

## VELOCIMETRÍA DE FLUJO POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS

Mauricio Hadad, Jorge Amigone, Alejandro López, Luis Ochoa y Valeria Gessaghi

*Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa*  
*Calle 110 esquina 9, (6300) General Pico, Argentina - e-mail: gessaghi@ing.unlpam.edu.ar.*

### RESUMEN

La técnica de medición de velocidad de flujo por imágenes de partículas, Particle Image Velocimetry (PIV) ha ido ganando aceptación como herramienta para evaluar el campo de flujo en circuitos y máquinas hidráulicas. En muchos ámbitos es incluso usada para conocer las tensiones de corte en la pared a partir la medición de velocidades locales.

PIV utiliza el concepto del desplazamiento de partículas en un pequeño intervalo de tiempo para obtener el campo de velocidades del flujo. Es una técnica no invasiva y puede proveer un valor vectorial, cuantitativo e instantáneo del campo de velocidades con una resolución espacial comparable a la obtenida por otras técnicas convencionales.

Para medir el campo de velocidades se introducen partículas de flotabilidad neutra en el flujo, las que son iluminadas en la región del campo en la que se quiere conocer la velocidad. La iluminación se hace con una luz plana y se toman imágenes separadas por un intervalo de tiempo conocido. Se procesan las imágenes, dividiéndolas en un cierto número de ventanas de interrogación, y se correlacionan estadísticamente las dos imágenes para determinar un valor medio del desplazamiento de las partículas el plano iluminado, para cada ventana de interrogación. Entonces, se obtiene el vector de velocidad en el plano para cada ventana de interrogación, dividiendo el desplazamiento por el intervalo de tiempo entre imágenes.

En este trabajo se presenta el diseño, armado y validación de un sistema PIV, de bajo costo para medición de bajas velocidades. Se diseñó y construyó un circuito hidráulico con una sección de prueba transparente y adecuada para la utilización de la técnica. Se seleccionó, adquirió y montó el sistema de filmación junto con el sistema de adquisición y procesamiento de imágenes. A su vez se diseñó un sistema de iluminación utilizando un diodo laser y un *chopper* mecánico. Finalmente se tomaron imágenes y se obtuvo el campo de velocidades en un conducto de sección circular, la cual se contrastó con los valores predichos por la teoría.

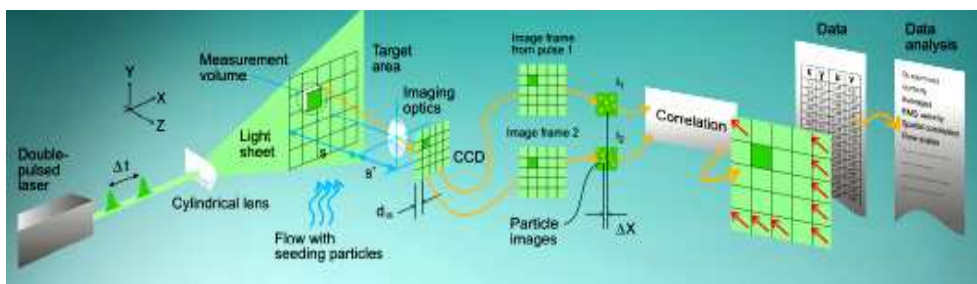
**Palabras Claves:** PIV, campo de velocidades, medición, velocidad local

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del campo de velocidades instantáneo en una geometría determinada y en ciertas condiciones de flujo es una característica fundamental para el diseño y estudio de todo sistema hidráulico. De esta manera, el desarrollo de un sistema de medición de velocidad local es de gran relevancia, principalmente considerando que se utilizan sistemas hidráulicos en casi todas las industrias, como por ejemplo: automotriz, aeroespacial, química, marítima, farmacéutica, biomédica, etc.

Existen distintas técnicas de medición de velocidad local, algunas determinan la velocidad del flujo punto a punto y otras realizan una descripción completa e instantánea de todo el campo de velocidades del flujo. Siendo el atractivo de estas últimas, la cantidad de información que proveen sin perturbar el flujo..

Una de éstas técnicas es conocida como Particle Image Velocimetry, o PIV, y consiste en registrar, en dos imágenes separadas por un intervalo de tiempo conocido,  $\Delta t$ , la posición de un grupo de partículas que viajan en el flujo, al cual se quiere medir la velocidad. Las imágenes adquiridas son procesadas utilizando técnicas de correlación estadística para determinar el campo de desplazamiento de las partículas, el cual, al dividir por  $\Delta t$ , da el campo de velocidades en el plano de la imagen. La Figura 1 muestra un esquema explicativo de la técnica PIV bidimensional.



*Figura 1 Esquema explicativo de la técnica PIV bidimensional*

PIV es una técnica no invasiva y provee un valor vectorial, cuantitativo e instantáneo del campo de velocidades. El método PIV bidimensional entrega información del campo de velocidades en 2 dimensiones, pudiendo ampliarse a 3 utilizando una segunda cámara que registre el movimiento de las partículas desde un ángulo diferente. Esta técnica puede brindar un campo de velocidades instantáneo con cierta rapidez, ya que requiere menor tiempo de procesamiento de la información.

Para visualizar el flujo se utilizan unas partículas, denominadas trazadoras, que siguen el movimiento del fluido y estudiando su movimiento se pueden conocer los patrones de flujo y velocidades. Para esto las partículas deben tener flotabilidad neutra ya que sino adquirirían una velocidad extra en la dirección de la gravedad. Además, su dimensión debe permitir una buena reflexión de la luz y no perturbar al flujo real. Si esto se cumplen, se puede despreciar el error cometido al estudiar el movimiento de una partícula trazadora en lugar de una partícula de fluido [1,2].

Para la aplicación de esta técnica es necesario que el fluido sea transparente, permitiendo la correcta visualización de las partículas trazadoras, para esto se requiere una buena iluminación, la cual se logra mediante un plano láser pulsado de alta intensidad, que ilumina un plano de la región de interés. Para conocer el campo de velocidades en toda la región, se mueve el plano de iluminación hasta cubrir el volumen completo bajo estudio.

Se adquieren, utilizando una cámara, un par de imágenes consecutivas con un intervalo de tiempo entre ellas pequeño y conocido. Una vez digitalizadas, las imágenes se dividen en regiones, denominadas subventanas, y se determina un vector desplazamiento más probable, realizando una correlación estadística entre cada subventana de la primer imagen y su homóloga en la segunda. Se divide el desplazamiento obtenido por el intervalo de tiempo entre las imágenes para calcular el vector velocidad [3,4]. Repitiendo el proceso en todas las subventanas de la imagen se determinan las componentes del campo de velocidades en el plano estudiado. Si la cámara utilizada es digital, la técnica recibe el nombre de Digital Particle Image Velocimetry, DPIV.

- Es importante destacar que la técnica de PIV se basa en las siguientes suposiciones:
- Las partículas trazadoras se mueven igual que el fluido, por lo que conocer su movimiento implica conocer el movimiento del fluido.
- El desplazamiento dentro de cada subventana es homogéneo, o sea no existen gradientes de velocidad dentro de la misma.
- La densidad de partículas es homogénea dentro del región de estudio.

En este trabajo se presenta la construcción de un dispositivo, de bajo costo, para medir bajas velocidades mediante la aplicación de la técnica PIV. Resultó de éste una tesis de grado de la carrera de Ingeniería Electromecánica [5]. La misma es parte de un proyecto de desarrollo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa y se convertirá en un elemento fundamental para abordar el estudio del comportamiento de flujos de distintas características y en distintos ámbitos. Para ello se diseñó y construyó el sistema: un circuito hidráulico con una sección de prueba transparente, un sistema de iluminación y un sistema de adquisición y procesamiento de imágenes. .

## **2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y OBTENCIÓN DE LA IMAGEN**

El dispositivo experimental esta constituido por dos partes fundamentales: el circuito hidráulico y el dispositivo de medición, los cuales se explican de manera detallada en los siguientes puntos.

### **2.1. Circuito hidráulico**

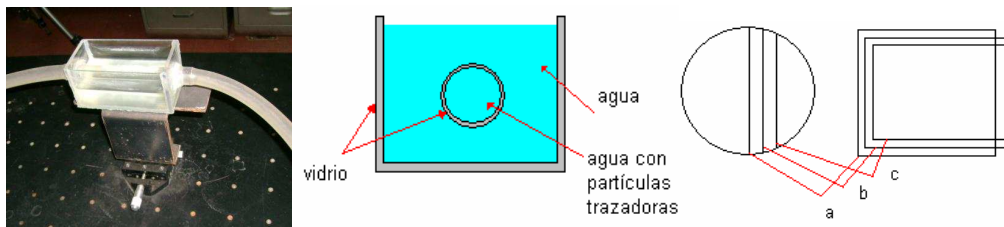
Se trata de un circuito cerrado, Figura 2, que consta de una bomba, válvulas, tuberías, trampa de aire y sección de prueba. En él circula agua con partículas trazadoras, seleccionándose en

este caso poliamida de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio. Este tamaño permite una escasa perturbación del flujo y brinda una buena reflexión.



*Figura 2 Circuito hidráulico montado sobre la mesa óptica*

La sección de prueba se muestra en la Figura 3, donde se observa un conducto de vidrio, que en este caso es de sección circular, dentro de una caja de sección rectangular, también de vidrio. La caja de vidrio no tiene tapa y se llena de agua para tomar las mediciones. El material del conducto es vidrio porque posee un índice de refracción similar al del agua, por lo tanto los rayos de luz reflejada por las partículas son desviados sólo levemente al cambiar de medio. La caja de vidrio es necesaria ya que, según la Ley de Snell, que permite estudiar el ángulo de refracción, para ángulos de incidencia perpendicular al plano, los rayos refractados emergen con un ángulo perpendicular, con lo cual no se deforma la imagen y no hay desviación en la posición de las partículas. La sección de prueba está montada sobre una base micrométrica que permite desplazar la región de estudio de manera controlada. Mediante dicho desplazamiento se obtienen los distintos planos de medición y así se puede medir el campo de velocidades en toda la región.



*Figura 3 Sección de prueba y planos de estudio: a:  $\Phi=18\text{ mm}$ , b:  $\Phi=16\text{ mm}$  y c:  $\Phi=14\text{ mm}$*

El circuito contiene un sistema de bypas permite regular el caudal de circulación. Se obtuvo una curva de caudal en función de la apertura de la válvula de regulación para poder regular el caudal y obtener velocidades menores a 0,1 m/s, que es el intervalo de interés para que se espera medir.

## 2.2. Dispositivo de medición

El dispositivo de medición está compuesto por: el sistema de iluminación compuesto por el plano láser y el chopper y el sistema de adquisición compuesto por la cámara y la PC.

Para la generación de un plano láser pulsado se estudiaron distintas técnicas. Por un lado se puede utilizar un láser pulsado, es decir que genera pulsos de alta intensidad mediante un

bombeo óptico pulsado que produce que la emisión de luz durante un intervalo de tiempo corto. Estos, si bien desde el punto de vista técnico son los mejores para la aplicación, son muy costosos, por lo tanto se buscaron otras maneras de generar un plano láser pulsado, a un costo más accesible. Para este desarrollo se selecciono un láser gaseoso de bombeo óptico continuo de helio-neon y con una longitud de onda de 660-650 nm. Tiene un costo aproximado de mil cuatrocientos pesos (\$ 1400). Para generar el plano laser, Figura 4 (a), a partir de un haz puntual, se lo hizo incidir sobre una lente cilíndrica y una esférica. La primera genera el plano y la segunda reduce su espesor. Para lograr los pulsos se utilizó un chopper mecánico, Figura 4 (b), el cual genera un pulso de iluminación y además produce disparos que indican a la cámara cuándo debe adquirir la imagen. El chopper cuenta con cuatro ranuras, Figura 4 (c), dos de ellas, indicadas con los números 1 y 2 en la Figura, dejan pasar el haz del laser durante un intervalo corto de tiempo, y las otra dos dejan pasar el haz del fototransistor infrarrojo montado sobre el disco. El fototransistor está conectado a un circuito electrónico que emite una señal cada vez que el haz es obturado y le indica a la cámara que comience a adquirir la imagen. La posición de los orificios de iluminación permite adquirir dos imágenes sucesivas con un intervalo entre ellas menor a la velocidad de la cámara.

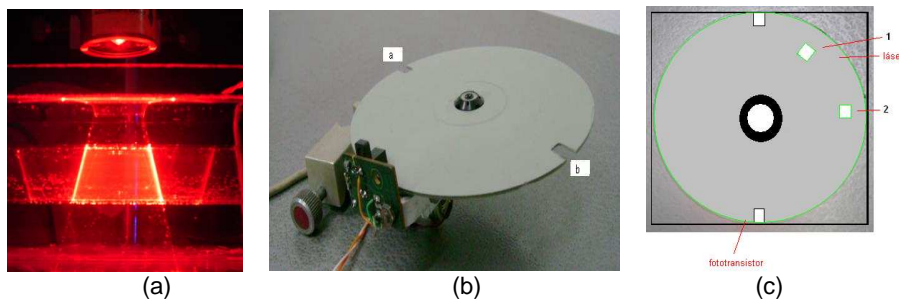


Figura 4 (a)Plano laser, (b) chooper mecánico (c) orificio para iluminación y disparo de la cámara

Una característica importante de la cámara es la velocidad para adquirir y transferir las imágenes. Se requiere que el tiempo entre cuadros sea lo más corto posible para poder medir velocidades de flujo mayores. Para la selección de la misma hubo que adoptar una solución de compromiso entre la velocidad y su costo, de ello surgió la alternativa de una Sony XCD-X710 [5], la cual se conecta a la PC a través de la interfase IEEE 1394 o Firewire, que es capaz de transmitir 400 megabites de información por segundo. Sin embargo, la cámara seleccionada sólo es capaz de adquirir 30 imágenes por segundo de 1024x768 pixels, o 50 imágenes por segundo a una menor resolución. El costo de la cámara es de aproximadamente mil seiscientos dólares (U\$S 1600) más los costos de importación.

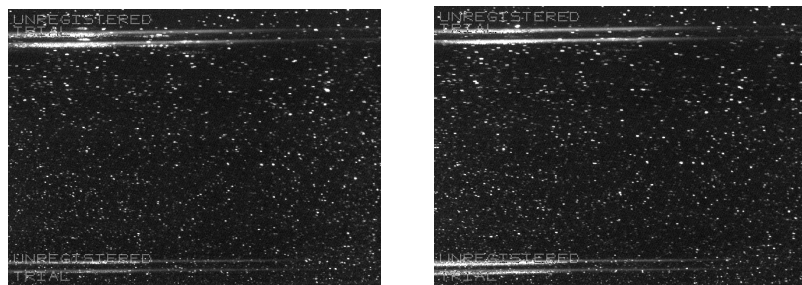
Para realizar el cálculo de la frecuencia de chopeado y su sincronización, las características que se tuvieron en cuenta son: la velocidad máxima de la cámara, 30 imágenes por segundo (por lo que el tiempo entre las imágenes es de 33.3 ms), el tiempo de exposición, el tiempo entre exposiciones, el esquema de ranuras del chopper y la tensión aplicada al motor que mueve el chopper. La cámara se configura en modo de trigger externo y con un tiempo de

exposición de 27 ms que es el máximo posible a setear por software. El intervalo entre imágenes se determina por el ángulo entre ambos orificios del chopper (Figura 4 (c)) y la velocidad de rotación del disco. Con una tensión aplicada al motor de 1.076 V se obtiene una velocidad del chopper de 94.25 rad/s y se tiene un tiempo entre imágenes de 13 ms para un par y de 56 ms entre el par siguiente. Debido al espesor de la ranura de iluminación, la sección se ilumina durante un tiempo definido por dicho espesor,  $10^\circ$ , la resolución de la imagen, 26.66 pixels/mm y la velocidad de giro del disco, 94.25 rad/s. Por lo tanto, si la velocidad de las partículas es tal, que recorren más de un píxel en el tiempo en que la sección está iluminada, en la imagen se verá una raya en lugar de un punto donde está la partícula, y esto limita la máxima velocidad medible con el sistema construido a aproximadamente 40 mm/s

También se verificó experimentalmente este valor, variando la velocidad en el circuito y estudiando las imágenes, la velocidad media máxima medible encontrada fue de  $37 \pm 9$  mm/s , lo cual concuerda con el valor predicho.

### 2.3. Obtención de la imagen

Una vez montada la cámara, ajustado el zoom y el foco para visualizar el plano en estudio, se regulan brillo, ganancia, exposición, tamaño de la imagen y cuadros por segundo (fps) de la cámara, a través del software, IC Capture 2.0, para lograr imágenes útiles para la medición. En la Figura 5 se muestra dos ejemplos de imágenes obtenidas con el sistema construido.



*Figura 5 Imágenes obtenidas (tamaño 640x480 pixeles)*

Las mismas muestran una región de  $18 \times 24$  mm<sup>2</sup>, con una resolución de 1020x768, por lo que 1 mm equivale a 26.66 píxeles, dicha relación se conoce como factor de escala y se representa por la ecuación (1).

$$\frac{1}{\beta} = \frac{D_p}{D_{mm}} = \frac{480}{18} = 26.66 \text{ pixels/mm} \quad (1)$$

donde  $D_p$  es la dimensión en píxeles y  $D_{mm}$  es la dimensión en mm.

### 3. OBTENCIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Una vez obtenidas las imágenes y transferidas a la PC, serán almacenadas como array bidimensionales en dos archivos a los que se les aplican distintas operaciones de donde

resulta el campo de vectores velocidad deseado. Las operaciones aplicadas se clasifican en tres grupos: pre-procesado, procesado y post-procesado.

- Pre-procesado: son un conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible, comúnmente llamadas de procesamiento de imágenes
- Procesado: consiste en aplicar técnicas de correlación estadística que permiten obtener el campo de vectores desplazamientos y luego un campo de vectores velocidad [7-9].
- Post-procesado: una vez obtenido el grupo de vectores, se realizan distintas técnicas de filtrado e interpolación para tratar de eliminar los errores introducidos durante la medición y el procesado [7-9].

Para realizar el procesamiento se seleccionó un toolbox disponibles en la plataforma Matlab, cuya utilización es muy flexible y generalizada en las carreras de ingeniería, el cual se ajustó al sistema de medición construido.

El programa implementado está compuesto por distintas funciones, cada una de las cuales se ocupa de una tarea específica. Por ejemplo, las funciones "principal\_cor.m" y "principal\_crr.m" se ocupan de aplicar las técnicas de correlación cruzada. La diferencia entre ambas es que la segunda lo aplica en forma iterativa ajustando el tamaño de la subventana en la segunda imagen. Luego existen otras funciones que realizan distintos tipos de filtrados: "p\_vector\_filtro\_medio.m", "p\_vector\_filtro\_vecest.m" e interpolación: "p\_vector\_interp\_linear.m", "p\_vector\_interp\_spline.m", "p\_vector\_interp\_NaN.m" y "p\_vector\_interp\_kriging.m". Las funciones de filtrado descartan vectores que resultan erróneos según algún criterio estadístico basado en los vectores obtenidos en las subventanas contiguas, mientras que las funciones de interpolación completan los *agujeros* que quedan en el campo dejados por los filtrados, en base a distintos criterios de interpolación. Los criterios de filtrado e interpolación son seleccionados por el usuario y varían según los patrones de flujo esperados.

Todas las funciones mencionadas son llamadas desde una función principal, "principal.m" que lee las imágenes y parámetros ingresados por el usuario como: tamaño de subventanas, superposición entre subventanas homólogas de las imágenes correlacionadas, tipos de correlación, tipos de filtrado e interpolación. Se puede ver un detalle de la estructura del programa y la descripción, funcionamiento y utilización de las funciones en [5]

La Figura 6 muestra la imagen original (a) y pre-procesada (b) y la Figura 7 muestra el campo de velocidades obtenido luego del procesamiento (a) y luego de un post-procesamiento (b).

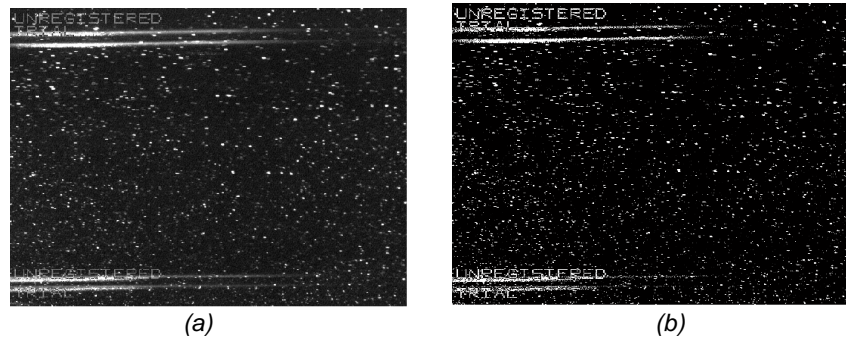


Figura 6 (a) Imagen original y (b) imagen pre-procesada

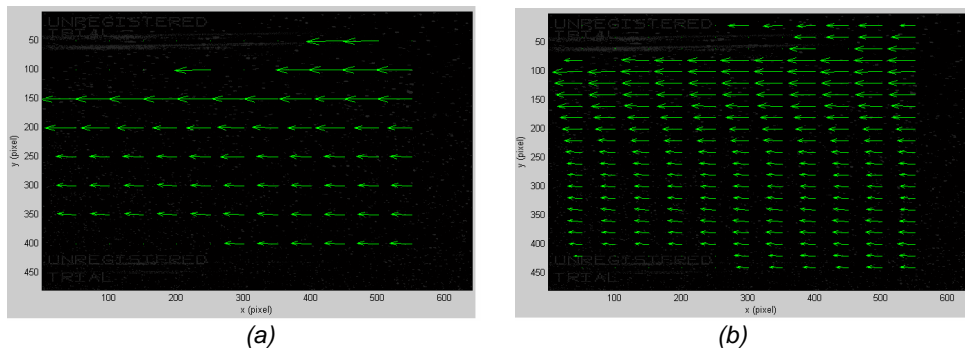
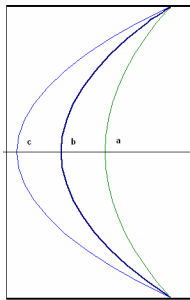


Figura 7 (a) Campo de velocidades después de la correlación y (b) después del post-procesamiento, i.e. filtrado e interpolación

Para llevar a cabo la validación se comparó el perfil logrado experimentalmente con el perfil predicho por la teoría de flujo laminar en conductos de sección circular, asumiendo régimen estacionario, efectos gravitatorios despreciables, una sección de prueba es suficientemente larga y las paredes son fijas e impermeables se llega a la ecuación (2) conocida como de Poiseuille [10]. Para el caso medido se tiene un número de Reynolds,  $Re = 665$ , con lo cual estamos en presencia de un flujo laminar.

$$V_z(r) = -\frac{\partial p}{\partial z} \frac{R^2}{4\mu} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2)$$

donde  $R$  es el radio del conducto,  $v_z$  es la componente axial de la velocidad,  $\frac{\partial p}{\partial z}$  es el gradiente de presión en la dirección axial,  $\mu$  es la viscosidad del agua y  $r$  es la coordenada radial. Para un valor de velocidad media de 37 mm/s y con un error del 24% se obtiene el perfil teórico de velocidades de la Figura 8, en azul se muestra el valor medio y en celeste los perfiles con el 24 % de error.

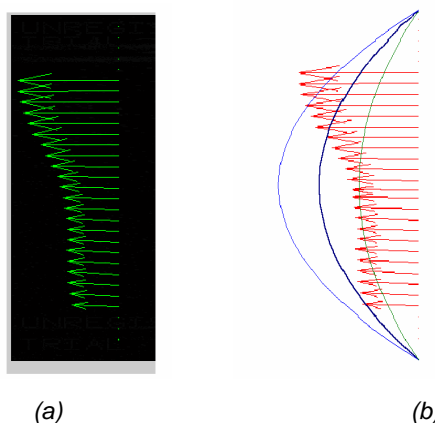


*Figura 8 Perfil teórico de velocidades esperado en la sección de prueba*

Se ajustaron los parámetros del programa utilizando una subventana rectangular de 100x20 píxeles, con un solapamiento entre subventanas del 50% en las dos coordenadas. En la Figura 9 se muestra el perfil obtenido experimentalmente, (a), y la comparación con el perfil teórico, (b), mostrado en la Figura anterior. Se puede ver que el perfil obtenido no es un perfil parabólico sino que tiene una región en la parte inferior del tubo donde tienen un valor constante y en la parte superior aumenta la velocidad en un factor 2.

De la comparación se observa que la posición del valor máximo de ambos perfiles difiere, dado que para el perfil teórico la velocidad de máxima se encuentra en el centro del conducto y para el perfil obtenido experimentalmente la misma se encuentra por encima de dicha línea media. Además se nota que faltan los vectores correspondientes a las partículas que circulan cercanas a los bordes del caño.

Esta diferencia puede ser causada por perturbaciones en el flujo producidas por el tipo de bomba utilizada, por la presencia de una importante cantidad de partículas que pueden no estar mezcladas de manera uniforme en el fluido o por el ruido generado por el brillo consecuente del reflejo del láser en el conducto. Sin embargo, los valores de velocidad media y máxima concuerdan con los valores esperados.



*Figura 9 (a) Perfil obtenido con el sistema PIV y (b) comparación con el perfil teórico de Poiseuille*

#### **4. CONCLUSIONES**

Se desarrolló con éxito un sistema de medición de velocidad de flujo por seguimiento de partículas de costo relativamente bajo, ya que el equipamiento más costoso es la cámara, el laser y la una PC. Éste se validó midiendo el campo de velocidades en un conducto de sección circular. Si bien la forma del perfil obtenido no es parabólica como se esperaba, se obtuvieron los valores de velocidad máxima y media esperados, por lo que se considera que los resultados obtenidos con el sistema construido son confiables y aceptables dentro de un cierto rango de velocidades limitado, 40 mm/s, y con una resolución limitada. Con las adecuaciones correspondientes se podrán realizar nuevas experiencias con geometrías diferentes e inclusive con presencia de objetos en la corriente, como es el caso de perfiles alares.

#### **5. REFERENCIAS**

- [1] Hahn D. W.: Light Scattering Theory. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. University of Florida, June 2004.
- [2] Raffael M.; Willert C. & Kompenhans J., Particle Image Velocimetry, Dossat, 1998.
- [3] Willert C. E., Digital Particle Image Velocimetry, Experiments in Fluids, vol. 10, 1991.
- [4] Prasad Ajay K, Particle Image Velocimetry. Current Science, vol. 79, n. 1, pp 52, 2000.
- [5] Hadad, Mauricio. Desarrollo de sistema de medición de campo de velocidades aplicando la técnica Particle Image Velocimetry. Tesis para la obtención del grado de Ingeniero Electromecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Pampa. Febrero, 2008
- [6] Sony Corporation, Digital Video Camera Module, Technical Manual, 2000.
- [7] Bolinder Jonas, On the accuracy of a digital particle image velocimetry system, Department of Heat and Power Engineering, Division of Fluid Mechanics, Lund Institute of Technology, Technical report, 1999.
- [8] Begueri Buquet Marcelo A., Estudio experimental del flujo en una cavidad por técnicas de seguimiento de imágenes de partículas, Tesis final de Ingeniería, Universidad Nacional de Buenos Aires, Junio 2005.
- [9] Keane R. D. & Adrian R. J., Theory of cross-correlation analysis of PIV images, Applied Scientific Research, vol. 49, pp 191-215, 1992.
- [10] White Frank M., Mecánica de los Fluidos, Mc Graw Hill, 5th Edición, 2003.

#### **Agradecimientos**

Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad de Ingeniería de la UNLPam. Proyecto: velocidad de flujo por imágenes de partículas (PIV), Directora: Mgr. Gessaghi