà una resistenza di circa 7800 Ω , intesa come resistenza interna del generatore di tensione che produce e , che dunque richiede per l'amplificatore del sensore una impedenza di ingresso grande rispetto a questo valore. I misuratori di portata magnetici più comuni accettano fluidi con conducibilità piccole fino a 5 $\mu\text{S/cm}$, mentre i sistemi speciali possono scendere fino a 0.1 $\mu\text{S/cm}$. La benzina, con conducibilità di $10^{-8} \mu\text{S/cm}$, è senza dubbio impossibile da misurare; l'alcol, con 0.2 $\mu\text{S/cm}$, è appena appena misurabile; il mercurio (un metallo liquido), con $10^{10} \mu\text{S/cm}$, non presenta alcun problema di conducibilità. Dato che i sistemi disponibili in commercio sono limitati al valore di 0.1 $\mu\text{S/cm}$, sono stati provati con successo apparati di ricerca che lavorano con fluidi dielettrici come l'idrogeno liquido¹¹⁶.

Un campo di applicazioni specialistico, cui è stata posta molta attenzione, è quello della misura dei flussi di sangue¹¹⁷ nei capillari di organismi viventi. I sensori miniaturizzati permettono misure in capillari piccoli fino a 1 mm. Per avere la possibilità di misurare flussi dinamici, si impiegano sistemi ac o dc commutati ("a onda quadra"), con frequenze da 200 a 1000 Hz.

Anche se i sistemi ac e dc commutati predominano, i modelli dc "puri" sono stati impiegati per misure di metalli liquidi, come il mercurio. Qui non esistono problemi di polarizzazione. Inoltre, non è necessario un rivestimento interno della condotta in materiale isolante, dato che la conducibilità del metallo liquido è molto buona a confronto con quella di una condotta di metallo ordinario (acciaio inossidabile). Questo significa che una tubatura metallica non è un "cortocircuito" molto efficace per la tensione indotta nel flusso di metallo liquido. Inoltre, non sono necessari elettrodi speciali e la tensione di uscita è ricavata dallo stesso tubo metallico nei punti di massima differenza di potenziale. Sono stati costruiti dei misuratori dc puri¹¹⁸ piccoli ed economici avvalendosi di un campo magnetico permanente ed elettrodi speciali in argento sinterizzato con cloruro d'argento, che migliorano notevolmente i classici problemi di instabilità dei misuratori dc. Sviluppati inizialmente per flussi di sangue, sono utilizzabili con molti liquidi con conducibilità maggiore di pochi microsiemens per centimetro. Dato che si usa un campo magnetico permanente e un funzionamento dc, l'elettronica può essere molto semplice, fornendo uno strumento con risposta veloce, anche se di moderata stabilità e accuratezza, utile in diverse applicazioni di ricerca.

Dato che il contatto tra gli elettrodi e il liquido presenta talvolta dei problemi, un produttore¹¹⁹ ha sviluppato un modello (utilizzabile a partire da 0.05 $\mu\text{S/cm}$) dove gli elettrodi capacitivi sono annegati in un tubo di ceramica, formando una superficie perfettamente liscia e senza fessure. Un altro recente sviluppo¹²⁰ consiste nella possibilità di misurare accurata-

FLUIDI CHE
SONO
MISURABILI

¹¹⁵ V. P. Head, "Electromagnetic Flowmeter Primary Elements", *Trans. ASME*, p. 662, dic. 1959.

¹¹⁶ V. Cushing, D. Reily e G. Edmunds, "Development of an Electromagnetic Induction Flowmeter for Cryogenic Fluids", NASA Lewis Res. Ctr. contract NASW-381, *Final Rept.*, 1964.

¹¹⁷ R. S. C. Cobbold, "Transducers for Biomedical Measurements", cap. 8, Wiley-Interscience, New York, 1974.

¹¹⁸ "In Vivo Metric Systems", *Tech. Bull.*, 1, Healdsburg, CA, dic. 1980.

¹¹⁹ Krohne Inc., Peabody, MA, 800-356-9464 (www.krohne.com).

¹²⁰ J. Flood, "Single-Sensor Measurement of Flow in Filled or Partially Filled Process Pipes", *Sensors*, sett. 1997, pp. 54-57; B. Doney, "EMF Flow Measurement in Partially Filled Pipes", *Sensors*, ott. 1999, pp. 65-68.

CASO IN CUI IL SISTEMA PUO' AVERE RISPOSTA VELOCE

mente u
scarico,
sono riei
Tra i
siasì osi
viscosità
vasto ca
de "purc
commut

Flussin

Un corp

nei ib

100 011

collegi

ardiv

in un

dove

scrittura

ossibile

ib 510

1161

Per num

efficient

è propon

essere n

lati degl

tipo di c

sponibil

resisten

stenza d

sistenti

e hann

tubo ch

circa 0.

modell

sono m

corpo r

confron

sono pc

mente un flusso quando la tubatura non è piena, come capita spesso nei sistemi di acque di scarico, che sono progettati per funzionare con una grande varietà di flussi e che quindi spesso sono riempiti solo in parte.

Tra i vantaggi generali dei misuratori di portata elettromagnetici ci sono: l'assenza di qualsiasi ostruzione del flusso; capacità di misurare flussi inversi (reverse flows); insensibilità alla viscosità, densità e disturbi nel flusso purché il profilo di velocità si mantenga simmetrico; un vasto campo lineare; una risposta veloce alle variazioni di portata (istantanea per un sistema dc "puro", con un limite posto dalla frequenza del campo magnetico in un sistema ac o dc commutato).

VANTAGGI

Flussimetro a forza di resistenza (dispositivi a ostruzione)

Un corpo immerso in un flusso di fluido è soggetto a una forza resistente F_d data da

$$F_d = \frac{C_d A \rho V^2}{2} \tag{7.64}$$

- dove
- $C_d \triangleq$ coefficiente di resistenza (drag)
 - $A \triangleq$ area della sezione trasversale, m^2
 - $\rho \triangleq$ massa volumica del fluido, kg/m^3 (DENSITA')
 - $V \triangleq$ velocità del fluido, m/s

Per numeri di Reynolds sufficientemente elevati e per corpi opportunamente sagomati, il coefficiente di resistenza è ragionevolmente costante. Quindi, per una data massa volumica, F_d è proporzionale a V^2 e dunque al quadrato della portata volumica. La forza di resistenza può essere misurata collegando il corpo che produce la forza resistente a una mensola con incollati degli estensimetri. Uno strumento in commercio¹²¹ usa una configurazione a tubo cavo del tipo di quella riportata in Figura 7.42 per isolare gli estensimetri dal flusso di fluido. Sono disponibili dei modelli per dimensioni della condotta da 10 mm a 1.5 m di diametro. L'oggetto resistente per lo strumento da 12 mm è di circa 10 mm di diametro, ha un coefficiente di resistenza di circa 4.5 e produce una forza resistente di circa 10 N alla portata massima. I corpi resistenti per tubi di diametro maggiore occupano una frazione più piccola della sezione del tubo e hanno coefficienti di resistenza di circa 1.5; la forza massima si attesta intorno a 50 N. Il tubo che costituisce l'elemento sensibile alle deformazioni ha pareti di spessore variabile da circa 0.25 mm a 0.75 mm in corrispondenza della posizione degli estensimetri, a seconda del modello. Un ponte intero con estensimetri da 350 Ω è progettato per circa 1000 $\mu m/m$. Si possono misurare liquidi, gas e vapori in un vasto campo di temperature, pressioni e portate. Se il corpo resistente viene costruito con forma simmetrica, si possono misurare flussi inversi. A confronto con la gran parte degli altri misuratori di portata, la risposta dinamica è assai veloce; sono possibili frequenze proprie variabili da 70 a 200 Hz.

¹²¹ Target Flowmeter, Venture Measurement Co. LLC, Spartanburg, SC, 800-778-9251 (www.aaliant.com).

VANTAGGIO!
 È QUINDI
 SI POSSONO
 MISURARE
 PORTATE DI
 MATERIALI
 FLUIDI NON MISURABILI
 CON MISURATORI
 ELETTROMAGNETICO

SVANTAGGI:

- OSTRUZIONI AL FLUSSO
- INTERVALLO DI V MISURABILI LIMITATO
- INS. A VISC., DENSITA'
- ⇒ TEMPERATURA

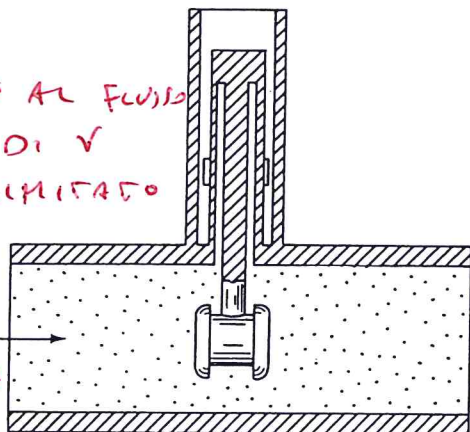


FIGURA 7.42 Misuratore a forza di resistenza.

$$(*) : t = \frac{L}{c+v} = \frac{\frac{L}{c}}{\frac{c+v}{c}} = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$$

$$v \ll c \Rightarrow \frac{v}{c} \rightarrow 0$$

POSSIAMO USARE TAYLOR X APPROSSIMARE:

$$\frac{1}{1+x} \rightarrow \left(1 - x + x^2 - x^3 \dots \right)$$

FERMANDOCI AL PRIMO TERMINE:

$$\frac{1}{1+x} \rightarrow 1 - x \Rightarrow \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \rightarrow \frac{L}{c} \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

Misuratori di flusso ultrasonici

I disturbi di pressione di piccola entità si propagano in un fluido con una determinata velocità (la velocità del suono) *dipendente dal fluido*. Se il fluido è anche caratterizzato da una velocità, allora la velocità *assoluta* della propagazione del disturbo di pressione è la somma algebrica delle due. Poiché l'entità della portata è correlata alla velocità del flusso, questo effetto può essere utilizzato in svariati modi come principio operativo dei misuratori di flusso "ultrasonici"¹²². Il termine *ultrasonico* si riferisce al fatto che, nella pratica, i disturbi di pressione sono usualmente brevi treni di onde sinusoidali la cui frequenza è superiore al campo udibile dall'orecchio umano, che arriva fino a circa 20 000 Hz. Una frequenza tipica può essere 10 MHz. I due principali metodi ("tempo di volo" e "doppler") per impiegare il fenomeno sopra citato dipendono dall'esistenza di trasmettitori e ricevitori di energia acustica. Un approccio comune consiste nell'utilizzare trasduttori a cristalli piezoelettrici per entrambe le funzioni. In un trasmettitore viene data in ingresso al cristallo energia elettrica sotto forma di brevi impulsi di tensione ad alta frequenza, che mettono in vibrazione il cristallo. Se il cristallo è in contatto col fluido, la vibrazione verrà comunicata al fluido e si propagherà attraverso di esso. Il cristallo ricevitore è esposto a queste fluttuazioni di pressione e risponde vibrando. Il moto di vibrazione produce un segnale elettrico a esso proporzionale, proprio come avviene nei normali trasduttori di spostamento piezoelettrici. La necessità di avere, come avviene nella maggioranza degli strumenti, un campo acustico sufficientemente stretto e ben definito, giustifica l'utilizzo di frequenze elevate (10 MHz). Per un cristallo che deve risultare un efficiente trasmettitore di energia acustica, si deve avere un diametro D grande rispetto alla lunghezza d'onda λ dell'oscillazione. Il segnale conico generato da un cristallo circolare ha un mezzo angolo del cono, detto α , dato da $\sin \alpha = 1.2 \lambda/D$; quindi, per avere angoli piccoli è necessario avere rapporti λ/D piccoli. Poiché la necessaria compattezza richiede valori di D ragionevolmente piccoli (≈ 1 cm), allora dobbiamo utilizzare lunghezze d'onda dell'ordine di 1 mm. L'acqua, per esempio, ha $\lambda = 1.5 \times 10^6/f$ mm ($f \triangleq$ frequenza, Hz) e quindi risulta chiaro che si deve far ricorso a frequenze nell'ordine del megahertz. La Figura 7.43a mostra l'applicazione più diretta di questi principi. Con una velocità di flusso nulla il tempo di passaggio t_0 degli impulsi diretti dal trasmettitore al ricevitore è dato da

¹²² L. C. Lynnworth, "Ultrasonic Flowmeters", cap. 5 in W. P. Mason e R. N. Thurston (eds.), "Physical Acoustics", Academic, NY, 1979; D. Clayton, "Ultrasonic Flowmeters Get the Nod", *Control Engineering*, sett. 1998, pp. 64-69.

$$t_0 = \frac{L}{c} \tag{7.65}$$

Dove $L \triangleq$ distanza tra il trasmettitore e il ricevitore e $c \triangleq$ velocità del suono nel fluido. Per esempio, in acqua $c \approx 1520$ m/s e quindi se $L = 305$ mm, $t_0 = 0.0002$ s. Se il fluido si muove a una velocità V , il tempo di passaggio t diventa

$$t = \frac{L}{c + V} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{V}{c^2} + \frac{V^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{V}{c} \right) \tag{7.66}$$

e se definiamo $\Delta t \triangleq t_0 - t$, allora

$$\Delta t \approx \frac{LV}{c^2} \tag{7.67}$$

Quindi, se c e L sono noti, la misurazione di Δt permette il calcolo di V . Mentre L può essere assunta come costante, c varia, per esempio, con la temperatura e poiché c è presente nella forma c^2 , allora l'errore causato dalla variazione di T può diventare significativo. Inoltre, Δt è piuttosto piccolo in quanto V è una piccola frazione di c . Per esempio, se $V = 3.05$ m/s, $L = 305$ mm e $c = 1520$ m/s, allora $\Delta t = 0.4 \mu\text{s}$ che è un incremento temporale troppo piccolo per essere misurato in modo accurato. Poiché, con questo schema, la misurazione di t_0 non viene fornita direttamente, può risultare preferibile la modifica illustrata in Figura 7.43b. Se t_1 rappresenta il tempo di volo nella direzione del flusso e t_2 il tempo di volo in direzione opposta a quella del flusso, otteniamo

$$\Delta t \triangleq t_2 - t_1 = \frac{2VL}{c^2 - V^2} \approx \frac{2VL}{c^2} \tag{7.68}$$

$$\left. \begin{matrix} t_2 = \frac{L}{c-v} \\ t_1 = \frac{L}{c+v} \end{matrix} \right\} \Rightarrow t_2 - t_1 = \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} = \frac{L(c+v) - L(c-v)}{c^2 - v^2} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2}$$

Δt nei 2 vs si ↑

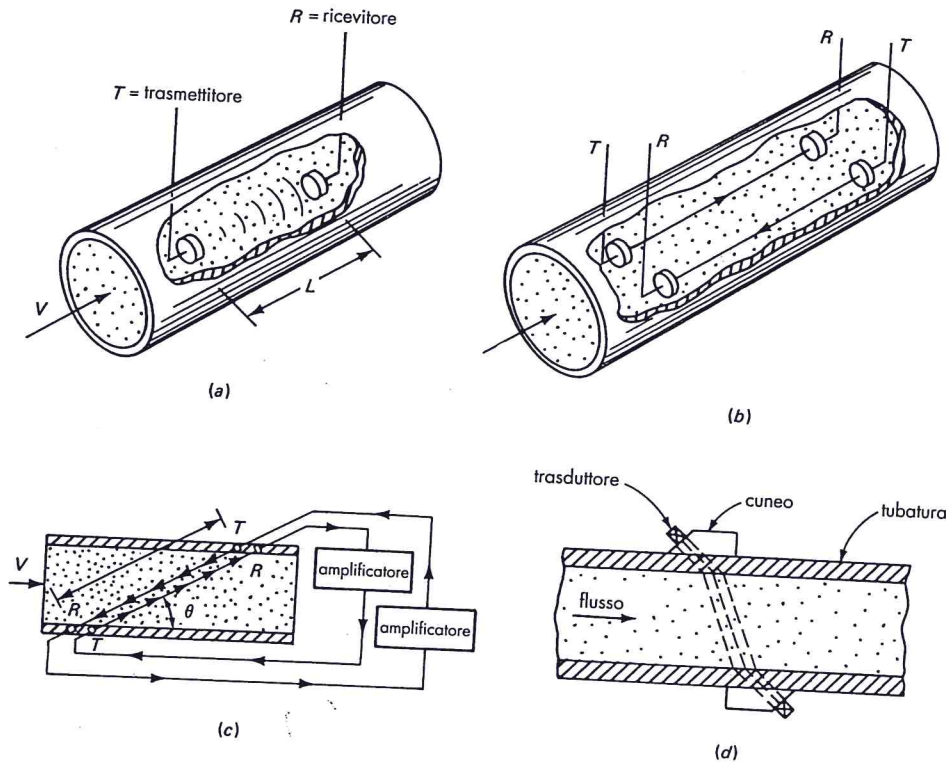
Q
P'
è
P'
Q'
m
Δ
=

ct
st.
m
su

Pc
de
og
su
cn

pr
fa
la
un

FIGURA 7.43 Misuratori di flusso ultrasonici a tempo di volo.



Questo Δt è doppio rispetto a quello precedentemente ricavato e inoltre è un incremento temporale che esiste fisicamente e può essere misurato direttamente. Tuttavia la dipendenza da c^2 è ancora uno svantaggio.

In Figura 7.43c vengono creati due sistemi oscillanti auto-alimentati utilizzando gli impulsi ricevuti per triggerare gli impulsi trasmessi in una configurazione con feed-back. La frequenza di ripetizione degli impulsi nell'anello di propagazione in avanti (forward loop) è $1/t_1$, mentre quella dell'anello all'indietro (backward loop) è $1/t_2$. La differenza di frequenza è $\Delta f \triangleq 1/t_1 - 1/t_2$ e poiché $t_1 = L/(c + V \cos \theta)$ e $t_2 = L/(c - V \cos \theta)$ otteniamo

$$\Delta f = \frac{2V \cos \theta}{L} \quad (7.69)$$

che è indipendente da c e così non soggetta a errori dovuti a variazioni di c . Questa tecnica è stata utilizzata per molti anni, ma è stata largamente rimpiazzata (a causa dei progressi nelle misure digitali per ciò che concerne l'accuratezza e la risoluzione) da metodi basati su misure dirette dei due tempi di volo e sulla susseguente rielaborazione dei dati:

$$V = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \quad \text{infatti:} \quad \frac{(c + V - c + V)L}{(c - V) \cdot (c + V)} \cdot \frac{L}{L^2} \cdot \frac{2VL}{L^2} \cdot \frac{L}{2} = V \quad (7.70)$$

Possiamo notare come questo metodo non richieda la conoscenza della velocità del suono c . I dettagli riguardanti la misura di tempo variano a seconda del costruttore e solitamente sono oggetto di brevetti, comunque è normalmente necessario procedere a una media di alcune misurazioni prima di riportare la velocità del flusso. Almeno uno strumento¹²³ si avvale della cross-correlazione per misurare gli intervalli di tempo.

Per tagliare i costi e ridurre gli errori legati alle variazioni della lunghezza del cammino, provocate dall'accumulo di depositi sulle facce del trasduttore, molti misuratori di portata fanno uso, oggi, di due trasduttori, invece che di quattro. Questo è stato realizzato attraverso la divisione temporale dei compiti della singola coppia di trasduttori, in modo da disporre di un utilizzo alternato: nel verso della propagazione della corrente e controcorrente. Tutto ciò è

¹²³ Digital Correlation Transit Time Flowmeter, Polysonics Inc., Houston, TX, 281-879-3700 (www.polysonicsinc.com).

mette di utilizzare un particolare metodo di implementazione della FFT, che risulta efficace nel filtrare i segnali di rumore come quelli prodotti dagli azionamenti elettrici a frequenza variabile spesso utilizzati per pompare i fluidi. Per ciò che concerne gli effetti del profilo di velocità del flusso, il misuratore a effetto Doppler "interroga" soltanto il volume di controllo definito dall'intersezione del fascio trasmesso con quello riflesso; così, misura una velocità media su questo spazio (non su una traiettoria diametrale inclinata da parete a parete, come nel misuratore a tempo di volo). Questa misurazione della velocità "puntuale" può sicuramente essere usata in sede di taratura al fine di fornire la portata volumetrica totale; tuttavia il profilo di velocità del flusso deve essere riproducibile. (In aggiunta una qualsiasi variazione della posizione del volume di controllo può generare errori, anche se il profilo del flusso è riproducibile.) Se il nostro obiettivo è quello di misurare velocità in più punti, invece di una portata globale, allora questo "problema" del misuratore a effetto Doppler si trasforma in un vantaggio. Un sistema pulsato¹³² (invece che CW o Continuous wave) che utilizza particolari tecniche per incrementare la risoluzione è stato effettivamente utilizzato per ottenere i profili di velocità nei vasi sanguigni.

Grazie alla disponibilità di misuratori sia per fluidi puliti, sia per fluidi sporchi, della quasi totale assenza di ostruzione o di cadute di pressione, di una modalità di funzionamento che ben si presta all'utilizzo di sensori "clamp-on" e del buon campo di misura, i sistemi ultrasonici vanno incontro a un successo sempre crescente¹³³. I misuratori ultrasonici sono stati utilizzati principalmente per i liquidi, ma trovano ora applicazione anche per i gas e il vapore (l'attuale mercato ha circa queste proporzioni: 70% liquidi, 30% gas; il tipo clamp-on è attualmente utilizzato solo per i liquidi). Un'applicazione piuttosto comune è la misura sui gas infiammabili nelle raffinerie. Un'unità¹³⁴ utilizza una tecnica basata sulla correlazione del tempo di volo, insieme a metodi brevettati, per la misura del peso molecolare medio, al fine di fornire la velocità (da 30 mm/s fino a 85 mm/s) la portata volumetrica e la portata massica (sono richiesti sensori di pressione e temperatura). Un misuratore per il vapore, dello stesso costruttore, è in grado di misurare la portata in volume di vapore acqueo e la portata in massa di vapore saturo o surriscaldato, anche in questo caso richiedendo sensori di pressione e temperatura oltre alle tabelle del vapore. Le applicazioni per alta temperatura possono necessitare di tecniche speciali¹³⁵. L'American Gas Association ha studiato, e ora anche approvato, l'utilizzo di misuratori ultrasonici multi-traiettorie per il controllo del trasporto del gas naturale, un ampio mercato che necessita di grande accuratezza¹³⁶. Abbiamo posto grande attenzione al flusso all'interno di condotte, ma vogliamo almeno menzionare un'applicazione di misura per flussi "esterni": gli anemometri¹³⁷, o misuratori di velocità del vento. Questi sono strumenti che misurano il tempo di volo e che sono in grado di misurare la velocità e la direzione del vento in due o tre dimensioni.

Misuratori di flusso a distacco di vortici

Il fenomeno del distacco dei vortici ("Karman vortex street") a valle di un corpo solido dai bordi "smussati", immerso in una vena fluida, che si verifica quando un flusso stazionario lo investe, è ben noto nella meccanica dei fluidi ed è la base dei misuratori di flusso a distacco di vortici¹³⁸. Quando il numero di Reynolds del tubo N_R risulta maggiore di circa 10000 la formazione dei vortici è sicura e la frequenza di distacco è data da

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

dove $V \triangleq$ velocità del fluido
 $d \triangleq$ dimensione caratteristica del corpo da cui avviene il distacco
 $N_{st} \triangleq$ numero di Strouhal, numero determinato sperimentalmente, circa costante nell'intervallo utile alla misurazione del flusso (per esempio 0.21 per i cilindri).

Grazie a un opportuno disegno della forma del corpo su cui avvengono i distacchi, N_{st} può essere assunto come circa costante su un vasto intervallo di N_R (e quindi di portate) rendendo f proporzionale a V e fornendo così un principio di misurazione della portata "digitale" basato sul conteggio della quantità di vortici staccati su una certa base temporale (vedere Figu-

¹³² R. S. C. Cobbold, op. cit., p. 286.

¹³³ "Engineer/Users Guidebook to Doppler Flow Measurement in Liquids", Polysonics, Houston, TX, 1986; C. Robinson, "Obstructionless Flow Meters", *In Tech*, pp. 33-36, dicembre 1986.

¹³⁴ Panametrics, Inc., Waltham, MA, 800-833-9438 (www.panametrics.com).

¹³⁵ L. Lynnworth, "High-Temperature Flow Measurement with Wetted and Clamp-On Ultrasonic Sensors", *Sensors*, ott. 2000, pp. 36-52.

¹³⁶ "Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters", Transmission Measurement Committee Rept. 9, American Gas Association (www.aga.org), giugno 1998; J. Yoder, "Ultrasonics Reverberate through Flowmeter Market", *In Tech*, luglio 2000, pp. 44-47.

¹³⁷ R. Lockyer, "A Sonic Anemometer for General Meteorology", *Sensors*, maggio 1996, pp. 12-18; Vaisala Inc., Handar Business Unit, Sunnyvale, CA, 408-734-9640 (www.handar.com).

¹³⁸ E. Ribolini, "Intelligent and Mass Vortex Flowmeters", *In Tech*, feb. 1996, pp. 31-37; J. Olin, "Generation-Next Mass Flowmeter Arrives", *In Tech*, gen. 1999, pp. 58-61.

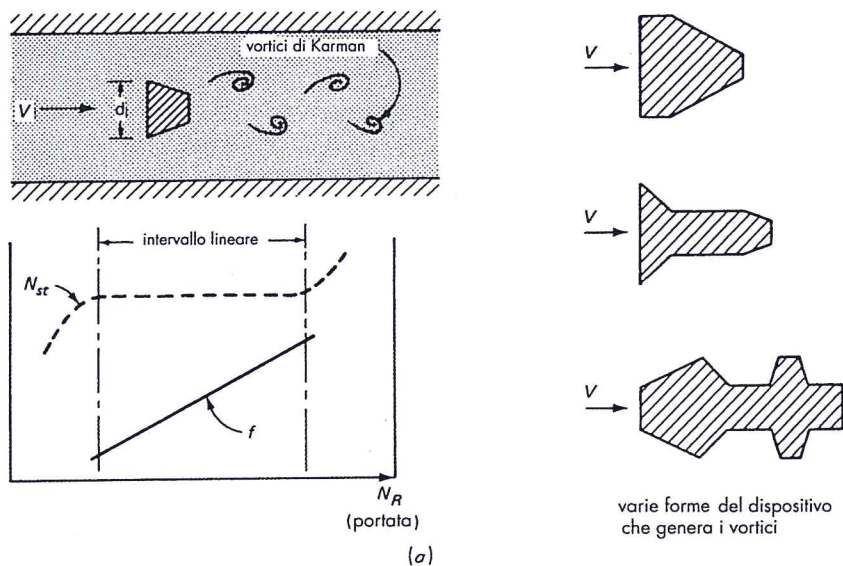
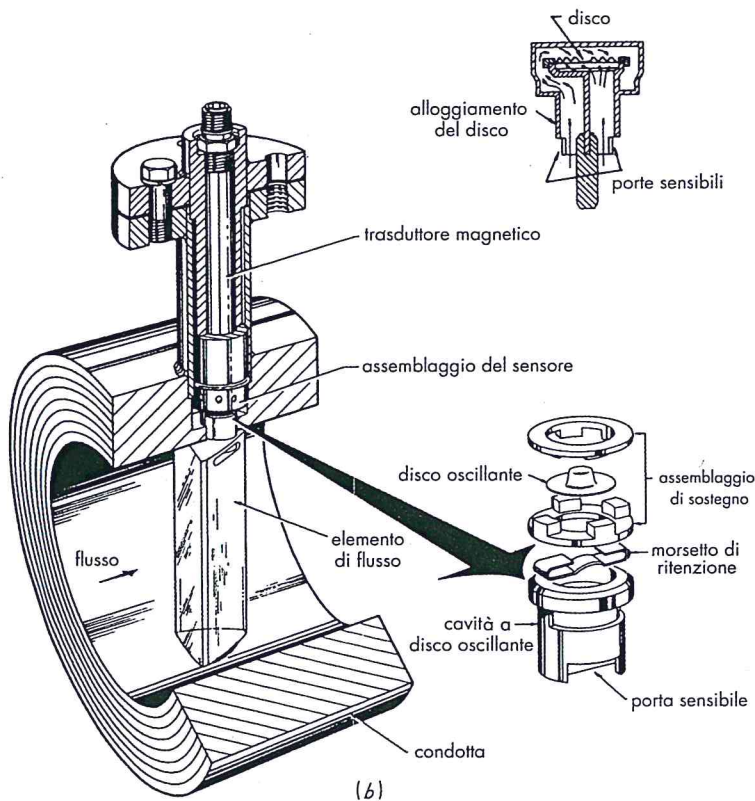


FIGURA 7.45
(a) Principi di funzionamento dei misuratori di flusso a distacco di vortici. (b) Dettagli sui misuratori di flusso di distacco di vortici (cortesia Neptune Eastech, Edison, NJ).



ra 7.45a). Molti costruttori hanno sviluppato svariate forme per i corpi da cui si ha il distacco e svariati schemi per la **misura della frequenza**. I vortici causano forze alternate o pressioni locali sul corpo su cui c'è il distacco: metodi basati sull'impiego di **materiali piezoelettrici** o di estensimetri a resistenza elettrica possono essere impiegati per metterle in luce. Anche **sensori termo-anemometrici a film caldo**, annegati nell'elemento che distacca vortici, possono avvertire le fluttuazioni periodiche del flusso di velocità. L'interruzione di fasci ultrasonici, dovuta al passaggio dei vortici può essere utilizzata per misurare i vortici stessi. Le pressioni differenziali provocate dal distacco di vortici generano oscillazioni di una piccola pallina ingabbiata, il cui movimento può essere rilevato con un trasduttore magnetico di prossimità. La Figura 7.45b mostra un ulteriore schema che avverte la differenza di pressione per mezzo di un diaframma elastico.

Una grande varietà di liquidi, gas e vapori può essere sottoposta a misurazioni con questo metodo. Intervalli lineari in un campo a 15:1 sono piuttosto comuni mentre a volte è possibile arrivare a 200:1. Le frequenze dei vortici in corrispondenza della massima velocità di flusso sono dell'ordine dei 200-500 Hz e la frequenza risponde alle variazioni di velocità del flusso al massimo in un ciclo. Se si sceglie di utilizzare un convertitore frequenza-tensione per ottenere una tensione analogica in uscita, allora il suo filtro passa-basso determinerà la risposta globale del sistema, che può essere abbastanza veloce per portate elevate, ma deve diventare minore per basse portate (perché la costante di tempo del filtro deve essere resa di durata maggiore, al fine di avere un ripple accettabile alle frequenze più basse, tipicamente da 5 a 10 Hz). Quando è richiesta la risposta più rapida possibile è disponibile una configurazione¹³⁹ che fa uso di sensori ultrasonici e di un piccolo elemento per il distacco di vortici a sezione triangolare (avente sulla parte posteriore un bordo smussato). Un fascio ultrasonico ad alta frequenza attraversa la tubatura in corrispondenza del vortice e viene modulato dalla frequenza di distacco dei vortici.

Il filtraggio estrae l'involuppo del segnale modulato, che è la frequenza di distacco. Con il bordo smussato nella parte posteriore, i vortici si staccano dai bordi a spigolo vivo del triangolo, grazie ai quali si riducono le fluttuazioni nei tempi che intercorrono tra i successivi distacchi di vortici, rispetto al caso di altre forme che possono essere impiegate per originare il distacco. La piccola dimensione dei corpi che creano il distacco fornisce inoltre frequenze più alte (fino a 6000 Hz) per una data velocità di flusso. Se allora ricorriamo a una tipologia di convertitore F/V a "costante di tempo nulla" (come per esempio l'Ono Sokki) possiamo riaggiornare la nostra misura di velocità a ogni impulso dando, per esempio, una lettura ogni 0.001 s per una frequenza di 1000 Hz. Se non è necessario avere la risposta più veloce, possiamo ottenere un'accuratezza maggiore mediando diversi impulsi; questa tecnica è comunemente usata in tutti i misuratori a distacco di vortici. Come per i misuratori ultrasonici, le caratteristiche assai valide dei misuratori a distacco di vortici hanno permesso loro di sottrarre ai tipi di strumenti più tradizionali una parte del mercato dei misuratori di portata.

Miscellanea

Parliamo qui brevemente di tre argomenti che non possono essere trattati a fondo a causa delle limitazioni di spazio disponibile, ma che sono considerati meritevoli di qualcosa di più di un semplice riferimento bibliografico. I flussi bifasici¹⁴⁰ si presentano in un certo numero di applicazioni pratiche e sono considerati di particolare interesse nelle miscele vapore/acqua e aria/acqua negli impianti di generazione di potenza a vapore¹⁴¹. Gli ambienti ostili e la mancanza di campioni di taratura unici e riconosciuti rendono lo sviluppo di questi strumenti particolarmente difficile. Sul mercato sono pochi gli strumenti disponibili e normalmente sono necessarie modifiche o speciali adattamenti degli apparecchi standard per adeguarsi alle diverse applicazioni. Le misurazioni sui liquidi criogenici come l'ossigeno liquido¹⁴² e l'idrogeno liquido (utilizzati nei motori dei razzi), il gas naturale liquefatto ecc., presentano problemi legati alle temperature estreme, di basso valore, e ai rischi di esplosione. L'utilizzo del più sicuro azoto liquido come fluido sostitutivo, ai fini della taratura¹⁴³, è stato ritenuto una procedura valida, e costituisce la base di una attrezzatura dedicata alla taratura, che garantisce un'incertezza sulla portata massica di circa $\pm 0.2\%$ su un intervallo di portata compreso tra 5.45 e 57 m³/h a una temperatura compresa tra 70 K e 90 K. L'utilizzo della cross-correlazione come principio alla base delle misure di flusso è oggetto di ricerca e può condurre a tutta una serie di strumenti commerciali, poiché questa tecnica può essere implementata in vari modi¹⁴⁴ attraverso l'utilizzo di segnali marcati, "riconoscibili", già presenti nel flusso o introdotti intenzionalmente. In breve i segnali, provenienti da due sensori, separati assialmente lungo il tubo da una distanza L e che rispondono ai segnali marcati, vengono cross-correlati, utilizzando una serie di ritardi. Poiché i segnali marcati passano da un sensore all'altro alla velocità V del flusso, la funzione di cross-correlazione dovrebbe presentare un picco in corrispondenza di un ritardo pari a L/V secondi, che permette il calcolo di V in quanto L è nota. I vortici turbolenti, naturalmente presenti e rilevati con metodi ultrasonici basati sull'effetto Doppler, o gli impulsi termici intenzionalmente forniti al flusso e poi rilevati con delle termocoppie, sono solo due degli svariati possibili schemi considerati. La praticità del metodo è fortemente imperniata sulla disponibilità di correlatori a basso costo, basati su circuiti integrati e sulla tecnologia dei microprocessori.

¹³⁹ J-TEC Associates, Inc., Cedar Rapids, IA, 800-959-0872 (www.j-tecassociates.com); R. D. Joy, "Ultrasonic Vortex Meter Is a Wide-Range Gas Flowmeter", *Measurements & Control*, ott. 1984; "Air Flow Measurement for Engine Control", SAE 760018, gen. 1982.

DA CONTRO SI
HA IL DISTACCO
DI VORTICI PIU'
PICCOLI E QUINDI
MINORE SENSIBILITA'
E RAPPORTO SEGNALE- RUMORE

¹⁴⁰ G. F. Hewitt, "Measurement of Two Phase Flow Parameters", Academic, New York, 1978; P. P. Kremlevsky, "Flow Rate Measurement in Multi-Phase Flows", Bell House, New York, 2000.

¹⁴¹ "Development of Instruments for Two-Phase Flow Measurements", Rept. ANCR-1181, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, ID, 1974.

¹⁴² D. B. Mann, "ASRDI Oxygen Technology Survey", vol. 6, "Flow Measurement Instrumentation", NASA SP-3084, 1974.

¹⁴³ J. A. Brennan et al., "An Evaluation of Selected Angular Momentum, Vortex Shedding and Orifice Cryogenic Flowmeters", NBS Tech. Note 650, Cryogenics Div., Boulder, CO, 1974.

¹⁴⁴ M. S. Beck, "Correlation in Instruments: Cross Correlation Flowmeters", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 14, 1, 1981.