

Filtrado de velocidades y caracterización de parámetros dentro de resaltos hidráulicos libres y sumergidos

(D. Estructuras hidráulicas)

Luis G. Castillo Elsitdié

luis.castillo@upct.es

Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hidr@m

1 Resumen

Las medidas de velocidades instantáneas con instrumentación Doppler (ADV) son muy útiles en ingeniería hidráulica y ayudan a caracterizar el flujo en laboratorio y en el campo (ríos, canales, estructuras hidráulicas, etc.). Un ADV es capaz de medir velocidades medias de flujo con precisiones superiores al 4%. Las medidas de los diferentes índices turbulentos con alta resolución son únicamente posibles con señales coherentes pulso a pulso, sin embargo, dichas señales generalmente se encuentran alteradas en mayor o menor grado por señales parásitas que se denominan ruido blanco.

Por otra parte, los registros también suelen estar afectados por diversas anomalías en la recepción de la señal denominados “spikes” y cuyo origen obedece a algunos factores: flujos con alta intensidad de turbulencia y aireados, ambigüedades por diferencia de fase y que se producen cuando la velocidad real excede el límite superior de rango de medida.

Aunque los spikes en algunos casos pueden ser reducidos o incluso eliminados por el ajuste de los parámetros del equipo de medida, existen situaciones en las cuales no pueden ser totalmente evitados. Un caso particular lo constituye el resalto hidráulico, fenómeno que se caracteriza por un levantamiento brusco de la superficie libre, con fuerte disipación de energía y mezcla, alta intensidad de turbulencia y entrada de aire, generación de ondas y spray. En el artículo se analizan y aplican los siguientes métodos de filtrado:

- Método del Umbral de aceleración y velocidad (Nikora and Goring, 2000) y nueva modificación propuesta.
- Método del corte inicial en función percentiles 99% y 1% y ajuste progresivo de los límites inferior y superior del registro en función estadísticos 5 y 95% (Castillo, 2008) y mejora del método.
- Método del Umbral Espacio-Estado (Goring and Nikora, 2002), modificaciones propuestas por Wahl (2003) y modificaciones propuestas en este artículo.

Finalmente, los métodos citados con las mejoras propuestas se aplican a los registros de velocidades instantáneas medidas dentro de algunas configuraciones de resaltos hidráulicos libres y sumergidos. Los resultados obtenidos son comparados y contrastados con los resultados teóricos y experimentales ya afianzados.

2 Introducción

Las medidas de velocidades instantáneas con instrumentación Doppler (ADV) son muy útiles en ingeniería hidráulica y ayudan a caracterizar el flujo en laboratorio y en el campo (ríos, canales, estructuras hidráulicas, etc.). Un ADV consiste de un emisor rodeado por un número de receptores cada uno de los cuales mide una de las proyecciones del vector velocidad. El emisor genera una onda acústica de frecuencia f_e con velocidad del sonido c y longitud de onda $\lambda_e = c / f_e$ que se propaga a través del fluido, dispersándose cuando alcanza las pequeñas partículas que se mueven con la velocidad del fluido u , y cuyo eco es detectado por el receptor. De esta forma el ADV mide éste movimiento y no directamente la velocidad del fluido y, dado que las partículas siguen el movimiento del fluido con un retardo inercial despreciable, su velocidad se asume idéntica a la velocidad del fluido.

La velocidad u , la longitud de onda λ_r y la frecuencia correspondiente $f_r = c / \lambda_r$ de la onda acústica rebotada difiere de la onda emitida, definiéndose así como frecuencia Doppler, al cambio de frecuencia de la onda acústica inducida por el movimiento de las pequeñas partículas $f_D = f_r - f_e$. La relación entre la frecuencia Doppler y las proyecciones de la velocidad u de la pequeña partícula en la dirección de los ejes del emisor y del receptor, u_e y u_r , resulta ser $f_D = f_e / c(u_e + u_r)$.

Un ADV es capaz de medir velocidades medias de flujo con precisiones superiores al 4%. Las medidas de los diferentes índices turbulentos con alta resolución son únicamente posibles con señales coherentes pulso a pulso, sin embargo, la señal sufre contribuciones de ruidos parásitos que tienen las siguientes características (Blanckaert and Lemmin, 2006):

- El contenido de energía está uniformemente distribuido en el dominio de la frecuencia investigada (ruido blanco).
- Es insesgado: $\overline{\sigma_i} = 0$. Por lo tanto no afecta la estimación de las velocidades medias temporales \bar{u} .
- Es estadísticamente independiente de la frecuencia Doppler verdadera correspondiente: $\overline{\sigma_i f_{D,i}} = 0$, si $i \neq j$.
- El ruido de los diferentes receptores es estadísticamente independiente: $\overline{\sigma_i \sigma_j} = 0$. De esta forma las estimaciones de las tensiones de corte turbulenta están libres de ruido si $\overline{\sigma_i^2} = \overline{\sigma_j^2} = \overline{\sigma^2}$. Sin embargo, las estimaciones de las tensiones normales turbulentas sí están afectadas por el ruido.

Hunther y Lemmin (2001) propusieron un método de corrección directa que permite eliminar la mayoría del ruido blanco en las medidas de turbulencia. Para esto se requiere que el equipo ADV tenga cuatro receptores, disponiendo de esta forma de información redundante en una de las componentes de velocidad.

Por otra parte, los registros de velocidad obtenidos con un equipo ADV suelen estar afectados por diferentes señales parásitas denominados “spikes” y cuyo origen obedece a algunos factores como son: flujos con alta intensidad de turbulencia, flujos aireados cuya propiedad acústica no es adecuada, ambigüedades por diferencia de fase cuando la velocidad excede el límite superior del rango de medida. Aunque los spikes en algunos casos pueden ser reducidos o incluso eliminados por el ajuste de los parámetros del equipo de medida, existen situaciones en las cuales no pueden ser totalmente evitados (Wahl, 2003). Un caso particular constituye el resalto hidráulico.

Un resalto hidráulico se caracteriza por un levantamiento brusco de la superficie libre, con fuerte disipación de energía y mezcla, alta intensidad de turbulencia y entrada de aire, generación de ondas y spray.

De esta forma, en flujos bifásicos (agua-aire) y altamente turbulentos los registros de velocidades obtenidos con un equipo ADV deben ser verificados y de ser necesario, llevar a cabo un filtrado con el propósito de eliminar y/o corregir los datos anómalos, pero conservando las características fundamentales y la continuidad del registro.

El proceso de eliminar spikes involucra dos pasos: (1) detectar el spike y (2) reemplazar el spike. Los dos pasos son independientes pero en los métodos iterativos, el reemplazo del spike puede afectar la detección del mismo en las siguientes iteraciones.

Existen algunos algoritmos de detección de spikes. En este artículo se analizan y aplican los siguientes:

- Método del Umbral de aceleración y velocidad (Nikora and Goring, 2000) y nueva modificación propuesta.
- Método del corte inicial en función percentiles 99% y 1% y ajuste progresivo de los límites inferior y superior del registro en función estadísticos 5 y 95% (Castillo, 2008) y mejora del método.
- Método del Umbral Espacio-Estado (Goring and Nikora, 2002), modificaciones propuestas por Wahl (2003) y modificaciones propuestas en este artículo.

En este trabajo se analizan los algoritmos de filtrado indicados, se proponen mejoras y se aplican a los registros de velocidades instantáneas medidas dentro de algunas configuraciones de resaltos hidráulicos libres y sumergidos. Los resultados obtenidos son comparados y contrastados con los resultados teóricos y experimentales ya afianzados.

3 Métodos

3.1 Método del umbral de aceleración y velocidad (ATM+C)

Para que un registro sea considerado como spike, la aceleración debe exceder un umbral $\lambda_a g$ y la desviación absoluta de la velocidad media tiene que exceder el valor $k\sigma$, donde λ_a es un umbral de aceleración relativa, σ es la desviación estándar y k un factor a ser determinado. Este método constituye un procedimiento de detección y reemplazo en dos fases: la primera para las aceleraciones negativas y la segunda fase para las aceleraciones positivas. En cada fase se realizan los reemplazos necesarios de los datos hasta que todos cumplan los criterios de aceleración $\lambda_a g$ y velocidad $k\sigma$. A continuación se indican los pasos en cada fase:

1. Calcular la aceleración desde $a_i = (u_i - u_{i-1}) / \Delta t$, donde u_i es la velocidad registrada en el tiempo i y Δt el intervalo de muestreo.
2. Identificar los puntos donde $a_i < -\lambda_a g$; $u_i < -k\sigma$ y reemplazarlos.

El paso 2 se repite hasta que no se detecten más spikes. Entonces se inicia la segunda fase:

1. Calcular la aceleración como en la primera fase
2. Identificar aquellos datos donde $a_i > \lambda_a g$; $u_i > k\sigma$ y reemplazarlos.

El paso se repite hasta que no se detecten más spikes.

Nikora y Goring (2000) indican que una buena elección de los parámetros son los siguientes: $\lambda_a = 1 - 1.5$ y $k = 1.5$. Sin embargo, se ha observado que en el caso de resaltos hidráulicos el valor de λ_a se debe calcular en función de la posición d_j del punto de medida dentro del resalto hidráulico y de su correspondiente número de Froude, Fr_j . Entonces la aceleración a_j en función del número de Froude es:

$$a_j = \frac{u_j}{\Delta t} = \frac{Fr_j \sqrt{g y_j}}{\Delta t} = \lambda_{aj} g \quad (1)$$

Donde $\lambda_{aj} = Fr_j \sqrt{y_j} / (\Delta t \sqrt{g}) \geq 0.5$. El intervalo de muestreo es Δt . El valor y_j es y_{aj} cuando la dirección del flujo es hacia aguas abajo y, toma el valor y_{uj} , cuando la dirección es hacia aguas arriba (ver figura 1). De esta manera, el parámetro λ_{aj} se establece en función de las características específicas del flujo en cada punto y sección de medida.

En cuanto al umbral k , su determinación se basa en la teoría de la distribución de probabilidad normal, que expresa que para n variables aleatorias independientes con una distribución normal ξ_i , la desviación máxima absoluta esperada es:

$$E(|\xi_i|_{\max}) = \sqrt{2 \ln n} = \lambda_U \quad (2)$$

Donde λ_U se denomina el umbral Universal. Para una variable aleatoria normal de media nula y con desviación estándar estimada σ , el máximo valor absoluto esperado es:

$$\lambda_U \sigma = \sqrt{2 \ln n} \sigma \quad (3)$$

Sin embargo, este umbral puede resultar inadecuado cuando la distribución de velocidades no es normal, como sucede con las distribuciones de velocidad dentro de resaltos hidráulicos.

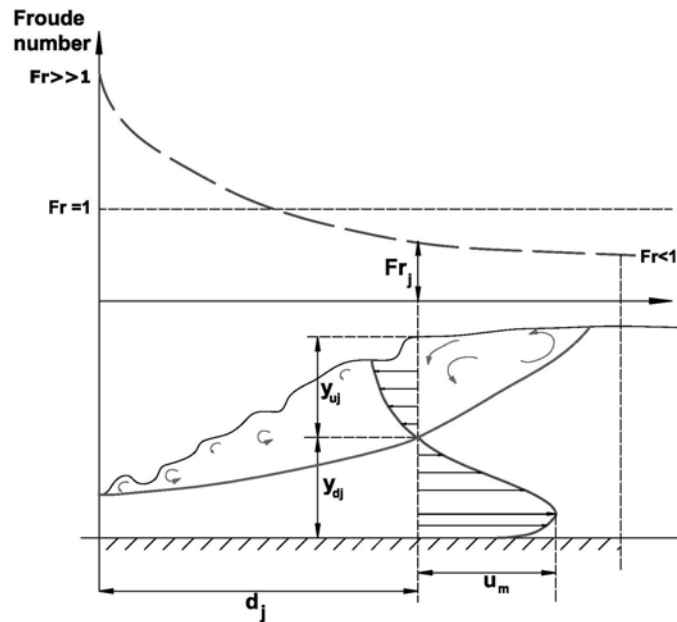


Figura 1 Variación del número de Froude y definición de los principales parámetros en un resalto hidráulico

3.2 Método del corte inicial en función percentiles 99% y 1% y ajuste progresivo de los límites inferior y superior en función de estadísticos 5% y 95% (PCLU)

El método surge de la última conclusión de arriba. Así, dado que la distribución de velocidades en un resalto hidráulico no se ajusta a una distribución normal, entonces es mejor estimar un umbral que tienda al límite superior de la señal registrada. El corte inicial en función de los percentiles 99% y 1% se realiza con el objeto de eliminar aquellos valores que aparecen en el registro de forma muy esporádica y cuyas amplitudes se desvían de forma exagerada con respecto al valor medio de la serie. La presencia de éstos spikes “solitarios” suelen invalidar cualquier otro procedimiento de filtrado.

El ajuste progresivo se basa en el corte de los límites superior e inferior, en función de los estadísticos 5% y 95% (Castillo, 2008). A continuación se describe el procedimiento.

Desde la media calculada \bar{u} y junto con el valor máximo registrado de la serie de datos u_{\max} , se determina una primera amplitud relativa $A_1 = u_{\max} - \bar{u}$. Seguidamente se calcula el valor $u_{\min} = \bar{u} - A_1$ y la amplitud general $A = u_{\max} - u_{\min}$. Finalmente se obtienen los valores de corte superior, $X_{\max.c} = u_{\max} - (0.05A)$ e inferior, $X_{\min.c} = u_{\min} + (0.05A)$. Este proceso se puede repetir si así lo requiere la serie de datos. Se recomienda no hacer más de dos filtrados para no alterar sensiblemente la serie original.

En el método original, el spike es reemplazado por el valor del corte superior o inferior correspondiente. Sin embargo, como procedimientos alternativos, el spike podría reemplazarse por la media o la mediana de la serie de datos, por la media de seis o doce puntos que engloben al spike. Goring y Nikora (2002) recomiendan como método de reemplazo la interpolación desde un polinomio de tercer grado que ajuste doce puntos próximos al spike.

3.3 Método del umbral espacio-estado (PSTM+W)

Se basa en el concepto del mapa de representación tridimensional de Poincaré o representación Espacio-Estado, en el cual la variable y sus derivadas primera y segunda son graficadas unas en función de las otras. Se definen

como spikes aquellos puntos que se sitúan fuera de la elipse correspondiente y cuyos ejes se determinan con el criterio Universal. El método se itera hasta que no se encuentran más spikes, es decir cuando el número de datos buenos (puntos dentro de la elipse) llega a ser constante (Goring y Nikora, 2002). Cada iteración consta de los siguientes pasos:

1. Se calcula la primera y segunda derivadas con el algoritmo de diferencia central:

$$\Delta u_i = (u_{i+1} - u_{i-1}) / 2 \quad (4)$$

$$\Delta^2 u_i = (\Delta u_{i+1} - \Delta u_{i-1}) / 2 \quad (5)$$

Notar que las expresiones no están divididas por el intervalo de muestreo Δt , con el objeto de que el sistema de ecuaciones (7) y (8) no lleguen a estar mal condicionadas.

2. Calcular las desviaciones estándar de las tres variables, σ_u , $\sigma_{\Delta u}$ y $\sigma_{\Delta^2 u}$ y de aquí, los valores máximos esperados, a partir del criterio Universal.
3. Calcular el ángulo de rotación del eje mayor del plano $\Delta^2 u_i = f(u_i)$, con la siguiente expresión de cross-correlación: $\theta = \tan^{-1}(\sum u_i \Delta^2 u_i / \sum u_i^2)$.

Sin embargo, en este artículo proponemos calcular dicho ángulo a partir de la siguiente expresión, obtenida por un ajuste de Gauss:

$$\theta = \tan^{-1}[(n \sum u_i \Delta^2 u_i - \sum u_i \sum \Delta^2 u_i) / (n \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2)] \quad (6)$$

Siendo n el número de datos.

4. Para cada par de variables calcular los ejes de la elipse. Así:

Plano $\Delta u_i = f(u_i)$. Eje mayor: $\lambda_U \sigma_u$. Eje menor: $\lambda_U \sigma_{\Delta u}$

Plano $\Delta^2 u_i = f(\Delta u_i)$. Eje mayor: $\lambda_U \sigma_{\Delta u}$. Eje menor: $\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u}$

Plano $\Delta^2 u_i = f(u_i)$. Los ejes mayor y menor a y b , respectivamente, se obtienen de la solución del siguiente sistema de ecuaciones: $(\lambda_U \sigma_U)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta$; $(\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta$.

En este artículo proponemos aplicar el siguiente sistema de ecuaciones, cuyas soluciones cumplen, en cualquier situación, la identidad trigonométrica prescrita:

$$(\lambda_U \sigma_U)^2 = a^2 \cos^2(\theta/2) + b^2 (\lambda_U \sigma_u / \lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 \sin^2(\theta/2) \quad (7)$$

$$(\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 (\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u} / \lambda_U \sigma_u)^2 \sin^2(\theta/2) + b^2 \cos^2(\theta/2) \quad (8)$$

5. En cada proyección de los planos espacio-estado, identificar los puntos que se sitúan fuera de la elipse correspondiente y reemplazarlos.

En cada iteración el reemplazo de los spikes reduce la desviación estándar y por tanto, el tamaño de la elipse.

Este algoritmo utiliza los estimadores clásicos, media y desviación estándar, para la localización y el escalamiento, respectivamente. Sin embargo, un dato erróneo de extraordinaria magnitud puede corromper los estimadores y afectar de forma significativa el funcionamiento del algoritmo.

Wahl (2003) propuso la mediana de la muestra como un estimador de localización y, la mediana de las desviaciones absolutas (MAD) de dicha mediana, como estimador de escala,

$$S = 1.483 \left(\left(\text{median}_{j=1, \dots, n} |x_j - \text{median}_{i=1, \dots, n}(x_i)| \right) \right) = 1.483 \text{ (MAD)} \quad (9)$$

Wahl incorporó éste algoritmo al programa WinADV (Wahl, 2000) junto con el criterio estadístico de Chauvenet. A continuación se indican las principales características:

- La mediana y el MAD son utilizados como estimadores de localización y escala.

- Se utiliza el criterio de Chauvenet en una sola iteración para definir la probabilidad de rechazo y el umbral de exclusión. Los spikes eliminados no se reemplazan, con lo cual la serie se reduce.
- El proceso de filtrado o despiking se lleva a cabo sobre cada una de las componentes de velocidad y así, todos los datos asociados se eliminan cuando se detecta un spike en cualquiera de las series temporales.

4 Aplicaciones y conclusiones

La figura 2 muestra dos registros de velocidades horizontales, obtenidos dentro de un resalto hidráulico en idénticas condiciones de flujo y posición. Los registros se obtuvieron con una frecuencia de muestro de 5 Hz y, la única diferencia consistió en que el rango de velocidad establecido en el registro izquierdo fue de ± 100 cm/s, así que la máxima velocidad horizontal teórica a registrar fue de ± 300 cm/s. Para el registro de la derecha, el rango de velocidad es de ± 250 cm/s (máxima velocidad horizontal teórica de ± 360 cm/s).

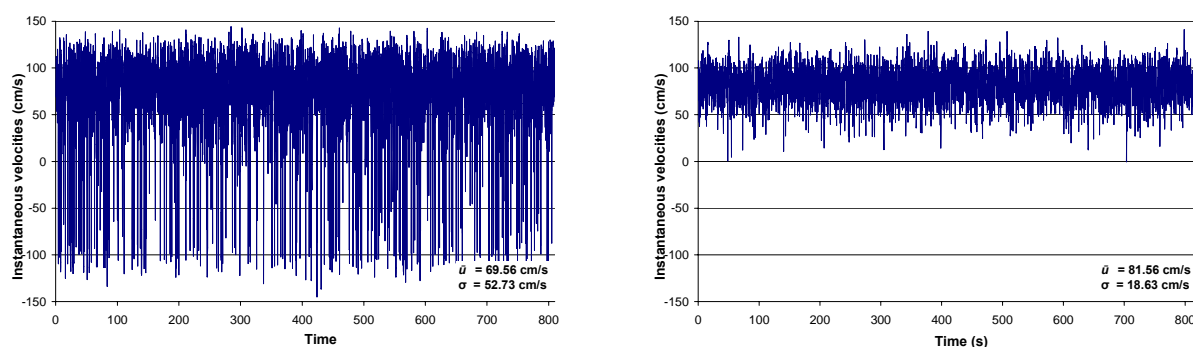


Figura 2 Tipos de registro de velocidad. Izquierda: registro patológico. Derecha: registro casi limpio

El registro izquierdo está muy contaminado y, aunque la máxima velocidad registrada es menor que la mitad del umbral máximo teórico, sin embargo, en las condiciones extremas de flujo dentro de un resalto hidráulico, se producen numerosos spikes por efecto de ambigüedad en diferencia de fase. Así, podemos concluir que el umbral de velocidad máxima real resulta ser mucho más bajo. Este registro es un caso patológico y sería rechazado; sin embargo, nos permite probar los diferentes algoritmos. La figura derecha constituye un registro casi limpio y equivale al registro de la izquierda pero sin los spikes por ambigüedades de diferencia de fase. Los spikes que contiene el registro derecho se deben exclusivamente al flujo altamente turbulento y aireado.

En la figura 3 se puede apreciar visualmente la bondad del filtrado conseguido con los métodos combinados (ATM+C y PCLU), tanto para el registro izquierdo (patológico), como para el registro casi limpio de la derecha.

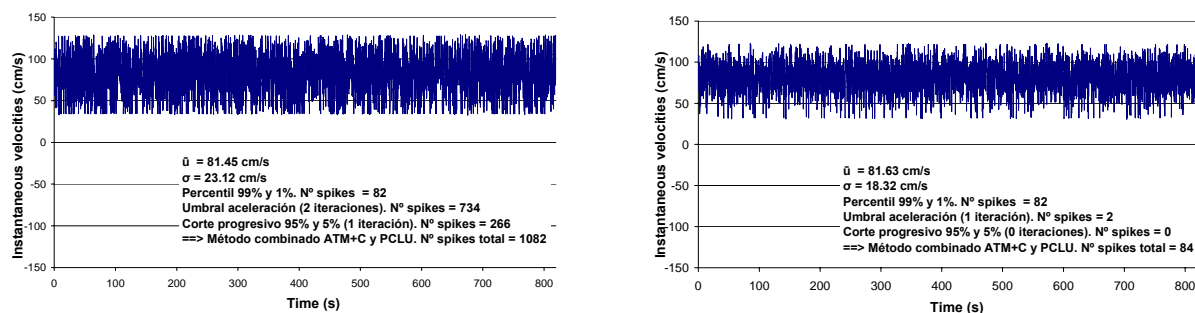


Figura 3 Registros de velocidad filtrados. Izquierda: registro patológico. Derecha: registro casi limpio

En la figura 4 se presentan los planos espacio-estado de las diferentes variables y sus elipses correspondientes, resultado de aplicar al registro contaminado el método de filtrado (PSTM+W). Todos los puntos que se sitúan fuera de las elipses se consideran spikes y por tanto, son eliminados.

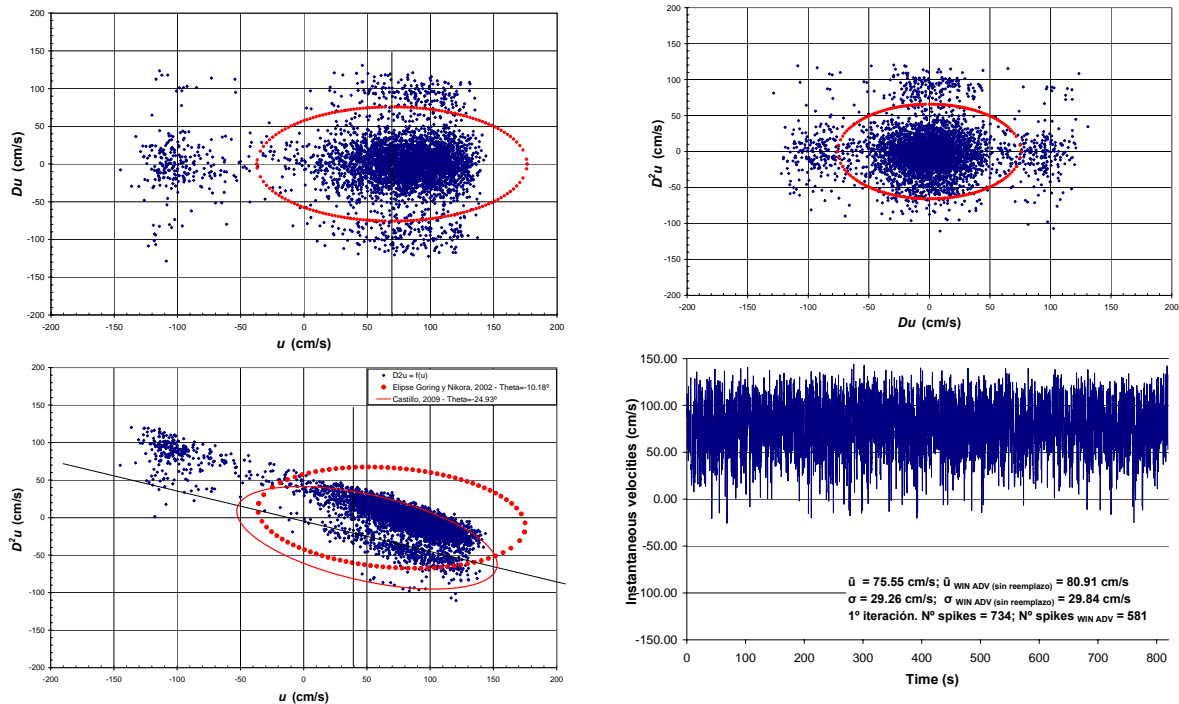


Figura 4 Espacio-estado de diferentes variables. Aplicación al registro contaminado del método de filtrado (PSTM+W)

También en la figura 4c (figura inferior izquierda) se puede ver la diferencia que se obtiene en tamaño y en ángulo de giro de la elipse en el plano $\Delta^2 u_i = f(\Delta u_i)$, debido a la diferencia en los algoritmos de cálculo propuestos por Goring y Nikora (2002) y en este artículo (Castillo, 2009).

En la figura 4d (figura inferior derecha) se presenta el registro patológico filtrado con el método PSTM+W. El programa Win ADV ejecuta una sola iteración y no reemplaza los spikes eliminados; así se han eliminado únicamente 581 spikes y la media y desviación estándar se calcula con la serie recortada. También se indica en la figura el número de spikes (734), la media y la desviación estándar con el método PSTM+W corregido en este artículo y en el que se reemplazan los spikes con la media de los doce puntos que engloban al Spike. En todo caso, se puede observar que el registro todavía contiene muchos spikes. Si se compara este resultado con el registro filtrado con el método combinado (ATM+C y PLCU), (ver figura 3a), observamos que este método combinado ha detectado y eliminado 1082 spikes, obteniéndose de esta forma un registro limpio de spikes.

En el cuadro 1 se resume y compara los principales resultados obtenidos con los diferentes métodos de filtrado.

En el caso del registro casi limpio, los métodos (ATM+C) y (ATM+C y PLCU) dan resultados muy similares y muy poco por encima del valor medio de la muestra de la serie original (difieren en menos del 0.13%). Si embargo, el valor medio de la serie después de filtrar con los métodos (PSTM+W) y (ATM+C y PSTM+W) resultan ser bastante inferiores de la serie original; así un 4.22% y un 4.35%, respectivamente.

En cuanto a la desviación estándar, con el método (ATM+C y PLCU) existe reducción con respecto al valor de la serie original de un 1.66%. Sin embargo, recordemos que estos métodos no corrigen las tensiones normales turbulentas y no somos por tanto capaces de discriminar las tensiones reales del ruido blanco.

En el caso del registro patológico, el método combinado (ATM+C y PLCU) proporciona el valor medio más próximo, tanto con respecto a la serie original del registro limpio (diferencia inferior al 0.14%), como con el registro limpio filtrado (diferencia inferior al 0.5%).

El método (PSTM+W) es el que proporciona el valor medio más alejado, tanto con respecto a la serie original del registro casi limpio (un 11.4%), como con respecto a la serie casi limpia filtrada (un 7.5%).

La desviación estándar de la serie del registro patológico se reduce ostensiblemente con todos los métodos de filtrado, especialmente con el método combinado (ATM+C y PSTM+W), cuya reducción resulta ser de un 59.7%. Dicha desviación estándar resulta ser superior en un 14.1% con respecto a la desviación estándar del registro casi limpio no filtrado y, de un 20.5% con respecto al valor del registro casi limpio filtrado. Al no disponer de un registro de datos de velocidad redundante (equipo ADV utilizado fue únicamente de tres receptores), no estamos en capacidad de saber en qué proporción el ruido blanco forma parte del valor obtenido de la desviación estándar.

De los resultados obtenidos podemos concluir que para el caso de velocidades registradas dentro de un resalto hidráulico, la combinación de los métodos (ATM+C y PCLU) constituyen el procedimiento más adecuado y robusto de identificación y reemplazo de spikes.

Tabla 1 Comparación de los resultados obtenidos por la aplicación de diferentes métodos de filtrado

	<u>Registro patológico</u>	<u>Registro casi limpio</u>
Longitud de la serie de datos:	4504	4504
Intervalo temporal entre puntos de datos (s):	0.20	0.20
Media de la muestra (cm/s):	69.56	81.56
Desviación estándar (cm/s):	52.73	18.63
Método ATM+C	Dos iteraciones	Una iteración
Número de spikes:	816	84
Media de la muestra después del filtrado (cm/s):	80.89	81.63
Desviación estándar después del filtrado (cm/s):	26.17	18.32
Programa WinADV: Método PSTM+W	Una iteración. Filtrado sin reemplazo de spikes. Media y desviación estándar de serie recortada	
Número de spikes:	581	41
Media de la muestra después del filtrado (cm/s):	80.91	81.81
Desviación estándar después del filtrado (cm/s):	29.84	18.28
Método PSTM+W	Dos iteraciones	Una iteración
Número de spikes:	1457	679
Media de la muestra después del filtrado (cm/s):	72.25	78.12
Desviación estándar después del filtrado (cm/s):	24.91	17.66
Métodos ATM+C y PSTM+W	ATM+C: 2 iteraciones PSTM+W: 1 iteración	ATM+C: 1 iteración PSTM+W: 1 iteración
Número de spikes:	1637	795
Media de la muestra después del filtrado (cm/s):	77.20	78.01
Desviación estándar después del filtrado (cm/s):	21.25	17.64
Métodos ATM+C y PCLU	ATM+C: 2 iteraciones PCLU: 1 iteración	ATM+C: 1 iteración PCLU: 0 iteraciones
Número de spikes:	1082	84
Media de la muestra después del filtrado (cm/s):	81.45	81.63
Desviación estándar después del filtrado (cm/s):	23.12	18.32

De la aplicación sistemática de la combinación de los métodos (ATM+C y PCLU) a los registros de velocidades obtenidos en diferentes secciones dentro de resaltos hidráulicos libres y sumergidos (ver figura 5a) y, desde el análisis de la distribución experimental de velocidades, se ha obtenido una ley universal de distribución de velocidades, válida en el rango $[0.2 \leq x/L_j \leq 0.7]$, (ver figura 5b).

La longitud escalar Y , es el calado donde la velocidad es igual a la mitad de la velocidad máxima registrada, $\bar{u} = u_m / 2$; $y_{m\acute{a}x}$ es el calado donde $\bar{u} = u_m$.

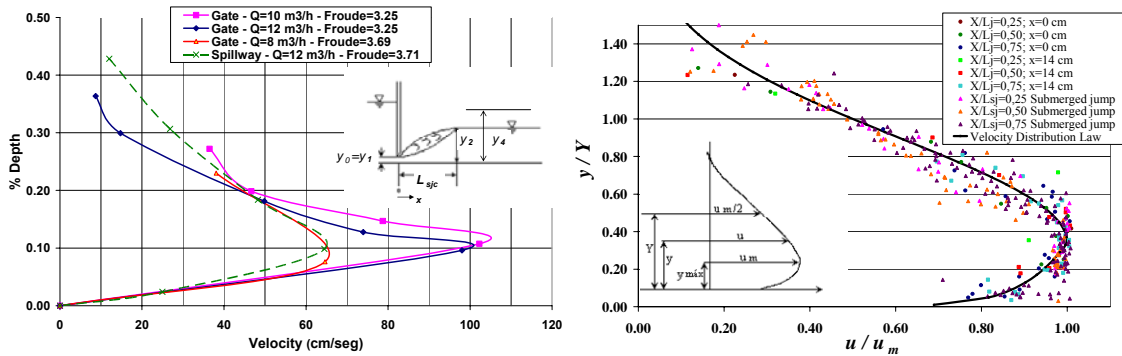


Figura 5 (a) Velocidades registradas en un resalto hidráulico. (b) Ley de distribución de velocidades en resaltos hidráulicos libres y sumergidos. Rangos de validez: $2.5 \leq F_{r1} \leq 5$; $0.25 \leq x/L_{sjc} \leq 0.75$ y $4 \leq y_4/y_0 \leq 10$

El mejor ajuste de la ley de distribución de velocidades dentro de resaltos hidráulicos libres y sumergidos es

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}; \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (10)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1.177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right]; \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1.5 \quad (11)$$

Donde $k = y_{m\acute{a}x} / Y$.

La Tabla 2 recoge los coeficientes k , exponentes n y los correspondientes rangos de validez de diferentes leyes de distribución de velocidades, propuestos por diferentes autores para resaltos hidráulicos libres y sumergidos. Es interesante notar que la diferencia en las características de los flujos no desarrollados y desarrollados se difumina completamente dentro del resalto hidráulico. Este último fenómeno se produce porque la turbulencia difunde todas las características del flujo como el momentum, energía o la misma turbulencia (Rouse et al., 1959). Los resultados que se presentan en este artículo constituyen leyes complementarias las leyes propuestas por Ohtsu et al. (1990).

Tabla 2 Coeficientes k y exponentes n . Leyes de distribución de velocidades en resaltos hidráulicos

Ley de distribución de velocidades	Rango de aplicación	k	n
Resaltos hidráulicos libres y sumergidos	$2.5 \leq F_{r1} \leq 5$		
Flujo no desarrollado	$0.25 \leq x/L_{jc} \leq 0.75$	0.342	9.5
Castillo (2008)	$4 \leq y_4/y_0 \leq 10$		
Resalto hidráulico libre. Flujo no desarrollado	$5 \leq F_{r1} \leq 7.3$	0.333	12
Ohtsu et al. (1990)	$0.2 \leq x/L_{jc} \leq 0.7$		
Resalto hidráulico libre. Flujo desarrollado	$5.3 \leq F_{r1} \leq 7.3$	0.351	7
Ohtsu et al. (1990)	$0.2 \leq x/L_{jc} \leq 0.7$		

Finalmente, en la figura 6 se muestra la relación de los diferentes calados en resaltos hidráulicos sumergidos, parametrizados en función del número de Froude correspondiente a la sección de desagüe de una compuerta plana, $F_0 = \bar{u}_0 / \sqrt{2gy_0}$. Podemos observar que los datos experimentales colapsan en una única ley experimental y cuyo coeficiente de regresión es $R^2=0,984$.

$$(y_4 / y_3) / F_0 = [1.173(y_3 / y_0)^{-0.766}] \quad (12)$$

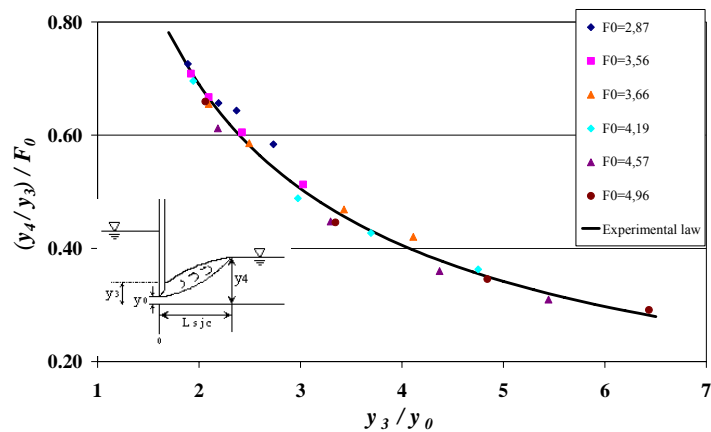


Figura 6 Ley experimental para la relación de calados en resaltos hidráulicos sumergidos

5 Referencias bibliográficas

- Blanckaert, K. and Lemmin, U. (2006).** *Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements.* Journal of Hydraulic Research Vol. 44, No. 1, pp. 3-17.
- Castillo, L. (2008).** *Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows.* The Eight Int. Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE 2008). Nagoya, Japan, Sep 8-12.
- Goring, G. and Nikora, V.(2002).** *Despiking acoustic Doppler velocimeter data.* Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, N° 1, January 1. pp. 117-126.
- Hurther, D. and Lemmin, U. (2001).** *A correction method for turbulence measurements with a 3-D acoustic Doppler velocity profiler.* J. Atmos. Ocean. Technol. 18, 446-458.
- Márquez, C. (2006).** *Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler.* Proyecto Fin de Carrera. EU Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT, Spain.
- Nikora, V.I. and Goring, D.G. (2000).** *Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds.* Journal of Hydraulic Engineering, 126(9), pp. 679-690.
- Ohtsu, F., Yasuda, Y. and Awazu, S. (1990).** *Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels.* Research Inst. of Science and Technology, Nihon University, No 35.
- Rouse, H., Siao, T.T. and Nagaratnam, S. (1959).** *Turbulence characteristics of the hydraulic jump.* Trans. ASCE 124: pp. 926-966.
- Wahl, T. L. (2000).** *Analyzing ADV data using WinADV.* Proc., 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, ASCE, July 30-August 2, Minneapolis, www.usbr.gov/wrrl/twahl/winadv.
- Wahl, T. L. (2003).** *Discussion of "Despiking acoustic Doppler velocimeter data by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora.* January 2002, Vol. 128, No 1, pp. 117-126. Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, June 1. pp. 484-488.