
Determinación del Gradiente de Velocidad en un Flujo Real por Medio de Técnicas Unidimensionales de Anemometría Láser Doppler

Alberto Osorio y Efraín Solarte

Grupo de Óptica Cuántica, Depto. de Física, Universidad del Valle, A.A. 25360,
Santiago de Cali, Colombia

RESUMEN

Los sistemas ópticos de anemometría Láser Doppler (LDA: Laser Doppler Anemometry) constituyen una alternativa no invasiva y de alta resolución para determinar la dinámica de fluidos. Estos sistemas permiten diseños que difícilmente pueden ser superados por otros anemómetros. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de los cambios en la frecuencia de la luz esparcida, efecto Doppler, por las partículas del fluido iluminadas por una fuente de luz coherente. Los corrimientos de frecuencia son proporcionales a la velocidad de las partículas o del fluido, si se consideran partículas dispersoras de baja densidad y no son afectados por parámetros externos al fluido como la presión o la temperatura. En este trabajo, se presentan las medidas de los cambios en la frecuencia Doppler, entregadas por un sistema LDA unidimensional. Estos datos permitieron calcular las diferentes velocidades del líquido, a lo largo de la sección transversal de un tubo circular, hallándose un aumento progresivo desde $0.05 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, para posiciones cercanas a las paredes del tubo, hasta valores de 0.30 cm/s , para la posición central. Con estos datos se obtuvo un perfil o gradiente de velocidad parabólico, finalmente se muestra la dinámica del flujo real utilizado, forzado por acción gravitatoria.

Palabras Clave: Anemometría Láser Doppler, PMT, Velocidad de un Fluido, Franjas de Interferencia, FFT.

ABSTRACT

Laser Doppler Anemometry optical systems (LDA) are very interesting solutions for non-invasive fluid dynamics' measurements. These optical systems allow a very precise and flexible anemometer design, which could not be achieved by any other anemometry system. Due to the measurement principle, depending on the scattered light Doppler shift, which is proportional to the source-detector's relative velocity, the rapidity of the in fluid contained scatter particles or the fluid velocity, by low scatters' density, can be determined. These measurements are not affected by the fluid external conditions, like pressure or temperature. In this work, the experimental measurements of Doppler shifts in a 1D-LDA system are presented. The velocity gradient across the section of a circular tube is calculated from the measurements, a parabolic velocity profile with velocities from $0.05 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, at the tube boundary, up to $0.30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, at tube the central position is found. Finally, the dynamics of the real gravity forced fluid is presented.

Keywords: Laser Doppler anemometry, PMT, Fluid velocity, Light interference, FFT.

1. INTRODUCCIÓN

Para determinar la velocidad de flujos líquidos, se han desarrollado diferentes técnicas basadas en principios hidrodinámicos, o en principios ópticos basados en el efecto Doppler de la luz. Al comparar las características exactitud y precisión y las posibilidades de aplicación, se encuentra que hay una diferencia significativa, mostrando que las técnicas ópticas, conocidas genéricamente como *Laser Doppler Anemometry*, (LDA) son una muy buena alternativa anemométrica. La Anemometría Láser Doppler, como técnica no invasiva, se centra en la medición de la velocidad de las partículas de baja densidad que son transportadas por los fluidos, para determinar así la velocidad de los flujos que llevan la misma velocidad¹.

La técnica LDA aplicada bajo diferentes configuraciones ópticas¹, entre ellas la diferencial Doppler, o de franjas y que tiene como ventajas principales una buena respuesta al ruido (SNR)², una complejidad óptica moderada, y que se basa

¹ Configuraciones simétricas, haz de referencia y diferencial.

principalmente en la detección de los cambios de la luz esparcida por las partículas suspendidas en el fluido, que continuamente transitan o cruzan perpendicularmente una zona de interferencia, creada por el cruce de dos haces coherentes que proviene de una misma fuente de luz, estas dispersiones son focalizadas sobre un fotodetector, que entrega una frecuencia igual a la diferencia del desplazamiento Doppler, correspondiente a los ángulos de dispersión, y en donde la velocidad de la partícula será proporcional a esta diferencia en frecuencia $\Delta\nu_D$, al ángulo ente los haces y a la longitud de onda incidente. La ecuación (1) muestra esta relación:

$$V_x = \frac{\Delta\nu_D \lambda_{in}}{2\text{sen}\theta} \quad (1)$$

El carácter gaussiano de los haces, hace que la zona de scattering tenga una forma elipsoidal con dimensiones D_x , D_y y D_z , un número de franjas N_{fr} y una separación entre franjas δ_{fr} . A continuación se presentan las ecuaciones que permiten determinar los parámetros de la zona de interferencia. Las figuras 2 y 3, muestran el cruce de los haces y la simulación del volumen de medida respectivamente³.

$$D_x = \frac{5f_{L1}\lambda_{in}}{2\pi r_0 \cos(\theta)}, \quad D_y = \frac{5f_{L1}\lambda_{in}}{2\pi r_0}, \quad D_z = \frac{5f_{L1}\lambda_{in}}{2\pi r_0 \text{sen}(\theta)} \quad (2)$$

$$N_{fr} = \frac{10f_{L1} \text{tag}(\theta)}{2\pi r_0} \quad (3)$$

$$\delta_{fr} = \frac{\lambda_{in}}{2\text{sen}(\theta)}. \quad (4)$$

Donde f_{L1} corresponde a la distancia focal de la lente que genera el cruce de los haces, r_0 al radio del haz láser, λ_{in} a la longitud de onda de la fuente y θ al ángulo entre el eje óptico y uno de los haces.

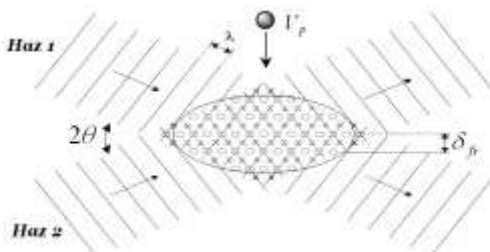


Figura 1. Cruce de haces que forman el volumen de medida.

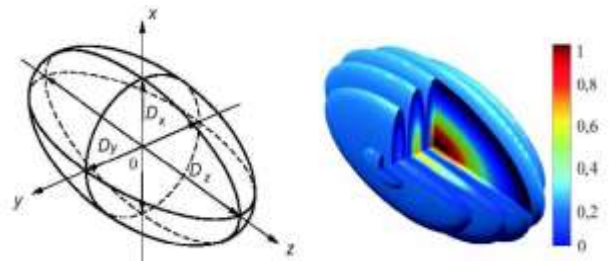


Figura 2. Simulación del volumen de medida.

La señal entregada por el fotodetector, comúnmente llamada señal Burst Doppler, está formada por dos señales: la primera es la señal modulada, que aparece por el paso alternado de las partículas de una franja iluminada a una oscura, la segunda producida por el perfil gaussiano del haz láser, llamada señal pedestal o portadora. La forma típica de estas señales se muestra en la Figura 3.

Como la señal Doppler se encuentra en el dominio del tiempo y la diferencia en frecuencia Doppler en el dominio de las frecuencias, se hace necesario el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) como herramienta de análisis, para determinar el valor de $\Delta\nu_D$.

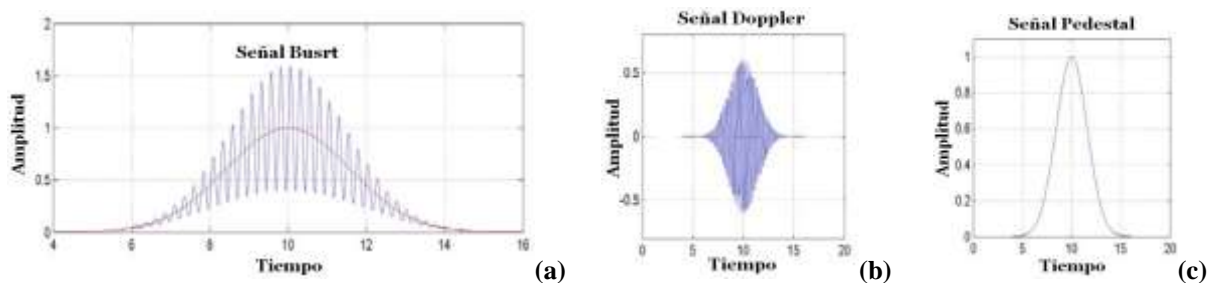


Figura 3. Señal Burst Doppler (a) y sus respectivas componentes moduladora (b) y pedestal (c).

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

2.1. Etapa Óptica

Se divide un haz láser de $25mW$ ($532nm$) en dos haces por medio de un BS 50/50. Luego, se redirecciona uno de los haces, de tal forma que los dos sean paralelos, con una separación de $3.4cm$. Una primera lente de $100mm$ de distancia focal permite que los haces se crucen al interior de un tubo de vidrio de diámetro interno de $12mm$. Posteriormente, estos haces son interrumpidos por un diafragma de $1.7mm$, que se encuentra a $8.5cm$ del volumen de medida. Este diafragma se utiliza para dejar pasar únicamente las dispersiones generadas dentro del fluido. Finalmente, se ubica una segunda lente de $50mm$ de distancia focal a $3.5cm$ del diafragma, que enfoca la luz en una abertura o pinhole de $600\mu m$ de diámetro, ubicado sobre la ventana del PMT a $5.5cm$ de la segunda lente. Las Figuras 4 y 5 muestran el esquema y el montaje experimental respectivamente.

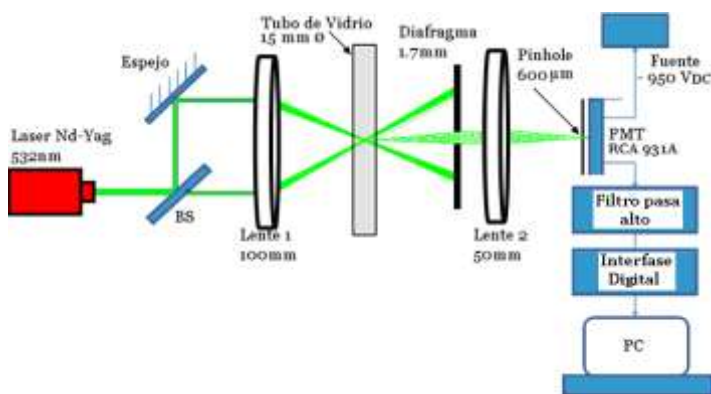


Figura 4. Diagrama esquemático del montaje.

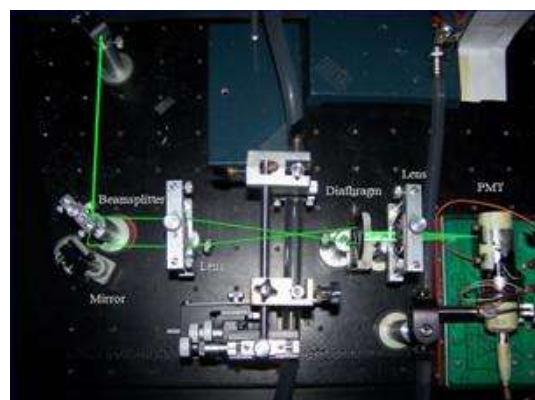


Figura 5. Fotografía del arreglo experimental.

Para garantizar un patrón de interferencia bien definido, se hicieron pasar los dos haces por un pinhole de $15\mu m$, obteniendo dos discos de Airy, que corresponden a cada uno de los haces, como se muestra en la Figura 6. En la Figura 7 se puede apreciar una vista superior de los haces ya calibrados cruzándose dentro del fluido.

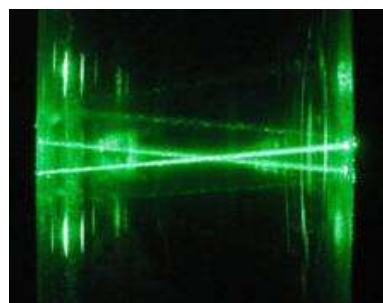
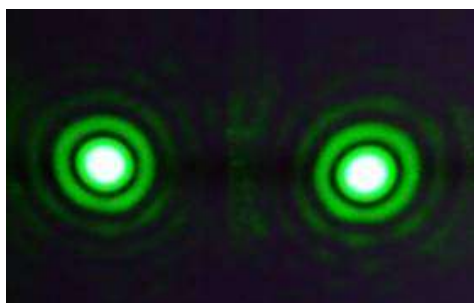


Figura 6. Anillos de Airy a causa del paso de los haces por un pinhole de $15\mu\text{m}$.

Figura 7. Vista superior del cruce de los haces dentro del fluido.

2.2. Etapa de Detección y Procesamiento

El fotodetector PMT (RCA 931A) funciona con un voltaje de -959 VDC . La señal entregada por el PMT pasa por un filtro, pasa-altos a 400Hz , y es posteriormente procesada por una interfase (DSO 2100 IBM PC-based oscilloscope; HUNG CHANG) que realiza la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En la Figura 8 se pueden ver simultáneamente la señal Doppler (abajo) y su respectiva FFT (arriba).

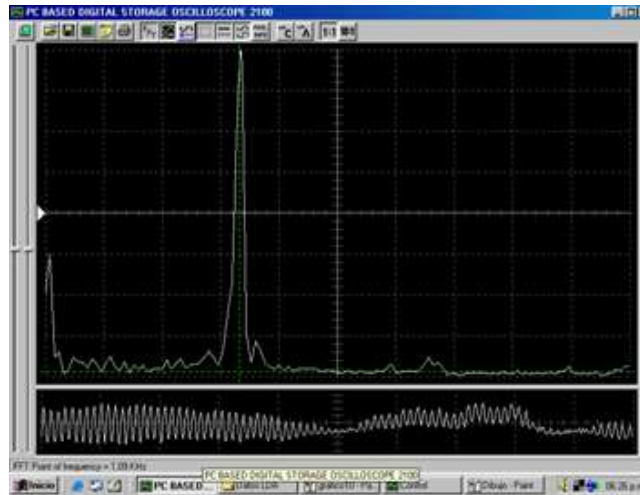


Figura 8. Señal Doppler entregada por el PTM (inferior) y su FFT en 1090 Hz (superior).

3. RESULTADOS

La geometría del sistema y la ley de Snell permitieron determinar el ángulo entre el eje óptico y uno de los haces dentro del líquido ($\theta = 6.75 \pm 0.01\text{ grados}$), por otro lado, utilizando las ecuaciones iniciales se calcularon las dimensiones del volumen de medida ($D_x = 85.3 \pm 0.1\mu\text{m}$, $D_y = 84.7 \pm 0.1\mu\text{m}$ y $D_z = 720 \pm 61\mu\text{m}$), el número de franjas ($N_f = 38\ 84.7 \pm 4$) y la separación entre franjas ($\delta_{fr} = 2.3 \pm 0.2\mu\text{m}$).

3.1. Medidas de Velocidad de Flujo

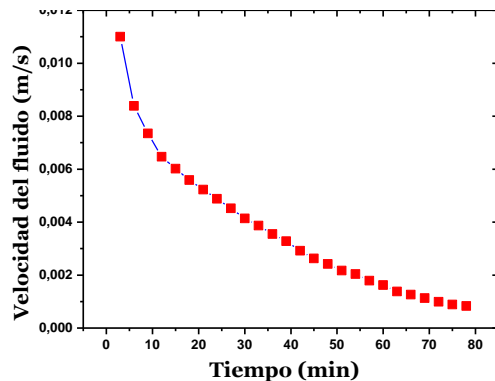


Figura 9. Velocidad de fluido en función del tiempo (Tiempo total 72 minutos)

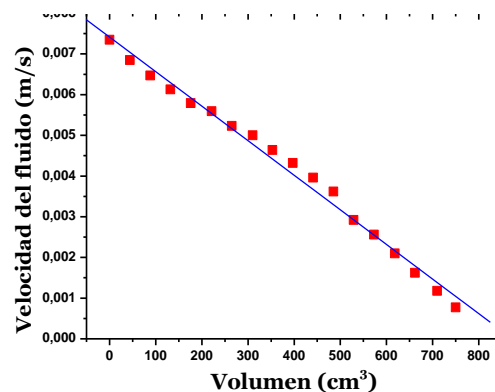


Figura 10. Velocidad de fluido en función del volumen (Volumen total 882cm^3)

Se utilizó una válvula para regular la velocidad del flujo del líquido y garantizar que el volumen total contenido en depósito de 1500 ml aproximadamente, permaneciera dentro de los límites de un régimen laminar a velocidad constante; sin embargo, los resultados obtenidos muestran un flujo laminar con velocidad variable, esto debido a las características del sistema impulsor del líquido, accionado por efecto gravitatorio. Las figuras 9 y 10 muestran dos graficas que caracterizan el sistema hidrodinámico.

Con la ayuda de un posicionador 3D se registraron 20 velocidades a lo largo de la sección transversal del tubo, observando un comportamiento simétrico o parabólico con respecto a la posición radial cero, correspondiente al centro del tubo, que a su vez coincide con la posición de la máxima velocidad alcanzada por el flujo en esta prueba (0.312 cm/s). Las menores velocidades de flujo se presentan en cercanía a las paredes del ducto y estuvieron en el orden de los 0.06 cm/s, como se puede apreciar en la Figura 11.

La ecuación de ajuste para la curva presentada en la Figura 11 [$y = 0.998 \pm 0.008 - (0.83 \pm 0.02)x^2$], junto a la ecuación de *Poiseuille* que rige los flujos laminares, permitieron determinar que las medidas realizadas tuvieron un error porcentual del 9%, dejando ver la eficiencia de esta técnica anemométrica.

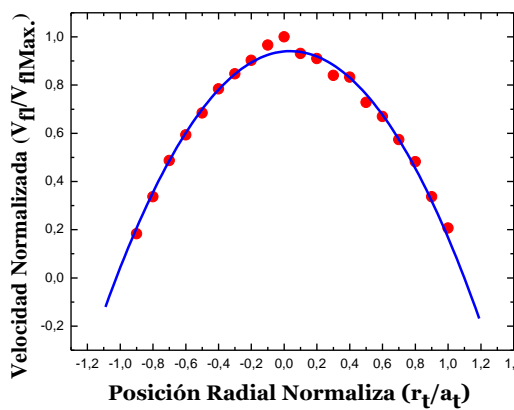


Figura 11. Distribución de las velocidades de flujo normalizadas, a lo largo de la posición radial normalizada.

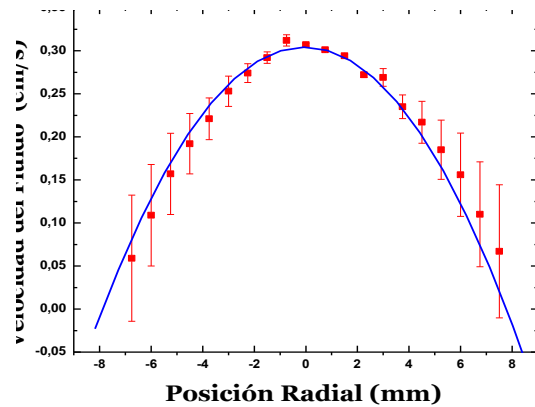


Figura 12. Perfil de velocidades a lo largo del diámetro del tubo.

En la gráfica de la figura 12. se presentan dos perfiles: el primero corresponde a la distribución de las velocidades experimentales del flujo (rojo), y el segundo (azul), generado a partir de la modelación en Matlab de la ecuación de *Poiseuille*, y en donde se puede apreciar un aumento progresivo, en la magnitud de las desviaciones estándar en cercanías a las paredes del tubo, fenómeno que podría estar relacionado con los efectos gravitacionales que afectan los líquidos que fluyen por ductos horizontales. Otro factor importante está relacionado con la condición del pleno desarrollo de los perfiles para tubos largos y que pudo afectar de una u otra forma, puesto que el punto de medida se encontraba a escasos 10cm de la unión tubo de vidrio – manguera.

4. CONCLUSIONES

Se midieron velocidades de los milímetros por segundo, que permitieron determinar el perfil de velocidad parabólico al interior de un ducto de sección circular para un líquido en régimen laminar. La modelación teórica y su comparación con los resultados dejan ver el buen funcionamiento del sistema LDA implementado. Los errores porcentuales máximos fueron del 9%. Se mostró que es posible detectar señales Burst Doppler con instrumentos electrónicos de mediana velocidad, lo cual permite la reducción de costos de este tipo de sistemas anemométricos. Este trabajo puede ser adaptado para realizar mediciones en fluidos reales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle por todo el apoyo brindado en la realización y la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

-
1. K.D. Jensen, "Flow Measurements", Dantec Dynamics Inc, Vol XXVI, No. 4, 2004
 2. D.G Vizcaino, "Sistema Láser de Medida de Velocidad por Efecto Doppler de Bajo Coste para Aplicaciones Industriales e Hidrodinámicas", Tesis Doctoral, Univesitat Politècnica de Catalunya, 2005
 3. F. Durst, A. Melling and J.H. Whitelaw, *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*, Academic Press, New York, 1976.