

## SISTEMA DE MEDICIÓN DE CAMPOS DE VELOCIDADES DE FLUIDOS

**D. Hoyos, M. Villena, I. De Paul, V. Serrano**

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)  
 Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta (CIUNSA)  
 Avenida Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta  
 Tel. 0387-4255578 – e-mail: hoyosd@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene por objeto describir el diseño, construcción y calibración de un sistema de medida de campo de velocidades de fluidos, basado en la técnica de medida denominada PIV (Particle Image Velocimetry). Esta técnica consiste en introducir trazadores (pequeñas partículas que tengan la misma densidad que el fluido pero de distinto color) iluminar un plano del campo de velocidades en el fluido y de esa forma resaltar los trazadores para que una cámara (utilizando la técnica de medida en dos dimensiones) capte el movimiento del fluido. En caso de utilizar dos cámaras (técnica de medida en tres dimensiones) se puede captar las tres componentes de velocidades del fluido. Existen distintos sistemas comerciales que permiten realizar la visualización del campo de velocidades utilizando la técnica de medida PIV. Estos sistemas requieren un hardware sofisticado y generalmente tienen un precio elevado. El sistema implementado trabaja con cámaras comunes y presenta un conjunto de técnicas de calibración y medidas que permiten medir campos de velocidades de fluidos dentro de un rango que corresponde a convección natural utilizando distintos tipos de trazadores.

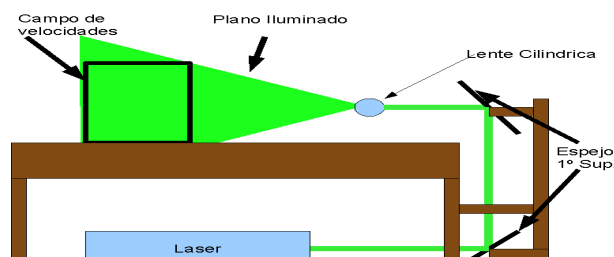
**Palabras clave:** medición, fluidos, instrumentación

### DESCRIPCIÓN GENERAL

En 1984 R. J. Adrian, presentó el primer trabajo de medición de velocidades de un fluido utilizando velocimetría de partículas (PIV) como una variación del método de cálculo de velocidades basado en speckle. La teoría fue ampliada para incluir imágenes digitales de PIV con doble-exposición, posteriormente para incluir imágenes digitales de múltiples exposiciones (Adrian, 1991). En 1992 se propuso utilizar correlación cruzada (Keane, 1992) y finalmente se desarrolló el algoritmo para medir campos de velocidades en tres dimensiones (Adrian, 2005).

Un instrumento para medir campos de velocidades en un fluido basado en la técnica de medida PIV (Adrian et al., 1991), está compuesto en general por un sistema de iluminación el cual consta de un láser cuyo haz es expandido por una lente cilíndrica para iluminar el plano del campo del fluido que será medido. En la figura 1 se muestra la disposición del equipo utilizado, en la misma se observa un láser debajo de la mesa, el haz es dirigido hacia el objetivo del experimento por dos espejos de primera superficie, posteriormente es expandido por una lente cilíndrica y finalmente incide sobre el modelo que se utilizará para medir el fenómeno a estudiar. El modelo debe ser transparente para el sentido de incidencia del haz como el de observación por parte de las cámaras.

Esta técnica de medida se utiliza para medir procesos turbulentos con velocidades muy altas y partículas muy pequeñas. Debido a que se analizan planos muy delgados (Adrian, 2003), la única manera de realizar la medida es disponer de un haz de alta energía, como un láser de potencia. En el caso de un fenómeno turbulento muy lento, como es el caso de los sistemas pasivos solares (De Paul, 2000), en el cual los trazadores pueden ser minúsculas gotas de agua o humo, no se necesita un haz tan estrecho y consecuentemente no es tan importante disponer de un haz láser.



*Figura 1: Esquema de Iluminación*

La escena en donde se muestra los trazadores inmersos en el fluido debe ser filmada por una cámara, luego la información debe ser enviada a una computadora para ser procesada. El método de medida del campo de velocidad de un fluido (PIV) consiste en la adquisición de dos imágenes separadas entre sí por un tiempo previamente establecido. Se debe realizar

correlación cruzada entre pequeñas ventanas que se encuentran superpuestas espacialmente en distintos tiempos (Raffel et al., 1996). Posteriormente se determina el tiempo entre imágenes, ubicación y dimensión de cada una de las ventanas con el objeto de calibrar el sistema (Naqwi, 2000). Los componentes que influyen en la medida son las cámaras y el procesador de señal, aspectos que son analizados a continuación.

## CÁMARAS

Para definir el sistema de adquisición de imágenes se debe analizar las cámaras utilizadas en un equipo comercial para PIV, el cual consta de las siguientes características.

|                | <i>desde</i> | <i>hasta</i> |
|----------------|--------------|--------------|
| Resolución CCD | 1600x1200    | 2200x200     |
| Frame rate     | 30Hz         | 10Hz         |
| Rango dinámico | 12 Bits      | 14 Bits      |

Tabla 1: Principales Características CCD

En la tabla 1 se puede observar que las características de los CCD utilizados son similares a los que se encuentran en cámaras digitales comunes, excepto en el rango dinámico que habitualmente es de ocho bits. A continuación se realiza una pequeña recapitulación acerca de las distintas tecnologías disponibles en la actualidad con sus distintas prestaciones. Existen distintas opciones para un equipo de adquisición de imágenes:

1. Framegrabber y una cámara convencional
2. Cámara fotográfica digital
3. Filmadora digital
4. Digitalizador de imágenes
5. WebCam
6. Cámara IP

La primera opción es la más apropiada, permite tomar imágenes con un rango dinámico muy alto y en general dispone de un conjunto de programas con los cuales se pueden realizar todos los procesamientos de imágenes. La desventaja de estos sistemas radica en el hecho de utilizar rutinas propietarias, en caso de cambiar el framegrabber se debe reprogramar de acuerdo al nuevo conjunto de rutinas. La evolución que sufrió este campo durante los últimos años hizo que muchos equipos se tornaran obsoletos en poco tiempo.

Las opciones 2, 3 y 4 presentan en general la desventaja del rango dinámico de ocho bits. Comparten el resto de las características de los equipos profesionales PIV.

Las opciones 5 y 6 presentan la desventaja del rango dinámico. Tienen resoluciones más bajas, similares a los sistemas PIV de hace cinco años. Para prestaciones donde se obtenga un contraste más alto entre el trazador y el medio, es necesario una calibración de las variables tiempo y distancia. Además de un estudio apropiado del error del sistema.

## INTERFASE CON LA COMPUTADORA

Si se analiza la problemática que plantean los casos 2, 3, 4, 5 y 6 se debe notar que en estas tecnologías no es necesario desarrollar interfaces, éstas se encuentran incluidas en el sistema. Por otra parte se necesita acceder a la información almacenada por los programas propietarios en la computadora. El sistema está conformado por:

Cámara digital y filmadora digital: En general cuentan con interfaz USB que permite la descarga de las imágenes en formato digital (En el caso de fotografías el formato más utilizado es JPG y para las filmaciones el tipo de archivo utilizado es MPEG)

Digitalizador de imágenes: Es un dispositivo que se conecta a la computadora a través de un puerto y permite la conversión de imágenes o filmaciones de una cámara convencional tipo PAL-N o NTSC, etc. Esta tecnología se utiliza principalmente para vigilancia, en algunos casos permite conectar mas de una cámara en paralelo. Las fotografías o filmaciones obtenidas pueden ser guardadas utilizando una variedad muy importante de archivos: JPG, MPG, AVI, GIF, BMP, etc.

Webcam: Esta tecnología permite la conexión del dispositivo a un puerto USB de la PC. La principal desventaja de la webcam es la pobre calidad del video, debido a su baja resolución.

## CÁMARAS IP

Una Cámara IP es una videocámara especialmente diseñada para enviar señal de video (y eventualmente audio) a través de una red de datos. Los paquetes TCP/IP generados por la cámara IP son ensamblados en un servidor web incorporado en la cámara y puestos a disposición de la red. Estos datos son accesibles desde cualquier navegador web del mismo modo que cualquier sitio web.

Esta tecnología permite conectar una o más cámaras a una red TCP/IP posibilitando la adquisición de imágenes a distancia. Los dispositivos mas nuevos también permiten la conexión a través de una red inalámbrica, de este modo es posible observar y documentar experimentos llevados a cabo en zonas donde no se dispone de una red cableada. El stream de video transmitido a través de la red (en tiempo real) puede ser almacenado en cualquier formato digital para su posterior tratamiento.

Después del análisis de las distintas opciones queda claro que utilizar Cámaras IP brinda como característica mas importante la posibilidad de obtener imágenes digitales desde lugares lejanos sin mayores inconvenientes. Las posibilidades de conexión a una red TCP/IP mediante cableado o conexión inalámbrica lo hacen aun mas versátil.

#### Conexión Ethernet

Una cámara IP puede ser integrada en una red Ethernet (10baseT o 100baseT) cuyo nodo central constituye un Hub o un Switch. La configuración de la misma solo requiere que pertenezca el mismo segmento TCP/IP de la red Ethernet. Se recomienda emplear un direccionamiento IP privado para el segmento, tanto para las estaciones de trabajo como para el nodo que conforma la Cámara IP.

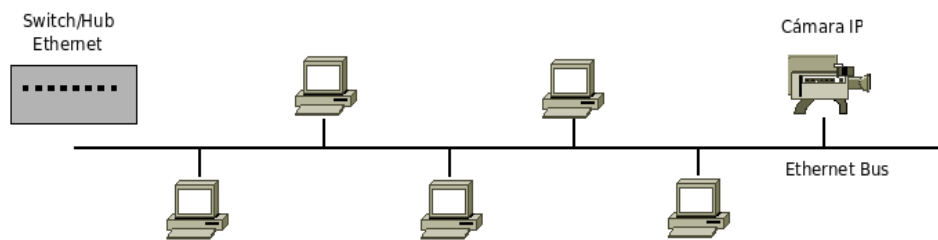


Figura 2: Cámara IP en una red Ethernet

En el caso de una red inalámbrica (IEEE 802.11) se puede incorporar la cámara IP a través de un punto de acceso Wi-Fi. El mismo puede ser instalado en un segmento de una red Ethernet o bien formar parte de otro segmento que solo incluya los dispositivos de conexión inalámbrica. En este último caso la conexión debe incluir un router para posibilitar la conectividad con las demás estaciones de trabajo y en particular con la PC en la cual se almacenará la señal originada por la Cámara IP para su posterior tratamiento.

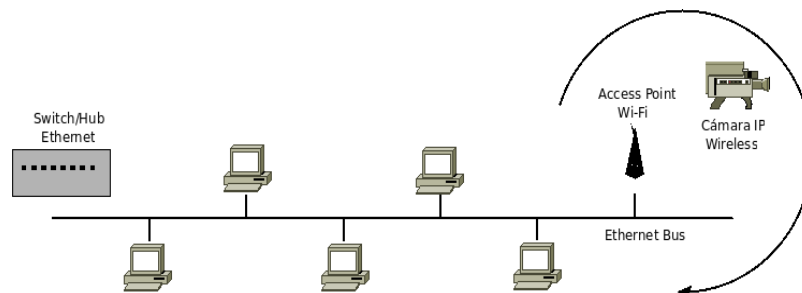


Figura 3: Cámara IP inalámbrica

### ACCESO A LA INFORMACIÓN

De acuerdo a los esquemas de conectividad propuestos el video generado por la Cámara IP estará disponible para todas las estaciones de trabajo del segmento de red (en el caso de asignar direccionamiento IP privado). En caso de utilizar direccionamiento IP público el video puede ser accesible desde Internet si la conectividad del segmento así lo establece.

Afortunadamente la mayor parte de estos dispositivos permiten aplicar políticas de seguridad para limitar el acceso a la señal de video generada por la Cámara IP. Así se puede optar por la configuración de filtros a través de numeración IP o estableciendo claves y nombres de usuarios permitidos, tanto para el acceso al video como a la configuración del dispositivo.

Las facilidades de configuración de una Cámara IP permiten también su administración remota, de este modo es posible modificar parámetros de funcionamiento y/o seguridad desde cualquier navegador web cuyo acceso se encuentre habilitado con anterioridad. Esta tecnología fue seleccionada por su flexibilidad y bajo costo para ser utilizada en el sistema de medida. Entre las ventajas se puede mencionar el hecho de poder utilizar más de una cámara simultáneamente, lo cual permite realizar PIV y Estéreo PIV.

### PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

De este análisis se puede inferir que un sistema que procese estos datos, debe ser capaz de manipular un conjunto muy grande de formatos de imágenes y videos. Estos formatos (debido al rápido avance en el campo de la compresión de imágenes) varían año tras año, por lo tanto el programa debe ser actualizado. Existe un extenso conjunto de programas para el procesamiento de imágenes, entre ellos Gimp (software de procesamiento de imágenes libre y gratuito). Si bien es cierto que Gimp y otros programas similares permiten llevar adelante complejas tareas en el tratamiento digital de imágenes, la mayoría

de este tipo de programas no permite la automatización de las mismas (no pueden ser programados para necesidades de tratamientos específicos). Por esta razón desde hace unos años se viene empleando SCILAB (software de cálculo matemático) para el desarrollo de algoritmos de medida. Este conjunto de rutinas que se ejecutan en el entorno de SCILAB, denominadas SCILABPRO permiten agregar algoritmos, cada vez mas complejos para el cálculo de medidas específicas, aprovechando las posibilidades de programación de SCILAB y su capacidad de incorporación de un gran número de librerías que amplían las posibilidades de cálculo.

SCILAB tiene la ventaja de realizar complejas operaciones matemáticas e incluye la posibilidad de ejecutar porciones de código TCL. Tool Command Language (TCL) es un lenguaje de programación interpretado y multi-plataforma al cual es muy sencillo agregar extensiones que mejora sus prestaciones. Una de las mas importantes es la extensión Tk, la cual permite administrar ventanas, botones, menús, barras de scroll, y toda una serie de elementos propios de la programación con interfase gráfica. Dentro de las opciones incluidas en Tcl/Tk se encuentra el elemento denominado CANVAS que puede visualizar imágenes, pero este elemento es muy limitado debido a que solo visualiza archivos con formato png, pgm, ppm. Por otra parte la extensión IMG permite visualizar a través de CANVAS la mayor parte de los formatos gráficos existentes: jpg, gif, bmp. La visualización de video no está incluida en IMG, pero existen dos extensiones que permiten visualizar videos: QuicktimeTCL y TkVideo. Con estas extensiones se puede visualizar un amplio rango de formatos de video: avi, vmw, mpg.

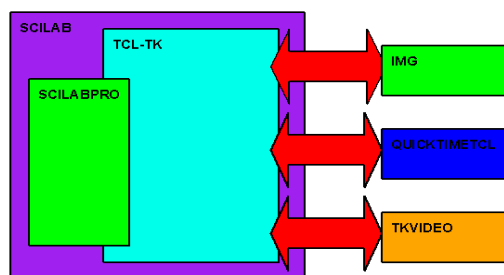


Figura 4: Estructura de Software de Aplicación

Al agregar a SCILAB las extensiones IMG, QuicktimeTCL y TkVideo se dispone de una plataforma completa en la cual se puede procesar imágenes y/o video provenientes de diversos tipos de archivos. También se desarrollaron rutinas en SCILAB que permiten transformar estos archivos en matrices, las cuales pueden ser procesadas por el software SCILABPRO. QuicktimeTCL fue desarrollado por la empresa Apple y es un complemento de su producto Quicktime. Este último se actualiza constantemente y puede reproducir prácticamente todo tipo de formatos de imagen y video.

El procesador de imágenes desarrollado está compuesto por dos partes: un conjunto de rutinas que operan sobre SCILAB y otro conjunto de programas desarrollados en Tcl/Tk y sus extensiones.

El conjunto de rutinas que se ejecutan sobre Tcl/Tk está compuesto principalmente por dos programas:

- MIRA
- CONTROL

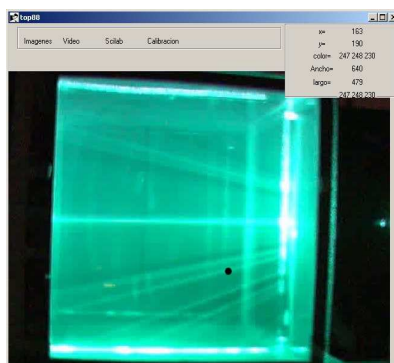


Figura 5: Aplicación MIRA en ejecución

La aplicación MIRA presenta una interfase gráfica para la adquisición de imágenes e introducción de las mismas en SCILABPRO, este programa no permite automatizar la tarea de adquisición y procesamiento de las mismas. El proceso de adquisición de una imagen a partir de un video consiste en llamar al proceso MIRA desde la opción Archivos\_pro (como se muestra en la figura 5). Desde esta aplicación se habilita la visualización de video y se obtiene la escena que se desea analizar. Luego esta escena es enviada a SCILAB para su procesamiento.

El programa CONTROL no presenta una interfase gráfica, pero puede ser ejecutado directamente desde el entorno de SCILAB y permite la automatización de la medida que se desea realizar. En la figura 5 se muestra una imagen adquirida por el sistema de medida.

## SISTEMA DE MEDIDA DEL CAMPO DE VELOCIDADES DE FLUIDOS

Esta compuesto por dos cámaras IP cuyas características son:

|                |                   |
|----------------|-------------------|
| Resolución     | 640 x 480 pixeles |
| Frame rate     | 25 Hz             |
| Rango Dinámico | 8 bits            |

Tabla 2: Características Cámara IP

Estas cámaras utilizan un programa propietario (incluido en el software que acompaña a la cámara). Esta aplicación permite seleccionar el origen del video procedente de alguna de las dos cámaras disponibles y guarda esa información en la PC en formato AVI. El software desarrollado y descrito anteriormente permite procesar esa información.

Para calcular el campo de velocidades de un fluido, se debe calibrar el equipo de medida, obtener el error de dos variables, el tiempo transcurrido entre dos eventos y la posición de un punto cualquiera de la imagen. Todas estas tareas se pueden realizar desde la aplicación MIRA, este programa permite calcular el tiempo transcurrido entre imágenes y calibrar la misma.

### CALIBRACIÓN DEL TIEMPO ENTRE IMÁGENES

Para calibrar el tiempo transcurrido entre imágenes, se configuró un dispositivo basado en PLD de modo tal que permita medir el tiempo con precisión. El principio de funcionamiento de este dispositivo se basa en el encendido y apagado de LED's transmitiendo así un código que puede ser filmado por la cámara y de este modo determinar el tiempo transcurrido entre imágenes. Es dispositivo se muestra en la figura 6, junto al osciloscopio con el cual se calibra la base de tiempo.



Figura 6: Dispositivo de Calibración de tiempos

El sistema consiste en un divisor de frecuencia de ocho bits (la frecuencia de entrada es ajustable entre 1 y 2.5ms). Este sistema divide por dos cada bit. Por lo tanto los períodos obtenidos son:

|               |   |   |   |    |    |    |     |     |
|---------------|---|---|---|----|----|----|-----|-----|
| Divisiones    | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |
| Períodos [ms] | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |

Estas señales son enviadas a los ocho LED's que se encienden y apagan en cada uno de esos períodos, filmando este dispositivo se puede medir el tiempo transcurrido y de ese modo calibrar el tiempo.

En la figura 7 se muestra la forma de onda generada, observando el alto de esta forma de onda se puede medir el tiempo con una exactitud de 1 a 2.5 ms (milisegundos).

El resultado de calibrar las cámaras del instrumento indican que entre imágenes existe un tiempo de 60 ms. Las especificaciones de las cámaras proponen 20 imágenes por segundo lo cual implica un tiempo de 50 ms entre imágenes. Por lo tanto existe una diferencia que se puede originar en los algoritmos de compresión implementados en el hardware de la cámara, como así también en el ensamblado de las tramas Ethernet para su transporte a través de la red.

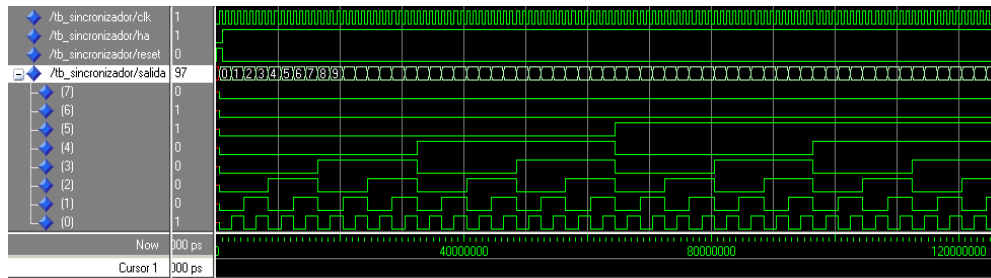


Figura 7: Formas de Onda de Dispositivo de Calibración de Tiempo

### CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS

Para poder medir distancias utilizando cámaras de video se debe realizar un procedimiento denominado calibración de cámaras (Hoyos, 2000). Este procedimiento consiste en determinar una matriz de transformación que convierta la posición de los puntos de una imagen proveniente de la cámara medida en pixeles, en distancias medidas en cm, mm, o décimas de milímetros. Tomar una imagen con una cámara consiste en proyectar un objeto tridimensional en un plano de dos dimensiones. Suponiendo en una primera aproximación que la cámara no presenta ningún defecto se puede utilizar el modelo Pinhole. Este modelo consiste en suponer que la cámara no tiene óptica sino que se trata de un pequeño orificio que proyecta la luz sobre un plano perpendicular al mismo. Esta es la cámara más simple que puede existir.

$$U = \frac{d_i}{z} x$$

$$V = -\frac{d_i}{z} y$$

(1)

$$u = a_{11} x + a_{12} y + a_{13} z$$

$$v = a_{21} x + a_{22} y + a_{23} z$$

$$w = a_{31} x + a_{32} y + a_{33} z$$

(2)

$$U = \frac{u}{w}$$

$$V = \frac{v}{w}$$

(3)

En la figura 8 se puede observar un esquema de la cámara de la que se puede inferir que las coordenadas del objeto proyectado sobre el plano imagen de la cámara son las correspondientes a la fórmula 1.

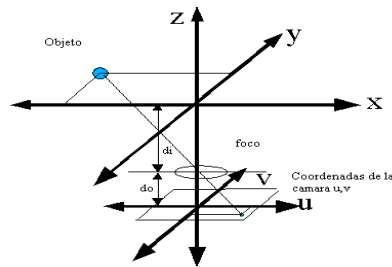


Figura 8: Esquema de una cámara modelo Pinhole

donde  $d_i$  es la distancia del foco al plano imagen,  $z$  es la distancia del foco al objeto,  $U$  y  $V$  las coordenadas del plano imagen, y  $(x, y, z)$  las coordenadas del objeto. Para realizar la medición se utiliza la matriz de proyección perspectiva de la cámara, la cual surge de utilizar un sistema proyectivo de coordenadas en lugar del cartesiano. La expresión de las mismas es la mostrada en la fórmula 2 en donde  $(u, v, w)$  son las coordenadas proyectivas y finalmente la fórmula 3 muestra el cambio a coordenadas euclidianas donde  $(U, V)$  son las coordenadas cartesianas. Para encontrar la posición de un objeto se necesita conocer la matriz anterior, por lo tanto el proceso de calibración de una cámara consiste en calcular los coeficientes  $a_{ij}$ .

$$u = U \cdot w$$

$$u = a_{11} x + a_{12} y + a_{13} z$$

$$w = a_{31} x + a_{32} y + a_{33} z$$

$$a_{11} x + a_{12} y + a_{13} z = U \cdot (a_{31} x + a_{32} y + a_{33} z)$$

si  $(a_{33} = 1) \wedge (z = 1)$

$$a_{11} x + a_{12} y + a_{13} z = a_{31} x + a_{32} y + a_{33} z$$

$$U = a_{11} x + a_{12} y + a_{13} z - a_{31} x$$

(4)

La ecuación (4) está formada por los componentes  $a_{ij}$  de la matriz, las coordenadas espaciales y del plano imagen de cada punto. Se puede obtener de la misma forma la siguiente ecuación:

por los componentes  $a_{ij}$  de la matriz, las coordenadas espaciales y del plano imagen de cada punto. Se puede obtener de la misma forma la siguiente ecuación:

$$\dots$$

(5)

Con estas ecuaciones se busca un conjunto de puntos conocidos que puedan ser previamente medidos sobre el objeto a analizar y con ellos se construye la matriz de calibración de la cámara (4), esta matriz tiene once incógnitas, necesita al menos once ecuaciones independientes, cada punto conocido suministra dos ecuaciones independientes, por lo tanto se necesitan al menos seis para poder realizar una medición, resolviendo esta matriz se encuentran los coeficientes buscados (Young-Hoo, 1998). Al ser este algoritmo muy sensible a fallas se utiliza una mayor cantidad de puntos por lo tanto se tiene una matriz con mayor cantidad de ecuaciones que incógnitas, la misma debe ser resuelta por el método de los cuadrados mínimos

$$\begin{matrix} x_1 a_{11} + y_1 a_{12} + z_1 a_{13} - a_{31} x_1 - \\ x_1 a_{21} + y_1 a_{22} + z_1 a_{23} - a_{31} x_1 - \\ x_n a_{11} + y_n a_{12} + z_n a_{13} - a_{31} x_n - \\ x_n a_{21} + y_n a_{22} + z_n a_{23} - a_{31} x_n - \end{matrix} \quad (6)$$

Se desarrollo un programa donde se visualiza la imagen y se pueden seleccionar las coordenadas de los puntos de coordenadas conocidas (x,y,z) en la imagen (u,v) Luego de esta selección se construye la matriz (6) y se calcula la matriz de distorsión proyectiva.

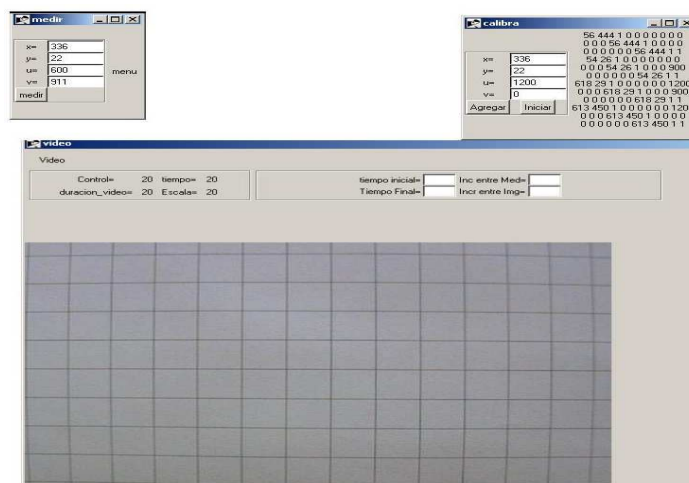


Figura 9: Cálculo y medición de distancias para SCILABPRO

### DEFORMACIÓN DE LA IMAGEN DEBIDO A LA LENTE

Para comprobar la deformación de la imagen se generó una grilla utilizando QCAD (software de tipo CAD de libre disponibilidad). El uso de una herramienta CAD garantiza precisión en el dibujo, de este modo se conformaron cuadrados de un centímetro de lado. Se imprimió el mismo con una precisión de 300 puntos por pulgada y se capturó una imagen con las cámaras a calibrar. Esta imagen se muestra en la figura 9 y pone en evidencia la deformación característica producida por una lente en la cámara. Se calibró la imagen utilizando las rutinas de calibración y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla.

|                  |                   |                     |
|------------------|-------------------|---------------------|
| $a_{11} = 2.135$ | $a_{12} = 0.005$  | $a_{13} = -118.632$ |
| $a_{21} = 0.015$ | $a_{22} = -2.147$ | $a_{23} = 954.999$  |
| $a_{31} = 0$     | $a_{32} = 0$      | $a_{33} = 1$        |

Tabla 3: Coeficientes  $a_{ij}$  obtenidos

Se midió en distintos puntos de la imagen y se obtuvo un máximo de error según  $y = 1.2$  mm,  $x = 0.7$  mm, lo que implica un error porcentual de  $\square y = 1.3\%$  y  $\square x = 0.5\%$ . Estos errores corresponden a los introducidos por el sistema físico de medida y deben ser sumados al error producido por los algoritmos de cálculo que no son analizados en este trabajo (Naqwi, 2000). El error se obtiene mediante la expresión (7)

El sistema desarrollado calcula el campo de velocidades de un fluido utilizando el algoritmo de correlación cruzada (Hoyos, 2003) (Weng, 1995). Este sistema toma la información de una filmación. Se puede medir distintos instantes del desarrollo del experimento y realizar un video del mismo con el campo de velocidades superpuesto, lo que permite obtener una valiosa información cuantitativa del fenómeno analizado. Al mismo tiempo guarda los campos de velocidades obtenidos en matrices para realizar un análisis cuantitativo del mismo. En la figura 10 se muestra el resultado del cálculo de un campo de velocidades con la imagen del experimento superpuesto con él.

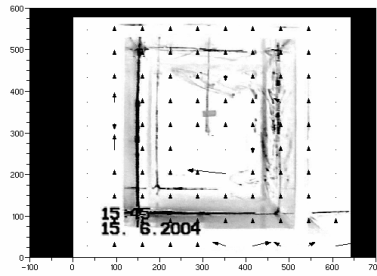


Figura 10: Campo de velocidades en un fluido

## CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un procesador que permite adquirir imágenes de diversas tecnologías. Se diseñaron métodos de cálculo de los errores cometidos por el sistema: tiempo y distancia. Finalmente se construyó un sistema utilizando la tecnología de cámaras IP con conectividad inalámbrica para medir campos de velocidades en un fluido tanto en dos como tres dimensiones. Esta tecnología puede ser utilizada para PIV pero presenta distintos errores:

a) El tiempo entre imágenes es distinto del especificado, pero aun así puede determinarse fácilmente una vez seleccionada la cámara y establecida la latencia en la topología de la red.

b) La distorsión producida por la lente debido a que esta tecnología en general utiliza gran angular. Se puede determinar, y en trabajos sucesivos se tratará de hacerlo, de compensar cambiando la matriz de calibración de la cámara y la cantidad de puntos de control. En una medición real es muy difícil disponer de más de cuatro puntos conocidos, razón por la cual no se incluyó este tipo de algoritmo en este sistema.

Finalmente la utilización de cámaras IP, conectadas en una red Ethernet o la opción de redes inalámbricas, amplía el campo de aplicación de esta técnica.

## REFERENCIAS

- Adrian R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annu Rev. Fluid Mech.* 23,,pp 261-304.
- Adrian R. J.(2004). Twenty years of particle image velocimetry, 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa.
- Amir Naqwi (2000). Distortion Compensation for PIV Systems, TSI Inc.
- Hoyos D, Hoyos E, De Paul, I (2003). Programa para medición de campos de velocidades en fluidos utilizando velocimetría de partículas, *AVERMA Vol.7 N° 2* p. 08.97 ISSN 0329-5184
- Hoyos D, De Paul, I (2000) Sistema de Calibración de un medidor de velocidad de flujo de aire usando procesamiento digital de imágenes, *AVERMA Vol. 3, N° 2, 2000.* ISSN 0329-5184
- Keane, R. D. and Adrian, R. J. (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images, *Appl. Sci.Res.* 49, pp. 191-215.
- Raffel M, Westerweel J, Willert C, Gharib M and Kompenhans J (1996), Analytical and experimental investigations of dual-plane particle image velocimetry, *Opt. Eng.* 35 ,,2067-2074
- Welch B., Jones K, y Hobbs J. (1997) *Practical Programming in Tcl and Tk.* Prentice Hall
- Westerweel J.(1993). Digital Particle Image Velocimetry Theory and Application *Optical diagnostics in fluid and thermal flow.* SPIE 2005 624–35
- Weng W., Liao G., and Fan W. (1995). An improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry.

## ABSTRACT

This paper aims to describe the design, construction and calibration of a system to measure velocity field of fluids, based on the measurement technique called PIV (Particle Image Velocimetry). This technique consists of introducing tracers (small particles that have the same density that the fluid but of a different color) to illuminate a plan of the velocity field in the fluid and thus highlight the plotters to a camera (using the technique of measurement in two dimensions) captures the movement of the fluid. When using two cameras (technical measure in three dimensions) can be captured all three components of velocity of the fluid. There are various commercial systems that enable the display of the velocity field using the technique of measuring PIV. Such systems require sophisticated hardware and generally have a high price. The implemented system works with cameras and provides a common set of calibration techniques and measures that can measure velocity fields of fluid within a range that corresponds to natural convection using different types of tracers.

**Keywords:** measurement, fluid, instrumentation