

MEDIDA DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE UN LÍQUIDO EN UN TUBO DE SECCIÓN CIRCULAR MEDIANTE UN RADAR LÁSER

David García-Vizcaíno, Jaume Recolons, Federico Dios, Adolfo Comerón
dgarcia@tsc.upc.edu, recolons@tsc.upc.edu, fede@tsc.upc.edu, comeron@tsc.upc.edu
Dpto. de Teoría del Senyal i Comunicacions (TSC).
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Abstract- In this paper we present the measures of the profile or velocity gradient of a liquid (water) across a circular section pipe in laminar state, by means of a two-dimension laser radar system (2D-LDA) designed by the EEF-TSC group of UPC. The measurement instrument is build with an optical system that outputs three laser beams that are focused on the target, two acoustic-optical modulators, a set of lenses and mirrors, and two beam splitters. The dispersed signal, produced by particles introduced in the liquid, is captured by means of a set of lenses that focus it on a photodetector (APD). By means of an electronic subsystem and an acquisition and processing subsystem (in Visual C++) we obtain the results and they are compared to the theoretical model (essentially parabolic profile).

I. INTRODUCCIÓN

Gracias al desarrollo por parte del Grupo de EEF-LIDAR de TSC-UPC de un instrumento de medida basado en sistemas LDA [1][2][3] (anemometría láser Doppler), somos capaces de realizar medidas de dos componentes de velocidad de cualquier tipo de blanco (sólido, líquido o gaseoso) con gran resolución, precisión, y con la ventaja de que el instrumento, a diferencia con los medidores clásicos, es no invasivo, de gran precisión y resolución. El primer experimento [4] se realizó sobre un blanco giratorio (disco de PVC con un pequeño motor) que sirvió para poder calibrar todo el sistema electrónico y adquisición, además de corroborar el buen funcionamiento del medidor. Más tarde, mediante la medida del movimiento de agua, con el sembrado de pequeñas partículas de vidrio dentro de un recipiente, pudimos asegurarnos de que el sistema también era capaz de medir líquidos [5]. En este artículo, presentamos las medidas sistemáticas del perfil o gradiente de velocidad de un fluido (agua líquida) a través de un conducto o tubo de sección circular en régimen laminar, a partir de un sembrado artificial de partículas de Poliamida-12, comparando los resultados experimentales frente a la teoría clásica.

II. INSTRUMENTO DE MEDIDA

El sistema de medida utiliza la técnica diferencial para detectar dos componentes de la velocidad de las partículas que fluyen por un fluido y discriminar el sentido de movimiento. El sistema final, denominado sistema radar

láser 2D-LDA, en configuración *forward scattering* o DHD, se presenta en la figura 1.

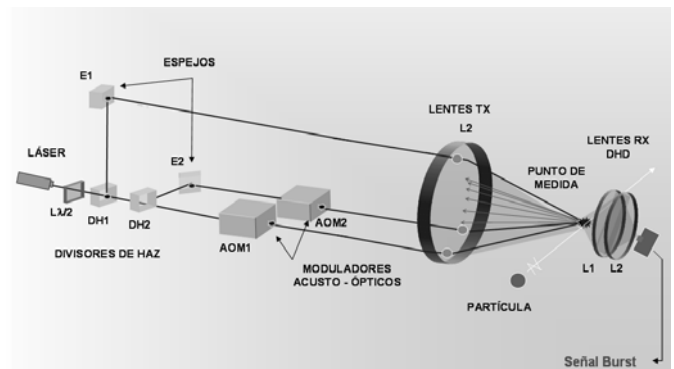


Fig. 1. Sistema Radar Láser 2D-LDA en DHD

Se utiliza como transmisor un láser de HeNe (20mW @633nm), con un diámetro del haz de 1.2mm, con polarización lineal y como receptor un APD polarizado a 190 V por una fuente de HV, seguido de un amplificador de transimpedancia. La luz generada por el láser es dividida en tres haces, mediante dos divisores de haz (uno de ellos polarizado) y un conjunto de espejos. Dos de los haces son desplazados en frecuencia mediante dos moduladores acustoópticos (AOM) de valor $f_{AOM1}=39.1\text{MHz}$, y $f_{AOM2}=45.1\text{MHz}$, mediante un acromato se focalizan los tres haces sobre el blanco. Formando un ángulo entre haces de $\alpha=4.5^\circ$, con una distancia focal de 250mm y de diámetro 40mm. Parte de la luz dispersada por las partículas será recogida, y focalizada por un conjunto de lentes RX, de distancia focal 100mm y de diámetro 25mm sobre el área activa de un módulo fotodetector APD. La interferencia producida por el cruce de tres haces de perfil gaussiano en un punto del fluido forman tres zonas de franjas, por interferencia de los haces dos a dos. Las partículas atraviesan las zonas de scattering, obteniéndose una señal Burst a la salida del APD, compuesta por una componente de baja frecuencia debida a la señal del pedestal (perfil gaussiano) y a otra de alta frecuencia o señal Doppler (producida por las

oscilaciones de la energía dispersada por la partícula al atravesar la zona de interferencia), donde su espectro estará formado por dos tonos centrados a las frecuencias de los AOM, que serán proporcionales a las dos componentes de la velocidad a detectar V_1 y V_2 .

Las dos componentes de velocidad, en función de la frecuencia de la señal Doppler de cada uno de los batidos, f_{D1} y f_{D2} , de la longitud de onda del láser λ , y del ángulo que forman los haces α , son

$$V_1 = \pm f_{D1} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha/2)} \quad (1)$$

$$V_2 = \pm f_{D2} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\alpha/2)} \quad (2)$$

Mediante un subsistema electrónico de acondicionamiento, se desplaza el espectro de la señal Doppler a una frecuencia intermedia de 3MHz, para su posterior procesamiento digital mediante una tarjeta de adquisición de datos (Gage), a una frecuencia de muestreo de 20MHz, la cual realiza la estimación espectral, a partir de la FFT [6], y presentación de datos en un entorno Visual C++ en un PC Pentium IV a tiempo real, consiguiendo un error máximo en la medida por debajo del 1%, realizando unas 30 medidas por segundo.

III. MONTAJE DEL EXPERIMENTO

Para presentar una serie de medidas sistemáticas de la velocidad del fluido la primera elección importante y fundamental es que tipo de fluido vamos a medir. Por su disponibilidad y la posibilidad de realizar experimentos sencillos en circuitos cerrados, la mejor elección es utilizar algún tipo de líquido, y queda claro que el agua es el mejor candidato.

Se precisa de algún montaje que nos permita impulsar al flujo de agua de forma controlada, con accesibilidad para realizar las medidas y, en la medida de lo posible, de manera tal que pueda obtenerse algún perfil conocido de velocidades.

Uno de los experimentos más realizados por su sencillez, es la medida de la velocidad de agua corriente en un tubo de sección circular [7], donde el perfil o gradiente de velocidad teórico es conocido.

Se dispuso un circuito cerrado, formado por un recipiente con el fluido y una bomba de agua que lo hace circular por un tubo de plástico. Hemos utilizado una pequeña bomba de agua para peceras, con un regulador que permite variar el flujo del agua y forzar la circulación del fluido a velocidad constante. Como se describe en la teoría general de los sistemas LDA, lo que realmente vamos a detectar no serán las moléculas que forman el fluido, en este caso de agua, sino las impurezas que contenga.

Para maximizar la intensidad de luz dispersada y mantener una buena cantidad de adquisiciones, la mejor opción es sembrar el fluido con partículas comerciales que faciliten las medidas. En nuestro caso, se utilizan partículas aproximadamente esféricas de Poliamida-12 (PSP-20), de

diámetro entre 5 y 35 μm Ref. 80A4011 de la empresa Dantec.

Una vez diseñado el circuito, necesitamos disponer de un punto de medida accesible por el medidor Radar láser Doppler. Recordemos que un sistema de este tipo, necesita disponer de una ventana de medida para que sea capaz de muestrear el fluido. Es decir, que la luz del medidor tiene que ser capaz de "ver" el fluido. Como la medida se realizará en un punto cualquiera del circuito cerrado, la mejor opción será intercalar, en el camino de circulación del agua, una pieza que nos permita introducir los haces láser Doppler dentro del fluido.

Con este propósito se construyó una pequeña pieza (manguito de medida), con sus caras anterior y posterior recubiertas por un material transparente (metacrilato) que permiten a la luz del medidor acceder al fluido que circula por él.

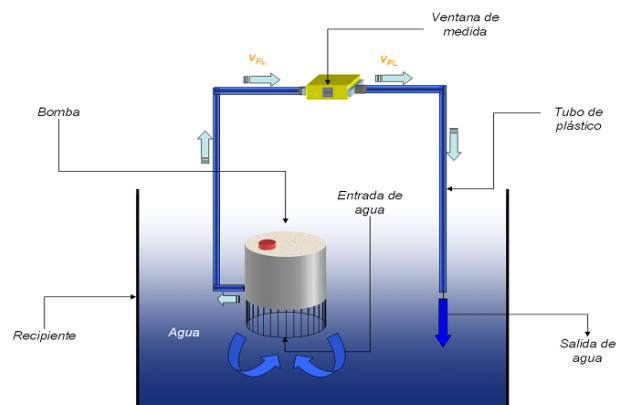


Fig. 2. Esquema del montaje utilizado para la medida de la velocidad de agua en un circuito cerrado.

Las dimensiones del manguito, mecanizado en el taller mecánico del grupo de EEF, son de, aproximadamente, 7.5 cm. de largo, con dos piezas roscadas en sus extremos para conectar el tubo de plástico de entrada y salida de agua, y de 2.5 cm. de altura y profundidad. En la parte central de la pieza se encuentra la ventana de medida, con dos piezas de metacrilato en sus dos caras, formando un acceso o punto de entrada de 1 cm., que coincide con el diámetro del tubo. Hay que destacar que, por motivos de mecanización, la ventana de medida no es de sección circular. Las paredes donde se han colocado las piezas de metacrilato, que permiten la entrada de los haces láser y la salida de la luz dispersada en dirección hacia delante (DHD), son planas y pegadas sobre el manguito de medida. Este tipo de ventana nos va a facilitar la posibilidad de realizar medidas en sentido transversal a la dirección del fluido, en una serie de puntos del diámetro del manguito.

El principal inconveniente a tener en cuenta en este montaje es que, al no ser una pieza perfectamente circular, las medidas del perfil de velocidad que vamos a realizar no coincidirán exactamente con las que teóricamente deberíamos haber obtenido. Por otro lado, tampoco podemos afirmar, y lo hemos podido comprobar experimentalmente, que la pequeña bomba de pecera utilizada genere un flujo constante de agua en todo instante de tiempo. A pesar de todo ello, el perfil de velocidad en un tubo de sección circular teórico podría ser una muy buena referencia para

confrontar con los valores obtenidos experimentalmente. Es cierto que la mejor opción hubiese sido realizar medidas de velocidad con algún montaje hidrodinámico calibrado y comprobado con otras técnicas de medida, pero debido a la imposibilidad de trasladar la parte óptica del prototipo del sistema 2D-LDA, hemos creído que este tipo de comparación, sabiendo que para un blanco sólido funciona perfectamente, puede ser totalmente válido.

IV. GRADIENTE O PERFIL DE VELOCIDAD EN EL INTERIOR DE UN TUBO

Si consideramos el movimiento de un fluido real viscoso por un tubo de sección circular [8], en el caso en que podamos descomponerlo en capas o cilindros coaxiales caracterizados cada uno de ellos por una velocidad determinada, paralela al tubo, "resbalando" una sobre otras, diremos que se mueve en régimen laminar o de *Poiseuille*. En este caso, en la capa en contacto con las paredes del tubo se tendrá velocidad nula, mientras que a medida que nos acercamos al eje del tubo irá aumentando la velocidad hasta su valor máximo. En definitiva, el gradiente de velocidad en función de la distancia radial r_t corresponde a una parábola, como se ha representado en la figura 3, de la forma

$$\frac{V_{FL}}{V_{FLmax}} = 1 - \left[\frac{r_t}{a_t} \right]^2 \quad (3)$$

donde V_{FL} es la velocidad del fluido, V_{FLmax} la velocidad en el eje del tubo, a_t el radio del tubo y r_t la distancia radial.

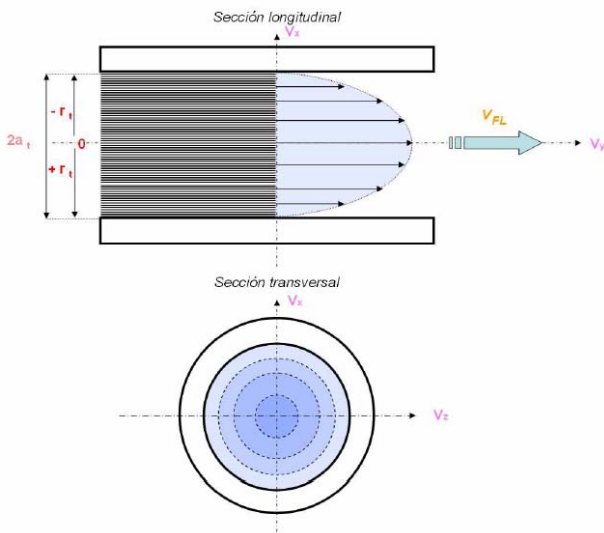


Fig. 3. Circulación laminar por un tubo. Distribución de velocidades.

El régimen laminar sólo será estable a velocidades relativamente pequeñas. A velocidades superiores a un cierto valor crítico (número de *Reynolds*), aparecen a veces pares de fuerzas interiores que producen rotaciones dentro de la masa líquida en movimiento de traslación, es decir, las líneas de corriente dejan de ser paralelas al eje del tubo formándose remolinos que mezclan el líquido próximo a las paredes con el existente, en un instante, en la proximidad del eje. En este caso se dice que el fluido está en régimen turbulento o de

Venturi. En nuestro caso particular, estamos en régimen laminar.

V. MEDIDAS Y RESULTADOS

Se presentan las medidas realizadas del perfil o gradiente de velocidad del tubo de sección circular, circulando por su interior agua corriente, en función de la componente radial r_t en todo el diámetro del tubo.

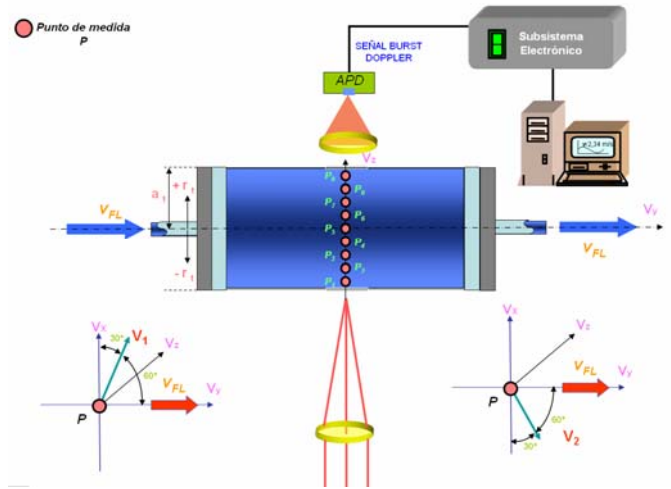


Fig. 4. Montaje del experimento de medida y componentes de velocidad medidas por el instrumento.

De las medidas realizadas en los nueve puntos presentados en la Fig. 4, a lo largo del eje Z, obtendremos los valores de la velocidad media $V_y = V_{FL}$ de 2000 medidas (512 muestras capturadas) y de su desviación típica en cada punto.

En las figuras 5 y 6 presentamos la evolución de la velocidad en función de la distancia radial y su desviación típica (s), para el caso de un disparo (partículas de SNR pequeñas) y cuatro disparos (partículas de SNR elevadas).

De las medidas realizadas podemos observar que, promediando todos los datos, sin discriminar ninguna de ellas, obtenemos los siguientes valores de velocidad (media y desviación típica) de las dos componentes, en el centro del tubo (punto P_5)

$$V_1|_{P_5} \cong 1.21m/s \quad s_1|_{P_5} \cong 12cm/s \quad (4)$$

$$V_2|_{P_5} \cong 1.21m/s \quad s_2|_{P_5} \cong 12cm/s \quad (5)$$

Si ahora convertimos las componentes de velocidad detectadas por el anemómetro Láser Doppler en las componentes de velocidad ortogonales definidas en el eje X (V_x), y en el eje Y (V_y), de la figura 4, obtenemos

$$V_x|_{P_5} \cong 0 m/s \quad s_x|_{P_5} \cong 17cm/s \quad (6)$$

$$V_y|_{P_5} \cong 2.42 m/s \quad s_y|_{P_5} \cong 17cm/s \quad (7)$$

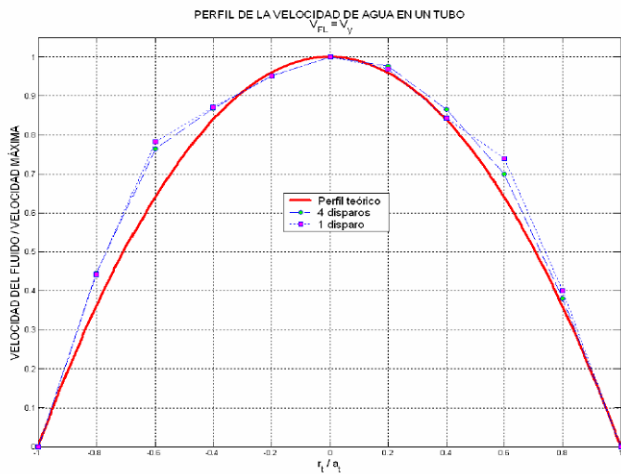


Fig. 5. Medidas del perfil de velocidad de agua por un tubo de sección circular.

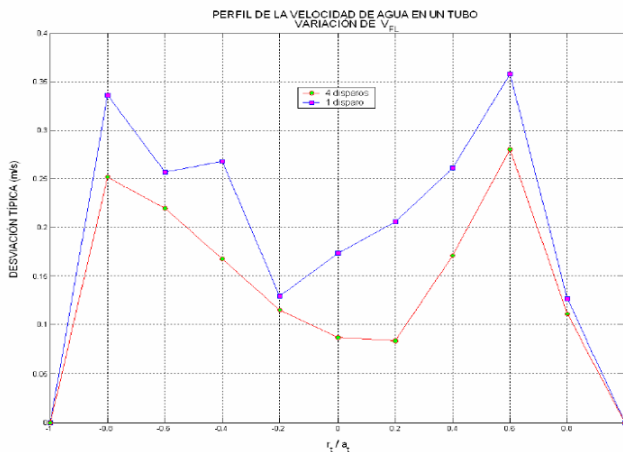


Fig. 6. Medidas de la variación (desviación típica) del perfil de velocidad de agua por un tubo de sección circular.

Como era de prever, el fluido en el experimento se mueve en dirección al eje Y , sin componente en el eje X , y por eso la velocidad V_y es de 2.42 m/s en el punto de medida P_5 que coincide con el eje del tubo de sección circular, y el perfil parabólico queda totalmente comprobado.

Las variaciones de velocidad en las dos componentes indican no solo el error implícito de todos los subsistemas electrónicos, adquisición y estimación espectral, sino también las posibles turbulencias en el medio de propagación.

VI. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en las figuras anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

- EL perfil de velocidad real obtenido por el prototipo del sistema 2D-LDA, confirma la evolución parabólica con ciertas oscilaciones o turbulencias en los resultados. Esto

coincide con la teoría del experimento hidrodinámico, ya que en nuestro caso el número de *Reynolds* era de 3000, y eso supone que debe esperarse un régimen laminar pero con pequeñas turbulencias.

- Las desviaciones típicas mostradas resultan igualmente pequeñas. No obstante la medida de la componente V_1 presenta mayor variabilidad. Esto podría estar relacionado con algún desequilibrio en cuanto a la potencia óptica de los tres haces y a su eficiencia de la formación de las franjas.

- Las variaciones de la velocidad en los diferentes puntos de medida, caracterizadas por su desviación típica, aumentan en las zonas del tubo más próximas a las paredes, mientras que en el centro la estimación tiene menor variación. Esto podría ser debido a que el fluido es, relativamente, más turbulento en esas regiones que en la zona central.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Gobierno Español que ha financiado este trabajo a través del programa CICYT PETRI 95-0249-OP, en colaboración con la empresa Monocrom S.L.

REFERENCIAS

- [1] L.E. Drain, *The Laser Doppler Technique*, Addison-Wesley (1975).
- [2] Yeh, Y. and Cummings H. Z., *Localized fluid flow Measurements with an HeNe Laser Spectrometer*, Applied Physics Letters, 4, 176-8 (1964).
- [3] David Garcia-Vizcaino, Sistema láser de medida de velocidad por efecto Doppler de bajo coste para aplicaciones industriales e hidrodinámicas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). 2005
- [4] David Garcia-Vizcaino, F. Dios, J. Reolons y A. Comerón, Medidas de la velocidad de un blanco sólido con un sistema radar láser 2D-LDA Congreso XX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI2006. Universidad de Oviedo. 2006
- [5] David Garcia-Vizcaino, F. Dios, J. Reolons y A. Comerón, Medidas Experimentales de la Velocidad de un Fluido con un anemómetro Láser Doppler (2D-LDA), Congreso XVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI2003. Universidad a Coruña. 2003
- [6] F. Dios, A. Comerón and D. Garcia-Vizcaino, On the choice of the number of samples in Laser Doppler Anemometry signal processing. Optical Engineering. 2001
- [7] F. Durst, A. Melling, and J. H. Whitelaw. *Principles and practice of laser- Doppler anemometry*. Academic Press, London/New York/San Francisco, 1976
- [8] Luis Del Arco Vicente. *Física para Ciencia e Ingeniería*. Ariel, 1978.