

Cálculo experimental de la difusividad turbulenta a partir de imágenes obtenidas con cámara de alta velocidad

(Recibido: 10/04/2015; Aceptado: 20/05/2015)

Jesús Roca Martínez, Juan T. García Bermejo, Antonio Viguera Rodríguez, Luis G. Castillo Elsitdié
 Grupo de investigación Hidr@m – Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental
 Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
 Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203 Cartagena (España)
 Teléfono: 968327026
 Email: jrm2@alu.upct.es, juangbermejo@upct.es, aviguera.rodriguez@upct.es, luis.castillo@upct.es

Resumen. El análisis de imágenes tomadas con cámara de alta velocidad en flujos de agua previamente sembradas con partículas constituye una herramienta útil para la determinación del campo de velocidades. El laboratorio de hidráulica de la UPCT posee un dispositivo hidráulico formado por una tubería en la que se impulsa agua y aire dando lugar a un flujo bifásico. El objetivo de este trabajo es el de determinar el campo de velocidades de la fase agua y calcular a partir del mismo los valores de la difusividad turbulenta.

Palabras clave. Difusividad turbulenta; flujo bifásico; imagen; PIVlab

Abstract. The analysis of images captured by a high speed digital camera allows to determinate the velocity field in flows with previously added tracer reflective particles. The hydraulic Laboratory of the Universidad Politécnica de Cartagena has a device composed by a pipeline, in which air and water are transported producing a two phase flow. The main objective of this work is to calculate the velocity field of the water phase and then, to estimate the turbulent diffusion.

Keywords: Turbulent diffusion; two-phase flow, images; PIVlab

1. Introducción

El análisis de imágenes tomadas con cámaras de alta velocidad constituye hoy en día una herramienta útil para determinar parámetros hidráulicos como son: campo de velocidad y vorticidad instantáneos, velocidad media, fluctuación de velocidad e intensidad de la turbulencia [1]. En el laboratorio de Hidráulica de la UPCT se estudia la difusividad del oxígeno en agua para el caso de flujos bifásicos aire-agua en tubería. Para ello es necesario definir el parámetro *difusividad turbulenta*, en la fase agua, a partir del cual se podrá calcular la difusividad molecular del oxígeno en el agua.

El flujo bifásico aire-agua en tuberías de impulsión en las que se inyecta los dos fluidos presenta distintos tipos de flujo no simétricos que dependen directamente de las velocidades superficiales del agua, $Q_{agua}/A_{conducción}$, del aire, $Q_{aire}/A_{conducción}$, y de la inclinación de la tubería [2]. Se han estudiado tres caudales de agua (3, 6 y 9 m³/h) y dos de aire por cada caudal de agua (2.5 y 5 m³/h). Todas las combinaciones de caudales se repiten para dos inclinaciones, 1% y 4%. En la Fig. 1 se observa un esquema de los dos tipos de flujo desarrollados que son flujo burbuja alargada y flujo tapón (Fig. 2).



Fig. 1. Esquema de flujo burbuja alargada (izquierda) y tapón (derecha) [3].

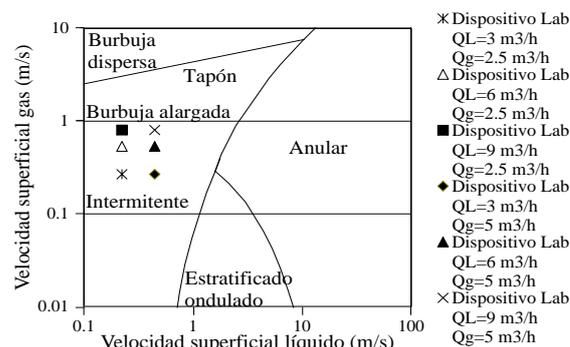


Fig. 2. Patrón de flujo calculado según el ábaco de Barnea et al. 1980 [2].

2. Base teórica

Una imagen digital en blanco y negro se puede registrar como una matriz de números, uno por pixel, que van de 0 a 255, y que reflejan las intensidades de luz. Mediante el correcto sembrado del flujo con partículas reflectantes de densidad similar a la del agua se consigue disponer de suficientes pixeles con intensidades de color elevadas. Para la definición del campo de velocidades se divide cada imagen en un número de subventanas. Dentro de cada subventana, las partículas son usadas como trazadores para la resolución de la función estadística de correlación cruzada, la cual es resuelta con la transformada rápida de Fourier (FFT) seguida de la técnica de deformación de subventanas. Con esta metodología se busca la posición de otra subventana referida a la imagen desplazada un Δt con el valor más elevado de dicha función. La posición final de esta subventana con mayor correlación referida a la primera

subventana, permite definir el campo de velocidades para cada subventana y par de imágenes.

La función de correlación cruzada se define como la suma de los productos de las dos matrices numéricas de intensidad de luz que corresponden a cada subventana [4]:

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-L}^L I(i, j) I'(i + x, j + y) \quad (1)$$

Donde las variables I e I' representan las matrices de intensidad de luz de cada subventana, y donde I' ocupa una posición de desplazamiento relativo (x, y) respecto a $I(i, j)$. La correlación cruzada se resuelve siguiendo el esquema de la Fig. 3 con la transformada rápida de Fourier.

$$R_{II}(x, y) = invFFT[FFT(I) \times Conj(FFT(I'))^*] \quad (2)$$

Donde inv = inversa y $conj$ =conjugado.

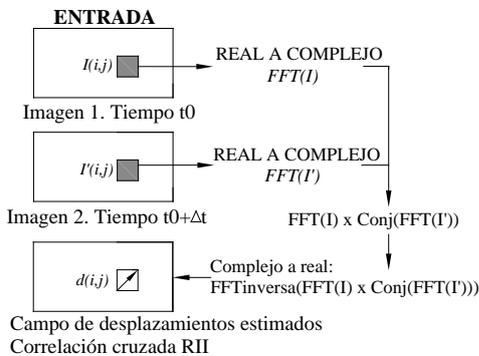


Fig. 3. Implementación de la correlación cruzada usando transformadas rápidas de Fourier FFT [4].

Uno de los problemas en la resolución de la FFT es el ruido de fondo y la dificultad de encontrar el pico de intensidad. Para tener exactitud en el método se utiliza la técnica de deformación de subventanas, que evita que las partículas que estamos siguiendo se solapen con otras que nos vienen de otras subventanas. Por lo tanto las subventanas se deforman de acuerdo a la trayectoria del flujo usando la información de los desplazamientos obtenidos con la FFT (Fig. 4). Los pasos de cálculo se resuelven para distintos tamaños de ventanas.

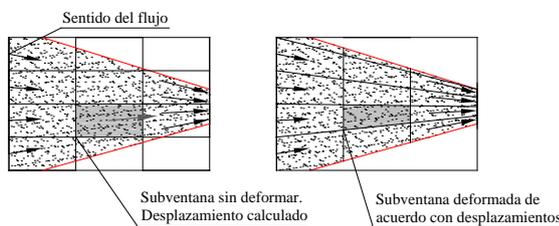


Fig. 4.Principio de la técnica de la deformación de las subventanas.

3. Materiales y métodos

3.1. Dispositivo físico laboratorio hidráulica UPCT

El dispositivo del Laboratorio de Hidráulica de la UPCT está formado por una tubería que consta de un tramo de conducción de metacrilato de 64 mm de

diámetro interior y de longitud igual a 6 metros, con pendiente regulable entre el 0% y 10%. La cámara de alta velocidad *Faster Image Troubleshooter HR* alcanza hasta 2000 imágenes por segundo (Fig. 5). El tamaño de la ventana capturada es de 240x320 píxeles. El flujo se siembra con partículas de 100µm de diámetro y una densidad de 0.99g/cm³.



Fig. 5. Detalle posición cámara de alta velocidad.

3.2. Cálculo del campo de velocidades instantáneas

Para el cálculo de la correlación transversal se hace uso del software libre PIVlab [5]. Dentro del flujo bifásico de burbuja alargada se distinguen cuatro zonas de: I) frontal de inicio de la burbuja; II) zona burbuja aire; III) posterior o zona de mezcla; y IV) tapón de agua (Fig. 6).

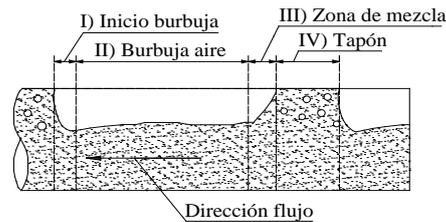


Fig. 6. Zonas del flujo tapón.

El análisis del campo de velocidades se llevará a cabo de manera separada para cada una de estas zonas. Se han registrado en torno a 20 imágenes para analizar cada zona. Las imágenes son procesadas recortándolas para calcular las velocidades en el fluido, y se lleva a cabo el calibrado dimensional a partir del diámetro interior de la tubería 64 mm. Se ha elegido el tamaño de las subventanas de 64x64 píxeles para el primer paso, y de 32x32 píxeles para el segundo paso. En este estudio preliminar no se han aplicado filtros.

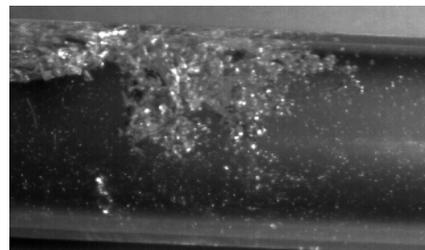


Fig. 7. Imagen de la zona III) posterior o zona de mezcla y IV) tapón de agua.

4. Resultados obtenidos

Una vez definido el vector velocidad para cada subventana, se obtiene una matriz para cada imagen y

para cada una de las tres zonas definidas. En cada celda de la matriz tenemos la componente de la velocidad en u (eje x) y v (eje y):

$$(u_{(x,y,i)}, v_{(x,y,i)}) \tag{3}$$

Donde x se refiere a la columna de la matriz en la que está situada la celda $x = 1, 2, \dots, m$; m es el número total de columnas de la matriz; y es la fila de la matriz en la que está situada la celda $y = 1, 3, \dots, n$; n es el número total de filas de la matriz; i , es la pareja de imágenes analizada $i = 1, 2, 3, \dots, k$; y k es el número total de pares de imágenes analizadas por fase. A partir de las velocidades instantáneas se calcula la matriz de velocidades medias:

$$\bar{u}_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^k u_{(x,y,i)}}{k}; \bar{v}_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^k v_{(x,y,i)}}{k} \tag{4}$$

Y a partir de estas la velocidad promediada por cada fase se calcula:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \bar{u}_{(x,y)}}{m * n}; \bar{v} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \bar{v}_{(x,y)}}{m * n} \tag{5}$$

Donde $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \bar{u}_{(x,y)}$ y $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \bar{v}_{(x,y)}$ son los sumatorios de velocidades medias u y v respectivamente para cada matriz correspondiente a cada zona. La matriz de fluctuaciones de velocidad se calcula a partir de las siguientes ecuaciones:

$$u'_{(x,y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (u_{(x,y,i)} - \bar{u}_{(x,y)})^2}{k}} \tag{6}$$

$$v'_{(x,y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (v_{(x,y,i)} - \bar{v}_{(x,y)})^2}{k}} \tag{7}$$

Donde $(u_{(x,y,i)} - \bar{u}_{(x,y)})^2$ es la desviación cuadrática media de las velocidades u ; mientras que $(v_{(x,y,i)} - \bar{v}_{(x,y)})^2$ es la desviación cuadrática media de las velocidades en v . A continuación se calcula la matriz de energía cinética turbulenta (ecuación 8):

$$k_{(x,y)} = \frac{u'^2_{(x,y)}}{2} + \frac{v'^2_{(x,y)}}{2} \tag{8}$$

La matriz de difusividad turbulenta se ha calculado:

$$E_{(x,y)} = \sqrt{k_{(x,y)}} * 0.07 * h \tag{9}$$

donde h es el diámetro interior de la tubería. Por último se calcula la difusividad turbulenta media por fase:

$$E = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n E_{(x,y)}}{m * n} \tag{10}$$

donde $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n E_{(x,y)}$ es la suma de todas las celdas dentro de la matriz de difusividad. Los valores de difusividad turbulenta más elevados se encuentran en los extremos de la *burbuja* (Fig. 8).

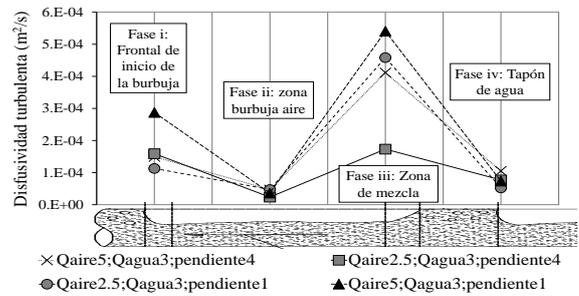


Fig. 8. Valores de difusividad turbulenta tipo en cada una de las zonas con caudal de agua de 3 m³/h, y de aire de 2,5 y 5 m³/h, para la inclinación de tubería de 1 y 4%.

5. Conclusiones

El análisis de imágenes mediante la correlación cruzada resuelta con la transformada rápida de Fourier seguida de la técnica de deformación de ventana constituye una herramienta útil para determinar diversos parámetros hidráulicos en flujos de agua. Se ha calculado el valor de la difusividad turbulenta del agua que es proporcional a la difusividad molecular del oxígeno lo que facilitará el cálculo de la difusión del oxígeno en la fase agua una vez definido el coeficiente de transferencia en la interface aire-agua. Las zonas con mayor difusividad corresponden a las zonas de mezcla e inicio de la burbuja, tal y como hemos podido ver en la Fig. 8.

Agradecimientos

Al Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) por su colaboración. Esta investigación se financia con fondos de la Entidad de Saneamiento de la Región de Murcia (ESAMUR) y de la cátedra HIDROGEO de la UPCT formando parte del convenio “Estudio en Prototipo de Inyección de Aire en Impulsiones de Aguas Residuales Urbanas para la Eliminación de Olores”.

Referencias

- [1] Righetti, M., Lanzoni, S. (2008) “Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks”. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(2008)134:1(15).
- [2] Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. (1980). “Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes”. *International Journal of Multiphase Flow*, Pergamon Press, pp. 217-225, vol. 6.
- [3] Lauchlan, C.S., Escarameia, M., May, R.W.P., Burrows, R., Gahan, C. (2005) “Air in Pipelines. A Literature Review”. HR Wallingford. Report SR 649. Rev 2.0. pp92.
- [4] Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J. (2007) “Particle Image Velocimetry”. Springer 2 edn.
- [5] Thielicke, W., Stamhuis, E., “PIVlab 1.32”. <http://pivlab.blogspot.com.es/>.