

DETECCIÓN DE VÓRTICES EN UN CANAL ABIERTO EMPLEANDO PIV

Pedro Guido-Aldana y Adriana Ramírez-Camperos

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Investigadora Independiente, México.
E-mail: pedroguido@tlaloc.imta.mx, ramirezamar@hotmail.com

Introducción

Se propone una metodología para la detección y determinación de las frecuencias de paso de vórtices detrás de una forma de fondo fija instalada en el fondo de un canal abierto por el que circula agua sembrada con trazadores de flujo, sin presencia de partículas sólidas. Los campos vectoriales de velocidad 2D se obtienen mediante la técnica óptica llamada velocimetría de imagen de partículas (PIV). La detección de los vórtices se realiza seleccionando una línea vertical a cierta distancia de la cresta de la forma de fondo por donde pasan los vórtices y aplicando tres criterios: considerando la curvatura del perfil de velocidad, la teoría de puntos críticos y el criterio de Jeong y Hussain (1995), los cuales se integraron en un algoritmo para automatizar el proceso. Aunque el tercer criterio es el más confiable para la detección de vórtices, también es el más complicado y el que consume más tiempo. Se demostró que el primer criterio funciona como un filtro para eliminar campos vectoriales donde la probabilidad de existencia de un vórtice es menor, reduciendo el tiempo de procesamiento de la computadora. Los resultados indican que las frecuencias de paso de vórtices aumentan con el número de Reynolds en una tendencia lineal.

Detección de vórtices

Aunque el término vórtice se usa ampliamente en la dinámica de fluidos, su definición sigue siendo controversial. Haller (2005) menciona que los vórtices a menudo se consideran regiones de alta vorticidad, pero no existe un umbral universal para definirla. Se sabe que la vorticidad también puede ser alta en flujos cortantes paralelos donde no hay vórtices. Otras definiciones son demasiado vagas y no se prestan fácilmente a la implementación en un algoritmo de detección, aunque son consistentes con las observaciones visuales. Por ejemplo, la definición de Lugt (1983), quien propuso que un vórtice es el movimiento giratorio de una multitud de partículas materiales alrededor de un centro común. El reto es traducir estas descripciones intuitivas de vórtice en una definición formal.

Algunos métodos que son representativos del estado del arte de la detección de vórtices fueron presentados por Levi et al. (1990), Jeong y Hussain (1995), Geers et al. (2005). En el presente trabajo, la detección de vórtices en campos de velocidad obtenidos con PIV se estableció para un flujo particular en un canal abierto. Se aplicaron tres criterios con diferentes niveles de complejidad y confiabilidad.

Arreglo experimental y técnica

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal abierto de 1.5 m de largo, 0.10 m de ancho y 0.15 m de profundidad (Fig. 1). Se llevaron a cabo tres experimentos con números de Reynolds (Re_D) de 672, 1333 y 2032, donde Re_D se definió de manera similar a Armaly et al. (1983), en donde D es el diámetro hidráulico del canal, igual a dos veces la diferencia entre el tirante de agua y la altura de la forma de fondo en [m]; ν es la viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente en [m²/s], ecuación 1.

$$Re_D = \frac{2VD}{\nu} \quad [1]$$

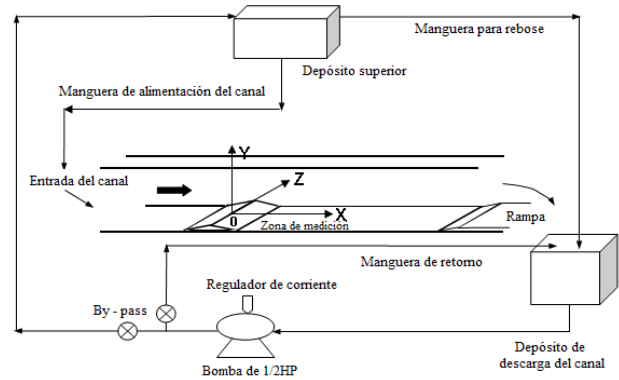


Figura 1.- Dispositivo experimental. Guido (2007).

Se utilizó un sistema DANTEC PIV-2D (Fig. 2) compuesto de una cámara digital de alta resolución, un sincronizador, un láser pulsante de doble cavidad y una computadora para obtener los campos vectoriales 2D de velocidad en la sección de prueba.

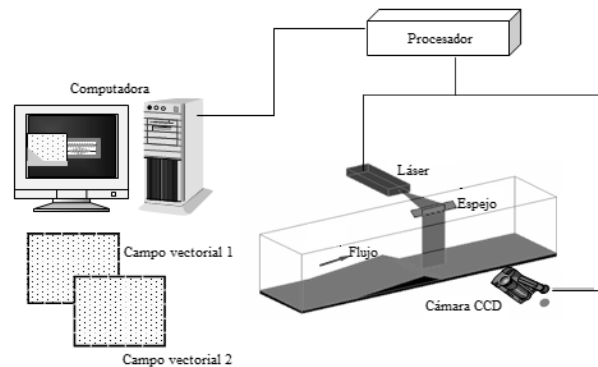


Figura 2.- Sistema de adquisición de datos PIV. Guido (2007).

Metodología

Se aplicaron tres criterios con diferentes niveles de complejidad y confianza. El primero y más simple se basó en la curvatura del perfil vertical de magnitudes de velocidades, estableciendo una similitud con una parábola (ver Fig. 3).

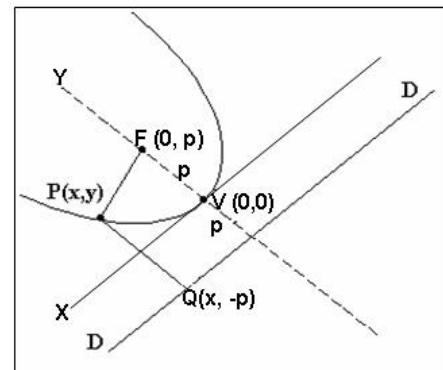


Figura 3.- Gráfico de la parábola con el vértice V(0,0). Guido (2007).

El segundo se relaciona con la teoría de puntos críticos, la cual surge del trabajo de Poincaré sobre puntos singulares en ecuaciones diferenciales Poincaré (1882), (Fig. 4).

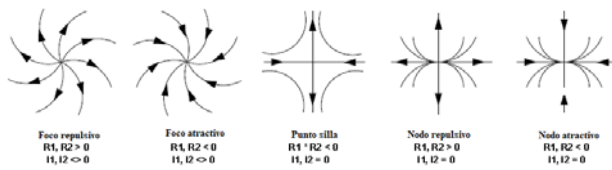


Figura 4.- Criterio de clasificación para los puntos críticos. R_1 y R_2 denotan la parte real de los valores propios del Jacobiano; I_1 e I_2 denotan la parte imaginaria. (Helman y Hesselink, 1989).

El tercero es el criterio propuesto por Jeong y Hussain (1995) que considera un vórtice como una región en la que el tensor $S^2 + \Omega^2$ presenta dos valores propios negativos. La forma matricial de S y Ω se presenta en las ecuaciones 1 y 2:

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} \quad [2]$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 0 \end{pmatrix} \quad [3]$$

Resultados

Para cada Re_D se realizaron experimentos sembrando el flujo con trazadores que permitieron obtener 3,650 matrices de vectores de velocidad. Cerca del 60% de los campos vectoriales de velocidad 2D fueron eliminados con el criterio asociado con el perfil de magnitudes de velocidades o similitud con la parábola. Las regiones de vórtice se confirmaron en el siguiente paso utilizando el criterio de puntos críticos. Finalmente, con el criterio de Jeong y Hussain, se confirmó que el 40% era un vórtice real, con centros cercanos a la línea vertical. Un ejemplo del análisis se muestra en la Fig. 5. Los cuadros negros indican la extensión de la región interior del vórtice y el tipo de vórtice (foco repelente); el círculo blanco representa el centro del vórtice obtenido con el criterio de Jeong y Hussain (1995); también se aprecia el contorno del vórtice (línea continua negra).

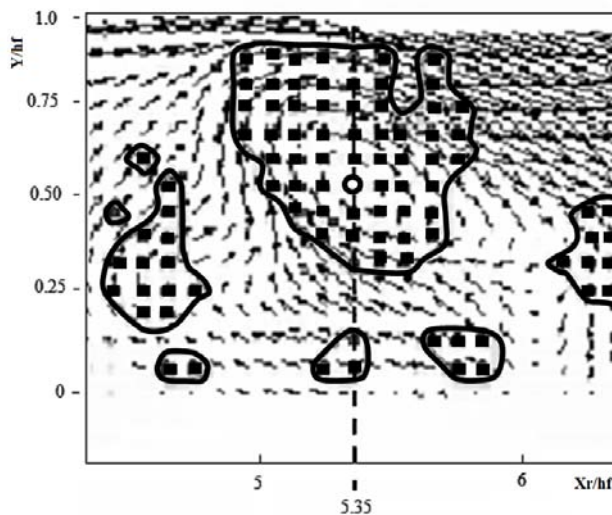


Figura 5.- Detección de un vórtice. Guido (2007).

Conclusiones

Se desarrolló y comprobó experimentalmente una nueva metodología que proporciona una evaluación precisa de la frecuencia de paso de vórtices a partir de los campos vectoriales de velocidad 2D obtenidos con PIV en un flujo generado detrás de una forma de fondo fija sin presencia de partículas sólidas. La combinación de tres criterios: perfiles de magnitud de velocidad (similitud con la parábola), teoría de los puntos críticos y la teoría de Jeong y Hussain (1995), se implementaron en un algoritmo que reduce considerablemente los tiempos de procesamiento de la computadora.

Después de la aplicación del criterio de los perfiles de magnitud de velocidad, se eliminó aproximadamente el 60% de los campos de vectores de velocidad. Este criterio fue el más simple y el que consumió menos tiempo, pero no pudo diferenciar un punto silla y un centro de vórtice.

Los vórtices cuyos centros se localizaban sobre una línea vertical seleccionada se encontraron con el criterio de Jeong y Hussain en aproximadamente 40% de los campos vectoriales de velocidad 2D considerados como vórtices reales. Aunque este último criterio fue el más confiable, también fue el más complicado de implementar y el que consumió más tiempo.

La aplicación del criterio de los perfiles de magnitud de velocidad puede ayudar a ahorrar tiempo de cálculo en casos de series largas de campos de vectores.

En un análisis de frecuencia se requiere particular atención al proceso cuando se alcanza la frecuencia límite del sistema de adquisición de datos. En esta investigación, la frecuencia límite fue de 7.5 Hz; cuando la frecuencia del vórtice es de 5 Hz, algunos eventos no son detectados. Sin embargo, dado que el PIV de mayor frecuencia ya existe, esta limitante puede ser superada.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular al Instituto de Energías Renovables IER-UNAM (Departamento de Termociencias). Igualmente al Ing. Guillermo Hernández Cruz en el IER-UNAM por el soporte técnico durante el desarrollo de la investigación.

Referencias

- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., Schoenung, B. (1983). "Experimental and theoretical investigation of a backward-facing step flow". *Journal of Fluid Mechanics*, 127, pp. 473-496.
- Geers, L.F.G., Tummers, M.J., Hanjalic, K. (2005). "Particle image velocimetry-based identification of coherent structures in normally impinging multiple jets". *Physics of Fluids* (17)5, p. 055105.
- Guido, P. (2007). *Estudio experimental del transporte de partículas sólidas en flujo turbulento*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Helman, J.L., Hesselink, L. (1989). "Representation and Display of Vector Field Topology in Fluid Flow Data Sets". *IEEE Computer*, 22(8), pp. 27-36.
- Jeong, J., Hussain, F. (1995). "On the identification of a vortex". *Journal of Fluid Mechanics* (285), pp. 69-94.
- Levi, E. (1990). "Los vórtices en la hidráulica". *Ingeniería Hidráulica en México*. Edición Septiembre - Diciembre, pp. 20-30.
- Poincaré, H. (1882). "Les points singuliers des équations différentielles". *C. R. Acad. Sci. Paris* (94), 416-18; *Ceuvres Completes* (1), pp. 3-5.
- Lugt, H.J. (1983). *Vortex Flow in Nature and Technology*, 1st. ed. Wiley-Interscience, New York.
- Haller, G. (2005). "An objective definition of a vortex". *Journal of Fluid Mechanics* (525), pp. 1-26.