

OPTIMIZACIÓN DEL METODO PIV PARA CONVECCIÓN NATURAL

Daniel Hoyos, Irene De Paul

Instituto de Energías No Convencionales (CONICET) CIUNSA Consejo de investigación Universidad Nacional de Salta. C.P 4400-Salta

Tel. 0387-4255579 e-mail: hoyosdani@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se describe un método de medida de campos de velocidades de fluidos denominado PIV. El mismo se puede utilizar para optimizar sistemas que utilizan energía solar con convección natural o forzada. Se presenta un conjunto de algoritmos que permiten determinar cuándo se puede aplicar el método de medida, como optimizar el mismo y el error cometido al aplicar este método. Se aplica este resultado sobre una maqueta que simula una casa.

Palabras clave: energía solar, instrumentación, convección natural

INTRODUCCIÓN

Distintos sistemas que utilizan energía solar realizan la transferencia de energía a través de un fluido que puede ser agua o aire, utilizando convección natural o forzada (De Paul et al, 1997). La medición de los campos de velocidades de estos fluidos permite optimizar el diseño de estos sistemas. Pero cualquier instrumento que se introduzca dentro del fluido provoca la variación del campo de velocidades que se desea medir. Por lo tanto es importante contar con un método de medida que no implique la introducción de un instrumento en el mismo.

El método de velocimetría de partículas denominado PIV (Adrián, 2004) es una técnica de medida no intrusiva que permite el estudio de las estructuras espaciales del flujo. PIV captura los vectores de velocidad de dos dimensiones en un plano del campo del fluido. El flujo es sembrado con pequeñas partículas de la misma densidad del flujo pero de distinto color. El plano de medida es iluminado por una luz láser. Enfocando el plano de medida se coloca una cámara, que toma la luz reflejada por las partículas sembradas en el fluido, en dos instancias de tiempo. Para calcular las velocidades se utiliza el método de la correlación cruzada (Weng et al, 1998).

En procesamiento digital de señales la correlación cruzada es una medida de la similitud que tienen dos señales entre sí. Se define para dos dimensiones la expresión [1] en donde a y b son dos funciones de t y $R(t)$ es la correlación cruzada de a y b

$$R(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \frac{1}{T} a(x, y) \cdot b(x + dx, y + dy) dx \cdot dy \quad (1)$$

Es conveniente para el cálculo de esta expresión utilizar la herramienta matemática denominada transformada de Fourier. Si se aplica la transformada de Fourier a la expresión (1). Se obtiene que, la correlación cruzada de dos funciones en el dominio de la frecuencia, corresponde al producto punto a punto de las transformadas de las funciones. Como se muestra en la expresión (2) en donde $R(jw)$ es la transformada de Fourier de la correlación cruzada y $A(jw)$ y $B(jw)$ son respectivamente las transformadas de Fourier de las funciones $a(t)$ y $b(t)$.

$$R(jw) = A(jwx, jwy) \cdot B(jwx, jwy) \quad (2)$$

El algoritmo de cálculo de la expresión (2) se explicita en las formulas (3),(4),(5) y (6). En la formula (3) se obtiene la transformada de Fourier de la función A . En la formula (4) se calcula la transformada de Fourier de la función B . Mientras que en la formula (5) se explicita el producto punto a punto entre la transformada de Fourier de la función a y la conjugada de la transformada de Fourier de la función b . En la formula (6) finalmente se obtiene la correlación cruzada.

$$A(jwx, jwy) = F(a(x, y)) \quad (3)$$

$$B(jwx, jwy) = F(b(x, y)) \quad (4)$$

$$C(jwx, jwy) = A(jwx, jwy) * conj(B(jwx, jwy)) \quad (5)$$

$$c(x, y) = F^{-1}(C(jwx, jwy)) \quad (6)$$

Se debe buscar el máximo del resultado de la formula (6). La posición de este máximo determina el desplazamiento de las partículas (Wereley et al, 1998). Este es el método PIV. Como se puede inferir su implementación es complicada. En este trabajo se presentaran distintos algoritmos que permiten solucionar los problemas enumerados o estimar el error cometido. Para probar los algoritmos de cálculo PIV se diseñaron un conjunto de imágenes para probar los algoritmos PIV (Nishio et al, 2000). En este trabajo no se utilizan dado que esas imágenes tienen muchos trazadores, cosa que no ocurre en los experimentos que utilizan convección natural.

En la Figura 1 se puede observar una imagen captada por una cámara de video. En donde se encuentra, la maqueta iluminada por el haz láser. Dentro de la maqueta que simula dos habitaciones se encuentran los trazadores en suspensión. Esta imagen presenta algunos de los problemas que surgen de la implementación práctica del sistema cuando se desea medir campos de velocidades en fluidos producidos por convección natural. Dado que las velocidades son muy pequeñas, los trazadores tienen tendencia a decantar en el fondo lo que produce imágenes con pocos trazadores como se observa en la figura 1.

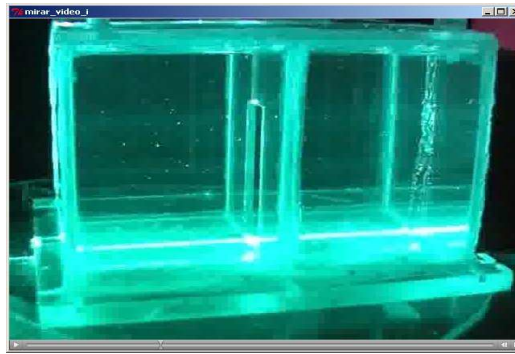


Figura 2: Imagen adquirida por la cámara de la maqueta con trazadores

Los problemas que presenta esta imagen se pueden enumerar como:

- ▲ Ruido térmico: producido por los fotositos de la cámara
- ▲ Objetos Fijos : Las paredes y techos de la maqueta que reflejan la luz
- ▲ Movimientos espureos: Se puede observar un desplazamiento de agua por la pared que no tiene que ver con el campo observado
- ▲ Ausencia de trazadores en algunos de las regiones del campo de velocidades

MATERIALES Y METODO

En la figura 2 se puede observar una fotografía del dispositivo experimental donde se puede observar la cámara que realiza la medida, la maqueta y el haz laser utilizado. Sobre el haz se coloca una óptica apropiada que forma un plano iluminado que debe atravesar la maqueta. La maqueta tiene en su interior agua y dentro de la misma los trazadores, los cuales son pequeñas esferas de vidrio que tienen la misma densidad del agua. Cuando el haz laser las iluminan ellas refractan la luz y pueden ser observadas. Los trazadores al tener la misma densidad del fluido, siguen el movimiento del mismo. La cámara de video capta este movimiento.

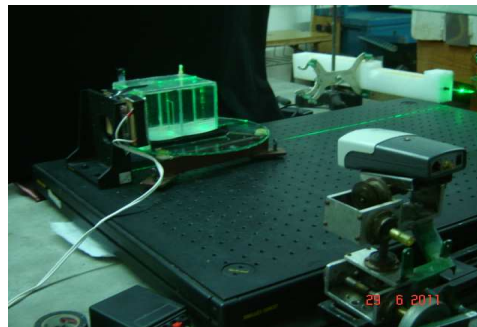


Figura 2: Dispositivo experimental

ANALISIS DEL ALGORITMO DE CORRELACIÓN CRUZADA

Al aplicar el algoritmo de correlación cruzada a dos funciones iguales, pero desplazadas en x , una distancia determinada, como las funciones mostradas en la figura 3, se observa que la ubicación del máximo corresponde a la distancia entre ambas funciones. En la figura 3 se utilizan dos funciones triangulares separadas entre sí una distancia de 20 unidades arbitrarias en la dirección de las x . Se puede observar que el máximo de la correlación coincide con la distancia que ambas funciones están separadas.

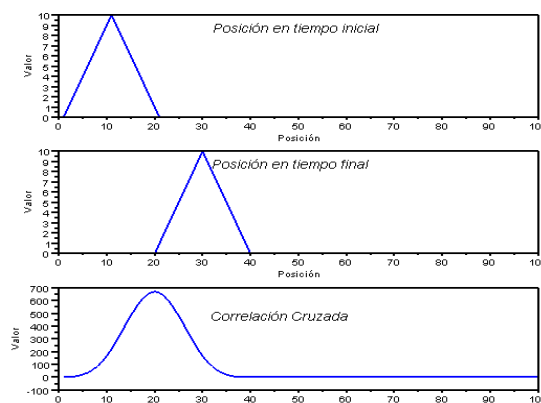


Figura 3: Funciones triangulares a y b separadas entre sí 20 y función de correlación cruzada

Se puede interpretar que la señal **a** representa un objeto que se encuentra en la posición $x=10$ en un tiempo t_1 y la señal **b** representa el mismo objeto que se desplazó desde izquierda a derecha del grafico hasta posición $x=30$ en un tiempo t_2 . La correlación cruzada de estas dos funciones se muestra en el figura 3 en la cual se puede observar que el máximo se encuentra en la posición $x=20$. Analizando este resultado se puede inferir que la posición del máximo de la función correlación cruzada es una medida del desplazamiento del objeto. La velocidad del objeto se obtiene de dividir el valor encontrado por el tiempo transcurrido como se muestra en la formula (7)

$$V = \max(c(x)) / (t_2 - t_1) \quad (7)$$

Continuando el análisis, si se interpreta que el objeto se mueve en dirección de derecha hacia izquierda entonces la función **b** representa la posición inicial en el tiempo t_1 y la función **a** representa la posición final en el tiempo t_2 . El resultado de aplicar el algoritmo de correlación cruzada es el mostrado en la figura 4.

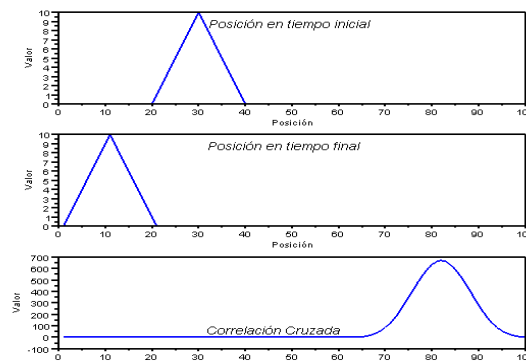


Figura 4: Desplazamiento en el sentido inverso al realizado en la figura 3

Se observa que el nuevo máximo se encuentra en la posición $x=80$, a 20 de la máxima frecuencia espacial. Esto implica que cuando el movimiento es en el sentido inverso de las x el máximo se encuentra en una posición mayor que la mitad y la expresión de la velocidad es la mostrada en [8] esto ocurre por la propiedad de la transformada de Fourier digital donde las frecuencias negativas se muestran en la mitad superior de las frecuencias.

$$v = \frac{(lmax - max(c))}{(t_2 - t_1)} \quad (8)$$

INFLUENCIA RUIDO ALEATORIO

Se analiza en esta sección la influencia del ruido aleatorio en la determinación del error en la medida de la velocidad. Para cumplir con este fin se utilizan las funciones triangulares de la figura 3 y se le suma una componente de ruido aleatorio cuyo máximo es igual al máximo valor de las funciones. Este caso es extremo dado que ruidos de estas características no se obtienen experimentalmente. En la figura 5 se muestran estas dos nuevas funciones y el resultado del cálculo de la correlación cruzada. Se puede observar que la posición del máximo de la correlación no varía significativamente.

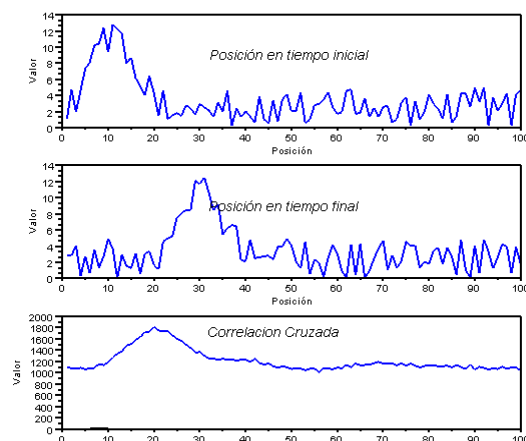


Figura 5: Análisis de la influencia del ruido en el resultado de la correlación cruzada

Se debe determinar el error producido por el ruido aleatorio. Con este fin se repite 100 veces las funciones utilizadas en la figura 2 con distintos ruido aleatorio y se calcula las funciones de la correlación cruzada y aplicando el algoritmo descrito se obtiene la posición del máximo En la figura 6 se muestra los resultados obtenidos con respecto a cada una de las medidas.

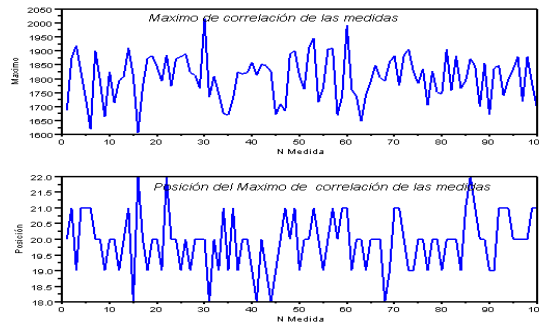


Figura 6: Grafico de resultado de correlación cruzada y posición del máximo vs medida

La figura 6 se calculó con un ruido del 50 % de la señal para 100 casos. Se obtuvo una desviación standard de 0.94. Resulta interesante definir un coeficiente que se pueda correlacionar con la desviación standard por lo tanto se propone definir la relación señal ruido como el cociente entre el máximo de la señal y el máximo ruido.

Para obtener una función que relacione cada posible desviación standard con la relación señal-ruido se repite el procedimiento anterior para distintas relaciones señal ruido y se grafica esta funciones. Lo anteriormente dicho se muestra en la figura 7

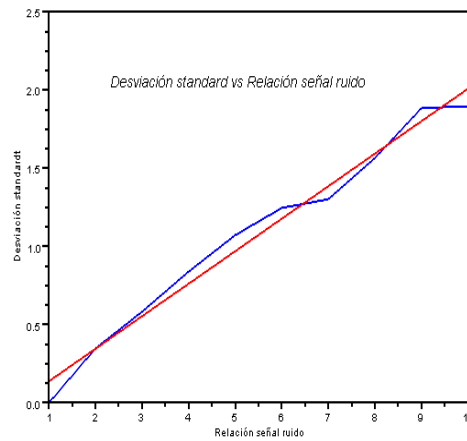


Figura 7: Grafico Relación Señal-ruido vs Desviación standard de la medida.

Se calcula la desviación standard y se obtiene una función lineal que vincula la relación señal ruido con el error de la posición obtenida como se muestra en la expresión (9)

$$error = 0,22 \cdot sr + 0,10 \tag{9}$$

Cuando se realiza una medición de campos de velocidad el factor del error que tiene en cuenta el ruido aleatorio es el explicitado en la expresión (9).

INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE UN OBJETO EN EL CAMPO DE MEDICIÓN

En esta sección se analiza la presencia de un objeto de mayor tamaño y muy iluminado en la región donde se desea medir el campo de velocidades. Esto se esquematiza en la figura 8 en donde se utiliza las funciones de la figura 3 a las que se le agregó una función cuadrada de alto 200 y ancho 20. Sobre estas funciones se aplicó el algoritmo de correlación cruzada, como se muestra en la figura 8. El resultado del procesamiento es que el algoritmo no encuentra ningún desplazamiento dado que el máximo calculado está en el origen. Esto ocurre porque el objeto en este caso la función cuadrada es mucho mayor que las funciones que simulan el movimiento.

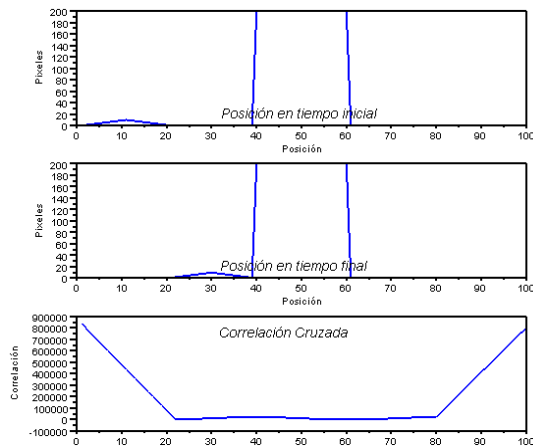


Figura 8: Procesamiento de las funciones en presencia de un objeto

Dado que se trata de objetos fijos en el campo de velocidades se propone un algoritmo para eliminarlos. El algoritmo propuesto es el siguiente:

1. Se genera una imagen en donde se muestran solamente los objetos fijos en el campo. Se observa que los trazadores están más iluminados que el fondo fijo. Por lo tanto se propone un algoritmo que compara ambas funciones punto a punto y elige el menor valor entre las dos funciones. Este algoritmo se denominó `and_difuso` dado que es uno de los posibles `and` que se utilizan en lógica difusa.
2. Cada una de las funciones son restadas con respecto al resultado obtenido de aplicar el `and_difuso`.

En la figura 9 se puede observar el resultado de aplicar este algoritmo y se observa que el objeto fijo en el campo de velocidades se borra completamente. Si a las nuevas funciones se les aplica el algoritmo de correlación cruzada, se puede calcular el desplazamiento de la función.

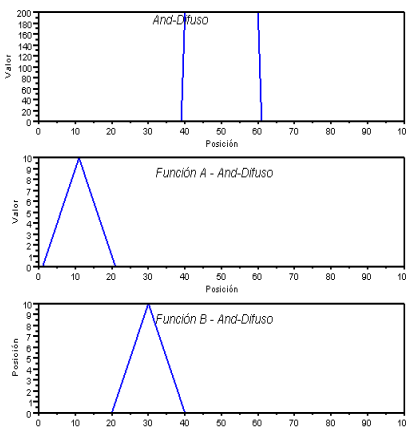


Figura 9: Funciones obtenidas de procesar las imágenes con el algoritmo `f1-and_difuso(f1,f2)`

En la figura 10 se observa el resultado de aplicar el algoritmo previamente descrito y luego el algoritmo de correlación cruzada. El movimiento queda perfectamente determinado.

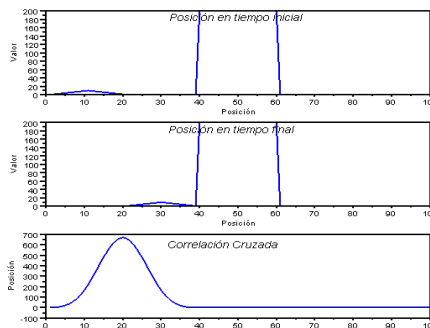


Figura 10: Gráfico que representa la aplicación del procesamiento `and_difuso`+correlación cruzada.

AUSENCIA DE TRAZADORES

En esta sección se trata de obtener un algoritmo, que permita determinar si en una región del campo de velocidades existen trazadores y si se correlacionan con los existentes en la otra imagen. Se observa que cuando una función es muy parecida a otra el valor de la correlación cruzada de ambas funciones es alto. Pero el valor de la correlación depende de la forma de la

función y de la cantidad de puntos que se utilice para calcular la misma. Por lo tanto la correlación cruzada de dos funciones no puede utilizarse como índice. El siguiente algoritmo permite obtener un resultado adecuado. Se calculan las siguientes funciones.

$$fc = \text{corracruz}(a, b) \tag{10}$$

$$mc = \text{maximo}(fc) \tag{11}$$

$$fa = \text{corracruz}(a, a) \tag{12}$$

$$ma = \text{maximo}(fa) \tag{13}$$

$$fb = \text{corracruz}(b, b) \tag{14}$$

$$mb = \text{maximo}(fb) \tag{15}$$

$$f = \frac{ma \cdot mb}{mc^2} \tag{16}$$

Donde *corracruz* es la correlación cruzada entre dos funciones. *fc* es la correlación cruzada entre las funciones *a* y *b*. La función *fa* y *fb* son las auto correlaciones de las funciones *a* y *b* respectivamente. El algoritmo representado por la palabra *máximo* encuentra el máximo de la función. Por lo tanto *mc*, *ma*, *mb* representan el máximo de las funciones *fa*, *fb*, *fc*. La ecuación [16] define un coeficiente que cuando ambas funciones son similares el resultado es uno y en caso que las funciones sean distintas el resultado se encuentra entre cero y uno.

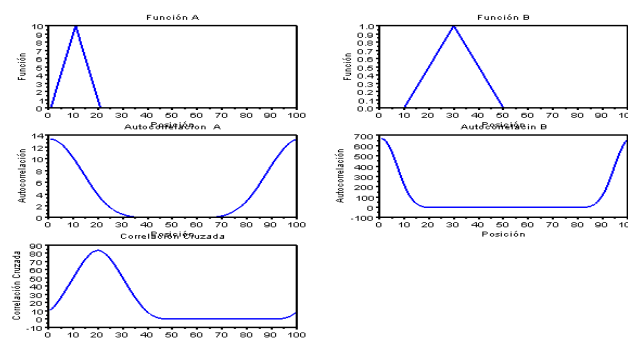


Figura 11: Gráfico donde se muestran las funciones a y b la auto correlaciones y la correlación cruzada entre ambas funciones.

Tomando distintas funciones y calculando este coeficiente se observan los siguientes resultados explicitados en la tabla 1. En la fila 1 se observan dos funciones idénticas. Mientras que en la fila 2 se observan dos funciones de distinto ancho. En la fila tres ruido con la función. Finalmente en la fila 4 las funciones más ruido.

Funciones		Coefficientes	Número
		1	1
		0.779	2
		0.2954	3
		1	4

Tabla 1: Funciones y coeficiente de similitud.

Se eligieron estas funciones porque representan situaciones cercanas a la realidad. El coeficiente propuesto tiende a uno cuando las funciones son muy parecidas entre si y tiende a cero cuando son muy distintas. Si se propone la situación que ambas funciones sean ruido el resultado es 0.66. Por lo tanto se propone que cuando el coeficiente es menor que 0.7 las funciones no pueden correlacionarse.

APLICACIÓN DEL METODO DE MEDIDA

El método propuesto utiliza una filmación de un experimento. Se toman dos imágenes de este video que se muestran en la figura 12. En este caso se utiliza las imágenes correspondiente a los tiempos 22 y 22.2 segundos.

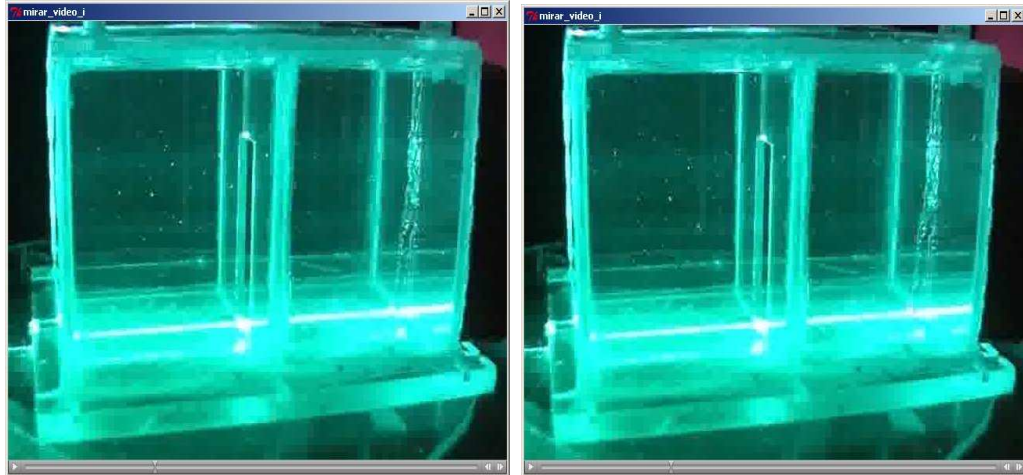


Figura 12: Imágenes correspondientes a 22 y 22.2 segundos

Dentro de la imagen existen distintas zonas:

- ▲ Objetos fijos
- ▲ plano iluminado no es uniforme.

Para eliminar del procesamiento se ejecuta el algoritmo `and_difuso`. Este algoritmo tiene también como ventaja que resta ruido térmico. Se selecciona el frame verde para tener mayor resolución. El resultado de este procesamiento se muestra en la figura 13.

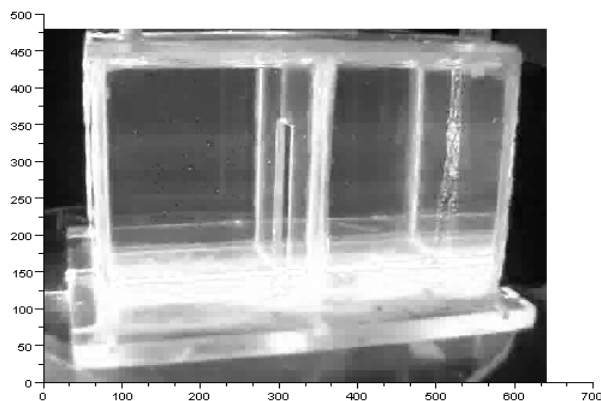


Figura 13: Resultado del procesamiento de las imágenes con `and_difuso`.

El siguiente paso consiste en restar a ambas imágenes el resultado obtenido en el punto anterior. Este procesamiento se muestra en la figura 14. Esta figura solamente muestra los objetos que se movieron y el ruido. Por lo tanto es una imagen muy difícil de visualizar dado que es muy oscura. Con el objeto que pueda ser apreciada se invirtió el color usando procesamiento de imágenes. Pero en el algoritmo se utiliza la misma tal cual es.

En las imágenes de la figura 14 se puede apreciar los siguientes detalles de las imágenes que no deben utilizarse para calcular el campo de velocidades.

- ▲ Movimiento por fuera del campo de velocidades.
- ▲ Zona exterior al campo de velocidades.

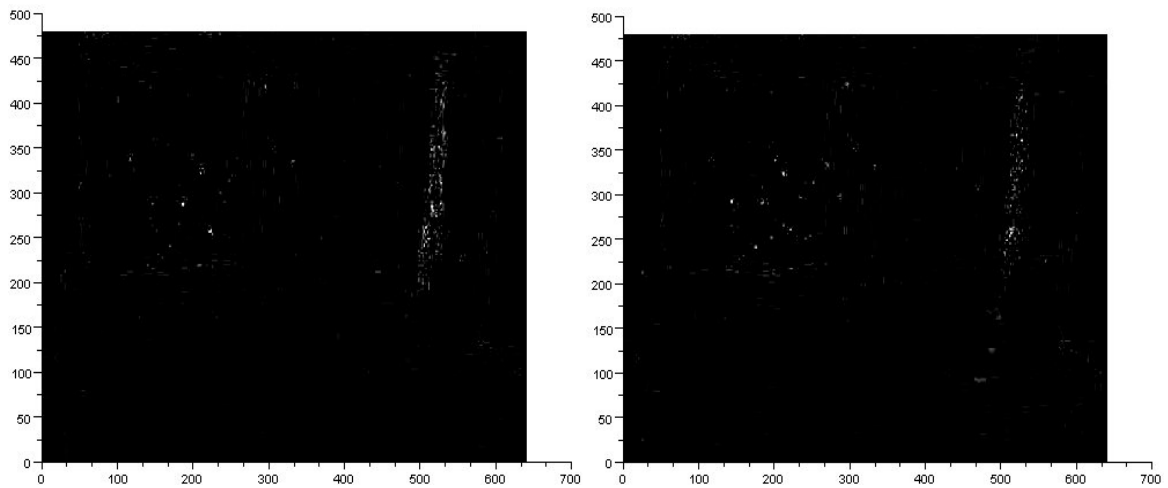


Figura 14: Imágenes obtenidas de restar cada una de las imágenes con la obtenida de realizar el procesamiento `and_difuso`, estas imágenes están resaltadas de forma que se puedan apreciar las partículas. Pero el algoritmo no necesita del resaltado para operar.

Para calcular el campo de velocidades se divide la región en n^2 subregiones. A cada una de las cuales se le aplica el algoritmo de correlación cruzada. El comportamiento observado en la figura 4 se traduce cuando se calcula la correlación cruzada en en dos dimensiones en el siguiente algoritmo que define el desplazamiento entre ambos grupos de manchas

Definiendo:

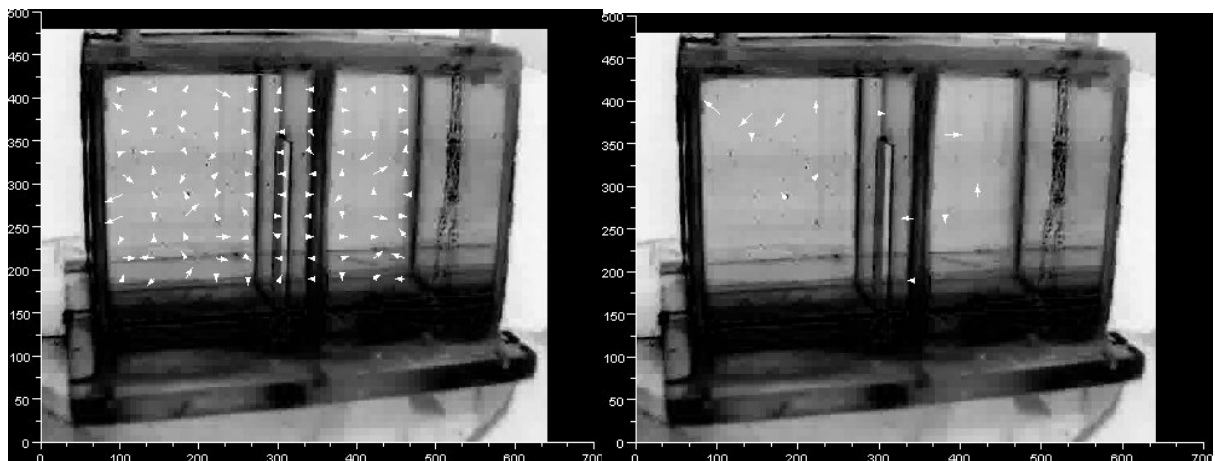
M_x =máximo en x de la correlación cruzada

M_y =máximo en y de la correlación cruzada

L =ancho de la ventana

$$\begin{aligned}
 & \text{si } L/2 > M_x \text{ y } L/2 > M_y \quad x=M_x, \quad \Delta y=M_y \\
 & \text{si } L/2 < M_x \text{ y } L/2 > M_y \quad \Delta x=M_x-L, \quad \Delta y=M_y \\
 & \text{si } L/2 > M_x \text{ y } L/2 < M_y \quad \Delta x=L, \quad \Delta y=M_y-L \\
 & \text{si } L/2 < M_x \text{ y } L/2 < M_y \quad \Delta x=M_x-L, \quad \Delta y=M_y-L
 \end{aligned}$$

En la figura 16 a se muestra el resultado de aplicar este algoritmo sobre la región seleccionada. Se calcula el coeficiente de la fórmula 16 para cada una de las subzonas y se toma como criterio que el mismo debe ser mayor que 0.4 para aceptar que existe información suficiente para estimar el campo de velocidades. En la figura 16b se muestra el campo de velocidades obtenido.



El calculo del error da en el orden de 0.11 para las zonas donde se pudo estimar el campo de velocidades.

CONCLUSIONES

El ruido térmico no afecta demasiado la medida.

La presencia de objetos fijos dentro del campo de medida puede ser resuelta aplicando el algoritmo propuesto denominado `and_difuso`.

Los movimientos que no corresponden al campo de velocidades se resuelven eliminando directamente esta parte de la imagen dado que no se obtuvo ningún algoritmo que solucionara este inconveniente.

En este trabajo se muestra el método sobre dos imágenes que presentan inconveniente para el cálculo del campo de velocidades. Pero una vez seleccionada la zona de medida se puede realizar este método sobre un conjunto de imágenes y armar un video con el mismo.

REFERENCIAS

- I. De Paul; D. Hoyos; L.Saravia (1997) Circulación y velocidad del vapor de agua en destiladores de geometría diferente Avances en energías renovables Vol 1 N° 1 pag 97- 100
- R. J. Adrian (2004) TWENTY YEARS OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY Experiments in Fluids (2005) 39: 159–169
- W. Weng, G. Liao, W. Fan (2001) Improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry Acta Mechanica Sinica Volumen 17, N 4 pag 332-339
- Steven T. Wereley Carl D. Meinhart (1998) Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms.10-th Internation Symposium on Applications of Laser Technology 13-4 K., Nishio, S., Saga, T. and Kobayashi, T.,(2000), "Standard images for particle-image velocimetry, Meas. Sci. Technol, 11, 685-691.

ABSTRACT

This paper describes a method of measuring fluid velocity fields called PIV. The same can be used to optimize systems that use solar energy with natural or forced convection. It presents a set of algorithms to determine when you can apply the method of measurement, how to optimize it and the error in this method. This result is applied on a model.

Keywords: solar energy, technology and education.