

## MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE FLUIDOS POR EFECTO DOPPLER

Boris Alberto López Zubieta<sup>1</sup>

Carrera de Física—UMSA  
La Paz—Bolivia

### RESUMEN

Este artículo describe el diseño y construcción de un anemómetro láser con equipos, instrumentos e insumos existentes en los laboratorios de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

El anemómetro láser permite medir velocidades de fluidos, sean estos líquidos o gaseosos, sin interferir en la dinámica de estos. Su principio de funcionamiento se basa en la interferencia producida por partículas suspendidas en el fluido que dispersan la onda electromagnética proveniente de un haz láser.

A pesar de las grandes limitaciones experimentales y tecnológicas propias de los laboratorios del país, el resultado fue exitoso.

*Descriptores: dinámica de fluidos — dispersión de ondas electromagnéticas — procedimientos de laboratorio*

### ABSTRACT

The present article describes the design and construction of an laser anemometer using the equipment and instrumentation of laboratories at the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). The laser anemometer allows for the measurement of fluid speeds, liquid or gaseous, without interfering with its dynamics. Its principle of operation is based on the interference produced by particles suspended in the fluid that disperse the electromagnetic wave produced by the laser. In spite of the experimental and technological limitations of our laboratories, the result was successful.

*Key words: fluid dynamics — dispersion of electromagnetic waves — laboratory procedures*

### 1. INTRODUCCIÓN

En 1964 Yeh y Cummins [18] idearon un arreglo experimental que permitía medir velocidades de fluidos sin interferir en la dinámica de este. Ésto se logró gracias a la aparición de los primeros láseres, que proporcionan una fuente de luz casi monocromática altamente coherente, y también a la aplicación de conceptos de interferencia, que permitieron medir la señal luminosa dispersada por las partículas en suspensión, las cuales deben insertarse al fluido. En una primera aproximación, la velocidad de las partículas coinciden con la velocidad del fluido.

Entre las múltiples ventajas de este equipo está la de no requerir calibración, no depende la

medición de la posición espacial del detector y principalmente, no interfiere con la dinámica del fluido.

La descripción de la construcción de un equipo de medición de velocidades de fluidos por efecto Doppler (LDA por sus siglas en inglés, *Laser Doppler Aneometry*) con componentes existentes en el país es parte del objetivo de este artículo.

Este trabajo es la tesis de grado del autor de este resumen, que fue realizada en el laboratorio de óptica de la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés, en La Paz Bolivia.

### 2. UN POCO DE TEORÍA

El desplazamiento en la frecuencia por efecto Doppler a escala astronómica es fácilmente visible y da una prueba inequívoca de la expansión del

<sup>1</sup>Email: pulsonocturno@hotmail.com

universo. A escala terrestre, las más altas velocidades típicas de fluidos resultan en corrimientos insignificantes con relación a la frecuencia de la luz ( $\approx 10^{15}$  Hz), no habiendo sido posible medir este cambio directamente por algún tipo de detector. Esto cambió en los últimos tiempos con la invención del espectrómetro óptico de alta resolución, pero este equipo sólo es aplicable a fluidos con velocidades supersónicas. Para velocidades subsónicas es necesario recurrir a técnicas de interferencia como ser la del heterodinado.

La interacción entre ondas planas y partículas esféricas refractantes fue abordada por Mie en 1908, a partir de la electrodinámica cuántica clásica de Maxwell y Lorentz.

Cuando una onda electromagnética plana incide con la superficie de una partícula en movimiento de diámetro mayor que su longitud de onda, se genera una onda esférica de frecuencia distinta a la original, esto debido al efecto Doppler [1][8][13][14][16][17][18].

Ahora, debemos considerar a dos ondas electromagnéticas planas procedentes de distintas regiones del espacio, con igual frecuencia y con un ángulo  $\alpha$  entre los frentes de onda. El par de ondas incide sobre la superficie de una partícula modelo [1], y por la teoría de Mie, se generan un par de ondas eléctricas esféricas. Este par de ondas tiene un segundo corrimiento Doppler debido a que ahora el receptor (partícula) se convierte en emisor en movimiento respecto al detector.

El receptor o detector sólo puede medir la intensidad, que es el cuadrado del valor absoluto del campo eléctrico de la onda, entonces, el detector en este caso mide la suma de las intensidades del par de ondas esféricas que interactuaron con la partícula. La suma de estas intensidades es posible de visualizar con algún tipo de graficador, como una señal de voltaje con modulación periódica. Esta modulación es de interés, ya que contiene la información de la velocidad de la partícula [1][8][16].

La frecuencia de modulación es también denominada frecuencia Doppler y es uno de los parámetros importantes para la detección de la señal dispersada por la partícula, los otros parámetros son la visibilidad o calidad de la señal y la intensidad.

La ecuación que liga la frecuencia de modulación con la velocidad de la partícula es de fácil deducción utilizando sencillas consideraciones físicas [1][8][18]:

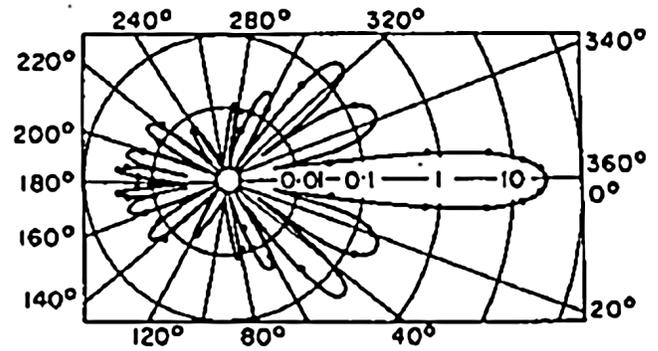


Figura 1. Diagrama polar de intensidades de Mie para dos ondas incidentes sobre una única partícula. Las ondas provienen del lado izquierdo de la gráfica, con un ángulo  $\alpha$  entre los haces.

$$\nu_D = \frac{2 \operatorname{sen}(\alpha/2)}{\lambda} v_y, \quad (1)$$

donde  $\nu_D$  es la frecuencia Doppler;  $\alpha$  es el ángulo que existe entre los haces que inciden sobre la partícula;  $\lambda$  es la longitud de onda de la onda incidente;  $v_y$  es la velocidad de la componente normal a la bisectriz del ángulo  $\alpha$  sobre el plano que contiene a los dos haces.

El otro parámetro mencionado es la visibilidad o calidad de la señal [1] y está definida por una relación de máximos y mínimos de la intensidad que llega al detector. Desarrollando la relación mencionada se llega a una ecuación que contiene los vectores polarización de las ondas eléctricas y sus intensidades:

$$\eta = \frac{2\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2 \sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}. \quad (2)$$

Observando la ecuación (2), se puede ver que para que la visibilidad sea máxima (ideal  $\eta = 1$ ), los vectores de polarización deben ser paralelos, entonces, perpendiculares al plano que contiene los dos haces incidentes sobre la partícula, y además, las intensidades recibidas tienen que ser iguales.

En la región de cruce de los haces se genera un elipsoide de revolución, muy similar a una "sandía", de perfil de intensidad gaussiano. Utilizando la definición de diámetro de un haz láser para definir el volumen de medida de la zona de intercepción como aquél cuya intensidad en la periferia es  $1/e^2$  veces la intensidad en el centro del haz. En el caso del volumen de medida, la intensidad máxima será la suma de las intensidades de los dos haces, el elipsoide tendrá su eje mayor en la línea que de-

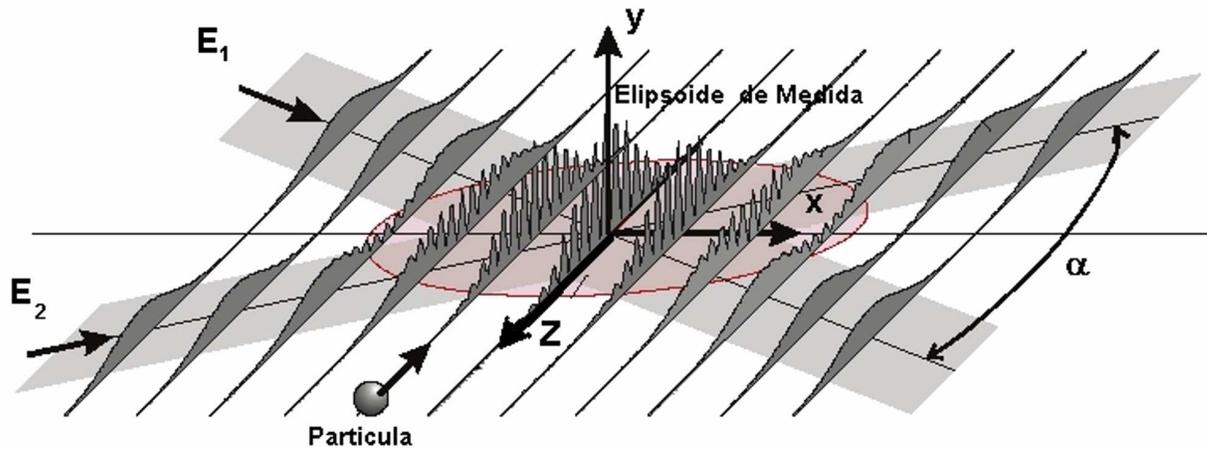


Figura 2. Elipsoide de medida generado por la interferencia de dos ondas eléctricas  $E_1$  y  $E_2$ . En el área de interferencia se producen regiones de luz (crestas) y sombra (valles). La gráfica es un diagrama de intensidades que muestra la estructura gaussiana de los haces incidentes y del elipsoide de medida. Una partícula que pasa por esta región provoca una ráfaga de “explosiones” de luz.

fine la bisectriz del ángulo formado por los haces incidentes o el eje óptico del sistema.

Por esa razón, la señal buscada tendrá dos componentes, una de baja frecuencia o pedestal, que tiene, como dijimos, la estructura gaussiana del haz, que es imprescindible filtrar, y una segunda de alta frecuencia, que es la señal buscada, que tiene forma de un paquete de ondas, también llamado *Bursts* o “explosiones”.

Por otro lado existen otros aspectos que considerar y están relacionados con la localización espacial del detector y con el tamaño de la partícula que incide sobre el volumen de medida.

Como mencionamos antes, Mie describió la interacción de partículas de tamaño similar a la longitud de onda incidente sobre ella. Uno de los resultados importantes de su trabajo fue que la intensidad de la radiación dispersada era función del ángulo de observación. La obtención de las gráficas que describen esta situación son excesivamente complejos para los fines de este texto.

Lo que nos interesa de estas gráficas es que la máxima intensidad dispersada está en dirección del haz incidente ( $\theta = 0^\circ$ ) y por el contrario existe un mínimo para la dirección opuesta ( $\theta = 180^\circ$ ). En caso de tratarse de partículas metálicas, la situación se invierte. Este resultado es muy importante en la configuración del equipo, ya que existen tres técnicas básicas: Dispersión hacia adelante, dispersión hacia atrás y dispersión fuera del eje, que serán abordadas un poco más adelante.

### 3. MODELO DE FRANJAS DE INTERFERENCIA

Este es un modelo alternativo al modelo clásico expuesto en párrafos anteriores, pero es capaz de explicar de una manera intuitiva los principales aspectos de esta técnica. Paradójicamente en la deducción de las ecuaciones no interviene el efecto Doppler.

Este modelo sólo es utilizable para el caso de dos ondas eléctricas interceptándose sobre partículas suspendidas en el fluido.

La utilidad de este modelo radica en que permite obtener parámetros importantes, como ser las dimensiones del volumen de medida y el número de franjas de interferencia que se genera en el volumen de medida [1][2].

En el volumen de medida generado se forman regiones de luz y sombra (figura 2). Al pasar una partícula por una región de luz se produce un destello o *Bursts* que llega al detector y por el contrario, si pasa por una región de sombra, no existe señal, lográndose de esta forma una secuencia de destellos de frecuencia igual al lado derecho de (1), con  $v_y$  como la componente de la velocidad de la partícula perpendicular a las franjas de interferencia.

Cada franja tiene una intensidad distinta a la franja precedente, debido a la estructura gaussiana del elipsoide. Este fenómeno produce una variación temporal en la intensidad de la señal que llega al detector.

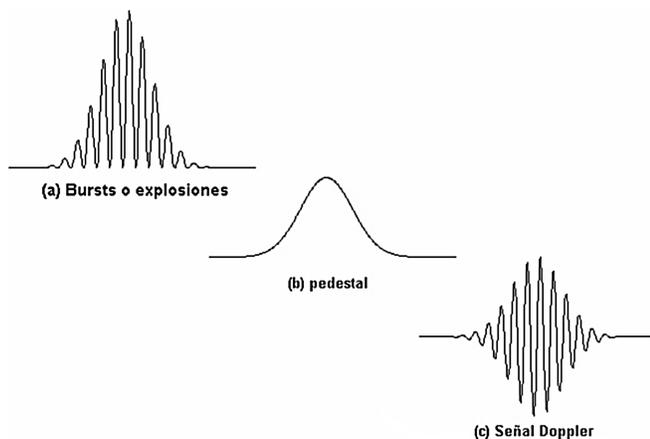


Figura 3. Muestra de las señales que intervienen en la detección (a) “explosiones” o *Bursts* (b) Señal de baja frecuencia o “pedestal” (c) Señal de alta frecuencia o “señal Doppler”.

#### 4. PARTÍCULAS DE DOPADO

Como fue descrita anteriormente, esta técnica de medición de velocidades de fluidos es posible gracias a la dispersión de la luz sobre las partículas sembradas al fluido de estudio, provocando el heterodinado en la superficie del detector o en un divisor de onda.

Las partículas, por consecuencia, tienen que tener un tamaño adecuado para que se pueda cumplir la aproximación de que la velocidad de las partículas es la velocidad del fluido.

El límite inferior del tamaño de las partículas lo marca la potencia del láser y la localización espacial del detector [1][8].

El límite superior lo marca la teoría de Bassett [1], que describe el arrastre unidimensional de partículas esféricas con velocidad no necesariamente igual a la velocidad de la partícula en cuestión.

#### 5. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

Como se describió antes, la señal que nos interesa contiene dos componentes de frecuencias distintas, la señal eléctrica en forma de corriente originada en el detector tiene la forma de la figura 3a; una de ellas es de baja frecuencia, que llamamos pedestal (figura 3b) y la otra señal es de alta frecuencia y también denominada frecuencia Doppler, que es la que nos interesa. En la frecuencia de la señal Doppler esta la información que necesitamos.

Es importante eliminar la señal pedestal ya que no contiene información que nos sirva y es perjudicial porque modula a la señal Doppler, provocando distorsión de la onda que proviene del volumen de

medida.

Para este fin, son utilizados filtros electrónicos pasa banda en la señal de salida del detector.

Una vez eliminado el pedestal existen varias formas de procesar la señal Doppler y extraer el valor de la frecuencia.

Se debe analizar a la hora de elegir el método de análisis las propiedades del fluido, la velocidad máxima, la velocidad media, el espectro de energía, la velocidad instantánea, y la disponibilidad de equipo y componentes.

Podemos mencionar los siguientes métodos de procesamiento de señal [1][14][17][16]:

**Análisis Espectral:** Esta técnica registra la señal proveniente del detector y partiendo de la descomposición de armónicos, se halla la frecuencia Doppler.

**Seguidor de Frecuencias:** Se basa en un circuito electrónico que sigue los cambios en la frecuencia de la señal entrante y proporciona como resultado un voltaje proporcional a la frecuencia Doppler.

**Banco de Filtros:** Consiste en una batería de filtros pasa banda colocados en paralelo que permiten obtener una estima en tiempo real del espectro de la señal Doppler.

**Correlación de Fotones:** Esta es una técnica que se aplica sólo en situaciones extremas (baja intensidad, fluidos sin dopado, medidas a larga distancia). Consiste básicamente en medir las fluctuaciones respecto del tiempo medio de llegada de los fotones individuales. El periodo de la función de autocorrelación temporal del número de fotones corresponde a la frecuencia Doppler.

**Contadores de Periodos:** Este es el sistema más difundido. Consiste en medir el tiempo que tarda la señal en completar un número de ciclos prefijado.

#### 6. DETALLES DE CONSTRUCCIÓN

Existen tres métodos para captar la señal dispersada por las partículas del fluido. Estos son: Método de haz referencia, método heterodino simétrico y método heterodino diferencial.

El primero se basa en la interferencia producida entre una onda electromagnética dispersada por el dopado y una segunda onda que incide directamente sobre el detector. Este tipo de montaje dejó de ser utilizado por sus elevados problemas técnicos en la década de los 70.

El segundo método utiliza un único haz enfocado en una pequeña región donde pasa el fluido dopado. La onda esférica generada en la interac-

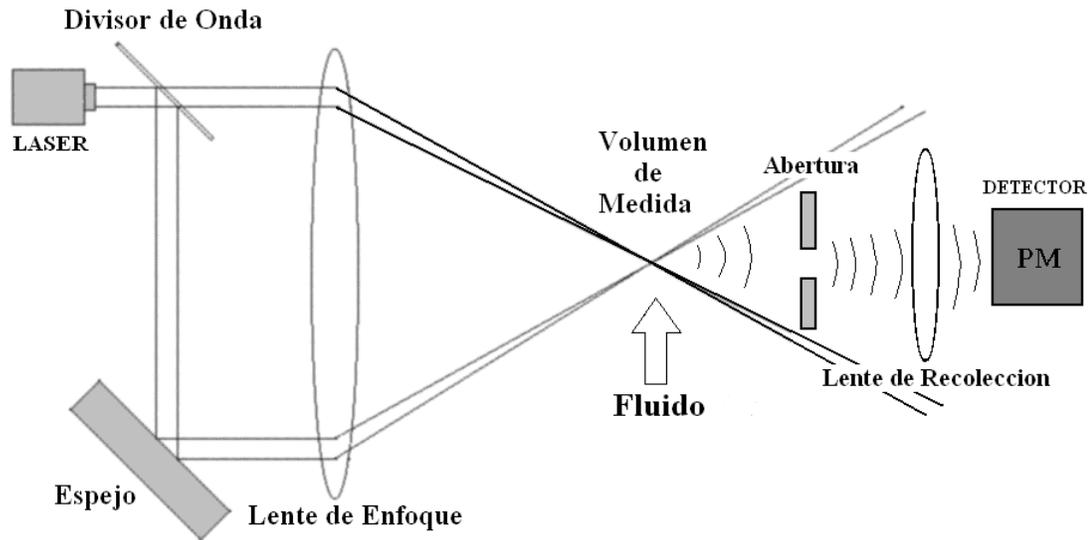


Figura 4. Sistema tipo “dispersión hacia adelante”. El detector está frente al volumen de medida. La abertura permite el ingreso de solamente la luz dispersada proveniente del volumen de medida. Este sistema es ideal por su elevado aprovechamiento de la intensidad de luz dispersada.

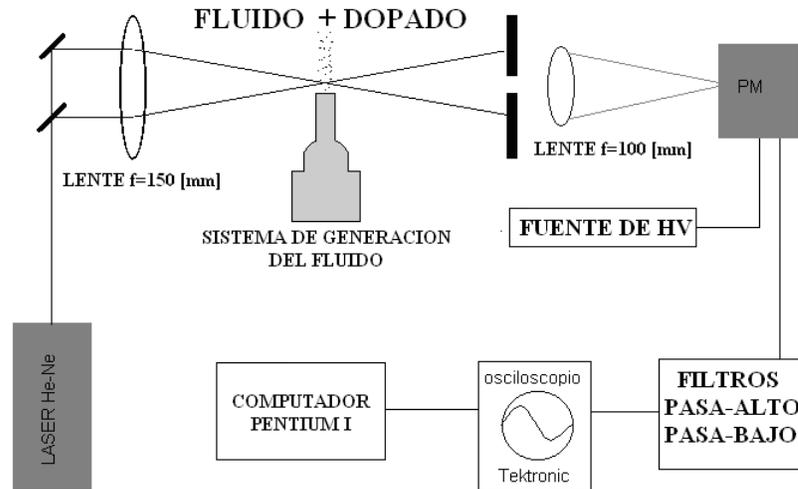


Figura 5. Diagrama de bloques del montaje final.

ción de una partícula del fluido con el láser ingresa por un par de ranuras existentes en la máscara que está localizada frente al detector. Estas dos nuevas ondas son concentradas por el lente de enfoque sobre la superficie del detector donde se produce el heterodinado.

Finalmente está el sistema heterodino diferencial. La teoría descrita en este artículo es apropiada para este sistema, pero es posible extenderla sin problema a los demás métodos.

Este último método a la vez se subdivide en tres mecanismos de detección. Estos son: Dispersión hacia adelante, dispersión hacia atrás y dispersión hacia fuera.

El método de dispersión hacia adelante permite

el máximo aprovechamiento en la potencia del haz láser, ya que el detector está en el eje óptico del sistema.

En el método de dispersión hacia atrás, como su nombre lo indica, el detector está en la misma dirección de donde provienen los haces. Requiere de dopado especial (partículas metálicas, gotas de aceite) y láseres muy potentes.

Finalmente está el modo de dispersión fuera del eje. El detector está en una región distinta del eje óptico del sistema. No es comúnmente utilizada en velocimetría láser, pero sí en otras técnicas derivadas de ésta, como ser la DPA.

Este es un intermedio entre los dos métodos descritos anteriormente y su ventaja radica en que per-

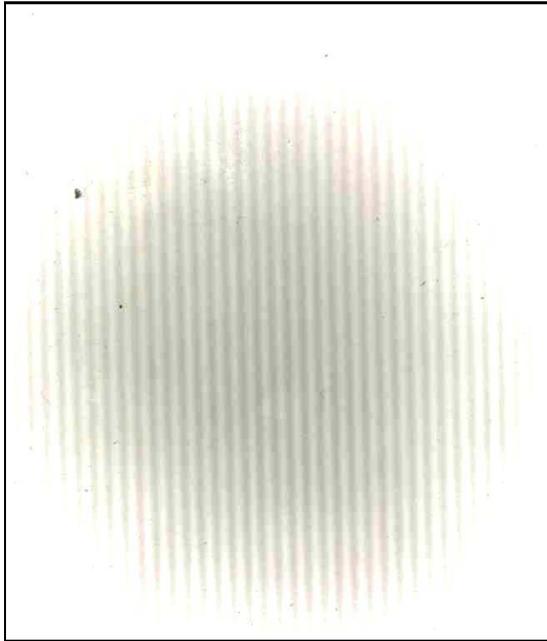


Figura 6. Fotografía de las franjas de interferencia logradas sobre papel fotográfico con una hora de exposición. (Laboratorio de óptica de la Carrera de Física de la UM-SA.)

mite reducir el volumen de medida con el uso de filtros espaciales [1], generando una alta resolución espacial.

Para este trabajo contamos con un láser He-Ne de  $1mW$  de potencia, no polarizado. Este láser es de baja potencia y la literatura recomienda utilizar uno de por lo menos  $5mW$ , con polarización lineal.

No se conocen trabajos hechos con láseres de las características señaladas, muy baja potencia y sin polarización.

De los dos problemas limitantes que poseía el láser utilizado, el más drástico fue el de la polarización, ya que para lograr que la onda se transforme en una onda polarizada se tuvieron que usar técnicas de polarización por reflexión que redujeron aun más la potencia de la onda electromagnética dispersada.

La contribución de este trabajo a la técnica LDA es justamente este hecho. Que es posible utilizar la dispersión de una onda de muy baja potencia y aun así generar el fenómeno de interferencia en la región de medición y lograr medir por medio de esta interferencia la velocidad de un fluido dopado sin recurrir a técnicas caras y extremas descritas anteriormente.

Por estas razones y por la simplicidad en el montaje óptico, se escogió para el montaje el sistema heterodino diferencial en su modo de dispersión hacia

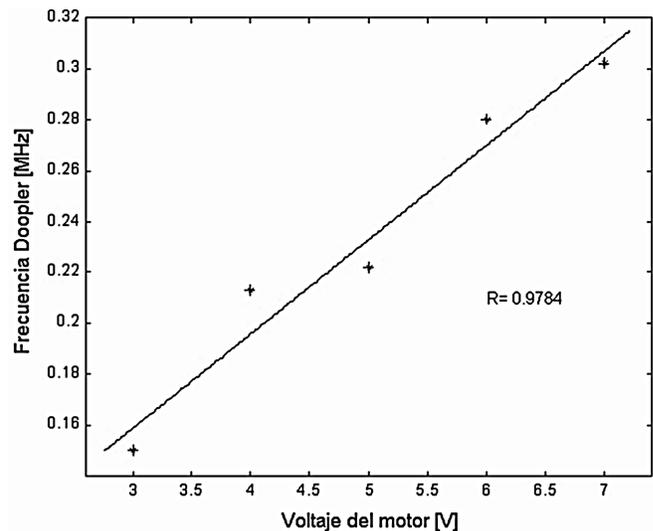


Figura 7. Muestra gráfica del desplazamiento de la frecuencia en función del voltaje suministrado al motor.

adelante, para aprovechar al máximo la potencia del láser.

El detector es un tubo fotomultiplicador marca Hamamatsu, modelo R1512 de elevada ganancia ( $\sim 10^6$ ).

También se utilizó un divisor de onda marca Leybold de 58/43, que no es el divisor de onda más apropiado pero se acerca al ideal de 50/50.

También se utilizaron espejos ópticos de un interferómetro Michelson-Morley.

Los lentes de enfoque y recolección fueron tomados del inventario de la Carrera de Física.

Finalmente se utilizó un osciloscopio marca Tektronic modelo 305.

Este equipo elimina gran parte de circuitos electrónicos que se requerirían para digitalizar la señal para luego ser analizados por una computadora [20].

Para los filtros pasa banda [8][1] fueron utilizados amplificadores operacionales de alta frecuencia marca National Instrument modelo LM7171 y LM 7161.

Una vez concluido el montaje del equipo (figura 5), se debe comprobar la existencia del fenómeno de interferencia en el volumen de medida, esto se logra colocando un lente de distancia focal pequeña ( $\sim 5\text{ mm}$ ) en el volumen de medida y proyectando la imagen a una pantalla. El resultado fue exitoso (figura 6); la inexistencia de las franjas de interferencia hubiera detenido este trabajo permanentemente.

Fueron construidos diferentes mecanismos para generar un fluido laminar con partículas suspendi-

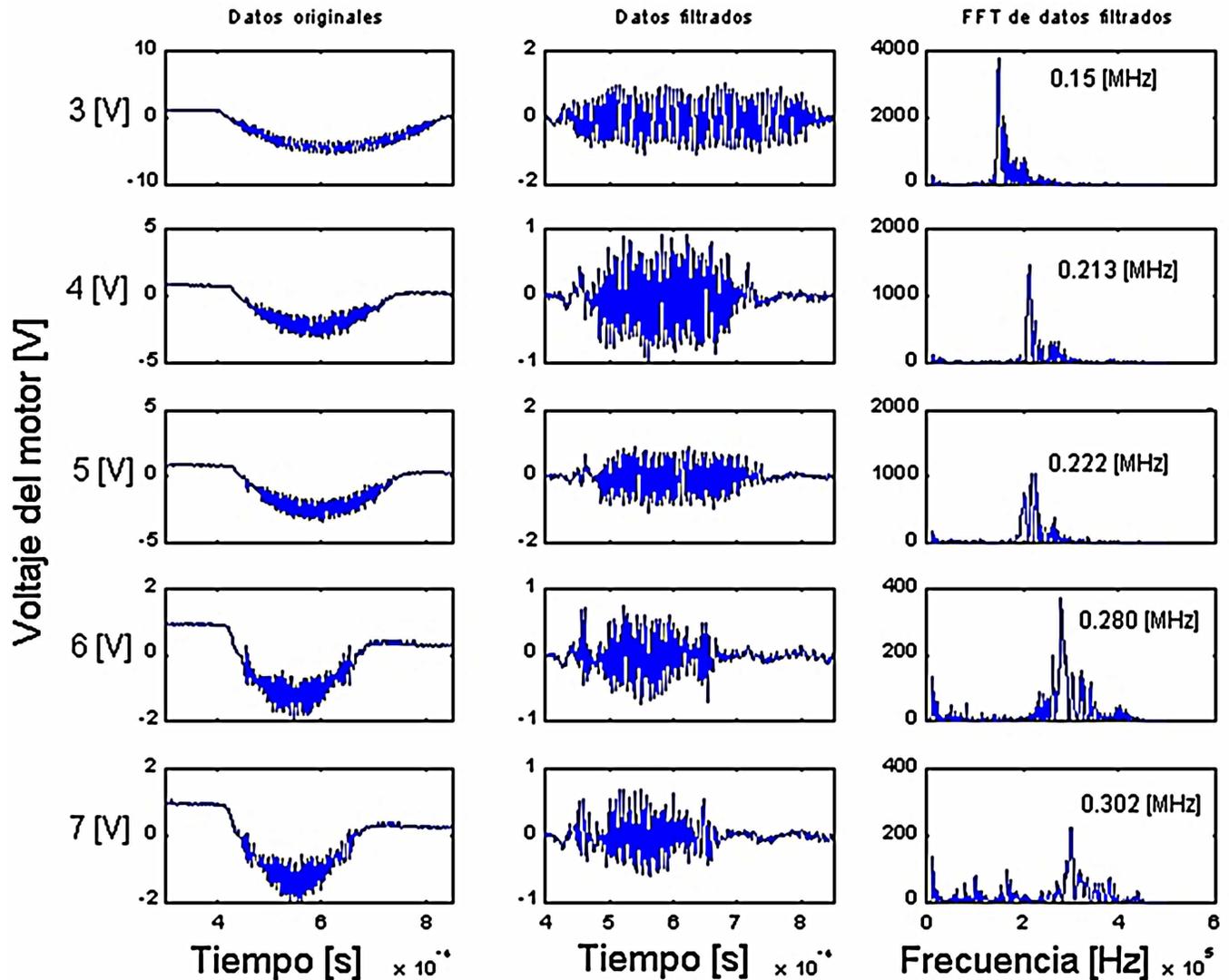


Figura 8. Cada fila de cuadros corresponde a un voltaje de ventilador. La primera columna de cuadros son datos “crudos” que proceden de los filtros electrónicos, la segunda columna de cuadros muestra datos filtrados y la tercera columna de cuadros corresponde a la FFT de los datos filtrados. Se puede apreciar la existencia de la señal “pedestal” y el corrimiento de frecuencia en función del cambio de voltaje del motor.

das en el fluido. Dio muy buenos resultados una caja adherida a un ventilador unido a un tubo con adelgazamiento, similar a un tubo de Venturi. Para forzar la laminaridad del fluido se colocó un sistema de bombillas. Como partículas en suspensión, se utilizaron las del producto de la combustión de incienso floral en varilla de entre  $0,1$  a  $2 \mu m$  de diámetro.

Debido a la falta de un equipo alternativo de medición de velocidades se recurrió a la siguiente solución:

Hallamos la dependencia de la velocidad angular del motor del túnel de viento en función del voltaje suministrado a éste. La dependencia es lineal, entonces es de esperar que el corrimiento en

la frecuencia de la señal en función al cambio en el voltaje suministrado al motor también sea lineal.

## 7. RESULTADOS

Después de variados intentos se logró el corrimiento en la frecuencia en función del cambio de la velocidad del fluido, figura 7, y también la estructura esperada de la señal en forma de *Bursts*.

La tabla 1 muestra los datos de la frecuencia Doppler en correspondencia con la variación en el voltaje del ventilador más la velocidad calculada del fluido por la ecuación (1).

La figura 8 muestra la señal procedente del fotomultiplicador, su respectivo filtrado y análisis espectral. Nótese el corrimiento en función al cambio

TABLA 1

Parámetros del modelo de referencia.

Voltaje de Motor [V]	Frecuencia Doppler [MHz]	Velocidad de Fluido [m/s]
3	0.150	0.60
4	0.213	0.90
5	0.222	0.94
6	0.280	1.19
7	0.302	1.27

en la velocidad angular del motor, y por consiguiente, el incremento en la velocidad del fluido.

### 8. CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo era:

Construir y caracterizar un medidor de velocidades de fluidos por efecto Doppler.

Pero también existían objetivos secundarios, los cuales eran:

—Generar franjas de interferencia en el volumen de medida.

—Lograr la estructura de *Bursts* o “explosiones” en la señal eléctrica, causadas por el heterodinado de la señal dispersada por las partículas sembradas al fluido.

—Y finalmente, demostrar el corrimiento en la frecuencia de la señal dispersada por los sólidos en suspensión en función al cambio de la velocidad del fluido.

Los tres objetivos secundarios fueron cumplidos de forma satisfactoria y por consiguiente se logró cumplir con el objetivo general del trabajo, lográndose el resultado esperado.

### REFERENCIAS

- [1] Pastor J. V., *Movimiento del Aire en Motores Diesel de Inyección Directa*, Servicio de Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia, 1997.
- [2] Tocho J. O., *Láser y Óptica en Ingeniería*, Centro de investigaciones Ópticas, 1982.
- [3] Hecht E., *Óptica*, Serie Schaum, McGraw-Hill, 1988.
- [4] *Catálogo General de Física*, Leybold Didactic, 1997.
- [5] Demtröder W., *Laser Spectroscopy*, Springer-Verlag, 1981.
- [6] Hecht-Zajac, *Óptica*, Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- [7] Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes And Assemblies*, Hamamatsu, 1998.
- [8] Santos D. V. J., Tobías O. J., *Velocimetría Láser Doppler*, Informe Técnico, 1987.
- [9] Holman J. P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 1994.
- [10] Edminister J. A., *Circuitos Eléctricos*, Serie Schaum, McGraw-Hill, 1983.
- [11] Alonso M., Finn E., *Física I, II*, Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.
- [12] Brigham E. O., *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall, 1974.
- [13] Arai N., *Laser Anemometer Measurements in the Flowfield Around Two Bodies*, Tokio Noko University, 1984.
- [14] Yoshida S., Tashiro Y., *LDA Probe for Water Flow Measurement*, Hokkaido University, 1981.
- [15] Butcher P. N., Cotter D., *The Elements of Nonlinear Optics*, Cambridge University Press, 1998.
- [16] Devenport W. J., *Laser Doppler Anemometry*, 1995.
- [17] Dantec Dynamics, *Laser Doppler Anemometry: Introduction to Principles and Applications*, Dantec Dynamics A/S,
- [18] Yeh Y., Cummins H. Z., *Localized Fluid Flow Measurements With an He-Ne Laser Spectrometer*, Applied Physics Letters, 1964.
- [19] Westphal W. H., *Tratado de Física*, Labor S. A., 1964.
- [20] López Z. B. A., *Medición de Velocidades de Fluidos por Efecto Doppler*, Biblioteca de la Carrera de Física, UMSA, 2003.