

**ESTUDIO DETALLADO DE LOS PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE UN  
VELOCÍMETRO ACÚSTICO DE ALTA FRECUENCIA  
(ADV, ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER)**

De Medina, V.; Bateman, A.; Velasco, D.  
Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica  
Universidad Politécnica de Cataluña

**Resumen**

Los velocímetros tridimensionales desarrollados primeramente por Sontek y posteriormente por Nortek son de uso extendido en el mundo de la hidráulica. Se trata de instrumentos ampliamente configurables y en algunos casos queda a decisión del experimentador las opciones a adoptar. Tras realizar una serie de experimentos se presenta la influencia fundamental que tienen estos parámetros en el resultado final.

Ciertas configuraciones invalidan inmediatamente todos los datos que se tomen. Con carácter general se muestra como un instrumento muy robusto en las mediciones de velocidades medias y muy condicionado por la configuración en las mediciones turbulentas. Se descubre una relación que podría calificarse de exponencial entre el error del instrumento y la configuración de este.

**Abstract**

The three dimensional velocimeter, developed firstly by Sontek and finally by Nortek, is of extended use in the hydraulic world. It is widely configurable and sometimes the researcher has the responsibility to choose the best configuration options. After some test series, the fundamental influence of those options in the final results is studied.

Several configurations of the device immediately discard all the measures that were taken. In general, to measure the mean velocities, the ADV seems to be a very stable instrument and independent from configuration; but in the other hand, for turbulent measurements, the device is configuration-dependent. It is shown also, an apparent exponential relationship between the error of the instrument and its configuration.

# Contraste de las medidas realizadas con un ADV (acoustic doppler velocimeter) Nortek utilizando diferentes combinaciones de los parámetros de configuración.

## Introducción

El ADV de Nortek es un instrumento de fácil instalación y uso, ello permite que sin estar familiarizado con el aparato sea posible empezar a trabajar con él. Nos pide una serie de parámetros de configuración, que podemos dividir en dos grupos, por una parte están los objetivamente medibles como podrían ser la temperatura, la concentración de sales y la velocidad del sonido en el medio. Por otra parte encontramos otros parámetros que deben ser definidos en base a la experiencia e intuición del experimentador. Entre estos últimos encontraríamos el tamaño del volumen de control, el rango de velocidades y la frecuencia de medida.

## 1.-Parámetros de Configuración:

### Rango de velocidades

El rango de velocidades indica al instrumento la velocidad máxima que va a medir, en función de esta velocidad máxima se esperarán unos determinados desfases para el eco de cada partícula. La precisión en la determinación de este desfase es del 1% sobre el rango escogido, por tanto interesa utilizar el menor rango posible. Por otra parte un rango demasiado pequeño hará que ciertos desfases se atribuyan a velocidades negativas, dando resultados erróneos. Este parámetro parece que en principio queda determinado por las velocidades máximas del ensayo, pero intervienen otra serie de factores como el hecho de que su configuración afecta de diferente manera a cada uno de los ejes de medida, haciendo que su elección no sea tan obvia.

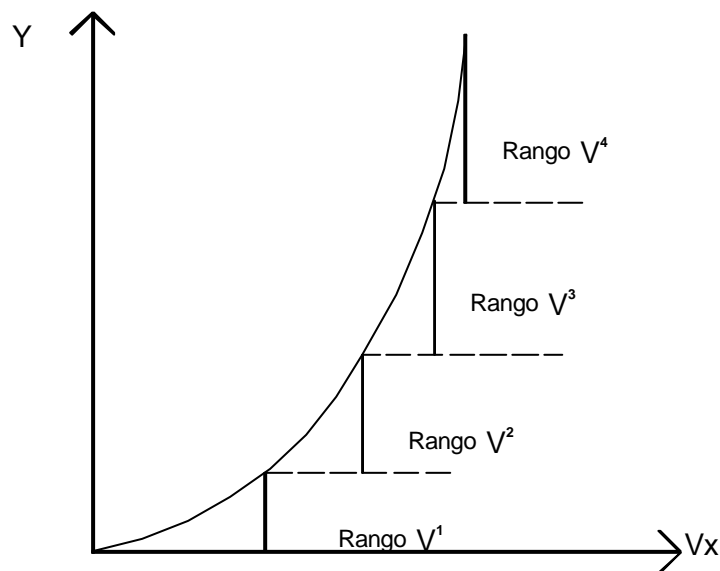


Ilustración 1 Perfil de velocidades característico

Por otra parte cuando tomamos un perfil de velocidades completo nos encontramos con medidas que van desde casi el cero hasta valores que pueden llegar a metros por segundo, esto hace que debamos trabajar con diferentes configuraciones en lo que se refiere a la elección del rango de velocidades. Para evitar los efectos de estos cambios de rango en los resultados podemos trabajar con una única configuración que permita medir todo el perfil. En este caso nos encontraremos midiendo

velocidades bajas con una configuración adaptada a valores mucho mayores, con la consecuente acumulación de error en la medida.

### Frecuencia

En las especificaciones del contrato de desarrollo del sensor se determinaban frecuencias de medida de 25 Hz con errores menores del 1%. En esencia el sensor toma

entre 200 y 250 medidas por segundo, estas las agrupa promediándolas hasta el momento de dar los datos. Esta frecuencia de captura es independiente de la frecuencia de adquisición de datos, de esta manera si solicitamos datos cada décima de segundo obtendremos el resultado de promediar 20 medidas, si por el contrario lo hacemos cada centésima de segundo obtendremos el resultado de promediar 2 medidas. Los datos resultados de promediar muchas medidas suprimen una parte importante del ruido doppler, por ello solamente se garantiza un error menor al 1% con medidas a 25 Hz o menos, es decir resultado de promediar 10 o más medidas. El software de adquisición de datos suministrado por Nortek permite medidas de hasta 100 Hz. Puede resultar tentador medir a frecuencias elevadas ya que ello permite acercarse a fenómenos turbulentos de frecuencias y números de onda mayores, veremos la alteración de los resultados debida al uso de frecuencias elevadas.

### Volumen de control

El volumen de control tiene su forma definida por la circunferencia que forma el emisor de ultrasonidos y el eje perpendicular a éste. Con estos dos elementos se genera un cono asociado a la dispersión de las ondas emitidas. Por el hecho de tratarse de un emisor de 10 MHz son ondas direccionales que presentan poca dispersión. Se nos permite escoger entre tres volúmenes de control diferentes, 3, 6 y 9 mm siendo esta dimensión la longitud del eje de revolución del cilindro que define el volumen de control, ya que el diámetro se mantiene constante. La manera de materializar el volumen de control es mediante la modificación del pulso y la modificación de la ventana de recepción de ecos.

Si tenemos en cuenta que a cada escala de la turbulencia le corresponde un tamaño, puede ser interesante utilizar volúmenes de control pequeños que nos permitan medir fenómenos lo más reducidos posible. Al igual que en el caso de las frecuencias, interesa obtener una señal resultado de promediar el máximo número de ecos, por ello parece razonable suponer que las medidas con volumen de control grande obtendrán mejores resultados ya que contienen más partículas.

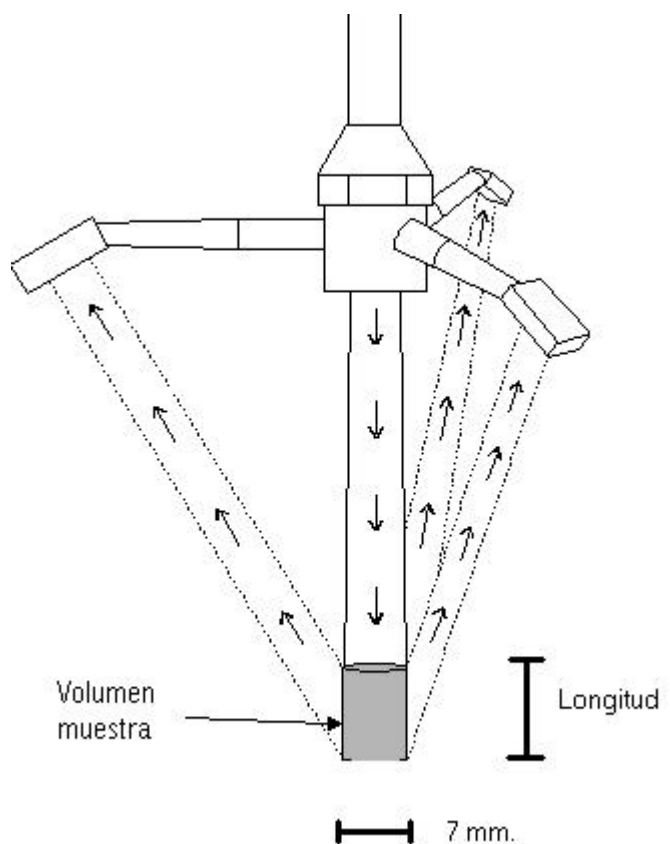


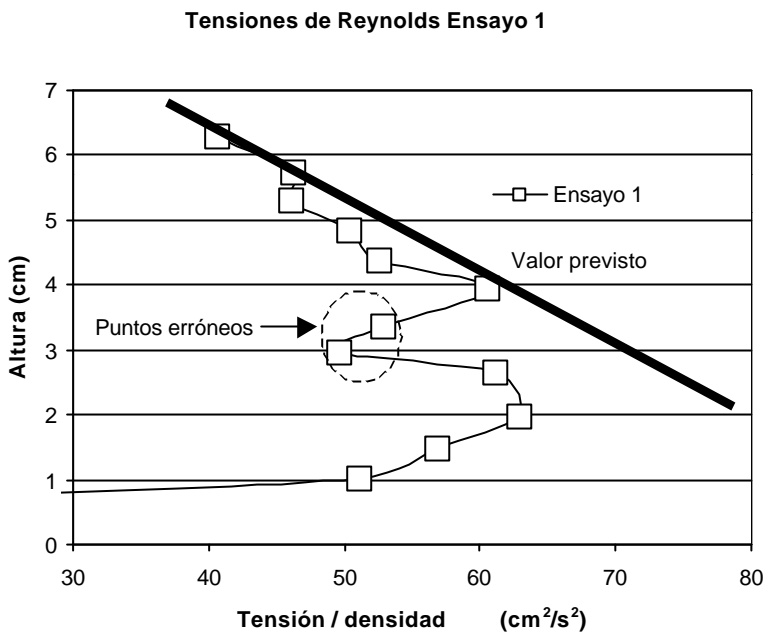
Ilustración 2 Volumen de control

### 2.-Antecedentes

El análisis de datos experimentales tomados en una campaña en el año 99 revelaba comportamientos extraños en algunos valores. Después de buscar posibles justificaciones a estos datos parecía que el origen no estaba en el montaje del ensayo sino en el funcionamiento del aparato de medida. Los ficheros generados por el instrumento poseen una cabecera en la que se almacena la configuración del aparato, analizamos exhaustivamente todos los bytes contenidos en la cabecera. Para ello no basta utilizar el software suministrado por Nortek (Getdtl.exe) sino que hay que recurrir a otros medios

como *Winadv.exe* (WAHL[00]) o los ficheros Matlab suministrados por Matt Brennan de Stanford (BRENNAN[00]). De todos estos elementos pudimos obtener una imagen más clara de la configuración real del aparato en el momento de la toma de datos.

La conclusión fue que para los datos erróneos el instrumento había producido una modificación del pulso que influía en el rango de velocidades, así que siendo nuestra configuración inicial de 100 cm/s el aparato se reconfiguró 160 cm/s. Para poder cuantificar la influencia de los parámetros en los resultados planificamos una serie de ensayos con



Gráfica 1 Perfil de tensiones de Reynolds característico de un canal

diferentes parámetros de medida cubriendo todas las posibilidades.

### 3.-Configuraciones de ensayo

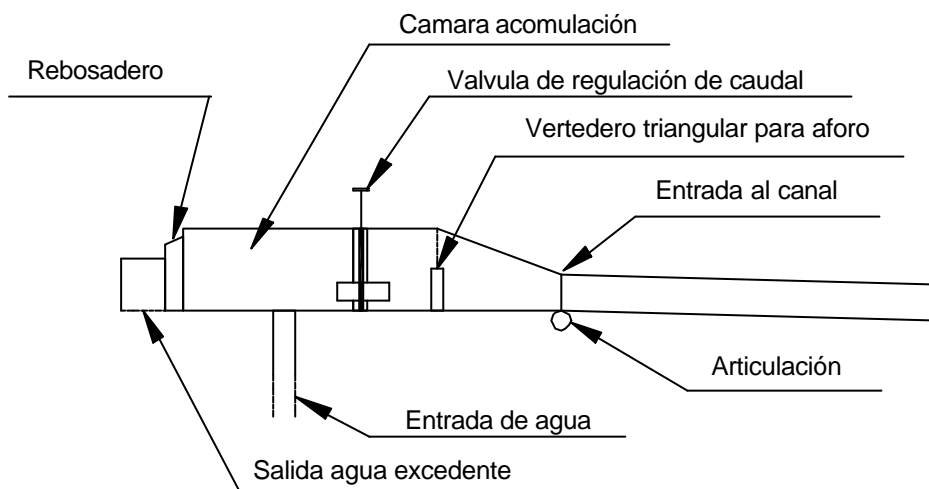
Para realizar nuestro ensayo combinamos los diferentes tamaños de volumen de control (3, 6, 9 mm) con los diferentes rangos de velocidades (3, 10, 30, 100 cm/s) con cuatro frecuencias escogidas (25, 50, 75, 100 Hz) dando un total de 48 tomas de datos. Sobre las diferentes frecuencias tenemos que decir que Nortek únicamente garantiza los resultados para valores de 25 Hz o menos, pero ya que permite que su software trabaje a frecuencias mayores se hace necesario un estudio del comportamiento del sensor a estas frecuencias. El parámetro más cuestionable es el rango de velocidades ya que cuando se utiliza uno menor que el adecuado se producen fenómenos de *aliasing* y otros errores. En nuestro ensayo las velocidades medias eran suficientemente bajas como para poder utilizar cualquiera de las configuraciones.

Volumen de Control (mm.)	Sample Rate	Velocity Range	Volumen de Control (mm.)	Sample Rate	Velocity Range
3	25	3 cm/s	3	25	10 cm/s
3	50	3 cm/s	3	50	10 cm/s
3	75	3 cm/s	3	75	10 cm/s
3	100	3 cm/s	3	100	10 cm/s
6	25	3 cm/s	6	25	10 cm/s
6	50	3 cm/s	6	50	10 cm/s
6	75	3 cm/s	6	75	10 cm/s
6	100	3 cm/s	6	100	10 cm/s
9	25	3 cm/s	9	25	10 cm/s
9	50	3 cm/s	9	50	10 cm/s
9	75	3 cm/s	9	75	10 cm/s
9	100	3 cm/s	9	100	10 cm/s
Volumen de Control (mm.)	Sample Rate	Velocity Range	Volumen de Control (mm.)	Sample Rate	Velocity Range
3	25	30 cm/s	3	25	100 cm/s
3	50	30 cm/s	3	50	100 cm/s
3	75	30 cm/s	3	75	100 cm/s
3	100	30 cm/s	3	100	100 cm/s
6	25	30 cm/s	6	25	100 cm/s
6	50	30 cm/s	6	50	100 cm/s
6	75	30 cm/s	6	75	100 cm/s
6	100	30 cm/s	6	100	100 cm/s
9	25	30 cm/s	9	25	100 cm/s
9	50	30 cm/s	9	50	100 cm/s
9	75	30 cm/s	9	75	100 cm/s
9	100	30 cm/s	9	100	100 cm/s

Tabla 1 configuraciones de ensayo

#### 4.-Montaje del experimento

Se trataba de obtener unas condiciones de experimento lo más estables posible de manera que pudiésemos realizar un barrido probando todas las posibles configuraciones y tomando datos con ellas, así después es posible comparar los resultados obtenidos y ver como se modifican en función de los parámetros. Para ello trabajamos en un canal situado en el sótano del edificio D1 del Campus Nord de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). Se trata de un canal con fondo de PVC y paredes de cristal. Tiene una sección de 60 cm de ancho por 60 cm. de altura y una longitud de 20 m. Se sustenta sobre unos pilares con forma atornillada que descansan en una hembras de tuerca, de manera que es posible subir y bajar estos pilares, así que con ello se consigue la pendiente deseada. Adoptamos una pendiente del 1% con 9 l/s de caudal. Debido a la

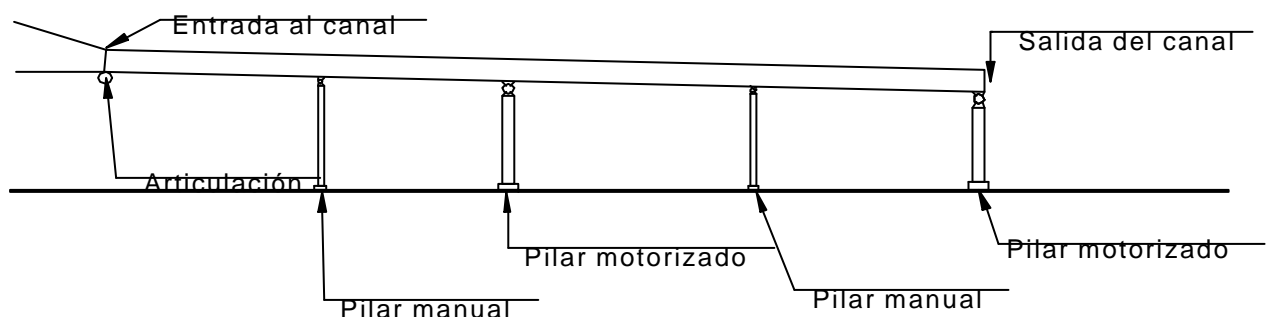


**Ilustración 4 Alzado del sistema de aforo del canal de pendiente variable del módulo D-1**

baja rugosidad del canal se obtenía un calado muy pequeño de manera que se represó el agua aguas abajo mediante una barrera de plástico que obligaba a subir la lámina de agua así se reducía la pendiente motriz y como consecuencia aumentaba el calado y se reducían las velocidades. En el centro del canal se situó el sensor fijándolo lo máximo posible y nivelándolo mediante un nivel

para asegurar su verticalidad. Las únicas medidas que se realizaron fueron las de Sontek con lo que se desconoce el calado o la velocidad real del flujo, ya que el objetivo era estudiar la estabilidad de las medidas del ADV.

De hecho la única condición estrictamente necesaria era la estabilidad del flujo de manera que a lo largo de las 4 horas que duró el experimento pudiésemos suponer que



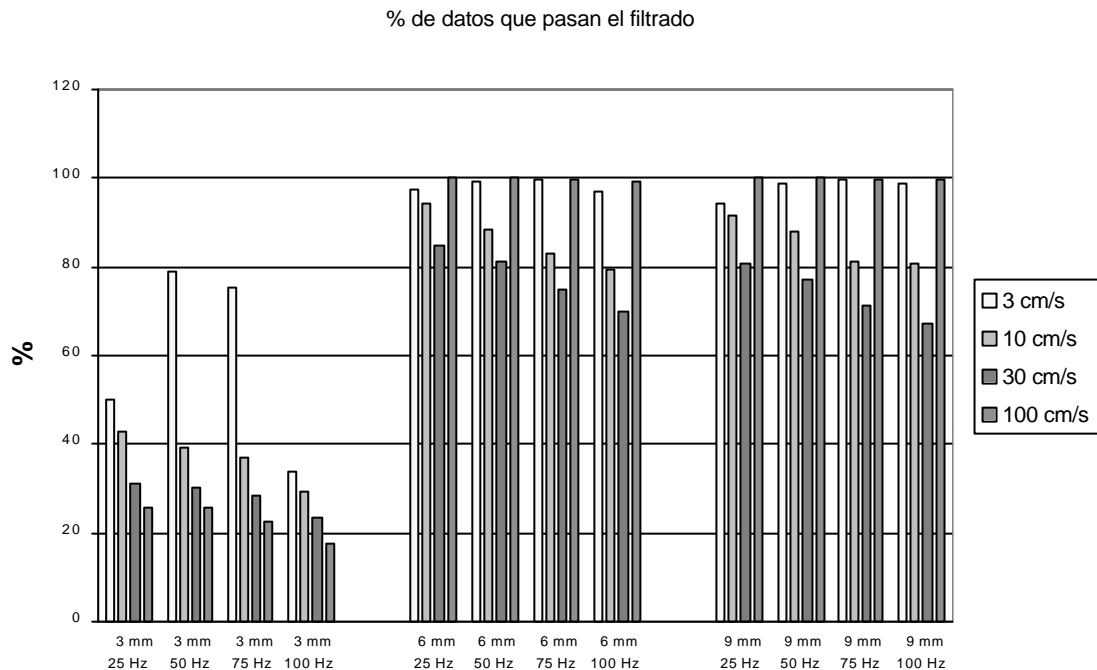
**Ilustración 5 Alzado del canal de pendiente variable del módulo D-1**

medíamos el mismo fenómeno.

## 5.-Análisis de filtrado y desviaciones

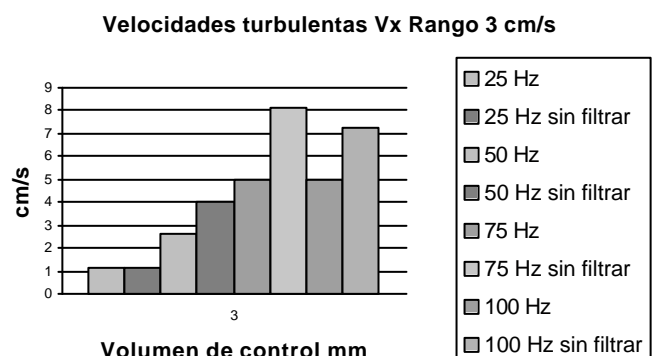
### Filtrado

Se obtuvieron muchos resultados, pero debido a la falta de espacio únicamente se pueden presentar algunos. En una primera fase se realizó un filtrado de los datos en función de su calidad, para ello se recurrió a los conocidos métodos de filtrar en función de la relación señal-ruido y en función de la correlación de los ecos medidos por el sensor. Estos son dos datos tomados por el aparato que se pueden leer y procesar. Se utilizaron como criterios exigir una correlación mayor del 70 % y una relación señal-ruido mayor de 15 db. Podemos ver en función de la configuración que tanto por ciento de los



Gráfica 2 % de datos de las medidas correctos

datos superaron el filtrado, vemos que en el caso de usar volúmenes de control pequeños obtenemos una baja calidad en la señal, en general el parámetro incumplido era el de relación señal-ruido, que daba en media valores ligeramente inferiores a 15 por lo que no superaba el filtrado, obteniéndose en la mayoría de casos valores inferiores al 30%, con lo que a pesar del filtrado los datos resultaban de dudosa validez. Para el resto de volúmenes el comportamiento era correcto. Resulta ilustrativo ver el efecto que produce el filtrado en las series de datos, lo que podemos ver en la gráfica 3, en la que se analiza la desviación estándar de los datos, donde apreciamos que como cabía esperar las velocidades turbulentas se reducen al filtrar los datos, ya que el filtrado reduce la dispersión.

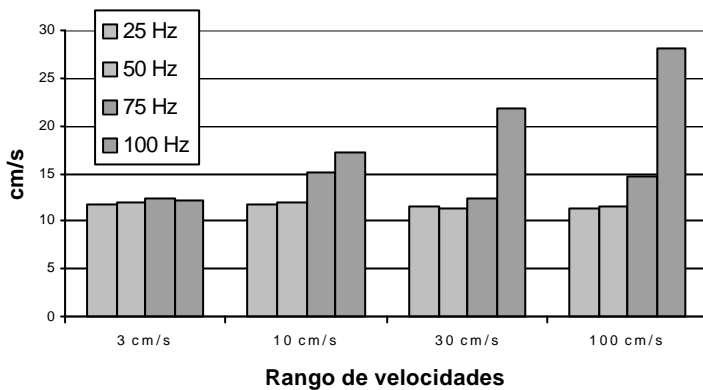


Gráfica 3 Influencia del filtrado en las velocidades turbulentas 3mm 3cm/s

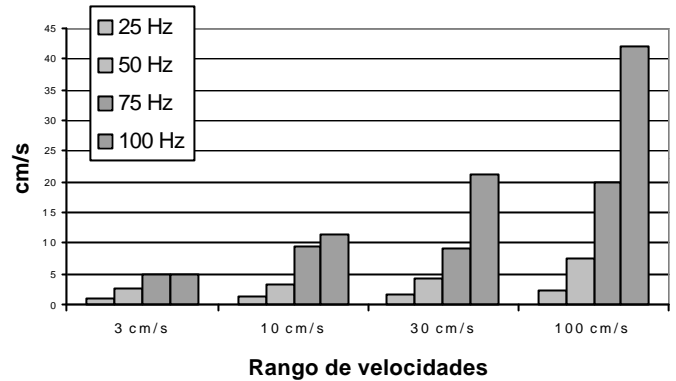
### Velocidades Medias y turbulentas

En la siguiente gráfica veremos como la influencia de la configuración en la medida de las velocidades medias es aceptablemente reducida, veremos el caso de volumen de

Valores de la velocidad media  $V_x$  para 3mm de volumen de control



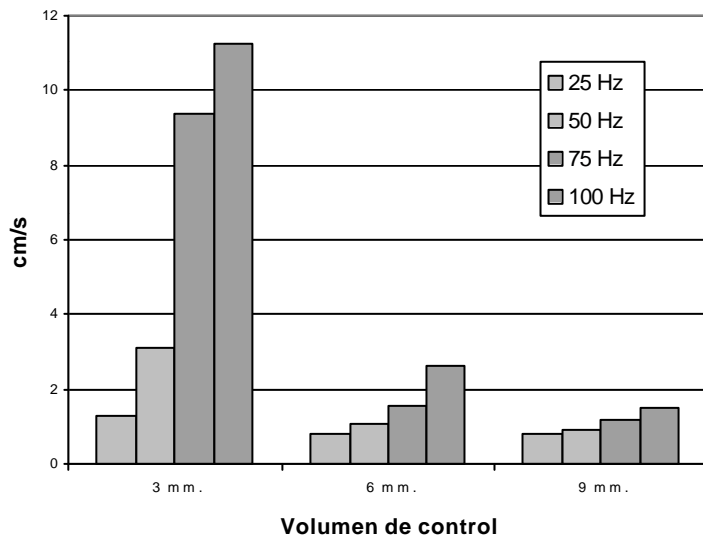
Valores de la velocidad turbulenta  $V'_x$  para 3 mm. de volumen de control



Gráfica 4 Velocidades medias y turbulentas para 3 mm volumen de control

control de 3 mm que es el que posee mayores desviaciones en la medida de las velocidades. Se puede apreciar que para las medidas a 25 y a 50 Hz los resultados son bastantes estables, sin embargo a 100 Hz el valor obtenido no es valido. Como tendencia podemos decir que al incrementar el rango de velocidades o la frecuencia de medida se incrementa el error en la media. Otra gráfica que es significativa es la de velocidades turbulentas. Analizamos las velocidades turbulentas mediante la desviación estándar de la velocidad, que es equivalente a la media cuadrática de las velocidades turbulentas. en este caso veremos también la configuración más desfavorable es con el volumen de control de 3 mm. Se aprecia una grave discrepancia en los resultados, siendo difícil considerar la mayoría de ellos como válidos, obligando a considerar muchas de las configuraciones como inadecuadas para el trabajo. Para los 3 mm. de volumen de control, únicamente a 25 Hz se mide un resultado más o menos estable, a pesar de que incluso para esta frecuencia al incrementar el rango de velocidades se observa un aumento del valor de la desviación. Al igual que antes se aprecia la tendencia a que *con el incremento del rango o de la frecuencia se incrementa el valor de la medida*. Para analizar el efecto del tamaño del volumen de control podemos ver la siguiente gráfica en la que vemos como *se reduce el valor de las velocidades turbulentas al incrementar el tamaño del volumen de control*, este efecto se debe a un mayor número de partículas implicadas en el cálculo del dato. Esta gráfica únicamente representa los valores obtenidos para rangos de 10 cm/s pero la tendencia se conserva para los otros rangos de velocidades.

Valores de la velocidad turbulenta  $V'_x$  para 10 cm/s de rango de velocidades



Gráfica 5 velocidades turbulentas para 10 cm/s de rango de velocidades

Por tanto hemos extraído tres tendencias diferentes en lo que al comportamiento de las velocidades turbulentas se refiere.

-El aumento del rango de velocidades incrementa el error, quizás debido a que el ruido es proporcional a este rango de velocidades

-El aumento de la frecuencia incrementa el error, quizás debido a que se reduce el número de datos promediados.

-El incremento del tamaño del volumen de control reduce el error, quizás debido al incremento de ecos recibidos por el sensor.

## 6.-Modelo de funcionamiento de las desviaciones

A la vista de los resultados obtenidos suponemos un modelo de comportamiento muy simple para las desviaciones de las velocidades (medias cuadráticas de las velocidades turbulentas). En primer lugar consideraremos la influencia de las frecuencias en la desviación, suponiendo su efecto como exponencial

$$Desviacion = A \times \exp(FRECUENCIA) + K$$

La  $A$  es un parámetro que depende de los otros elementos de configuración, en primer lugar del rango, supondremos que lo hace también de forma exponencial

$$A = B \times \exp(RANGO) + K_2$$

La  $B$  a su vez depende inversamente del último parámetro de configuración, el volumen de control y lo hace aparentemente exponencialmente

$$B = C \times \exp(-VOLUMEN) + K_3$$

Al unir todas estas hipótesis podemos escribir una fórmula del tipo

$$Desviacion = C \times \exp(FRECUENCIA + RANGO - VOLUMEN) + K$$

Donde  $FRECUENCIA$ ,  $RANGO$ ,  $VOLUMEN$  son funciones lineales que dependen cada una de la variable de configuración que lleva su nombre, y son del tipo:

$$FRECUENCIA = a \times Frecuenciadetoma \text{ de datos}$$

Donde  $a$  es una constante, con lo que la desviación resultante de este proceso depende 5 constantes:

$$Desviacion = C \times \exp(a \times Frecuencia + b \times Rango - c \times Volumen) + K$$

Que es una aproximación a groso modo, y que podemos realizar para los tres ejes para tratar de conocer las constantes, así que si empezamos analizando los datos de las velocidades en Y obtenemos que la mejor aproximación es para:

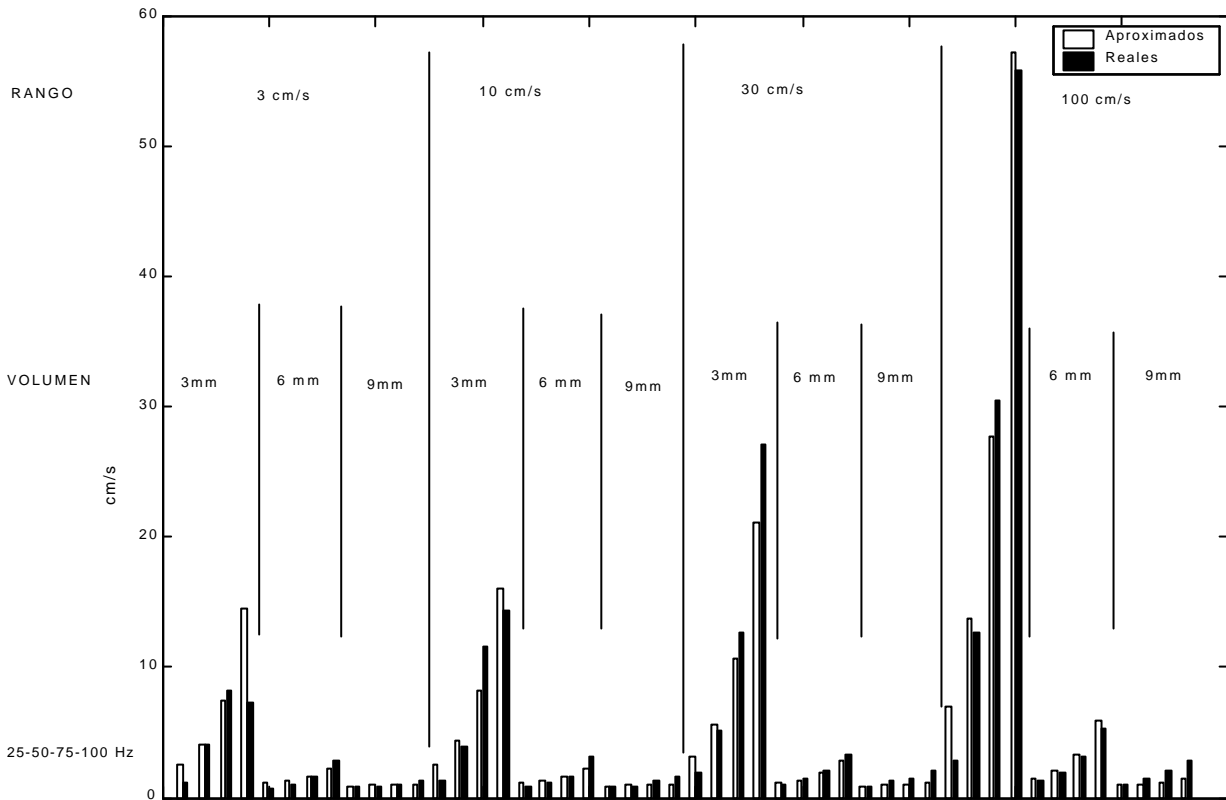
$$Desviacion = 2.32 \times \exp(0.03 \times Frecuencia + 0.013 \times Rango - 0.89 \times Volumen) + 0.45$$

Según este modelo se obtuvo los coeficientes del modelo para las desviaciones de la velocidad en los tres ejes, obteniendo de esta manera la siguiente tabla

CONSTANTES	C	a	b	c	k
X	7.696	-0.810	0.030	0.015	0.911
Y	2.321	-0.896	0.030	0.013	0.454
Z	10.626	-0.833	0.028	0.016	0.665

Tabla 2 coeficientes de ajuste de la función a los tres ejes

Desviaciones en Vx con la aproximación  $s=a \times \exp(-b \times \text{VOL}+c \times \text{FREC}+d \times \text{RANGO})+k$



Gráfica 6 desviaciones de Vx y modelo de estas para las 48 configuraciones

En la gráfica observamos que tal aproxima esta función a los 48 datos sobre la desviación de Vx, están clasificados por rango de velocidades, volumen de control y dentro de este aparecen las cuatro frecuencias de trabajo desde 25 Hz a 100 Hz

Realmente el comportamiento de algunas de estas constantes es muy bueno, el término independiente no debe ser constante ya que de él depende el valor real de la desviación, es decir es el que nos indica el valor del parámetro independientemente de la configuración, este valor debe depender de las condiciones de la turbulencia, ya que se trata de las medias cuadráticas de las velocidades turbulentas.

Podemos comparar el término independiente con el valor real de las desviaciones suponiendo que el resultado más aproximado es el que da la configuración de 3 mm 3 cm/s y 25 Hz.

CONSTANTES	Término independiente	Valor real
X	0.911	0.74
Y	0.454	0.48
Z	0.665	0.53

Tabla 3 término independiente de la aproximación a las desviaciones y valor real de estas

Por otra parte la constante C es la que pondera el efecto de las desviación al multiplicar el término exponencial de la ecuación, es el que tiene un comportamiento más impredecible, quizás tenga un doble comportamiento en función de si el eje pertenece al plano de emisión o si es perpendicular, no olvidemos que el sensor tiene un comportamiento diferente en función del eje de que se trata.

Si admitimos que los ejes X, Z tienen un peor comportamiento por pertenecer al plano del emisor, es lógico que tengan valores de error más altos, pero hay que justificar por

entre ellos tienen valores diferentes, podría tratarse de una relación entre los valores de sus desviaciones, es decir el que tenga un valor más alto tiene menores errores absolutos.

A pesar de que faltan datos para realizar hipótesis más fiables, podemos ver que el valor de la desviación de Z es aproximadamente el mismo que el de la desviación en Y y sin embargo tiene un error cuatro veces mayor, y por otra parte el rango de valores admitidos por Z es cuatro veces mayor debido a la geometría del sensor.

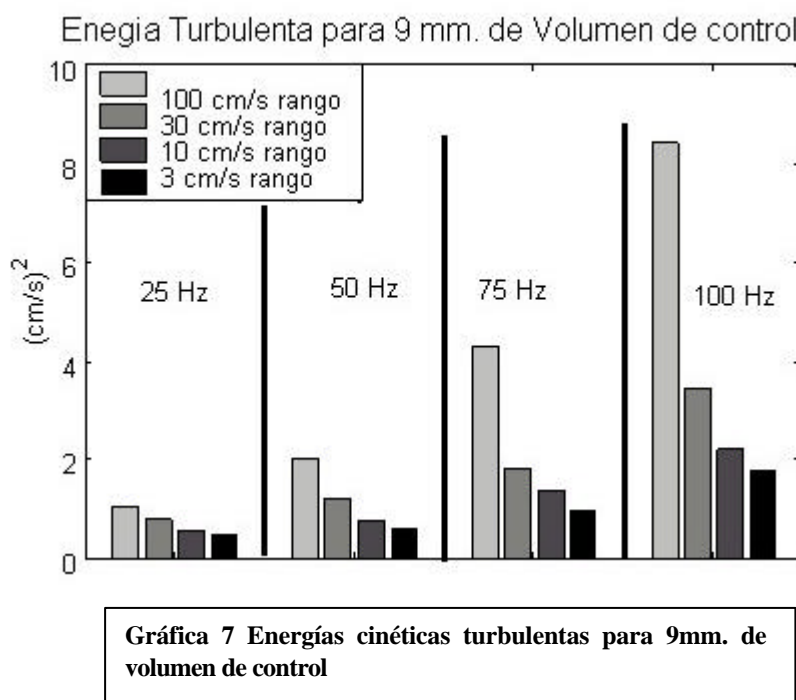
### 7.-Espectros de energía

Es sobradamente conocido que uno de los elementos de mayor importancia en los estudios de turbulencia son los espectros de energía, por ello estudiaremos como afectan las diversas configuraciones al resultado del espectro. El espectro de energía es la función conocida como densidad de potencia espectral *PSD* y se calcula como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. Otro método de obtener este espectro es el de Welch (WELCH[67]), que calcula el espectro de Fourier de la señal original y lo eleva al cuadrado, requiere normalización de los resultados en función de la ventana utilizada. Este es el método utilizado para nuestros cálculos, en las gráficas se aprecia como los diferentes espectros están situados a diferentes alturas, de manera que sus integrales dan valores muy diferentes, por otra parte sabemos que la integral de estos espectros debe ser el valor total de la energía. Todo esto se traduce en que tenemos valores de energía muy diferentes, lo que por otra parte ya sabíamos por que la energía turbulenta se calcula como:

$$Energia = \frac{VarianzaVx + VarianzaVy + VarianzaVz}{2}$$

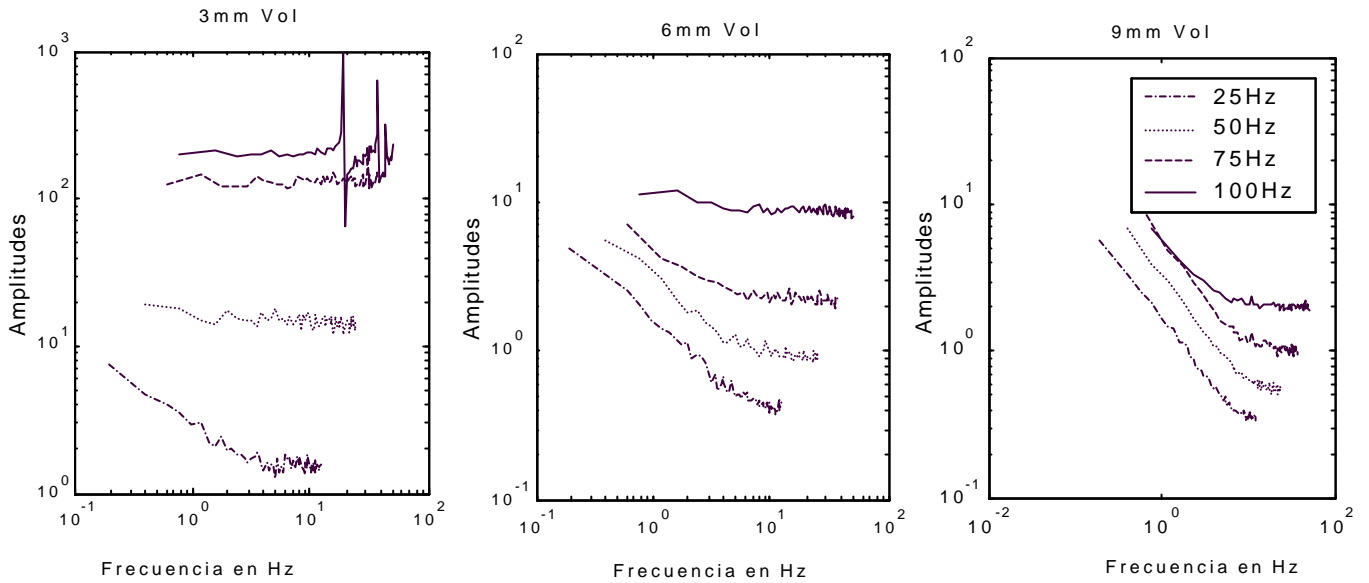
$$Energia = \frac{(DesviacionVx)^2 + (DesviacionVy)^2 + (DesviacionVz)^2}{2}$$

Es decir la energía turbulenta depende directamente las desviaciones, cuya variación ya hemos estudiado. Como muestra damos una gráfica de las diferentes energías para el ajuste de volumen de control de 9 mm. En ella se aprecia claramente el comportamiento

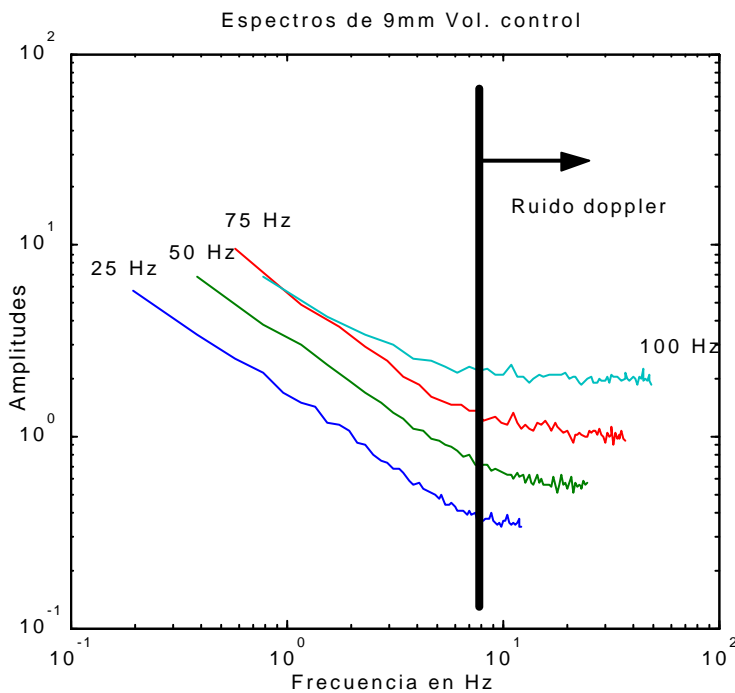


previsto por las desviaciones, de manera que la energía aumenta cuando las desviaciones aumentan debido al error, este incremento de la energía como hemos visto se traducirá en una distorsión del espectro de energía que dará unos resultados inesperados, en la siguiente gráfica veremos los espectros asociados a todos los ensayos realizados con 10 cm/s de rango de velocidades, en ellos se aprecian discrepancias muy graves tanto en las pendientes como en los valores absolutos, quedando muy alejados del valor previsto por Kolmogorov[41].

Sensibilidad 10 cm



Gráfica 8 Espectros de energía para rango 10 cm/s



Gráfica 9 Aparición del ruido doppler

El comportamiento de los espectros es muy irregular, solamente con 9 mm de volumen de control sigue un comportamiento ordenado. En la siguiente gráfica hemos representado frecuencia umbral del ruido doppler, que aparece cerca de los 8 Hz y parece ser independiente de los parámetros de configuración.

### 8.-Conclusiones

A la vista de estos datos se puede deducir que la configuración tiene una gran influencia en los resultados medidos. Si se utiliza una frecuencia por encima de la recomendada de 25 Hz el error aumenta exponencialmente, obteniendo unos resultados en general poco válidos. Es

necesario ceñir el rango de velocidades a los valores esperados, para lo que debería poder adoptarse cualquier valor sin estar atado a los 4 disponibles. El volumen de control pequeño puede resultar útil en algunas aplicaciones pero implica riesgo de errores en las medidas. El instrumento se muestra robusto en las medidas de medias de las velocidades pero especialmente sensible a la configuración en las medidas de parámetros turbulentos. No tiene sentido medir a frecuencias mayores del umbral en el que aparece el ruido doppler.

## **Agradecimientos**

Agradecimientos al *Turbulence and Fluid Dynamics Group* del Departamento de Física Aplicada de la UPC. Este trabajo ha contado con la ayuda del proyecto REN2000-013 de la CICYT

**http::**

[www-hidraulica.upc.es/gits.htm](http://www-hidraulica.upc.es/gits.htm)

## **Bibliografía**

WAHL[00] Tony L. Wahl (2000) "Analyzing ADV Data Using WinADV." 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management

WINADV[00] Tony L. Wahl, Hydraulic Engineer. Water Resources Research Laboratory U.S. Bureau of Reclamation, D-8560 P.O. Box 25007 Denver Colorado 80225-0007 [Http://www.usbr.gov/wrrl/twahl/winadv.html](http://www.usbr.gov/wrrl/twahl/winadv.html)

BRENNAN[00] . Sontek M-files by Matt Brennan, Stanford University, 5/3/00. <http://fluid.stanford.edu/~mbrennan/field/analysis/advanalysis.html>

Lohrmann, A., R. Cabrera, N.C. Kraus (1994), "Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use". Proceedings from Symposium and fundamentals in Hydraulic measurement and Experimentation, ASCE, pp 351-365, 1994.

WELCH[67]. Welch, P.D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. IEEE Trans. Audio Electroacoust. Vol. AU-15 (June 1967). Pgs. 70-73.

Kraus, N.C., A. Lohrmann, and R. Cabrera (1994), "New Acoustic Current Meter for Measuring 3-D Laboratory flows". J. Hydraulic Engineering, vol 120, no. 3, pp 406-412.

Lohrmann, A., B. Hackett and L.P. Roed (1990), "High resolution measurements of turbulence, velocity, and stress using a pulse-to-pulse coherent sonar. J. Atmos. Ocean Tech, Vol 7, pp 19-37

KOLMOGOROV[41]. Kolmogorov, A.N., Equations of turbulent motion of an incompressible fluid, Izv., Akad., Nauk., SSR, Seria Fizichesca Vi., No. 1-2 p. 56. 1968.

Lohrmann A., Cabrera R., et al, "Direct Measurements of Reynolds stress with acoustic doppler velocimeter". published in "Proceedings of the IEEE Fith Working Conference on Current Measurements", February 1995.

Lohrmann A., Gordon L., "NEAR-SHORE DOPPLER CURRENT METER WAVE SPECTRA", ASCE Waves2001 proceedings.