

PERFILES DE VELOCIDAD EN SISTEMA DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE CON UN VÓRTICE ROTACIONAL HIDRÁULICO

VELOCITY PROFILES IN A FREE-SURFACE FLOW SYSTEM WITH A HYDRAULIC ROTATIONAL VORTEX

Juan Arteaga Marín¹ y Holger Benavides Muñoz²

¹Estudiante de maestría en Recursos Hídricos, Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), San Cayetano Alto, Loja-Ecuador

²Profesor de la Sección Departamental de Recursos Hídricos, Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), San Cayetano Alto, Loja-Ecuador

Contacto: jgarteaga@utpl.edu.ec

RESUMEN

Los sistemas de flujo a superficie libre se caracterizan por la exposición de una región del fluido a la atmósfera. La velocidad de flujo en estos sistemas está condicionada por factores como la rugosidad de los materiales que conforman la sección que producen fuerzas de fricción que se oponen al movimiento del fluido. El propósito de este trabajo es el proporcionar una visión general de la distribución de las líneas de velocidad en un flujo a superficie libre (canal) que incluye un vórtice rotacional hidráulico. El aforo y toma de velocidades se realizó en nueve sectores del sistema de flujo experimental; siete sectores se fijaron en la sección del canal que abastece el prototipo y dos sectores en el vórtice rotacional. Las velocidades del flujo se midieron con el tubo Pitot en varios puntos en cada sector. Las distribuciones de velocidad se elaboraron con el apoyo de una aplicación informática para interpolación de datos y se comprobaron mediante un sistema de Dinámica de Fluidos Computacional-CFD. Los resultados obtenidos permitieron visualizar la localización de las velocidades máximas del flujo en las secciones del canal y del vórtice rotacional; y, comprobar la variación de la velocidad del flujo de acuerdo a los cambios graduales de las dimensiones y características de cada sección de la conducción. Además, se observó un aumento significativo de la velocidad del fluido cuando se produce el flujo rotacional y vorticial.

Palabras clave: dinámica de fluidos, flujo a superficie libre, perfil de velocidades, vórtice rotacional hidráulico.

ABSTRACT

Free-surface flow system are characterized by the exposure of an area to the atmosphere. The flow velocity in these systems is conditioned by factors such as the roughness of the materials which forms the section that produces friction forces opposed to the fluid movement. The purpose of this study is to provide an overview of the distribution of velocity lines in a free-surface flow (channel) which includes a hydraulic rotational vortex. Gauging and velocity were measured in nine sectors of the experimental flow system; seven were set in the section of the channel that feeds the prototype and two in the rotational vortex. Flow velocities were taken with the Pitot tube at various points along each sector. Velocity distributions were made with the aid of a computer application for data interpolation and were tested through a computational-fluid-dynamics (CFD) method. The results obtained allowed to visualize the flow's maximum velocities location in the sections of the channel and the rotational vortex; and to check the flow's velocity variation in accordance with the gradual changes of the dimensions and features in each driven section. In addition, a significant increase of fluid velocities when producing the rotational and vortex flow was observed.

Keywords: Fluid dynamics, free-surface flow, velocity profiles, hydraulic rotational vortex.



Recibido: 01 de julio de 2017

Aceptado: 20 marzo de 2018

ESPAMCIENCIA 9(1): 33-42/2018

INTRODUCCIÓN

Un sistema de flujo a superficie libre se produce cuando el líquido que fluye está en contacto con la atmósfera (Muñoz *et al.*, 2007). En una sección de flujo abierta, como la de los canales, únicamente es posible el flujo a superficie libre puesto que no puede presurizarse por la inexistencia de una superficie sólida de contacto en la parte superior (Cadavid, 2006).

En hidrodinámica una de las variables fundamentales para describir el movimiento del agua es la velocidad (Munson *et al.*, 1999; Braithwaite, 2011). En un flujo de tipo unidimensional se asume que la velocidad solo depende del movimiento longitudinal, es decir que se desprecian los cambios de velocidad transversales y verticales a la dirección principal del movimiento (Munson *et al.*, 1999). Sin embargo, este modelo unidimensional de la velocidad deja de serlo cuando se analiza el flujo en vertederos, compuertas, curvas o en cambios de sección (Munson *et al.*, 1999; López *et al.*, 2011). En estas zonas la corriente es de naturaleza tridimensional debido a que la rugosidad de las paredes y el fondo, la pendiente, la irregularidad de la sección y las variaciones de alineamiento del canal determinan la formación de gradientes transversales, verticales y longitudinales de la velocidad del flujo (Cadavid, 2006); por lo tanto, se dice que la velocidad real está en función de x , y , z , en el tiempo (t) (Munson *et al.*, 1999).

Desde la perspectiva matemática el comportamiento y variación de la velocidad de las partículas en un fluido respecto al tiempo puede explicarse a través de dos procedimientos, conocidos como los métodos de Lagrange y Euler. El método lagrangiano concibe la dinámica de las partículas de fluido mediante el análisis de las variaciones en su trayectoria a lo largo de una línea de corriente. En contraste el método euleriano busca determinar el comportamiento de una región de flujo mediante la descripción del comportamiento de una parte de este en el tiempo, cuando transcurre por una región preestablecida conocida como volumen de control (Laín y Grillo, 2005).

A partir de estos métodos se deducen algunas ecuaciones que permiten calcular las características del flujo. Una de ellas es la ecuación de continuidad, la misma que determina que la masa de agua que fluye por un sistema se mantiene constante a través del tiempo. Desde el punto de vista de la velocidad se sostiene que esta es proporcional a la cantidad de fluido y al área de la sección hidráulica por donde se produce el movimiento (Mott y Pedraza, 1996). Otra de las aproximaciones más utilizadas para calcular la velocidad de un flujo a superficie libre es la ecuación de Chezy-Manning, que toma en cuenta la rugosidad de la sección, el radio hidráulico y la pendiente longitudinal de la conducción, factores que afectan directamente la velocidad del flujo (Chow, 1994).

El objetivo de este estudio fue la caracterización del comportamiento hidrodinámico de las líneas de corriente de flujo en un sistema de superficie libre que incluye un vórtice rotacional hidráulico. Esto se alcanzó mediante un proceso experimental de medición para conformar mapas de distribución de velocidades (perfiles), que permitieron ilustrar una aproximación de la dinámica del flujo en el sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este apartado está organizado en dos secciones. En la primera se presenta el sistema de flujo objeto de estudio y se exponen brevemente los aspectos teóricos esenciales que describen el comportamiento del flujo hidráulico rotacional. La segunda sección describe el proceso metodológico (ensayo de laboratorio y análisis de datos) empleado para la caracterización de la distribución de las velocidades de flujo del sistema.

Sistema de flujo

El sistema de flujo de estudio es un sistema artificial de laboratorio compuesto por un banco (canal) rectangular que conduce el flujo hacia una sección circular para la formación de un vórtice rotacional (Figura 1). El material de la sección del canal del banco hidráulico es vidrio y el de la estructura del vórtice rotacional metálica.



Figura 1. Fotografías del banco (canal) y vórtice rotacional hidráulicos (Laboratorio de Hidráulica, Universidad Técnica Particular de Loja-Ecuador).

Fundamentos teóricos del flujo rotacional

Para un fluido que se mueve con velocidad lineal constante, la superficie libre bajo la acción de la gravedad es plana y el plano formado por esta, es perpendicular a la dirección del campo gravitatorio, por la tendencia del líquido a la mínima energía (Sotelo-Ávila y Cafaggi-Félix, 2006). Sin embargo, en el caso de un fluido acelerado con movimiento giratorio, el perfil superficial no es plano cuando rota con velocidad angular ω alrededor de un eje z (dirección de la aceleración gravitatoria), debido a que sobre cada punto de la superficie libre del líquido actúa una fuerza de aceleración centrípeta junto con la fuerza de aceleración de la gravedad, que cambia las condiciones de equilibrio (Manjón *et al.*, 2013). Esta nueva condición de equilibrio es la que conduce a la formación de un vórtice.

En un vórtice rotacional hidráulico el movimiento de la zona central del flujo tiende a comportarse como un sólido respecto a un eje. Desde la perspectiva física esto se interpreta como un vórtice de tipo forzado rodeado por un vórtice de tipo libre (Manjón *et al.*, 2013) (Figura 2). En el vórtice forzado cada partícula de fluido tiene la misma velocidad angular, no existen esfuerzos cortantes en el líquido, y la única aceleración que ocurre se dirige radialmente hacia el interior del eje de rotación debido a la presencia de la fuerza centrípeta. Por otro lado, en el vórtice libre cada partícula de fluido toma una trayectoria circular a una velocidad que tiene una variación inversamente proporcional respecto a la distancia al centro de rotación (Figura 2 y 3) (Torres, 2012).

La velocidad en cada uno de los vórtices viene dada por las ecuaciones (1) para vórtice forzado y ecuación (2) para vórtice libre, donde ω_0 es la velocidad angular del vórtice, ω es la velocidad angular inicial del vórtice, r_0 es la distancia entre el punto más alejado del recipiente y el eje de rotación (radio máximo) y r la distancia al eje de rotación (radio) (Barlari y Pérez, 2015). La velocidad angular en la superficie del vórtice se puede calcular mediante la ecuación (3) que establece una relación entre la frecuencia de giro de un punto del fluido con la velocidad angular medida en ese punto n , que representa el número de revoluciones por segundo (rps) a la que la partícula o punto rota respecto al eje (Manjón *et al.*, 2013; Barlari y Pérez, 2015).

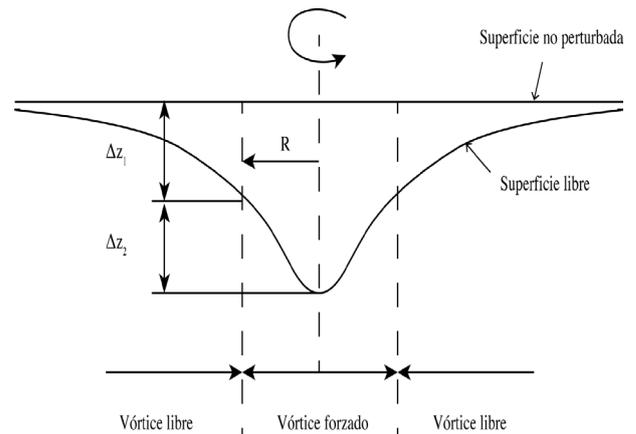


Figura 2. Representación gráfica del modelo teórico de un vórtice compuesto (Torres, 2012).

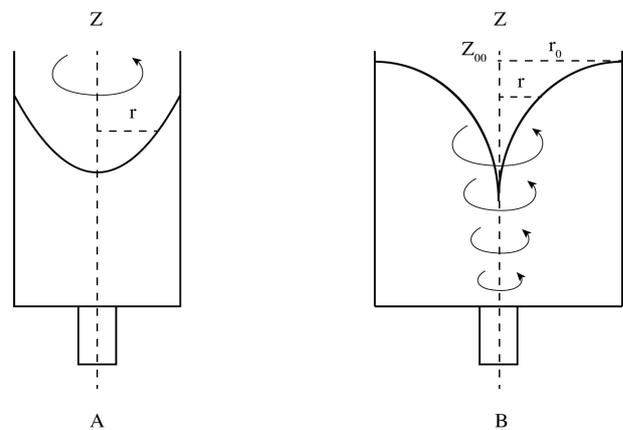


Figura 3. Esquema de los perfiles de la altura de la superficie libre del líquido, $z(r)$ en el vórtice forzado (A) y en el vórtice libre (B) (Manjón *et al.*, 2013).

$$\omega = \omega_0 \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 \frac{r_0^2}{r^2} \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (3)$$

El perfil de altura de la lámina libre del flujo rotacional se puede obtener por integración (Kundu y Cohen, 2010):

$$z(r) = \int_r^\infty \frac{\omega^2 r}{g} \partial r = \int_r^\infty \frac{\omega_0^2 r_0^4}{gr^3} \partial r = z_\infty - \frac{\omega_0^2 r_0^4}{2gr^2} \quad (4)$$

Donde z_∞ es la altura del fluido en el punto más alejado del eje de rotación, g la aceleración de gravedad y r la distancia al eje de rotación.

Métodos

El proceso metodológico utilizado para la caracterización hidrodinámica de las líneas de corriente de flujo en un sistema de superficie libre que incluye un vórtice rotacional hidráulico estuvo conformado por dos etapas: (i) ensayo de laboratorio para la recopilación de datos, y (ii) análisis de datos mediante interpolación y simulación computacional para el mapeo de perfiles de velocidad.

Ensayo de laboratorio

Se establecieron nueve sectores de medición de velocidad, siete en el canal y dos en el vórtice rotacional (Figura 4A). En cada uno de los sectores del canal se tomaron tres mediciones a diferentes profundidades, como se ilustra en la figura 4B. En los sectores del vórtice rotacional se registraron las mediciones de tres puntos en cada eje y también a profundidades diferentes, como se representa en la figura 4C.

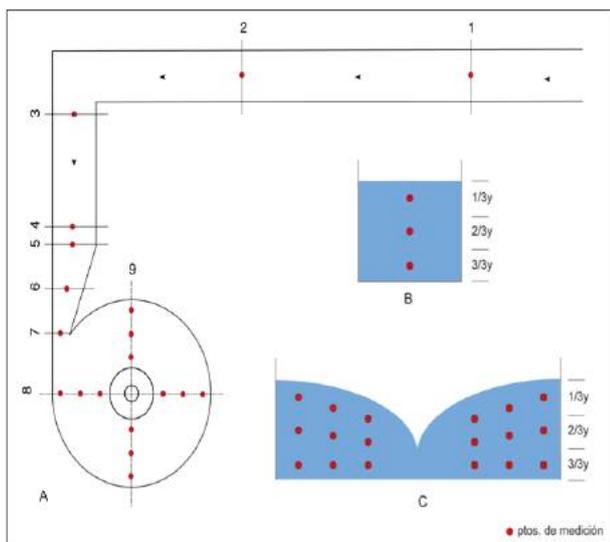


Figura 4. Esquema de la distribución de los puntos de medición en el sistema a superficie libre con un vórtice rotacional. (A) Vista en planta del sistema y los puntos de medición. (B) Vista frontal del sector de medición en la sección del canal. (C) Vista frontal del sector de medición en el vórtice rotacional.

La medición de las velocidades del flujo se realizó utilizando el tubo Pitot (Figura 5), mediante cinco repeticiones en cada punto y para un mismo caudal, que a su vez se determinó con el método volumétrico (Kennedy *et al.*, 1991). El tubo Pitot es uno de los diversos métodos para el aforo de sistemas de flujo hidráulico (McPhee, 2013). Este instrumento es, una aplicación de la ecuación de Bernoulli que consiste en un dispositivo tubular en

forma de L con un extremo abierto y de forma puntiaguda que se coloca en contracorriente en el punto de medición (Kundu y Cohen, 2010). La línea de corriente o filete líquido se detiene en la posición frontal del tubo, lo que produce un aumento de altura de presión, por encima de la altura piezométrica, cuya magnitud se traduce en la cabeza de velocidad en el punto (Figura 5).

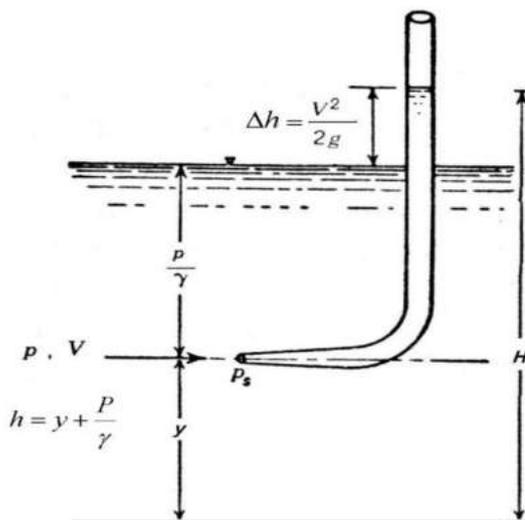


Figura 5. Esquema de medición de velocidad mediante tubo Pitot (Vennard y Street, 1985).

Según el esquema de la figura 5 se tiene que:

$$H = y + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

$$h = y + \frac{P}{\gamma} \quad (6)$$

$$H - h = \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

$$V = \sqrt{2g(H - h)} \quad (8)$$

Análisis de datos

La velocidad en cada punto de medición se calculó mediante la ecuación (8). Para obtener los perfiles de distribución verticales de velocidad, los valores obtenidos se interpolaron mediante Kriging, método basado en modelos estadísticos que incluyen análisis de las relaciones estadísticas (auto correlación) entre los puntos medidos, para estimar valores continuos en un espacio bidimensional o tridimensional (Delhomme, 1978).

Para llevar a cabo el proceso de interpolación, se creó una tabla de datos con tres campos: (1) coordenada X, (2) coordenada Y, y (3) velocidad de flujo en la coordenada XY (V). Se tomó como eje X de coordenadas a la solera del canal y como eje Y el tirante de flujo y. En el cuadro 1 se incluyen los tres valores de velocidad determinados y se agregan

otros valores bajo el concepto que la velocidad del flujo en las paredes y el fondo es igual a cero (Camargo, 2002).

Adicionalmente se realizó una simulación computacional del sistema del flujo en el software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ANSYS®AcademicR18.0, para lo cual se generó la geometría, el mallado, se ingresaron los parámetros hidráulicos y se ejecutó la simulación durante 20 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de velocidad calculados se presentan en el cuadro 1 el tirante o profundidad del agua (y) en el canal fue de 0,16 m. El ancho de solera fue de 0,20 m en los sectores 1 y 2; 0,30 m en los sectores 3, 4 y 5; 0,20 m en el sector 6; y 0,10 en el sector 7. El caudal trasegado por el sistema de flujo fue de 4,11 l/s.

Cuadro 1. Valores de velocidad de flujo medidos utilizando el tubo Pitot.

Zonas de aforo	Prof.	Sector	Δh (m)	V (m/s)	Sector	Δh (m)	V (m/s)	
Canal	1/3 inf.	1	0,15	1,76	2	0,13	1,59	
	2/3 med.		0,21	2,03		0,19	1,93	
	3/3 sup.		0,24	2,21		0,23	2,14	
	1/3 inf.	3	0,16	1,77	4	0,18	1,92	
	2/3 med.		0,18	1,92		0,20	2,01	
	3/3 sup.		0,23	2,12		0,24	2,21	
	1/3 inf.	5	0,16	1,81	6	0,17	1,86	
	2/3 med.		0,20	1,99		0,21	2,06	
	3/3 sup.		0,24	2,18		0,24	2,18	
	1/3 inf.	7	0,17	1,87				
	2/3 med.		0,21	2,04				
	3/3 sup.		0,24	2,18				
Eje 8	1/3 inf.	1,1	0,14	1,68	1,2	0,18	1,91	
	2/3 med.		0,19	1,95		0,20	2,02	
	3/3 sup.		0,21	2,06		0,22	2,11	
	1/3 inf.	1,3	0,17	1,84				
	2/3 med.		0,20	2,00				
	3/3 sup.		0,23	2,13				
	1/3 inf.	2,1	0,15	1,73	2,2	0,19	1,95	
	2/3 med.		0,20	2,00		0,21	2,05	
	3/3 sup.		0,23	2,12		0,23	2,12	
	1/3 inf.	2,3	0,19	1,97				
	2/3 med.		0,22	2,08				
	3/3 sup.		0,23	2,15				
Vórtice	1/3 inf.	3,1	0,14	1,66	3,2	0,17	1,87	
	2/3 med.		0,19	1,95		0,21	2,03	
	3/3 sup.		0,21	2,03		0,21	2,06	
	1/3 inf.	3,3	0,18	1,89				
	2/3 med.		0,20	2,00				
	3/3 sup.		0,23	2,13				
	Eje 9	1/3 inf.	4,1	0,13	1,63	4,2	0,18	1,89
		2/3 med.		0,19	1,96		0,21	2,03
		3/3 sup.		0,19	1,95		0,22	2,11
		1/3 inf.	4,3	0,19	1,94			
		2/3 med.		0,20	2,02			
		3/3 sup.		0,22	2,10			

Los perfiles de velocidad obtenidos de la interpolación de los valores medidos se muestran desde la figura 6 hasta la figura 11. En la figura 6 se presenta el perfil de velocidad en los dos primeros sectores de medición en donde se determinó un tirante y de 0,16 m en un ancho de solera b de 0,20 m. En este caso, la interpolación de velocidades dió como resultado valores máximos de 2,20 m/s y 2,30 m/s.

En los sectores 3 al 5 (Figura 7), debido al ensanchamiento de la solera b de 0,20 m a 0,30 m, el tirante y se redujo en aproximadamente 50% respecto al observado en las dos primeras zonas. La velocidad en este tramo conservó un comportamiento similar, ya que los valores se mantienen en los mismos rangos que en las zonas anteriores (2,00 m/s a 2,30 m/s).

Las figuras 7 y 8 corresponden a los perfiles de velocidad en el tramo de estrechamiento del canal de entrada hacia el vórtice rotacional. En estos casos se observó un incremento progresivo de velocidad con valores máximos de aproximadamente 2,80 m/s en el sector 6 (estrechamiento de 0,30 m a 0,20 m) y de aproximadamente 3,00 m/s en la zona de entrada al flujo rotacional

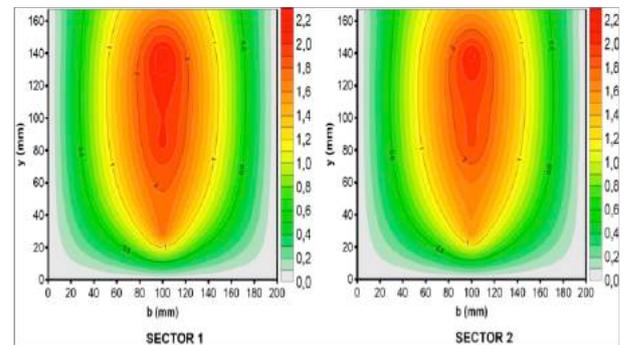


Figura 6. Imágenes de los perfiles transversales de velocidades del flujo en los sectores de medición 1 y 2 del canal principal.

También se observó en estos dos sectores que las velocidades máximas cubrieron un mayor rango vertical de la sección. El incremento de la velocidad en este tramo con estrechamiento de sección se debió a que en este sector el sistema debe trasegar el mismo flujo volumétrico a través de una menor sección viva, por lo tanto, se equilibra con un incremento de la velocidad.

El resultado del perfil longitudinal de la velocidad de flujo en el canal se presenta en la figura 9. Desde esta perspectiva se pudo observar el comportamiento de la velocidad del fluido al ingresar a la sección más angosta que conduce el flujo a la entrada del vórtice

rotacional propiamente dicho. Es evidente el aumento de la velocidad en el tramo final, donde se produce el estrechamiento progresivo de la sección del canal. Así, en este sector el intervalo de valores de velocidad más altos ocupa un rango vertical aproximadamente 2/3 más amplio en relación al punto inicial. Asimismo, se pudo observar que la velocidad máxima en el sector 7, donde se tiene un ancho de canal de 0,10 m, es aproximadamente 25% mayor al punto 1, donde el ancho del canal es de 0,20 m.

En el vórtice rotacional (Figura 10) se observó la existencia de simetría en la distribución de velocidades en cada sub-eje. La velocidad del fluido en el vórtice rotacional alcanzó los 3,20 m/s. La distribución de las líneas de velocidad mostró que en la zona central del flujo rotacional se producen los valores más altos de velocidad, mientras que en la proximidad a las paredes y en la cercanía a la superficie del agua se tienen las velocidades más bajas.

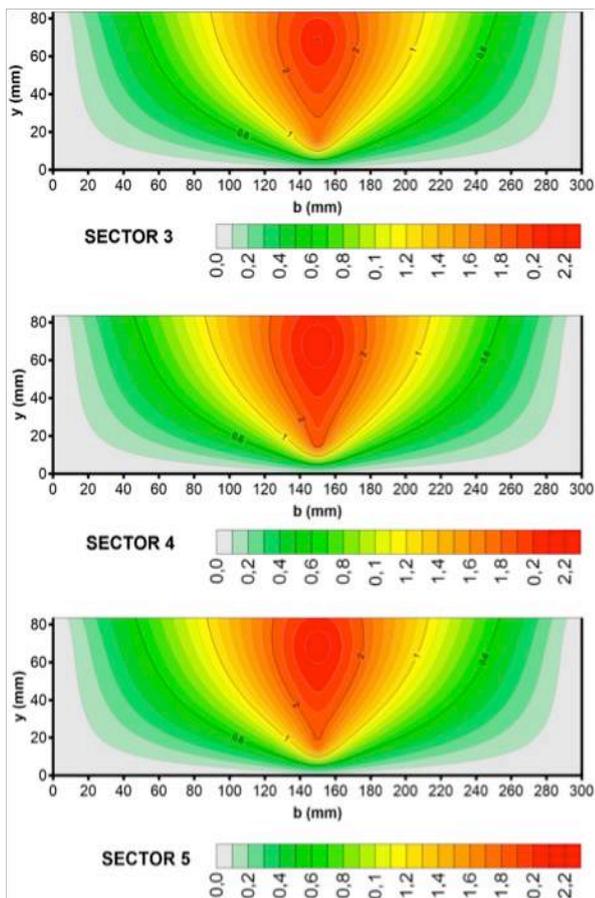


Figura 7. Imágenes con los perfiles transversales de velocidades del flujo en los sectores de medición 3, 4 y 5; en el canal de entrada al vórtice rotacional.

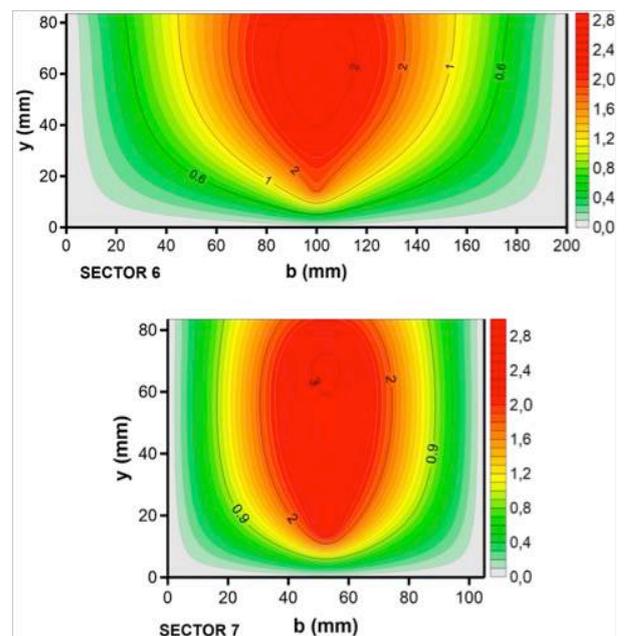


Figura 8. Imágenes con los perfiles transversales de velocidades del flujo en el sector 6 y sector 7 (canal de entrada al vórtice rotacional).

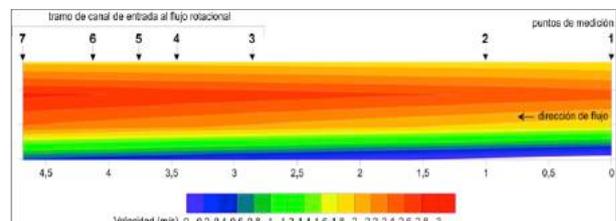


Figura 9. Vista longitudinal del perfil de velocidades de flujo en el canal.

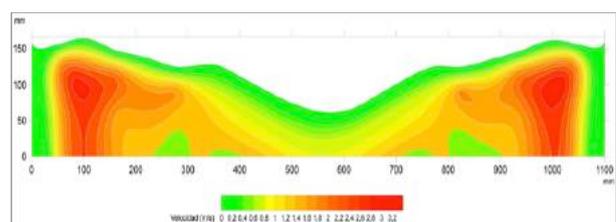


Figura 10. Imagen del perfil de velocidad en la sección transversal del vórtice rotacional hidráulico.

La simulación computacional en el software CFD produjo como resultado una distribución similar de las velocidades en el sistema de flujo (Figuras 11 y 12). En la figura 11 se muestran las líneas de velocidad del sistema de flujo, donde se distingue un contraste de velocidades entre las zonas de flujo lineal y rotacional, manteniéndose la semejanza de valores de velocidad entre el modelo CFD y el prototipo. En la figura 12 se

presenta el modelo tridimensional de la lámina libre o espejo de agua del sistema de flujo, donde se puede distinguir algunas turbulencias en el punto de entrada al flujo rotacional y dentro del mismo. En la figura 13 se exhibe el perfil lateral del tramo de canal que conduce al tanque circular, donde se percibe una disminución del tirante de agua por el aumento de la velocidad en este punto. Este incremento de velocidad en ese punto y el estrechamiento de la sección dan origen a las turbulencias en la zona de entrada al flujo rotacional.

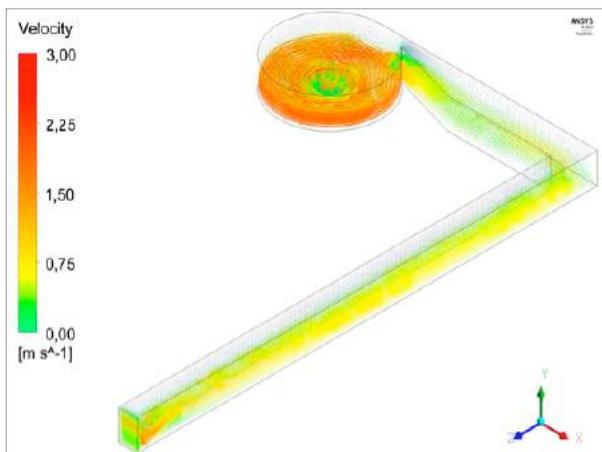


Figura 11. Representación de las líneas de velocidad en el sistema de flujo (modelo CFD).

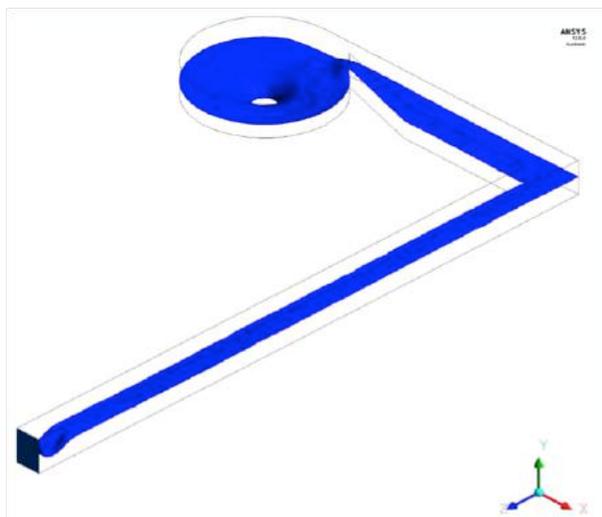


Figura 12. Representación gráfica de la superficie libre del agua (modelo CFD).



Figura 13. Gráfica de la variación del tirante en el canal y en la entrada al flujo rotacional (modelo CFD).

El resultado de la simulación del flujo en el vórtice rotacional (Figura 14) muestra las velocidades más bajas en la cercanía a las paredes, algo mayores que éstas en la superficie libre, mientras que las más altas se ubican en la zona central de la masa de flujo. En este caso se observa cierto grado de asimetría en la distribución de las velocidades en los radios del tanque circular. En el radio izquierdo, donde se localiza el canal de entrada transición al tanque circular se observan valores más altos de velocidad en relación al radio derecho. Sin embargo, el resultado de la simulación guarda alta similitud con los perfiles interpolados del prototipo, según la figura 10.

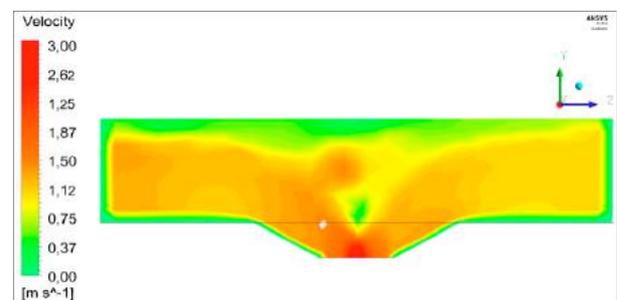


Figura 14. Ilustración gráfica del perfil de velocidades del flujo en el vórtice rotacional obtenido mediante el modelo computacional-CFD.

Como se ha podido observar la velocidad máxima en el flujo rotacional es relativamente mayor a la que se observa en el flujo lineal, por lo tanto, el comportamiento del flujo en el vórtice rotacional resulta interesante para el estudio de sus potenciales aplicaciones en la conversión de la energía de movimiento o energía cinética del agua en energía eléctrica (hidro-aprovechamiento). El comportamiento hidráulico del vórtice rotacional y su posible utilización para la generación de energía ya ha sido analizado en algunas investigaciones (Yaakob *et al.*,

2014; Shabara *et al.*, 2015; Ayala *et al.*, 2016; Power *et al.*, 2016). Los resultados de dichos estudios han planteado la construcción de sistemas de flujo rotacional como una alternativa innovadora para la generación de energía eléctrica a menor escala, económica y accesible para sectores y comunidades rurales aisladas, donde no llegan las redes de transmisión de energía eléctrica.

Los perfiles de distribución de velocidades aquí presentados han permitido comprobar lo que la literatura plantea acerca de la distribución de la velocidad en las secciones de flujo “a superficie libre” y de “vórtice rotacional”. En cada uno de los perfiles obtenidos por interpolación, se observa que la velocidad máxima ocurre por debajo de la lámina de fluido que se encuentra en contacto con la atmósfera. Esta observación se contrasta con lo descrito por Cadavid (2006), quien menciona que la magnitud de la velocidad del flujo varía de un punto a otro dentro de la sección y que la velocidad posee una tendencia de distribución simétrica en los canales, y cuyo valor máximo se ubica hacia el centro del eje x de la sección y por debajo de la superficie libre. La ocurrencia de la velocidad máxima bajo la superficie libre y no en ella se debe a la influencia de la atmósfera sobre la lámina libre de fluido (Weber *et al.*, 2002), aspectos físicos que también se validaron en este trabajo.

Es importante destacar que la distribución de velocidades varía de acuerdo a las características de la sección, principalmente de la rugosidad de las paredes y la solera (Mott y Pedraza, 1996). Por tanto, para canales con coeficientes de rugosidad bajos, es de esperarse mayor simetría en las líneas de velocidad y una distribución más uniforme. En el caso de este estudio, los materiales que componen la estructura del sistema tienen coeficientes de rugosidad de 0,01 (vidrio y latón) (Mott y Pedraza, 1996), que son valores de rugosidad más bajos dentro del grupo de materiales de los que usualmente se construyen las secciones de los canales (Meadows y Walski, 2001). Estas características de la sección de flujo del sistema estudiado se ven reflejadas en la simetría de las aproximaciones obtenidas.

La velocidad es una variable de gran importancia en la hidráulica de canales ya que influye directamente en su diseño (Farias, 1995), puesto que se requiere que el flujo se mantenga entre una velocidad mínima y una velocidad máxima. La primera de ellas es requerida para evitar la sedimentación o azolve de las partículas sólidas en el fondo (Camargo, 2002). La sedimentación ocasionada por valores de velocidad bajos que impiden el arrastre de las partículas demanda mayores inversiones para

mantenimiento y disminuyen la capacidad de operación de las infraestructuras. En contraste, el límite máximo de velocidad evita los fenómenos de erosión, socavación o abrasión continua de las paredes y el fondo, que se producirían con velocidades muy altas y que modifican las rasantes, generando problemas en el funcionamiento de los canales (Li, 2008).

Respecto al flujo rotacional presente en los vórtices gravitacionales, el conocer la ubicación de las velocidades más altas -significativo aporte de este estudio-, es quizá el aspecto más importante para el diseño de turbinas para generación de energía en vórtices (Zarate-Orrego *et al.*, 2016). Esta variable influye directamente sobre parámetros de diseño de las turbinas como longitud altura, diámetro y altura de rodetes; y separación longitud altura y grosor de álabes (Dhakal *et al.*, 2015). Asimismo, al influir la velocidad del flujo rotacional sobre el diseño de turbinas, influye también sobre la eficiencia o rendimiento de estas (Elbatran *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

Se ha presentado una aproximación analítica de la distribución de las líneas de velocidad en las secciones de un sistema de flujo a superficie libre mediante el estudio del comportamiento hidrodinámico del agua en un prototipo de un vórtice rotacional. Los resultados han permitido esquematizar una visión panorámica tridimensional general sobre la distribución de velocidades en los patrones de flujo rotacionales e irrotacionales. Los métodos de interpolación de datos y el software de simulación CFD brindan herramientas muy potentes que permiten analizar el comportamiento de la velocidad en flujos de diferentes características.

El método de estimación de perfiles de flujo presentado en este trabajo puede ser aplicado tanto a canales como a cauces naturales para obtener resultados de soporte y fundamento para el diseño de estructuras de gestión hidráulica y aprovechamiento energético mediante en vórtice gravitacional hidráulico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica Particular de Loja por facilitar sus recursos e instalaciones de Laboratorio de Hidráulica para el desarrollo de este trabajo; y, al M.Sc. Henry Rojas Asuero quien a través de su trabajo de titulación realizó el diseño y construcción del equipo de vórtice

LITERATURA CITADA

- Ayala, M., Benavides, H., y Riba, C. 2016. Sistema de generación energía sumergible basado en un vórtice gravitacional con sifón para comunidades aisladas. *Revista Técnica Energía* 12: 304-312.
- Barlari, M., y Pérez, I. 2015. Medición del campo de velocidades tangencial de un vórtice en un medio cilíndrico y estudio de su superficie libre. Laboratorio V, FCEN, UBA.
- Braithwaite, J. 2011. *An introduction to hydrodynamics*. CreateSpace Publishing, Bonn, Alemania.
- Cadavid, J. H. 2006. *Hidráulica de canales: fundamentos*. Universidad Eafit, Medellín.
- Camargo, J. E. 2002. *Manual de ingeniería de ríos: hidráulica de canales*. UNAM, México.
- Chow, V. T. 1994. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, Nueva York.
- Delhomme, J. 1978. Kriging in the hydrosiences. *Advances in Water Resources* 1(5): 251-266.
- Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Amatya, N., and Nakarmi, A. M. 2015. Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48: 662-669.
- Elbatran, A. H., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., and Shabara, H. M. 2015. Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 40-50
- Farias, H. D. 1995. Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales. *Ingeniería del Agua* 2(3).
- Kennedy, A., Fragoza, F., Peña, E., y Moreno, E. 1991. *Manual de aforos*. IMTA: Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, Morelia.
- Kundu, P. K., and Cohen, I. M. 2010. *Fluid mechanics*. Elsevier Academic Press, San Diego.
- Laín, L., y Grillo, C. 2005. Dispersión de partículas sólidas en flujos bifásicos turbulentos de interés industrial. *Ingeniería y Desarrollo* 17: 87-114.
- Li, M. H. 2008. *Stream restoration design handbook*. NCRS-USDA, Washington.
- López, D., de Blas, M., Marivela, R., Rebollo, J. J., Díaz, R., Sánchez-Juny, M., y Estrella, S. 2011. Estudio hidrodinámico de vertederos y rápidas escalonadas con modelo numérico tridimensional SPH. *Ingeniería del Agua* 2011: 521-531.
- Manjón, F. J., Villalba, J. M., Arribas, E., Nájera, A., Beléndez, A., y Monsoriu, J. A. 2013. Vórtices no estacionarios en un vaso de agua. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 35: 1-11.
- McPhee, J. 2013. *Guía de aforos en canales abiertos y estimación de tasas de infiltración*. Recursos Hídricos y Medio Ambiente - FCFM, Santiago, CL.
- Meadows, M. E., and Walski, T. M. 2001. *Computer applications in hydraulic engineering*. The Bentley Institute Press.
- Mott, R. L., y Pedraza, C. R. C. 1996. *Mecánica de fluidos aplicada*. McGraw-Hill, Madrid.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., y de Jesus Zerbini, E. J. G. 1999. *Fundamentos de mecánica de fluidos*. Limusa, México.

- Muñoz, J., Gonzalo, N., Dulhoste, F., y Santos, R. 2007. Extensión de simulador para su funcionamiento como colector - distribuidor de líquido usando ecuaciones de superficie libre. *Ciencia e Ingeniería* 28(2): 103-109.
- Power, C., McNabola, A., and Coughlan, P. 2016. A parametric experimental investigation of the operating conditions of gravitational vortex hydropower (GVHP). *Journal of Clean Energy Technologies* 4(2): 112-119.
- Shabara, H., Yaakob, O., Ahmed, Y., and Elbatran, A. 2015. CFD simulation of water gravitation vortex pool flow for mini hydropower plants. *Jurnal Teknologi* 74(5): 77-81.
- Sotelo-Ávila, G., y Cafaggi-Félix, A. 2006. Criterios de energía específica mínima y momentum mínimo en el cálculo del régimen crítico en canales de sección compuesta. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 7:175-184.
- Torres, G. 2012. Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua. Grupo Ingeniería, Bogotá, pág. 7.
- Vennard, J., y Street, R. 1985. *Elementos de Mecánica de Fluidos*. CECSA, México.
- Weber, J. F., Menéndez, A. N. y Elaskar, S. A. 2002. Modelación numérica de la distribución del flujo a superficie libre en secciones compuestas. *Mecánica Computacional* 21: 476-494.
- Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., Elbatran, A. H., and Shabara, H. M. 2014. A review on micro hydro gravitational vortex power and turbine systems. *Jurnal Teknologi* 69(7): 1-7.
- Zarate-Orrego, S. A., Torres-Casierra, G. A. y Risco-Moreno, E. B. 2016. Hidroturbina de vórtice horizontal de una cámara. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia* 79:150-163.