

14. DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE.

14.1. Canale con generatore di moto ondoso.

L'impianto sperimentale è costituito da un canale per moto ondoso bidimensionale con le pareti di cristallo e fondo di plexiglass, sostenute da una serie di telai in ferro posti ad una distanza reciproca di circa 44 cm. Il canale è largo 100 cm, alto 120 cm e lungo circa 45 m. Si veda la fig. 14.1.1

La struttura è sufficientemente robusta da limitare le deformazioni conseguenti al riempimento e svuotamento entro pochi decimi di millimetro.

Il canale è dotato di una spiaggia costituita da una sabbia con granulometria abbastanza uniforme con $d_{50}=0.15$ mm, a cui corrisponde una velocità di caduta di 0.018 m/s. Le dimensioni geometriche del modello riproducono le condizioni meteomarine del Mar Adriatico in analogia di Froude con scala delle lunghezze non distorta di 1/10. Nel canale sono state individuate 100 sezioni poste ad una distanza reciproca di 44 cm circa una dall'altra. Le sezioni sono state numerate a partire dalla berma di riva fino al generatore del moto ondoso. Il fondo del canale è orizzontale dalla sezione 100, ove si genera l'onda, fino alla sezione 72, dove inizia la pendenza.

Per la realizzazione del moto ondoso si è utilizzata una ventola piana posta ad una estremità del canale ed azionata mediante un opportuno cinematismo studiato in modo da imprimere un movimento di rototraslazione che meglio simuli il moto ondoso in fondali di profondità limitata.

Le normali perdite di acqua nel canale vengono automaticamente compensate con l'apertura di un'elettrovalvola che intercetta un condotto collegato alla rete dell'acquedotto urbano. L'elettrovalvola viene aperta o chiusa da un segnale elettrico inviato da un trasduttore elettronico di altezza connesso a un'asta idrometrica. Al fine di poter rilevare il valore medio del livello liquido nel canale, ed evitare, così, un funzionamento dell'elettrovalvola legato alle normali oscillazioni del pelo libero in presenza di moto ondoso, l'asta è immessa in un piezometro cilindrico comunicante con la vasca. Come è noto, quando il diametro del piezometro è grande si realizza un sistema che elimina le fluttuazioni del pelo libero.

Le misurazioni del profilo della superficie libera sono state eseguite mediante l'uso di una sonda resistiva collegata ad una centralina di controllo. Il sistema è schematizzato in

fig. 14.1.2. La sonda è costituita da due elettrodi in acciaio inossidabile, distanziati di 23 mm, con diametro di 4 mm e una lunghezza di 59 cm.

Come è noto il principio di funzionamento di una sonda del tipo descritto si basa sulla variazione della resistenza tra gli elettrodi; il valore di tale resistenza è inversamente

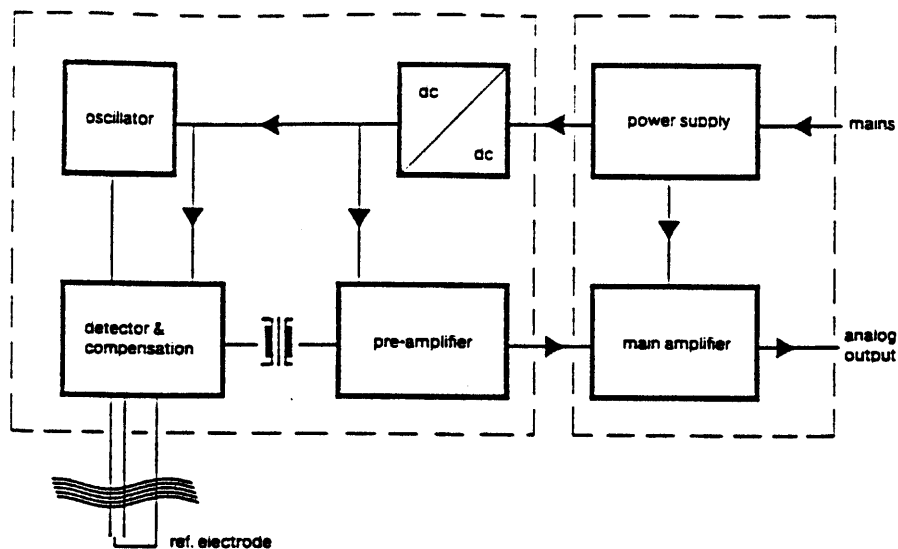


Fig. 14.1.2. Schema elettronico semplificato della sonda resistiva.

proporzionale all'immersione degli elettrodi e alla conducibilità del liquido.

E' noto che uno dei problemi di una sonda resistiva è la non linearità della risposta e la dipendenza della misura dal valore di condu

cibilità dell'acqua. Un sistema di linearizzazione del segnale e di compensazione del valore di conducibilità del liquido in cui la sonda viene utilizzata è ottenuto attraverso l'uso di un circuito elettronico di compensazione in cui è presente un piccolo elettrodo rilevatore di conducibilità (si veda lo schema di fig. 14.1.2).

L'apparecchiatura consente di selezionare quattro scale di funzionamento, caratterizzati da valori di fondo che, espressi in altezze della superficie del moto ondoso, sono rispettivamente di 5, 10, 20 e 50 cm. L'errore di non linearità è dello 0.5% del fondo scala selezionato. Lo strumento richiede una conducibilità del liquido, in cui viene utilizzato, non inferiore a 0.08 mS, con una influenza sulla misura inferiore all'1% per variazioni comprese tra 0.1 e 2 mS.

La centralina di controllo è caratterizzata da un segnale analogico in uscita di ± 10 VDC. Essa, inoltre, è alimentata da una corrente alternata di 220 VAC, 50-60 Hz e 20 VA. L'intero sistema di misura è caratterizzato da una risposta in frequenza accettabile.

La temperatura nel canale è stata misurata con un termometro digitale in grado di valutare il decimo di grado Celsius.

14.2. Sistema di generazione del moto ondoso.

La generazione delle onde è realizzata mediante una ventola piana messa in moto da un pistone. A tal riguardo si faccia riferimento alla fig. 14.2.1.

Le apparecchiature per la generazione del moto ondoso sono costituite, nelle loro

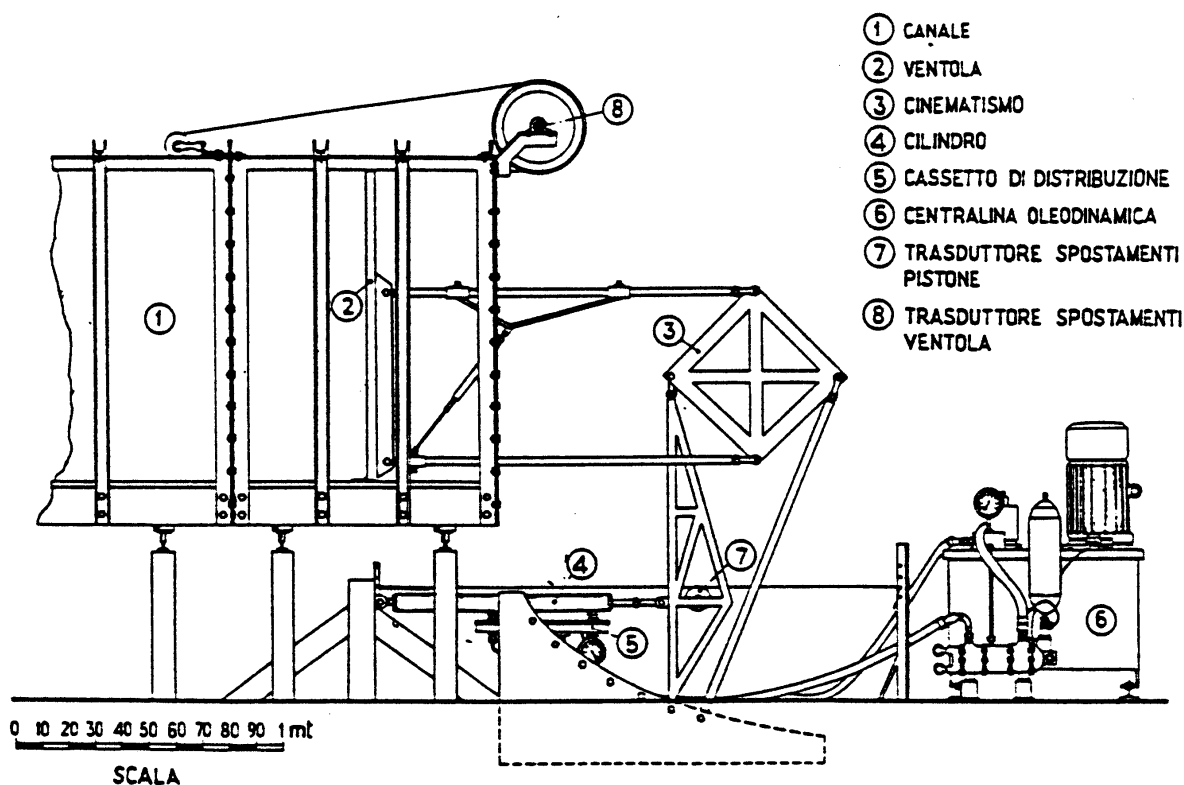


Fig. 14.2.1. Sistema di generazione del moto ondoso.

parti essenziali, da un sistema oleodinamico che determina gli spostamenti del pistone, e, attraverso i collegamenti meccanici, quelli della ventola (Lamberti et al., 1988). Il sistema comprende una centralina che mette in pressione l'olio (normalmente a 100 bar). Il moto dell'olio è controllato da una elettrovalvola di tipo MOOG, che lo invia alle due estremità del cilindro generando lo spostamento del pistone.

Lo spostamento del cassetto di distribuzione della elettrovalvola è comandato da una bobina alimentata dal segnale elettrico di errore, definito come differenza tra il segnale di comando e quello di retroazione (fig. 14.2.2). Il segnale di comando è stato generato da un

calcolatore di processo dotato di una scheda di conversione A/D e D/A della National Instruments modello AT-MIO 16 H. In fig. 14.2.3 è riportato lo schema delle connessioni per le uscite analogiche della

scheda. Le uscite analogiche sono comprese nell'intervallo ± 10 V. La casa costruttrice garantisce una accuratezza di 4.88 mV.

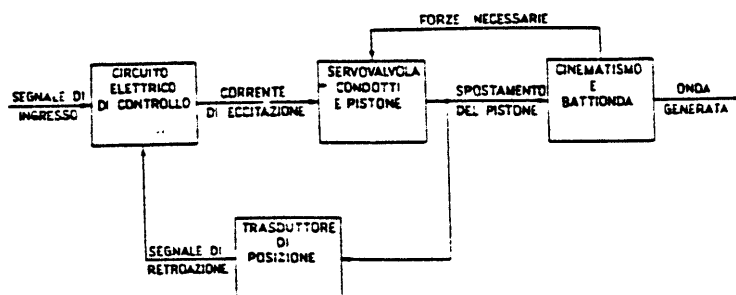


Fig. 14.2.2. Schema a blocchi del sistema di controllo del generatore di moto ondoso.

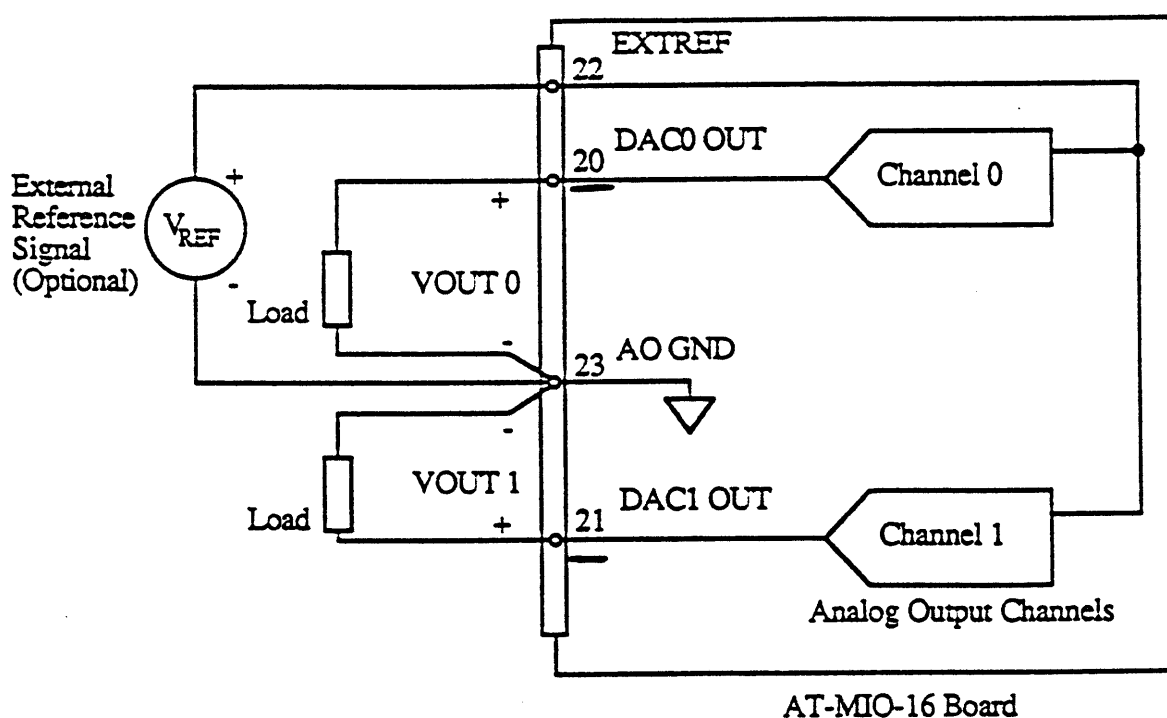


Fig. 14.2.3. Schema delle connessioni per le uscite analogiche della scheda di conversione D/A.

Si è realizzato un apposito software per la generazione del segnale di ingresso al circuito elettrico di controllo, che è di tipo sinusoidale con frequenza, definibile in input, variabile tra 0.2 e 1 Hz e altezza variabile tra 1 e 5 V.

14.3. Sistema di generazione del getto.

L'indagine sperimentale è stata effettuata considerando getti puri sommersi ad asse verticale effluenti da una luce posta a 16.7 cm dal fondo del canale. Tale distanza consente

di essere al di fuori dello strato limite di fondo e consente di evitare di effettuare le misurazioni in una zona troppo vicina al fondo stesso, dove la concentrazione di sabbia è troppo elevata. Per quanto attiene lo spessore dello strato limite al fondo del canale si può utilizzare la seguente formula di Stokes (Ragone, 1983)

$$\delta = 2\sqrt{\nu T\pi}$$

che fornisce un valore di 5.01 mm, 4.24 mm e 3.54 mm per frequenze del moto ondoso rispettivamente di 0.5 Hz, 0.7 Hz e 1.0 Hz.

Per il getto sommerso è stato appositamente realizzato un impianto per la simulazione dello scarico di un inquinante. Nelle sue parti essenziali tale impianto è costituito da un ugello di forme e dimensioni che è possibile variare opportunamente. L'alimentazione dello stesso ugello è realizzata utilizzando una vasca di carico, di dimensioni in pianta 1.30x0.50 m² ed altezza 0.50 m, dotata di un sistema di sfioro che consente di mantenere un carico costante di circa 8 m al di sopra della luce di efflusso. Una seconda vasca, di dimensioni in pianta 1x1 m² ed altezza 1 m, disposta alla quota zero di riferimento, viene impiegata, durante lo svolgimento delle prove, per l'alimentazione della vasca di carico e per la preparazione della miscela di acqua e colorante. Per entrambe le vasche sono stati realizzati dei sistemi di scarico di troppo pieno e di scarico di fondo. Lo scarico di troppo pieno della vasca di carico immette l'acqua nella vasca di alimentazione.

Si osserva che l'asse del getto è fortemente influenzato dal posizionamento e dalla forma dell'ugello. A tal proposito è da notare che in letteratura sono molto scarsi i dati relativi ai valori medi di velocità normali all'asse di un getto. Per esempio, Wygnanski e Fiedler (1969) riportano una curva rappresentativa dell'andamento dei profili di velocità ortogonali all'asse del getto da loro analizzato, osservando, tra l'altro, che essa è stata ottenuta attraverso l'applicazione dell'equazione di continuità a partire dai rilievi delle componenti longitudinali di velocità. Ossia, la curva non è il risultato diretto di una misurazione. Gli stessi autori, però, riportano i risultati sperimentali relativi alle intensità di turbolenza delle componenti fluttuanti di velocità ortogonali all'asse del getto analizzato.

Papanicolaou e List (1988), osservano che "una leggera inclinazione del getto darebbe luogo a degli errori di *bias*".

E' evidente, allora, facendo riferimento, per fissare le idee, al caso di un getto circolare, che è estremamente difficile ottenere dei risultati sperimentali che si riferiscano ai profili delle componenti radiali di velocità, se si tien conto che le componenti longitudinali sono di gran lunga maggiori. Basterebbe infatti un leggero sfasamento nella posizione del misuratore di velocità (si pensi al filo di un anemometro non perfettamente posizionato rispetto all'asse del getto) per provocare degli errori affatto non trascurabili nella determinazione di un profilo di velocità radiale. Per quanto attiene, invece, la determinazione delle intensità di turbolenza, dello skewness e del kurtosis, il problema si pone meno. E' noto, per esempio, che gli andamenti delle intensità di turbolenza delle componenti longitudinali e radiali di velocità presentano, ciascuno, delle peculiarità (Wignanski e Fiedler, 1969), ma il loro ordine di grandezza non è diverso. Pertanto, in questo caso, una leggera inclinazione del getto, rispetto ad una sua posizione teorica, darebbe luogo solo a degli errori di misura che si potrebbero definire normali in *campo sperimentale*. Questo spiegherebbe la ragione per cui molti autori presentano i diagrammi relativi alle intensità di turbolenza, allo skewness, al kurtosis, etc., ma non i profili delle componenti di velocità ortogonali all'asse del getto analizzato.

Il condotto che alimenta la vasca di carico ha un diametro di 1.0", mentre i condotti degli scarichi di troppo pieno sono di 1½". Infine, il condotto che alimenta il getto, a partire dalla vasca di carico, ha un diametro di 1/2". Tutti i condotti del circuito sono in acciaio zincato, ad eccezione della parte terminale del condotto che alimenta l'ugello. Quest'ultimo è stato realizzato con un tubo in materiale plastico flessibile, di diametro 1/4", seguito da un tubo in ottone anch'esso di diametro 1/4". La parte terminale di quest'ultimo è filettata in modo da poter ospitare un ugello della forma e dimensione desiderata. Il sistema modulare realizzato consente di variare, con estrema semplicità, il tipo di ugello e la distanza dello stesso dal fondo del canale. In particolare, nella presente ricerca, l'ugello è costituito da un elemento troncoconico, con diametro di uscita di 2.1 mm.

La vasca di carico è alimentata con l'ausilio di una elettropompa centrifuga monofase Pentax tipo CM50, in grado di sollevare una portata massima di 75 l/min, con prevalenza di 14 m, potenza del motore di 0.5 Hp e alimentata da una tensione di 220/50 V.

La misura della portata immessa è realizzata attraverso l'uso di un flussimetro. In particolare, in previsione di possibili sviluppi della ricerca fin qui condotta, si è realizzato un sistema di by-pass che consente di utilizzare un flussimetro mod. A1, con tubo di misura T3, o un flussimetro mod. A3, con tubo di misura T5, della CVC s.r.l. di Cologno Monzese (Milano). I due flussimetri sono caratterizzati da valori di fondo scala rispettivamente di 140 l/h e 500 l/h. Per entrambi la precisione è $\pm 2\%$ sui valori di fondo scala, per una temperatura massima di 50°C e per un valore di pressione compreso tra 4 e 10 ate. Il galleggiante, in acciaio al carbonio, è di tipo libero e la graduazione della scala, espressa in unità volumetriche (l/h), è incisa direttamente sul tubo di misura. Quest'ultimo è in vetro borosilicato con custodia in alluminio fuso verniciato a forno e guarnizioni in gomma nitrilica. Gli attacchi sono del tipo *filettati gas F verticali*. Per quanto attiene le dimensioni si faccia riferimento alla fig. 14.3.1, in cui $a=380$ mm e $b=55$ mm, per il modello A1, e $a=425$ mm e $b=85$ mm, per il modello A3. Il sistema di by-pass riportato in fig. 14.1.1 consente, a seconda della portata da immettere, di utilizzare l'uno o l'altro dei due flussimetri.

L'ugello è posto ad una distanza di 11 m dal generatore del moto ondoso e di 34 m dalla linea di riva. Tale posizione è considerata ottimale sia per evitare gli effetti legati alle condizioni al contorno tipiche della sezione in cui è presente il generatore del moto ondoso, sia al fine di evitare una eccessiva concentrazione di sabbia verso la zona di *shore*.

La temperatura dell'acqua immessa è stata misurata con lo stesso termometro digitale di cui si è parlato nel par. 14.1.

Alcune prove sperimentali consistevano nella visualizzazione del getto. Ciò è stato possibile attraverso l'uso di una soluzione di acqua e Rodamina B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$), con codice R 6626 del catalogo della SIGMA Chemical Company, Missouri, USA.

14.4. Sistema LDA.

Nel seguito si descriverà brevemente il sistema LDA utilizzato, sottolineando soprattutto le sue peculiarità e rimandando alla letteratura specializzata per informazioni di

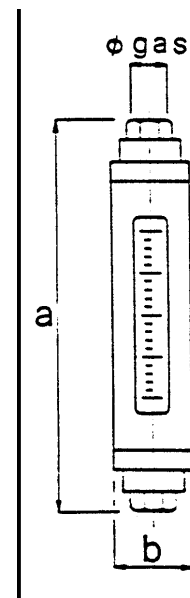


Fig. 14.3.1. Flussimetro.

carattere generale (Durst et al., 1981; Pulci Doria, 1992).

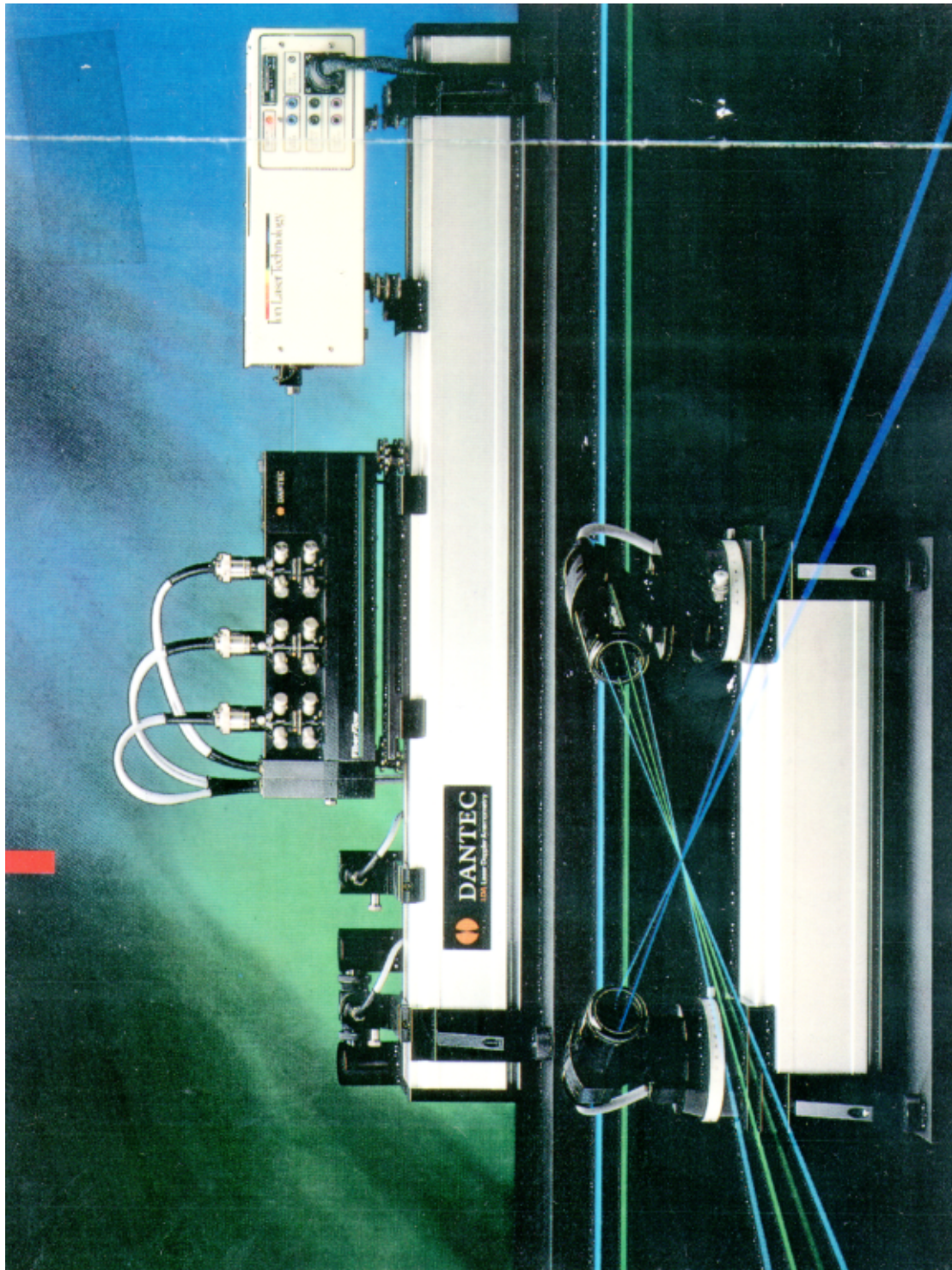


Fig. 14.4.1. Schema di un sistema LDA del tipo usato; si osserva che per esperienze condotte nell'ambito di questa ricerca il sistema era bidimensionale.

Il sistema LDA è del tipo riportato schematicamente in fig. 14.4.1. Esso è costituito da una sorgente laser Ar-Ion Coherent Innova serie 70 di potenza 5 Watt, raffreddata ad acqua. L'alimentazione elettrica è caratterizzata da una tensione di 380 V trifase con terra, senza neutro, e una potenza di 25 KW. Il sistema di raffreddamento consente di avere una portata di 8-10 l/min alla pressione di 3 atm.

L'intero sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati è noto come FlowTool™ della DANTEC Measurement Technology.

Il sistema LDA è del tipo a fibre ottiche, in modalità *backscattering*, bidimensionale a quattro raggi, con lunghezze d'onda di 488.0 nm e 514.5 nm.

Il sistema ottico di trasmissione e ricezione è costituito da un *transmitter* con 4 manipolatori ottici, due fotomoltiplicatori e un separatore di colore. La sonda trasmittente e ricevente è bidimensionale, con diametro di 85 mm e con lente frontale modulare, che, a scelta, può essere con distanza focale di 310 mm o 500 mm. Il cavo ottico, lungo 30 m, è costituito da fibre ottiche *single-mode*, ad alto mantenimento della polarizzazione, per ogni raggio laser emesso e da fibra *multi-mode* per il segnale di ricezione.

Il processore di segnale è un 58N40 FVA Enhanced della Dantec, comprensivo di una scheda per la seconda dimensione.

Il sistema è in grado, attraverso una scheda di conversione A/D della Keithley Metrabyte modello DAS 50/4, di acquisire, contemporaneamente alle due componenti di velocità, le uscite analogiche provenienti da quattro trasduttori. L'intero sistema è assistito da un calcolatore di processo dotato del software di gestione Floware Dantec.

Come è noto i sistemi di processamento del segnale Doppler di vecchia generazione, tipo il Tracker o il Counter, hanno una limitazione operativa dovuta alla presenza di rumore di fondo eventualmente sovrapposto al segnale Doppler. Ogni qualvolta si verifica una causa che genera o incrementa il rumore di fondo (volume di misura troppo vicino alle pareti, modalità di misura in backscattering, riflessioni indesiderate, etc.) sia il Tracker che il Counter non sono più in grado di inseguire la frequenza Doppler. I processori di nuova generazione consentono di estrarre la frequenza Doppler anche quando essa è annegata nel rumore di fondo. Tra questi si ricordano il BSA e l'FVA della Dantec, l'IFA mod. 650 o mod. 750 della TSI e il DSA della Aerometrics.

In particolare, per quanto riguarda l'FVA della Dantec, si osserva che in questo

strumento la frequenza Doppler è ottenuta mediante un'analisi, basata sulla determinazione della funzione di covarianza, del segnale in uscita dal fotomoltiplicatore. Tale analisi è effettuata sui *burst* dei segnali relativi ai successivi passaggi delle particelle nel volume di misura.

Andando più in dettaglio, si osserva che quando una particella *i*-esima attraversa il volume di misura, il fotomoltiplicatore *n*-esimo rileva un segnale

$$r_n(t + t_i) = a_{ni} \cdot \exp\left[-(t \omega_{si})^2\right] \cdot [1 + \gamma_{ni} \cos(\omega_{0i} t + \Phi_{ni})] \quad (14.4.1)$$

del tipo riportato in fig. 14.4.2, in cui t_i è il tempo di arrivo della particella, a_{ni} è un fattore di ampiezza tipico del rilevatore di *burst* utilizzato, ω_{si} è la larghezza del segnale, sicchè $1/\omega_{si}$ è proporzionale al tempo di transito, γ_{ni} è un termine di modulazione e ω_{0i} è la pulsazione Doppler. Nel seguito si indicherà con $A_{ni}(t)$ la funzione di involuppo della (14.4.1), così definita

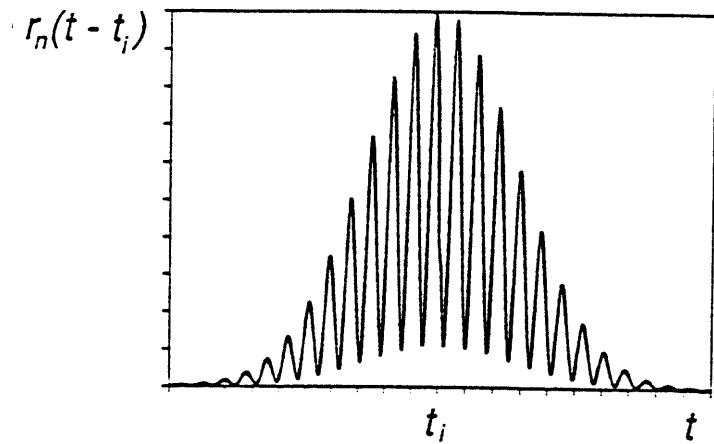


Fig. 14.4.2. Tipico segnale di burst legato al passaggio di una particella nel volume di misura del sistema LDA.

$$A_{ni}(t) = a_{ni} \cdot \exp\left[-(t \omega_{ni})^2\right] \cdot \gamma_{ni} \cdot$$

La funzione di covarianza incrociata di due segnali Doppler $r_n(t)$ e $r_m(t)$ è definita come segue

$$C_{nm}(\tau) = \int \left\{ A_n(t) \cos(\omega_0 t + \Phi_n) \cdot A_m(t + \tau) \cos(\omega_0(t + \tau) + \Phi_m) \right\} dt \cdot$$

La precedente relazione può essere così rappresentata

$$C_{nm}(\tau) = \frac{1}{2} A_{nm}(\tau) \cos(\omega_0 \tau + \Phi_{nm}).$$

Se si sostituisce il segnale reale $A_n(t)\cos(\omega_0 t + \Phi_n)$ con un segnale complesso del tipo di seguito riportato

$$A_n \cdot e^{i(\omega_0 t + \Phi_n)} = A_n \cdot [\cos(\omega_0 t + \Phi_n) + i \sin(\omega_0 t + \Phi_n)],$$

è possibile definire una funzione di covarianza incrociata complessa, la cui parte reale è

$$C_{Rnm}(\tau) = A_{nm}(\tau) \cos(\omega_0 \tau + \Phi_{nm})$$

e la cui parte immaginaria è

$$C_{Inm}(\tau) = A_{nm}(\tau) \sin(\omega_0 \tau + \Phi_{nm}).$$

Il rapporto tra la parte immaginaria e la parte reale è

$$\frac{C_{Inm}}{C_{Rnm}} = \tan(\omega_0 \tau + \Phi_{nm}).$$

Si osserva che questo rapporto non dipende A_{nm} .

Al fine della determinazione della frequenza Doppler, dalle relazioni precedenti si evince che la funzione di autocovarianza complessa è caratterizzata dalla seguente parte reale

$$C_{Rnn}(\tau) = A_{nn}(\tau) \cos(\omega_0 \tau) + N_{Rnn}(\tau)$$

e dalla seguente parte complessa

$$C_{Inn}(\tau) = A_{nn}(\tau) \sin(\omega_0 \tau) + N_{Inn}(\tau).$$

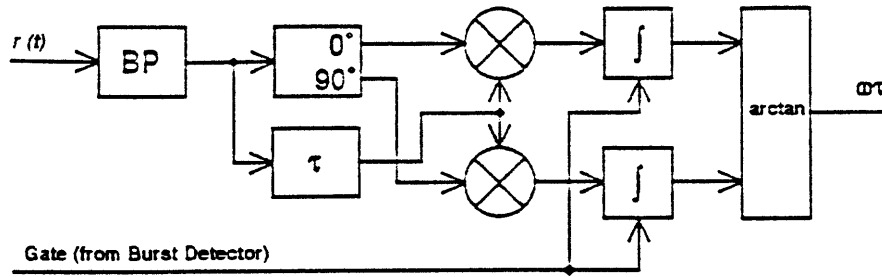


Fig. 14.4.3. Diagramma a blocchi del circuito di frequency detector.

Il termine $N_{Rnn}(\tau) + iN_{Inn}(\tau)$ rappresenta la funzione di autocovarianza complessa del rumore di fondo del segnale rilevato.

Si osserva che, in pratica, nell'FVA il segnale Doppler attraversa un filtro passa banda che consente di rimuovere il segnale di pedestal e parte del rumore (si veda la fig. 14.4.3).

Normalmente, pertanto, l'effetto del rumore è trascurabile e si può porre

$$\frac{C_{Rnn}(\tau)}{C_{Inn}(\tau)} = \tan(\omega_0 \tau).$$

Dalla precedente relazione si evince che la pulsazione Doppler ω_0 può essere determinata attraverso la funzione di autocovarianza complessa, fissato un opportuno valore di τ .

Facendo riferimento alla fig. 14.4.3, il segnale in ingresso, dopo essere stato opportunamente filtrato e amplificato, viaggia su due linee parallele: la prima consente di ottenere un ritardo del segnale di un tempo noto τ ; la seconda è caratterizzata da un circuito in grado di realizzare uno *splitting* di fase in modo da produrre due segnali aventi una differenza di fase di 90° . Ciascuno dei due segnali di uscita dal circuito di *phase splitter* viene moltiplicato per il segnale ritardato e integrato al fine di definire la parte reale e immaginaria della funzione di autocovarianza incrociata, precedentemente definita. I due circuiti integratori sono controllati da un segnale proveniente dal cosiddetto rilevatore di *burst*.

La frequenza Doppler è ottenuta dividendo l'uscita del circuito di *frequency detector* ($\omega\tau$) per il ritardo τ moltiplicato per 2π :

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega\tau}{2\pi\tau}.$$

E' evidente, dalla precedente espressione, che la scelta del tempo di ritardo τ è fondamentale nella risoluzione della misura della frequenza Doppler. Più grande è il ritardo, più piccola è la differenza di frequenza che può essere misurata. L'aumento della sensibilità, tuttavia, richiede una riduzione della larghezza di banda di frequenza Doppler. Si osserva, infatti, che per ogni definito valore di τ non è possibile distinguere una fase ϕ da $\phi + 2n\pi$ (con $n=1,2,3\dots$). Pertanto, per ogni fissato valore di τ , la massima frequenza Doppler misurabile è

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} < \frac{2\pi}{2\pi\tau} = \frac{1}{\tau}.$$

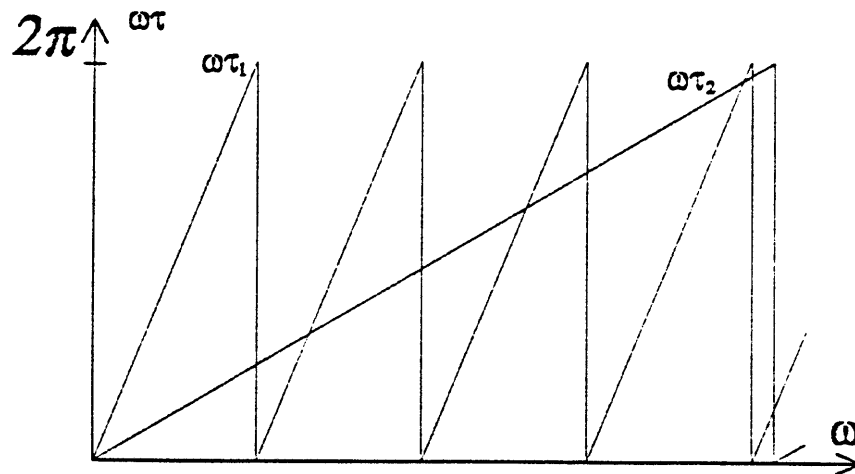


Fig. 14.4.4. Misura della frequenza di ambiguità.

Questo limite viene superato determinando la funzione di autocovarianza complessa per due distinti valori di τ . Si tratta, sostanzialmente, di evitare che $\omega\tau$ superi il valore di 2π . Utilizzando due circuiti *frequency detector*, con due diversi valori di ritardo, τ_1 e τ_2 , con $\tau_1 > \tau_2$, il *detector 1* consentirà di avere una più elevata risoluzione, mentre il *detector 2* consentirà di definire il limite di sensibilità raggiungibile. Infatti, facendo riferimento all fig. 14.4.4, il *detector 2* limiterà superiormente τ_1 , in modo che $\omega\tau_1$ non superi 2π . Questo

limite superiore è rappresentato da $\omega_0 \tau_2 = 2\pi$.

Le caratteristiche essenziali dell'FVA sono così sintetizzabili:

- rappresentazione digitale della velocità a 12 bit;
- banda di frequenza Doppler simmetrica rispetto al valore di velocità nulla per analisi di campi di moto caratterizzati da bassi valori di velocità media;
- banda di frequenza Doppler asimmetrica rispetto al valore di velocità nulla per analisi di campi di moto caratterizzati da alti valori di velocità media;
- larghezza della banda di frequenza Doppler fino a 45 MHz;
- 4 canali ausiliari a 12 bit per contemporanee acquisizioni delle uscite analogiche provenienti da altrettanti trasduttori (per es. trasduttori per la misura della pressione, della temperatura, delle altezze, etc.);
- buffer di memoria fino a 16 MByte per i dati acquisiti;
- processamento fino a 120000 dati/s per ciascun canale;
- limite di definizione dei *burst* fino a un rapporto SNR di -6 dB;
- *frequency shifter* interno;
- possibilità di controllo della funzione *high voltage* dei fotomoltiplicatori;
- accuratezza uguale allo 0.4% del valore di fondo scala della banda di frequenza Doppler utilizzata.

A r i g u a r d o dell'accuratezza si ricorda che la formula fondamentale di funzionamento di un sistema LDA, facendo riferimento alla fig. 14.4.5, è

$$V_x = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} f_0$$

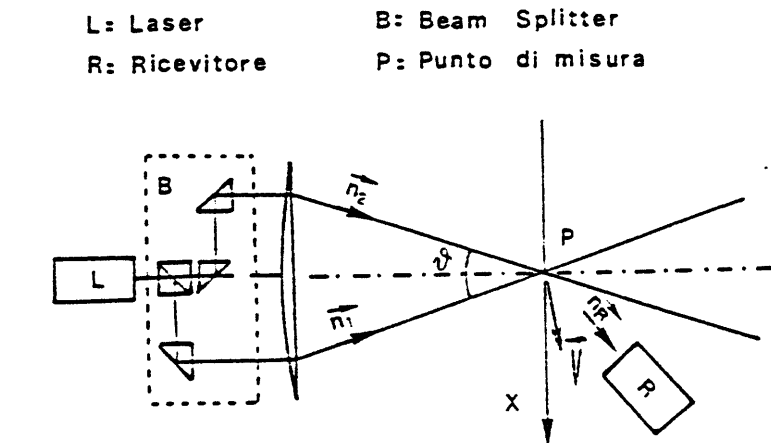


Fig. 14.4.5. Elementi essenziali della configurazione Differential Doppler di un sistema LDA.

in cui λ è la lunghezza d'onda del laser, θ è l'angolo formato dai due raggi laser e f_0 è la frequenza Doppler. Calcolando l'errore massimo sistematico, si ottiene

$$\left| \frac{\Delta V_x}{V_x} \right|_M = \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right|_M + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right|_M + \frac{\theta}{2} \cot \frac{\theta}{2} \left| \frac{\Delta \theta}{\theta} \right|_M.$$

Gli errori sulla lunghezza d'onda e sull'angolo θ sono normalmente trascurabili (Pulci Doria, 1992). Pertanto, l'unico termine che può fornire un errore più rilevante è quello relativo alla frequenza Doppler. Ecco perchè normalmente le case costruttrici forniscono l'accuratezza in termini di errore di fondo scala della banda di frequenza Doppler utilizzata.

Si ricorda, ancora, che il sistema comprende anche un pacchetto software Floware ver. 3.1. Il software è parte integrante dell'intero sistema di misura e consente un *setup* ottimale del processore di segnale, l'acquisizione dei dati in modalità multi-canale, l'analisi dei dati acquisiti e una loro rappresentazione grafica.

In particolare, tramite il software è possibile definire la lunghezza focale della lente frontale usata per la sonda trasmittente e ricevente; la lunghezza d'onda del laser con cui si opera (nel caso specifico si avevano due lunghezze d'onda per i due canali di acquisizione delle componenti di velocità, ossia 488.0 nm per il blu e 514.5 nm per il verde), la larghezza della banda di frequenza Doppler.

Il software consente, oltre alla registrazione su memoria di massa dei dati acquisiti, il calcolo del valore medio, dello scarto quadratico medio, del flatness (o kurtosis) e dello skewness dei dati acquisiti.

E' possibile, inoltre, effettuare successive elaborazioni per ottenere i diagrammi delle serie temporali, degli istogrammi e degli spettri di potenza.

In particolare, si osserva che le misure sono state condotte con una lente frontale di lunghezza focale 310 mm. In tal caso, le dimensioni del volume di misura sono riportate nella tab. 14.4.1.

Lunghezza d'onda [nm]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
488.0	0.1429	0.1426	2.3322
514.5	0.1507	0.1504	2.4589

Tab. 14.4.1.

Le componenti verticali di velocità sono state misurate con i raggi di lunghezza d'onda 488.0 nm e le componenti orizzontali con quelli di lunghezza d'onda 514.5 nm.

La sonda trasmittente e ricevente è stata posizionata su un sistema di brandeggio, costituito da slitte che consentono di realizzare spostamenti con un'accuratezza del ventesimo di millimetro. Una slitta dello stesso tipo è stata utilizzata per effettuare gli spostamenti della sonda resistiva, che, per i rilievi in presenza di moto ondoso, è sempre stata posizionata lungo la verticale passante per il volume di misura del sistema LDA.

Al fine di realizzare delle elaborazioni specifiche per la ricerca condotta, sono stati sviluppati dei programmi di calcolo che consentissero di definire lo spettro di ampiezze o di potenze, la funzione di autocorrelazione e di correlazione incrociata, etc.

Ciò è stato dettato anche dall'esigenza di conoscere esattamente l'algoritmo di calcolo utilizzato. Questa esigenza, come è noto, non è sempre del tutto soddisfatta utilizzando un software commerciale.