

FD704

VELOCIMETRÍA DOPPLER ACÚSTICA (ADV)

Prof. Christian Ihle

FCFM Universidad de Chile



1 Introducción

2 Descripción del instrumento

3 Límites de la técnica

Alternativas para velocimetría

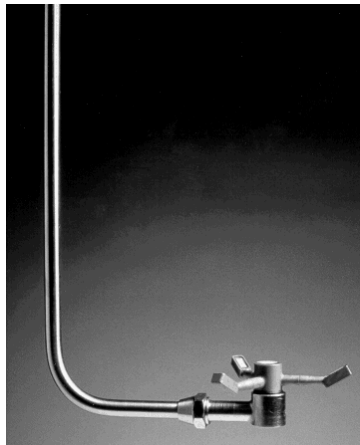
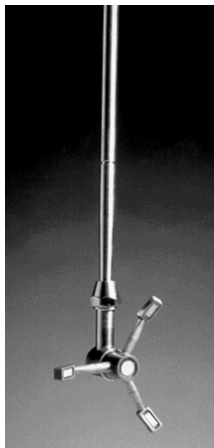
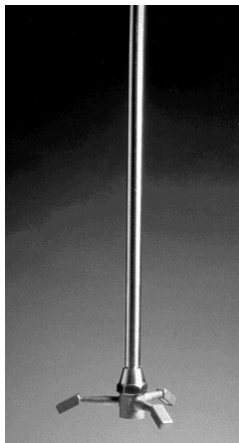
ADV Reporta valores medios de velocidad del agua en 3D con buena precisión y costos relativos bajos. Sin embargo, la capacidad del ADV para describir la turbulencia del flujo con precisión es limitada.

Hot-film Alta precisión. Sin embargo, su uso está limitado cuando existen impurezas en el agua.

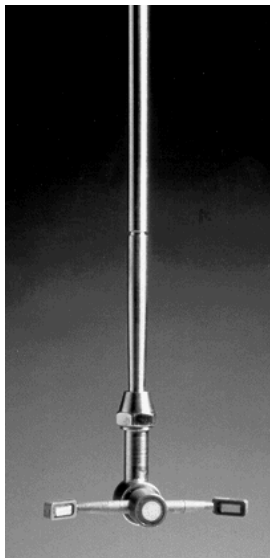
PIV y LDV alta resolución espacial o temporal. Sin embargo, la posibilidad de aplicarlas se reduce cuando crece la escala del experimento.

ADV

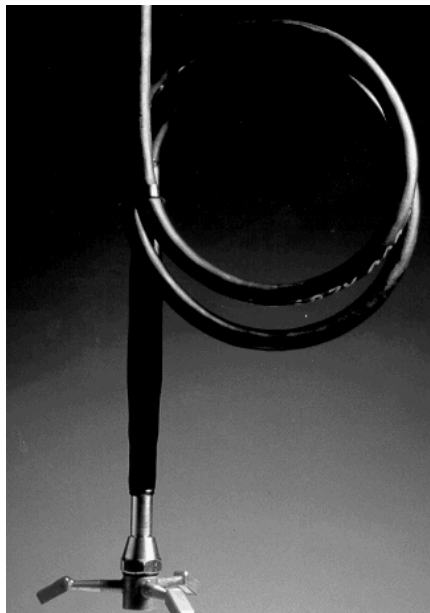
Tipos constructivos



Tipos constructivos

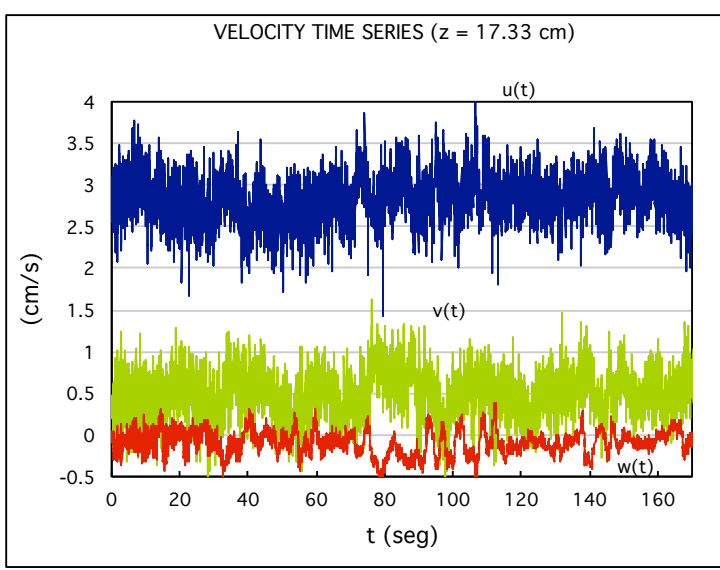


ADV



FD704

Series de tiempo



Principio

(García *et al.*, 2005)

- efecto Doppler
- dos pulsos cuadrados (f_{ADV} entre 5 Mhz y 16 Mhz)
- relaciona cambio de fase con velocidad de flujo
- requiere partículas para su funcionamiento

componentes

- sonda
- módulo de acondicionamiento de señal
- módulo de procesamiento de la señal



Principio de funcionamiento

- Tiempo entre emisión y recepción de cada pulso para cada componente i de la velocidad:

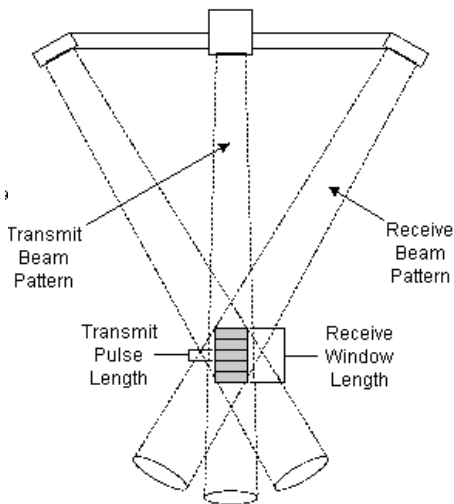
$$\delta t_{ki} = \frac{2x_{ki}}{C} \Leftrightarrow x_{ki} = \frac{C\delta t_{ki}}{2}, \quad (1)$$

con $k = 1, 2$ y C es la velocidad del sonido en el medio de las condiciones de prueba.

- Cuando se emite el segundo pulso, la partícula ha viajado en la dirección i una distancia $x_{1i} - x_{2i} = (T_{2i} - T_{1i})v_i$.
- En la práctica, estos instrumentos en vez de medir δt , determinan el cambio de fase. Se define en la fase $\phi_{ki} = 2\pi f_{ADV}\delta t_{ki}$. Con esto,

$$v_i = \frac{C}{4\pi f_{ADV}} \frac{d\phi_i}{dt}. \quad (2)$$

El cambio de fase es medido a partir de un algoritmo de auto correlación y correlación cruzada de la señal (Lhermitte & Serafin, 1984).



Correlación entre dos variables

$$R_{xy}(\tau) = E[x_k(t)y_k(t+\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)y(t+\tau)d\tau$$

$$R_{yy}(\tau) = E[y_k(t)y_k(t+\tau)]$$

$$(E[(x_k(t))]) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx$$

Algunas propiedades

$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau)$$









$$R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau)$$

$$R_{gh}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}G^c(\omega)H(\omega)$$

$$R(s, t) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i, j)g_2(i+s, j+t) \quad (3)$$

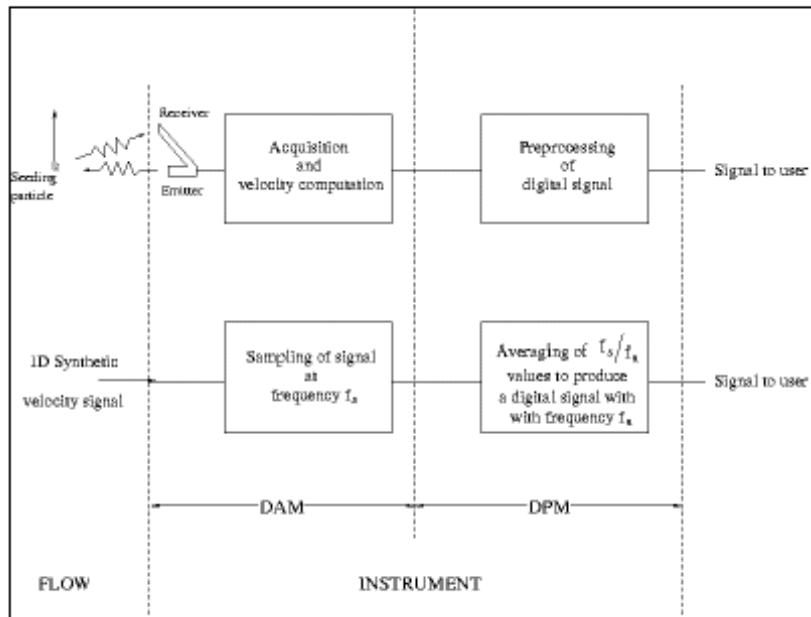
$$= \mathcal{F}^{-1} \mathcal{F}^* g_1(i, j) \mathcal{F} g_2(i+s, j+t). \quad (4)$$

Table 5.1 Special Autocorrelation Functions

Type	Autocorrelation Function
Constant	 $R_{xx}(\tau) = c^2$
Sine wave	 $R_{xx}(\tau) = \frac{X^2}{2} \cos 2\pi f_0 \tau$
White noise	 $R_{xx}(\tau) = a \delta(\tau)$
Low-pass, white noise	 $R_{xx}(\tau) = a B \left(\frac{\sin 2\pi B \tau}{2\pi B \tau} \right)$
Band-pass white noise	 $R_{xx}(\tau) = a B \left(\frac{\sin \pi B \tau}{\pi B \tau} \right) \cos 2\pi f_0 \tau$
Exponential	 $R_{xx}(\tau) = e^{-a \tau }$
Exponential cosine	 $R_{xx}(\tau) = e^{-a \tau } \cos 2\pi f_0 \tau$
Exponential cosine, exponential sine	 $R_{xx}(\tau) = e^{-a \tau } (b \cos 2\pi f_0 \tau + c \sin 2\pi f_0 \tau)$

Bendat & Piersol, (2011)

Estructura del instrumento



Adquisición de datos

Componente analógica

Dos pulsos enviados (ondas cuadradas)

Tiempos por pulso T_1 y T_2

Tiempo de procesamiento T_D

Tiempo de medición para cada componente radial $T_1 + T_D + T_2 + T_D$.

Tiempo total para mediciones 3D $T = 3(T_1 + T_D + T_2 + T_D)$ (Tiempo de respuesta del instrumento = $1/f_s$).

Frecuencia de muestreo $f_s = 1/T$ entre 100 Hz y 263 Hz

f_s actúa como filtro paso bajo. En consecuencia, la técnica tiene un cierto grado de aliasing (para $f > f_s/2$).

Promediación post-digitalización

- N valores considerados:

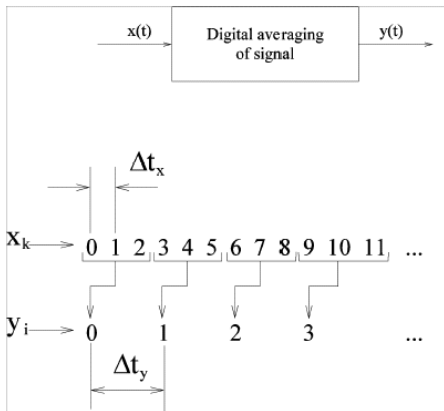
$$f_R = \frac{f_s}{N} \quad (5)$$

(escogida por el usuario)

- Filtro no-recursivo:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} x\left(t + \frac{n}{Nf_R}\right) \quad (6)$$

$y@f_R, x@f_s$



Frecuencias ADV empleadas por el sistema

Table 1. Frequencies Used by Acoustic Doppler Velocimeter

Velocity range (cm/s)	f_R [Hz]	1	25	100
	$f_{\text{cut-off}}$ [Hz]	0.44	11.3	50
			f_S (Hz)	
250		263	250	200
100		256	225	200
30		226	200	100
10		180	175	100
3		143	125	100

f_S depende del rango de velocidad y de la frecuencia seleccionada por el usuario, f_R (García *et al.*, 2005).

Función de transferencia

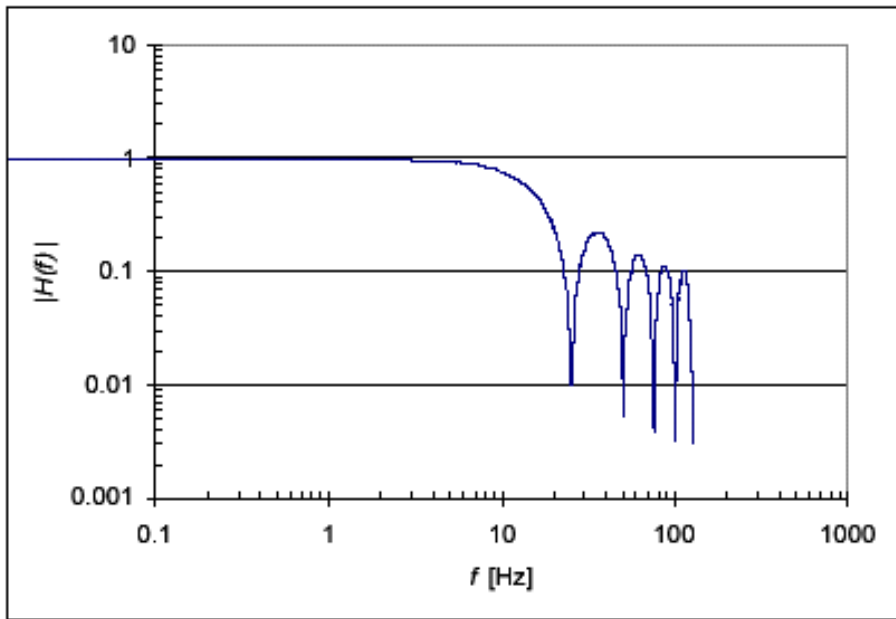
$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\exp\left(j2\pi \frac{nf}{f_R}\right)}{N} \quad (7)$$

$$= \frac{f_R}{f_s} \frac{1 - \exp\left(j2\pi \frac{f}{f_R}\right)}{1 - \exp\left(j2\pi \frac{f}{f_s}\right)}, \quad (8)$$

de donde,

$$|H(f)| = \frac{f_R}{f_s} \left[\frac{1 - \cos\left(2\pi \frac{f}{f_R}\right)}{1 - \cos\left(2\pi \frac{f}{f_s}\right)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

(demostrarlo!)



Resolviendo la turbulencia

Limitaciones del instrumento

- diámetro del volumen = 6 mm
- frecuencia de medición igual 50 Hz
- d es el tamaño del menor vórtice resuelto.

$$d = \frac{U}{f_{cutoff}}$$

Cutoff freq. [hz]	Velocities [cm/s]				
	1	10	20	70	100
1	1	10	20	70	100
2	0.50	5.00	10.00	35.00	50.00
3	0.33	3.33	6.67	23.33	33.33
5	0.2	2	4	14	20
12.5	0.08	0.8	1.6	5.6	8
25	0.04	0.4	0.8	2.8	4

Espectro de energía

(Pope, 2000)

$$E_{11}(k) = C_0 \epsilon^{2/3} k^{-5/3} f_L(kL) f_\eta(k\eta) \quad (10)$$

L escala integral

η escala de Kolmogorov

ϵ tasa de disipación de energía cinética turbulenta

$f_L(kL) f_\eta(k\eta)$ funciones de forma

Comparación con teoría

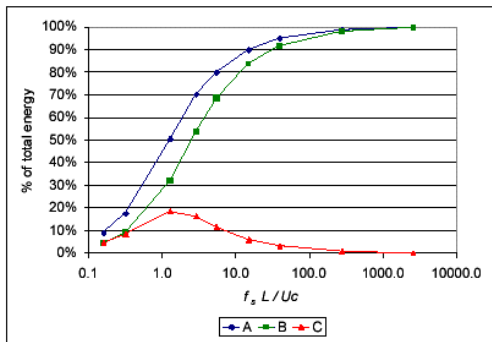


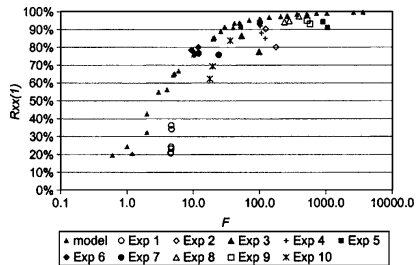
Figure 4: Percentage of the energy remaining in the signal for: Curve A: $f < f_s$; Curve B: $f < f_s/2$ and Curve C = energy corresponding to frequencies $f_s/2 < f < f_s$ in the original (unsampled) time series

Efecto en función de auto correlación

Medida de la capacidad de detectar estructuras coherentes en el flujo

Table 2. Characteristics of the Experiments

Experiment no.	Flow conditions		Instrument	
	L (cm)	U_c (cm/s)	Type	f_R (Hz)
1	20	~43	Micro ADV Sontek	10
2	38	5–7	Micro ADV Sontek	25
3	50–60	15–23	Nortek NDV 10 MHz	25
4	85	17–22	ADV Sontek	25
5	365.8	~10	Nortek NDV 10 MHz	25
6	26.7	56–71	Micro ADV Sontek	25
7	28.2	58	Micro ADV Sontek	25
8	80	5–9	Micro ADV Sontek	25
9	700	12–13	Nortek NDV 10 MHz	10
10	15	10–21	ADV Sontek	25

**Fig. 13.** Comparison between observed and predicted autocorrelation function value at Lag 1 of the recorded water velocity signals for different experimental conditions (see Table 2)

Minimizando el efecto de promediación

El parámetro F

$$F = \frac{L}{U_c / f_R} = \frac{f_R}{f_T} = \frac{L}{d_R} \quad (11)$$

f_T frecuencia característica asociada a los vórtices grandes en el flujo (contienen la energía que se transfiere hacia las escalas más pequeñas)

d_R diámetro del volumen de control

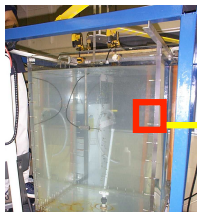
Se observa que $F > 20$ resulta en buenos resultados de medición.

Evaluación del efecto de estela generado por el ADV sobre el campo de velocidades

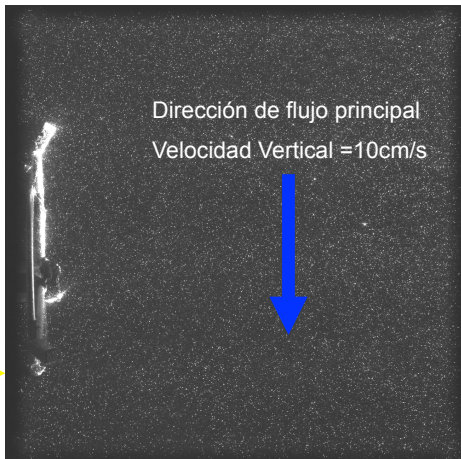
Resultados preliminares

Efecto de estela del ADV Nortek 10MHz

Tanque = 81x82x80cm
Columna de burbujas.



ADV



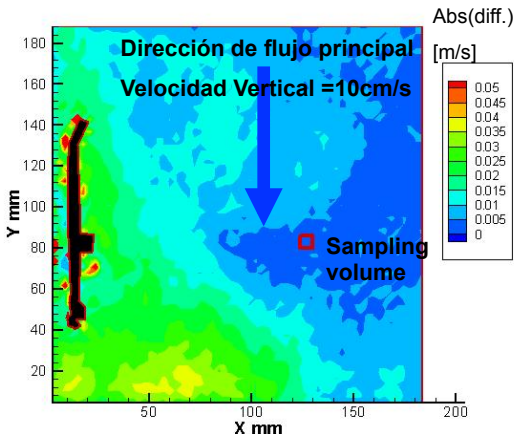
FD704

Evaluación del efecto de estela generado por el ADV sobre el campo de velocidades

Resultados experimentales preliminares

Efecto de estela del ADV Nortek 10MHz

Valor absoluto de las diferencias entre las magnitudes de la velocidad de flujo con y sin instrumento [m/s]



Evaluación del efecto de estela generado por el ADP sobre el campo de velocidades

Efecto de estela del
ADCP Sontek

Condiciones
experimentales

Canal

Longitud = 420 cm,
Profundidad = 40 cm
ancho = 30 cm



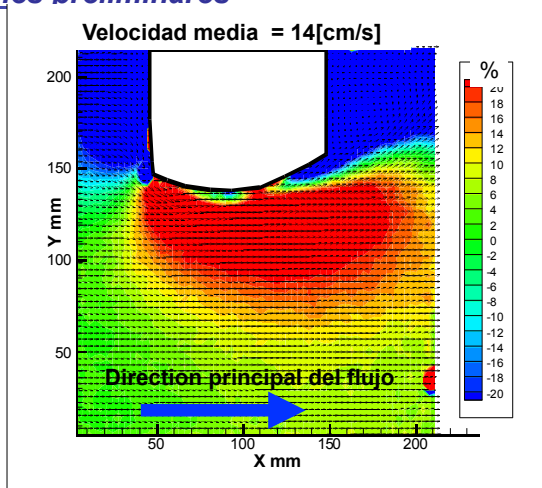
Evaluación del efecto de estela generado por el ADP sobre el campo de velocidades

Resultados experimentales preliminares

Efecto de estela del
ADCP Sontek

Diferencias Relativas
[%] entre magnitudes
de velocidades del
flujo con y sin
instrumento.

Se muestra el campo
de velocidades
alrededor del ADCP
con vectores



Bibliografía

- BENDAT, JULIUS S & PIERSOL, ALLAN G 2011 *Random data: analysis and measurement procedures*, 3rd edn., , vol. 729. New York: John Wiley & Sons.
- GARCÍA, C M, CANTERO, M I, NIÑO, Y & GARCÍA, M H 2005 Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering* **131**, 1062.
- LHERMITTE, ROGER & SERAFIN, ROBERT 1984 Pulse-to-pulse coherent Doppler sonar signal processing techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1** (4), 293–308.
- POPE, ST B 2000 *Turbulent flows*, Cambridge Univ. Press, Cambridge .