

20
2 ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISION DE INGENIERIA MECANICA E INDUSTRIAL

APLICACIÓN DE VELOCIMETRIA PARTICULAS POR IMÁGENES A MEDIOS GRANULADOS Y A FLUIDOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO
DE INGENIERO MECANICO
(AREA MECANICA).

PRESENTA :
JOSE ANTONIO CORDOVA MAGAÑA

DIRECTOR:
DR. CESAR TREVIÑO TREVIÑO



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1999

270860



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**APLICACIÓN DE VELOCIMETRÍA DE PARTICULAS POR
IMÁGENES A MEDIOS GRANULADOS Y A FLUIDOS**

JOSÉ ANTONIO CÓRDOVA MAGAÑA

TESIS

**PRESENTADA A LA DIVISION DE INGENIERIA MECÁNICA E
INDUSTRIAL**

DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

(AREA MECÁNICA)

Director: Dr. César Treviño Treviño

1999

Quiero agradecer a Abraham Medina, Erick Luna y a César Treviño por su apoyo en la realización de este trabajo. Gracias a esta investigación se publicó el artículo "Velocity field measurements in granular gravity flow in a near 2D silo" en la revista "Physics Letters A 250 (1998) 111-116".

PRÓLOGO

La medición de velocidades en flujos es de vital importancia en una infinidad de casos existentes en la ingeniería. Mejorar la eficiencia de turbomaquinaria, el diseño de quemadores para lograr la estabilización en flamas y mejorar la transferencia de calor en un sistema son ejemplos de problemas que requieren un entendimiento del campo de flujo.

Aunque a veces es suficiente con conocer velocidades promedio para entender el desarrollo de un fenómeno existen muchos casos con flujos inestables que generan complejos campos de velocidades, siendo la medición instantánea de éstos la razón por la cual surge la técnica de Velocimetría de Partículas por Imágenes.

En este trabajo se explica en qué consiste esta técnica, su aplicación a un problema de fluidos y por primera vez a los medios granulados obteniéndose importantes resultados así como experiencia en su uso.

ÍNDICE

I. Introducción	página
1.1 Descripción de la técnica de Velocimetría de Partículas por imágenes	1
1.2. El problema del escalón	6
1.3. Los medios granulados	8
II. El problema del escalón	
2.1 Descripción del problema del escalón	13
2.2 Ecuación y especificaciones del problema	14
2.3 Investigación experimental (equipo experimental)	16
2.4 Procedimiento	24
2.5 Análisis de Resultados	37
2.6 Conclusiones	
III. Los medios granulados	
3.1 Descripción del problema de los medios granulado	39
3.2 Equipo experimental y procesamiento de imágenes	42
3.3 Análisis de resultados	48
3.4 Conclusiones	54
IV. Conclusiones generales	56
Referencias	59

I. Introducción

1.1 Descripción de la técnica de Velocimetría de Partículas por Imágenes

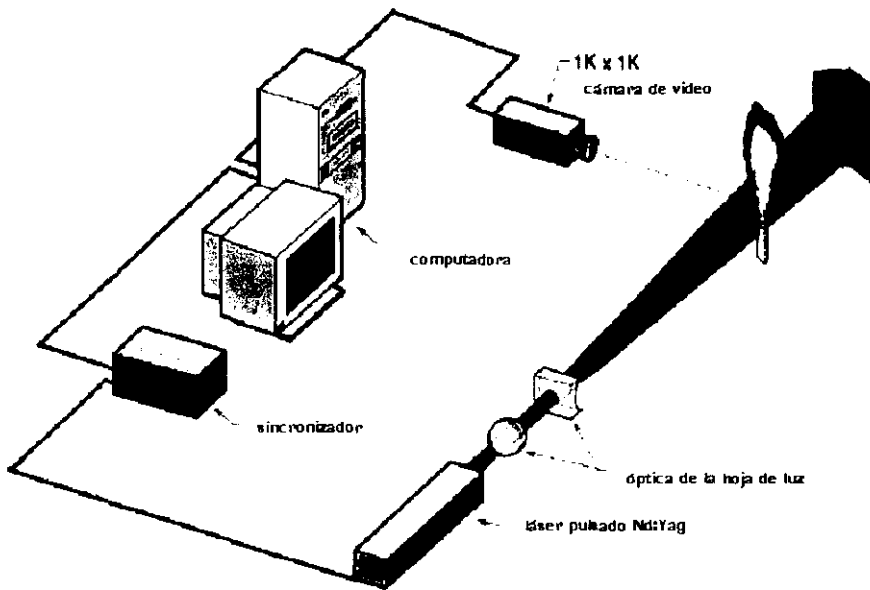
La Velocimetría de Partículas por Imágenes o simplemente PIV es una técnica muy eficiente para la medición instantánea de velocidad en dos dimensiones. Esta técnica la empezaron a desarrollar en los años 70's y era conocida como la técnica "laser speckle". A partir de entonces se han realizado muchas investigaciones para mejorar su desempeño, llegando incluso a la utilización de holografía para la medición de velocidades en flujos tridimensionales.

PIV es la medición simultánea de vectores de velocidad en un fluido o en partículas en muchos puntos (miles de puntos), utilizando técnicas ópticas de análisis de imágenes [1]. Las mediciones se realizan en rebanadas planas del campo de flujo, pero, como se mencionó, es posible hacer mediciones en tres dimensiones. La precisión de PIV es comparable a la obtenida con "Laser Doppler Velocimetry" (LDV) o con anemometría de hilo caliente. PIV es una tecnología ideal para el estudio de campos de flujo inestables [2].

PIV realiza mediciones de velocidades de flujo por medio de la medición de la distancia recorrida por partículas en el flujo en el tiempo entre dos pulsos consecutivos de luz. Cada vez que existe una pulsación del láser, la imagen de las partículas que en ese momento

atraviesan la hoja de luz producen una exposición en la cámara. Al ser un láser pulsado, se generan dos imágenes de cada partícula en la hoja de luz. Por medio de la medición de la distancia que las partículas han recorrido y dividiéndola entre el tiempo entre pulsos, se obtiene la velocidad para esa partícula. Por medio de las mediciones de desplazamientos de partículas en muchos puntos de la imagen, se obtiene un campo de velocidades. Debido a la gran precisión de la medición de la velocidad se pueden obtener otras cantidades tales como vorticidad, esfuerzos, etc.

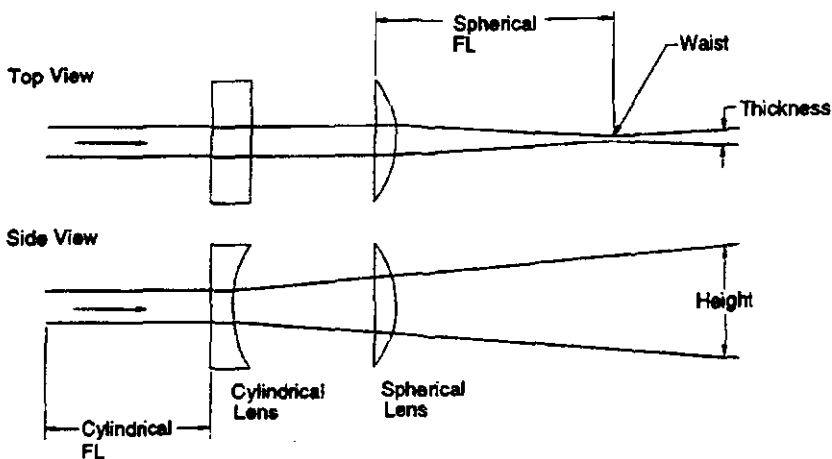
El sistema PIV cuenta con varios componentes importantes, los cuales funcionan en conjunto para lograr la obtención del campo de velocidades, en la siguiente figura se puede observar [3].



Componentes básicos de un sistema PIV

Láser y óptica de la hoja de luz

El láser pulsado y la óptica de la hoja de luz son parte del sistema de iluminación. La óptica de la hoja de luz incluye una lente cilíndrica y una lente esférica. La lente cilíndrica diverge al haz láser con un mismo espesor, la lente esférica concentra el haz en la distancia focal, lugar donde es preferible realizar el experimento.



Captura de Imágenes

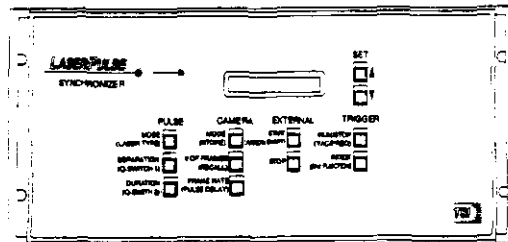
Las imágenes de las partículas en el flujo se pueden grabar en una cámara fotográfica o en una cámara de video CCD. En cualquier

caso, la computadora procesa una imagen digital del flujo. Cuando se utiliza la cámara de vídeo CCD, la tarjeta de vídeo lee la imagen de la cámara y la registra en RAM. Esta imagen digital se procesa utilizando el software de INSIGHT.



Sincronizador

Para poder obtener un campo de velocidades con el sistema PIV, el pulso del láser debe dispararse con una secuencia adecuada y con el tiempo deseado dependiendo de la velocidad del flujo en estudio. El sincronizador realiza esta tarea controlando el tiempo de todos los componentes, haciendo que funcionen como un sistema integrado.



Análisis y despliegue de imágenes

Las componentes de análisis y despliegue de imágenes del sistema PIV consisten en el software de INSIGHT [4] y una tarjeta capturadora de cuadros o "frame grabber". El software de INSIGHT procesa las imágenes digitales de PIV y mide la velocidad a través del campo de flujo. Los vectores de velocidad se despliegan como una transparencia encima de las imágenes. Por medio de post-procesamiento del campo de velocidades se obtienen valores tales como vorticidad y esfuerzos existentes en el flujo.

1.2 El problema del escalón

El tema de recirculación de flujos es de gran importancia ya que la presencia de dichos flujos en intercambiadores de calor, alrededor de edificios y circuitos microelectrónicos es un factor predominante en el diseño de cualquier dispositivo que interactúe con un fluido. Dentro de este tipo de flujos encontramos el flujo en un escalón en el cual el fluido pasa de un canal pequeño a uno mayor, presentando este problema una geometría muy sencilla pero a su vez existiendo recirculación y separación de flujo. Este tipo de flujo de expansión ha atraído la atención mundial durante las últimas décadas. Existen dos razones importantes por las cuales se lleva a cabo el estudio de este flujo, una

de ellas es porque este problema es rico en la física de los flujos y segundo por su utilidad práctica. Desde el punto de vista de la física de los flujos, el escalón presenta una separación de flujo, una región de recirculación justo atrás del escalón y una región de separación-reflujo pegada en el techo del canal, y posteriormente una estabilización del flujo aguas abajo en el canal de salida. Al entender este tipo de flujo de expansión, se pueden obtener esfuerzos cortantes y razones de transferencia de calor en muchos flujos industriales. La evidencia experimental, revela la existencia de la formación de vórtices a lo largo del canal de expansión aguas abajo del escalón [5,6].

Se han elaborado pocos estudios experimentales acerca del problema del escalón, y los fenómenos que caracterizan al flujo son poco conocidos y poco entendidos. Esto era debido principalmente a la ausencia de un método eficiente para la obtención de la información necesaria en el estudio de este flujo. Hasta 1980 sólo se habían utilizado dispositivos experimentales puntuales (la zona de estudio es un solo punto) tales como el anemómetro de hilo caliente, y el velocímetro "laser-Doppler", los cuales eran la única forma de medir velocidades variables. Obviamente dichas mediciones no pueden brindar una visión global del flujo. En este estudio, se utiliza la técnica de PIV, con la cual podemos hacer el estudio de un área y podemos registrar un campo de velocidades de dicha área [7].

Lo que había limitado el estudio era que no existían las técnicas experimentales adecuadas.

1.3 Los medios granulados

La arena, los suelos, los polvos medicinales, industriales y alimenticios y los granos agrícolas, entre otros, son un conjunto de materiales conocidos como medios granulados. Estos materiales son muy importantes principalmente en la industria química en donde representan el 50 % de los productos terminados y el 75 % del material en bruto. De esto se deriva la gran importancia del conocimiento de estas sustancias. Sin embargo, no existe tal conocimiento de estas sustancias representando desperdicios de hasta 40% en la capacidad de plantas industriales, por lo tanto, un buen manejo de estas sustancias representaría sustanciales ahorros y mejoras en los procesos de manejo, transporte, etc.

Los medios granulados desde el punto de vista de su microestructura, son agregados de granos rígidos que interaccionan principalmente por contacto (fricción y colisiones inelásticas entre ellos), los cuales se encuentran inmersos en un fluido intersticial que generalmente es aire o agua. Pero, si la densidad de los granos es mucho mayor que la del fluido intersticial, como el caso del aire, la presencia de dicho fluido puede ser despreciada. También el tamaño del grano puede variar considerablemente, desde unas cuantas micras, en polvos finos, hasta unos centímetros, en el caso de sólidos fracturados.

Esta aparente simplicidad en la estructura (tamaño y forma) y en

la interacción entre granos (interacción tipo esferas duras inelásticas), contrasta enormemente con la presencia de cúmulos atómicos o moleculares en los líquidos o en los sólidos, debido que a menudo estos cúmulos dan origen a complejos potenciales de interacción, lo cual dificulta el cálculo de sus propiedades macroscópicas.

Aún con estas ventajas el estudio teórico de los medios granulados a partir de la interacción entre granos (descripción micromecánica), es actualmente muy limitado y carece de los alcances de las teorías microscópicas de los líquidos y los sólidos. Las principales razones de esto son la acción de la gravedad, la inhomogeneidad en el material granular causada por la existencia simultánea de zonas de alta y baja concentración de granos, las colisiones inelásticas entre granos, y la fricción.

Por otro lado, la aproximación del continuo, esto es, cuando la interacción entre granos individuales no requiere considerarse, la dinámica granular puede describirse al analizar elementos de volumen que contienen un gran número de granos. No obstante esta aproximación solamente es útil para describir correctamente muy pocos fenómenos, puesto que a menudo se requiere obtener información a nivel de granos individuales.

Existen fenómenos característicos dentro de los medios granulados denominados como colectivos, es decir, a gran escala. Estos fenómenos son:

a) *La dilatancia.*- Tiene que ver con los diferentes acomodos espaciales o empaquetamientos que pueden adoptar los granos, ya sea en el caso

estático o bajo movimiento. Es por eso, que en un medio granulado, comúnmente ocurre que el material se dilata al aplicarle una fuerza compresiva.

b)La segregación.- Consiste en la separación del material en zonas o cúmulos de distinto tamaño de grano y, en última instancia es debida a la existencia de movimiento relativo entre los granos, causado por la vibración vertical o rotación horizontal.

c)Arqueo.- Es un fenómeno fuertemente relacionado con el empaquetamiento de granos confinados en un recipiente alto. Éste es originado por los contactos entre los granos, los cuales forman cadenas de fuerza que distribuyen la mayor parte del peso del material granular sobre las paredes de los recipientes. Esto provoca que la presión cerca del fondo sea independiente de la altura de llenado. La dilatancia y el arqueo ocurre en materiales monodispersos, es decir, compuestos de granos de igual tamaño, mientras que la segregación no se puede dar en estos materiales.

Una propiedad peculiar de los medios granulados es la fricción estática, la cual está gobernada por la ley de Coulomb, la cual establece que el movimiento relativo entre granos individuales, o elementos de volumen ocurrirá sólo si se excede un valor límite, que es proporcional a la fuerza entre estos.

Flujo granular

Tal como sucede en un fluido, un medio granulado puede deformarse bajo la acción de fuerzas externas. Desde este punto de vista, un fluido newtoniano se distingue de un medio granulado, puesto que el primero no soporta ninguna fuerza superficial tangencial y, por tanto, cualquier fuerza tangencial aplicada sobre el material provocará un flujo contante que, según sea la magnitud y frecuencia de dicha fuerza tangencial, podrá transmitirse a toda la región ocupada por el medio fluido. En un medio granulado, este mecanismo se origina a partir de fuerzas friccionales y puede generar distintos tipos de movimiento o flujo. El flujo lento o cuasiestático se distingue principalmente porque se mantienen en el altas concentraciones de granos y nulos gradientes de velocidad. Esto hace que la deformación del material sea inducida casi exclusivamente desde la superficie y, por tanto, la dinámica de la deformación sea bien descrita por ecuaciones de balance de fuerza en las cercanías de la superficie del material.

Cuando la magnitud y la frecuencia de las fuerzas tangenciales superficiales es muy grande, inicialmente ocurre un flujo granular lento, posteriormente rápido, en donde cada partícula se mueve independiente de las demás, existe un gradiente de velocidades no despreciable y la concentración de granos es pequeña. En este régimen de flujo rápido también conocido como régimen de inercia de grano, existe una dirección preferencial de flujo, una velocidad media de bulto

y, aparentemente, un movimiento aleatorio de los granos individuales respecto al flujo principal.

Es importante mencionar que en ambos regímenes de flujo existen fuerzas disipativas, que exigen la continua inyección de energía para mantener el movimiento. En la mayoría de los flujos granulares, una fuente importante de inyección de energía es el campo gravitacional. Coulomb enunció hace más de trescientos años la forma aproximada en que la presencia del campo gravitacional origina el movimiento superficial en un medio granulado, como una relación de proporcionalidad entre las fuerzas tangenciales y normales que actúan en un elemento de material granular. La formulación de modelos más detallados que tomen en cuenta los distintos modos de disipación para cualquier régimen de flujo, constituye ahora una de las líneas de investigación más activas de la física.

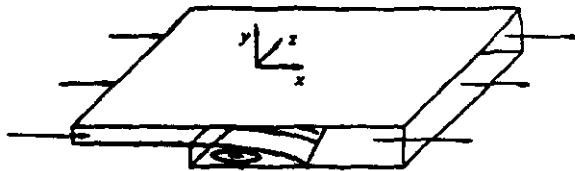
En este trabajo se busca conocer el carácter no estacionario de un medio granular observando por medio de velocimetría de partículas por imágenes el campo de velocidades al ser descargado por un orificio en un silo bidimensional por efecto de la gravedad. [8]

II. El problema del escalón

2.1 Descripción del problema del escalón

Como ya mencionamos el problema del escalón ha recibido mucha atención debido a que es un prototipo de flujo interno y separado. La mayoría de los estudios se han centrado en un régimen de números de Reynolds bajos y esta no es la excepción. El análisis de los resultados experimentales son un problema fundamental de los métodos numéricos. Sin embargo, esta parte del problema queda fuera del alcance de este texto ya que nos centramos en el aspecto experimental.

Es fácil suponer que de esta geometría sencilla de un escalón bidimensional se obtendría un flujo sencillo bidimensional, pero no es así. Apoyándonos en la teoría y en la información de la capa límite, siempre se había creído que existía un patrón simple de flujo mostrando una región sencilla de separación en el escalón como se muestra en la figura:



Se sabe que la región de separación es dependiente del número de Reynolds, de la altura del escalón y del momentum del flujo entrante. Pero existen otras zonas de recirculación las cuales no han sido medidas y no han sido reportadas. También se conoce muy poco de la estructura de flujo al cambiar el número de Reynolds sin cambiar la geometría del escalón, lo cual se realizó en esta investigación [4].

Este trabajo se realizó con el fin de observar las estructuras de flujo que se forman con un determinado número de Reynolds, y como cambian dichas estructuras al ir variando la velocidad de entrada del agua al escalón y por lo tanto cambiando el número de Reynolds. Para visualizar el flujo se utilizó el sistema PIV, excelente herramienta para este tipo de análisis. Al observar y entender las estructuras de este flujo, con regiones múltiples de separación ayudará a entender mejor como es la transferencia de calor y masa asociados con este problema.

2.2 Ecuaciones y especificaciones del problema

Dentro de la importancia teórica está detectar los vórtices de separación, siendo esta una labor difícil para los métodos numéricos ya que este problema es un prototipo para la evaluación de modelos de métodos numéricos de flujo viscoso incompresible.

En este problema no se consideran las fuerzas de cuerpo ya que su naturaleza es despreciable y se considera un fluido Newtoniano de viscosidad cinemática ν . Las ecuaciones de trabajo son las ecuaciones de Navier-Stokes de movimiento, sujetas a la condición de incompresibilidad. El modelado numérico se realiza entonces bajo las siguientes condiciones:

(1) Un flujo en estado estacionario

$$\frac{\partial}{\partial x_m} (u_m u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_m \partial x_m}$$

(2) Y laminar

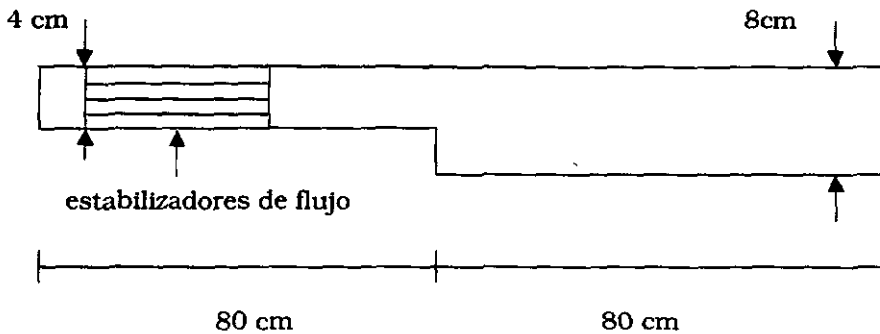
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

En las ecuaciones adimensionales anteriores de variables primitivas, u_i representa las componentes de la velocidad y p la presión isotrópica. La razón para utilizar la formulación velocidad-presión es por las condiciones de frontera bien definidas [5].

2.3 Investigación experimental (equipo experimental)

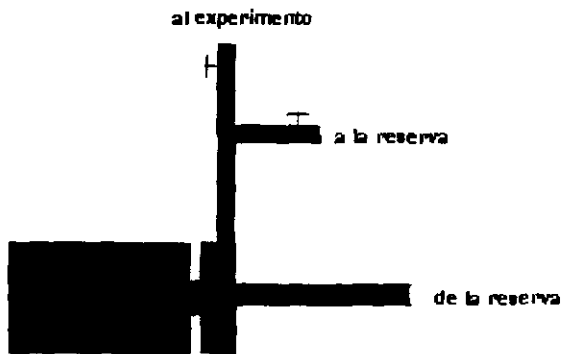
El circuito de agua utilizado para esta investigación se muestra esquemáticamente en la figura de la página 18.

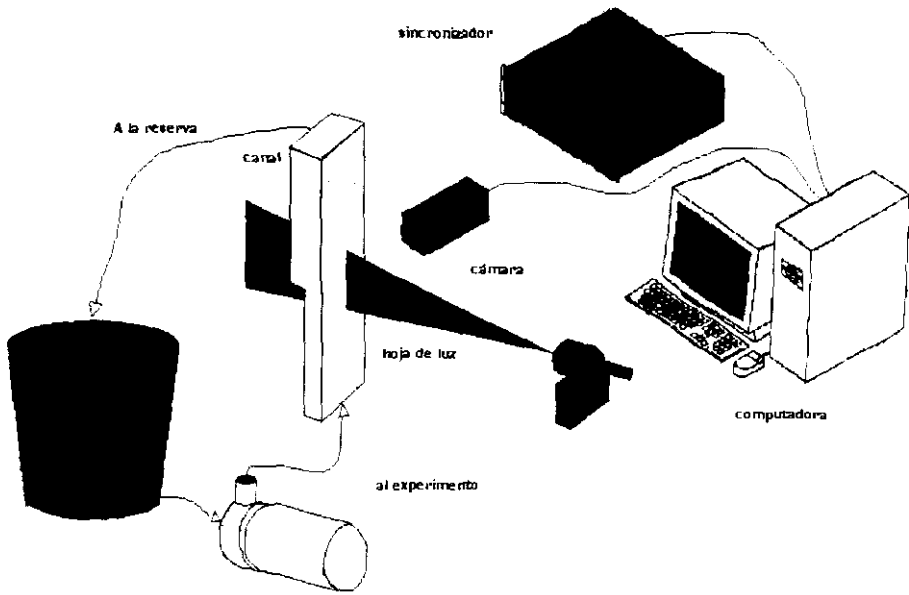
En este se incorpora un escalón bidimensional el cual cambia súbitamente, por medio de una expansión, de una geometría pequeña de 4 cm de altura por 10 cm de espesor, a una geometría mayor de 8 cm de altura por el mismo espesor, es decir, la relación o razón de expansión es de 2 a 1. Como se observa en la siguiente figura:



El dispositivo experimental está construido de acrílico de 6 mm de espesor con la finalidad de brindar rigidez estructural al canal, a excepción de la pared lateral izquierda, la cual es un acrílico de 2 mm de espesor ya que por esta cara se capturaron las imágenes con la cámara. Debido a las características del sistema PIV es necesario que la sección de prueba sea transparente, ya que por la cara posterior es

por donde pasa el láser pulsado que ilumina el flujo para poder ser analizado. El canal de entrada tiene una longitud de 1m y cuenta con una cámara de estabilización de flujo formada por pequeños tubos de 3mm de diámetro llamados enderezadores de flujo por donde se hace pasar el agua. El agua es alimentada a través de un orificio de 15 mm de diámetro que es el extremo la manguera de alimentación. Esta manguera de alimentación de $\frac{3}{4}$ in llegaba de la bomba que proporcionaba el gasto de agua para el experimento. El arreglo de la bomba se muestra en la siguiente figura en donde se aprecia que el flujo se divide a la salida de la bomba hacia dos válvulas con las cuales se regula la cantidad de agua que entra al experimento y manteniendo la bomba funcionando a su máxima carga siempre para evitar dañarla.





Dispositivo experimental

Las dimensiones del canal de entrada estaban diseñadas para que fuera suficiente grande para estabilizar el flujo y que este fuera completamente desarrollado al llegar a la zona del escalón. La parte superior e inferior del canal están sujetadas por medio de silicona y un ángulo de aluminio en la parte exterior con la finalidad de que este pegamento no ocasionara turbulencia dentro del flujo. El agua que entraba a la bomba se toma del fondo de una reserva o tanque de aproximadamente 50lt y está mezclada con esferas de plata recubiertas por una pequeña capa de cerámica con un diámetro medio de aproximadamente 20 μ las cuales son el visualizador adecuado para experimentos de PIV con agua. El canal de salida tiene una longitud de 1 m y, además, tiene un desalajo curvo con un radio interno de 5 cm y un radio externo de 13 cm, con el fin de evitar al máximo cualquier tipo de turbulencia aguas abajo que afecten las mediciones y observaciones. Por último, el agua completaba el circuito al caer de la salida curva del canal hacia la reserva volviéndose a iniciar el ciclo al reingresar el agua a la bomba.

Sistema PIV

Como ya se mencionó en la introducción, el sistema PIV cuenta con cuatro componentes básicos:

- 1.- Láser y la óptica de la hoja del láser
- 2.- Componente de captura de imágenes
- 3.- Sincronizador
- 4.- Sistema de análisis (“hardware” y “software de computadora”)

1.- Láser y óptica de la hoja de luz

Es una parte esencial del experimento, ya que va a ser la fuente de iluminación de la zona de estudio, también ya se mencionó que la lente cilíndrica diverge el haz láser mientras que la lente esférica lo concentra generando una parte de 1mm de espesor. La lente esférica utilizada es la de 1m, es decir, la zona de estudio se encuentra a un metro del arreglo de lentes para obtener la iluminación más precisa.

El sistema PIV utilizado cuenta con un láser de tipo Nd:YAG el cual tiene un ritmo de repetición de 10Hz que es un parámetro de diseño fijado por el fabricante. Con este sistema de 10Hz el máximo ritmo de repetición es de 7.5Hz cuando se utiliza con la cámara correlación cruzada de 1K para dar un pulso en cada cuadro de la cámara de 15Hz. Para sincronizar la cámara de 15Hz a los 10Hz, existe un tiempo de retardo de pulso dado por el sincronizador para esperar que termine el primer cuadro para disparar el primer láser. El segundo pulso se da en el segundo cuadro después de que transcurre el tiempo entre pulsos fijado por el usuario[2].

2.- Componente de captura de imágenes

Este sistema está conformado por una videocámara de correlación cruzada CCD. Esta cámara ofrece una resolución de pixel de 1K x 1K y 30 cuadros por segundo. Debido a que la precisión de las mediciones en VPI depende principalmente de la resolución del sistema de captura de imágenes, la resolución de la cámara así como su velocidad de captura proporciona una alta precisión en las mediciones. Ésta cámara

de correlación cruzada tiene la característica de permitir la captura de imágenes con un intervalo muy corto de tiempo entre ellas debido uso de dos cuadros utilizando el final del primero para la primera imagen y el segundo para la segunda imagen. Las imágenes de cada cuadro son analizadas utilizando la correlación cruzada para obtener un campo de velocidades sin ambigüedad direccional evitando el uso de equipos extras para resolver este problema. La cámara se conecta tanto al sincronizador como a la tarjeta capturadora de imágenes por medio de interfaces de alta velocidad que permiten la obtención y registro de pares de imágenes en un cierto instante de tiempo.

3. Sincronizador

El sincronizador es el controlador principal para el experimento de PIV. Controla el tiempo entre el disparo de cada láser, el número de imágenes a capturar y la rapidez con que se capturan. El sincronizador hace que cada elemento del equipo lleve a cabo su tarea en el momento adecuado. Esto es de suma importancia ya que para realizar mediciones con PIV todos estos componentes deben de funcionar en una secuencia adecuada. El sincronizador se encuentra conectado al láser, a la cámara de vídeo y a la computadora.

La secuencia de captura de imágenes es muy importante para obtener resultados correctos y en nuestro caso el análisis lo vamos a realizar con pares de imágenes debido a que tenemos un láser pulsado.

La secuencia es la siguiente:

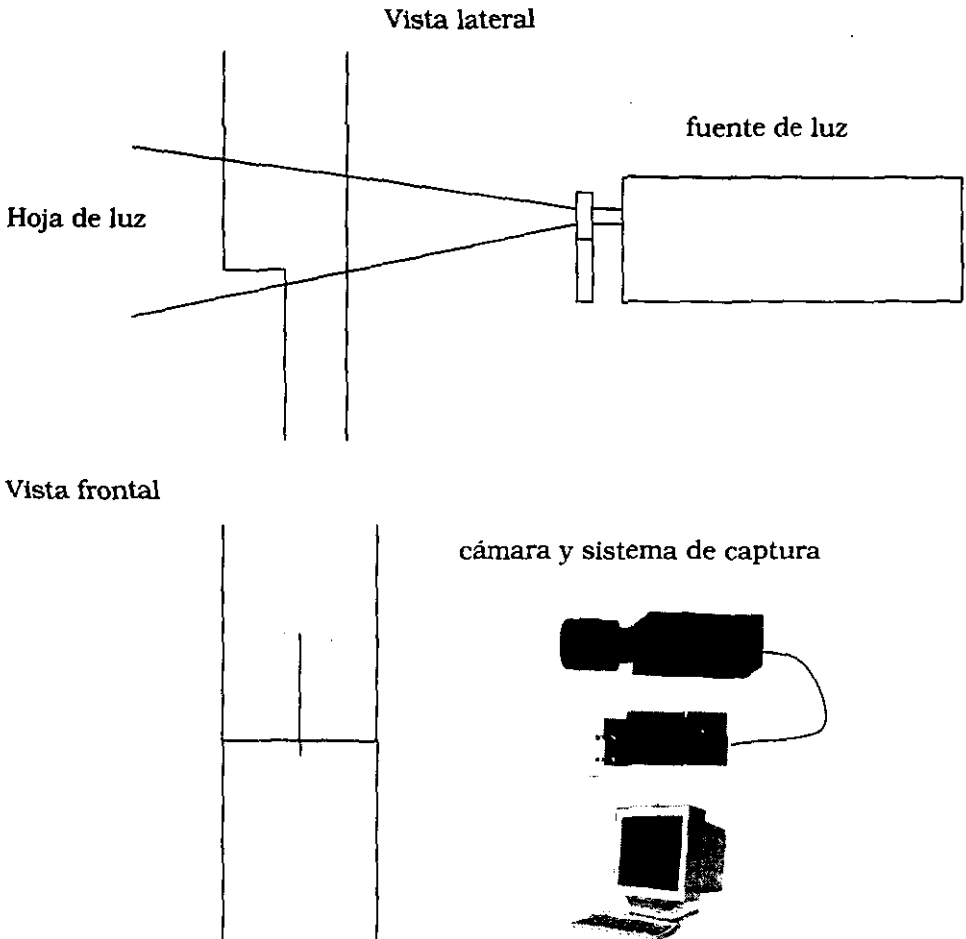
1. Se pone a funcionar la cámara ya que tiene que transcurrir el primer cuadro de esta para tomar la primera imagen al final del mismo.
2. El sincronizador recibe una señal de la cámara para informar que está lista para realizar la captura de la primera imagen.
3. El sincronizador manda una secuencia de señales adecuada para disparar tanto el primero como el segundo láser. Se dispara el primer láser.
4. El sincronizador espera que transcurra el tiempo entre pulsos fijado por el usuario y dispara el segundo láser.
5. La cámara toma la segunda imagen en el segundo cuadro y espera a que llegue el final del tercer cuadro para estar lista para la captura del siguiente par de imágenes.
6. El sincronizador espera que la señal de la cámara para mandar los pulsos para el siguiente par de imágenes.

4.- Sistema de análisis y despliegue de resultados

Para el sistema de análisis se utilizó el software INSIGHT de TSI para obtener el campo de velocidades y algunas propiedades importantes. Este software es un paquete de 32 bits para Windows diseñado para llevar a cabo algoritmos robustos a gran velocidad. Su principal cualidad es que sobre la imagen del campo de partículas superpone el campo de velocidades para rápida visualización del flujo.

Dispositivo experimental

En la siguiente figura se observa la colocación de cada una de las partes del equipo experimental, en donde se hace notar la importancia de las paredes transparentes del canal y que sean perpendiculares la hoja del luz y la cámara para poder realizar mediciones precisas:



2.4 Procedimiento.-

Se hizo circular agua a través del canal a una cierta velocidad para poder comenzar a realizar mediciones del campo de velocidades en el flujo, abriendo las válvulas y dejándolas en una cierta posición. Posteriormente se fija un determinado tiempo entre pulsos en el sincronizador y captura un par de imágenes como se ve en la siguiente figura:

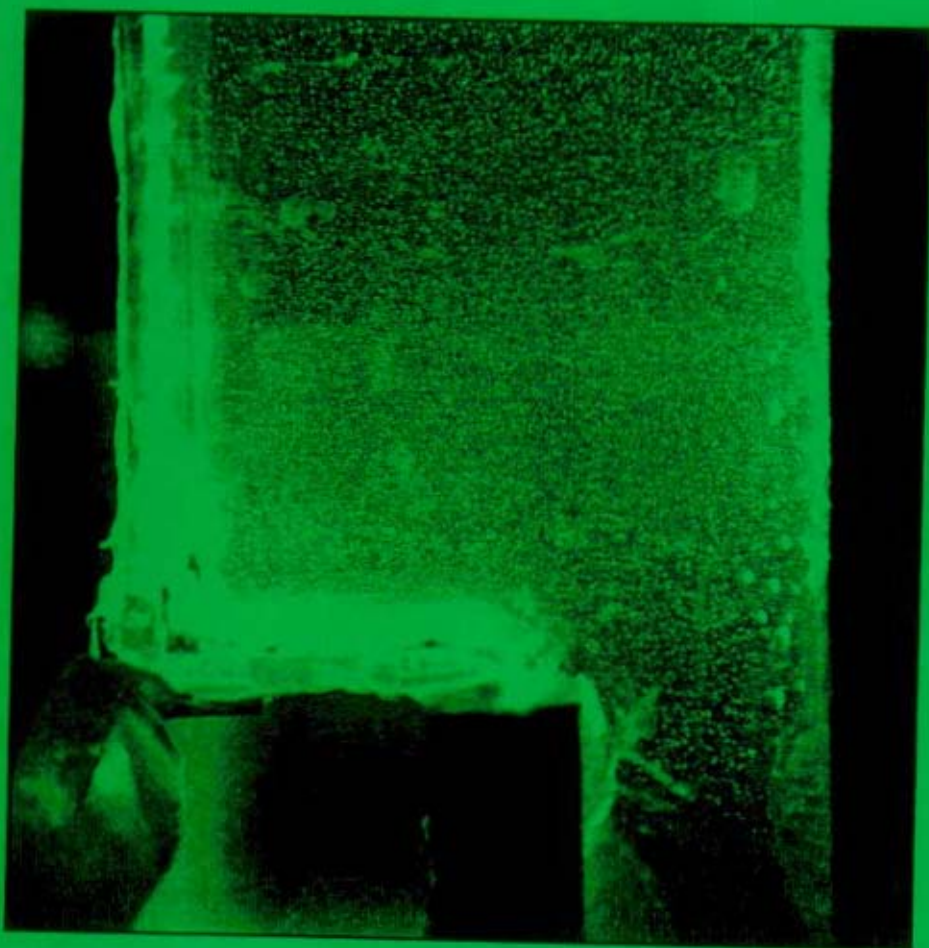


imagen 1

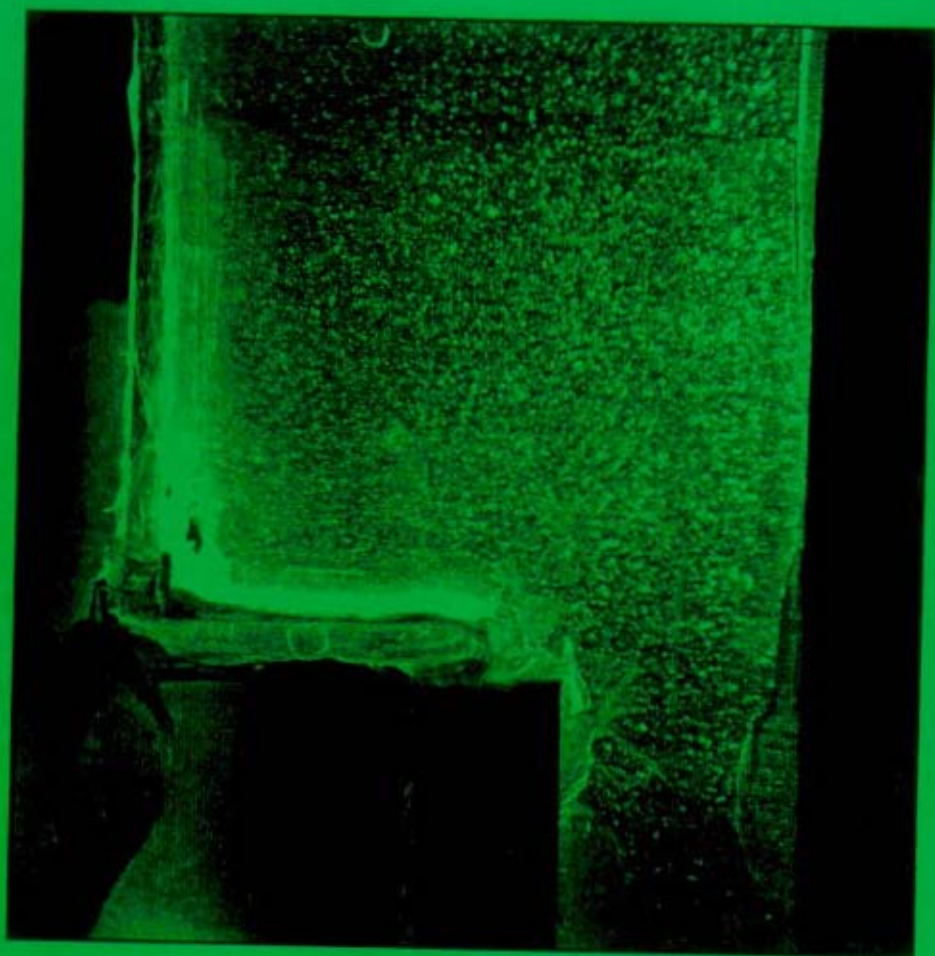
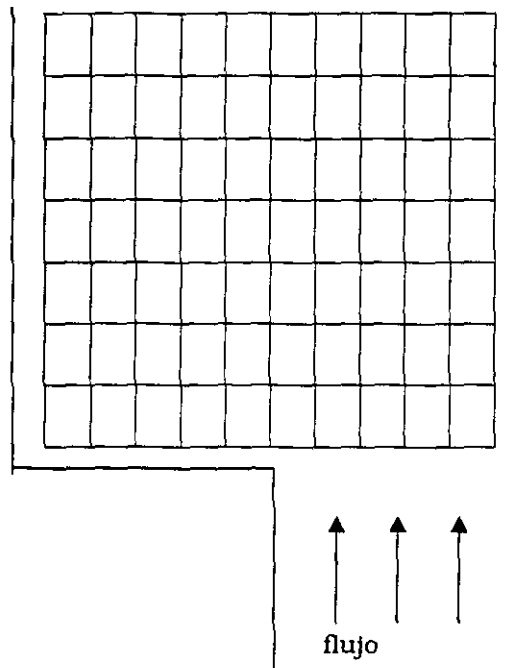


imagen 2

El tiempo fijado en el sincronizador en este par de imágenes fue de 0.006s. Este tiempo se alimenta a la computadora al igual que la relación entre píxeles y mm para obtener un factor de escala. El programa INSIGHT de TSI lleva a cabo la correlación cruzada ("crosscorrelation") entre la primera imagen y la segunda para obtener el campo de velocidades. Para este análisis nosotros debemos de dividir

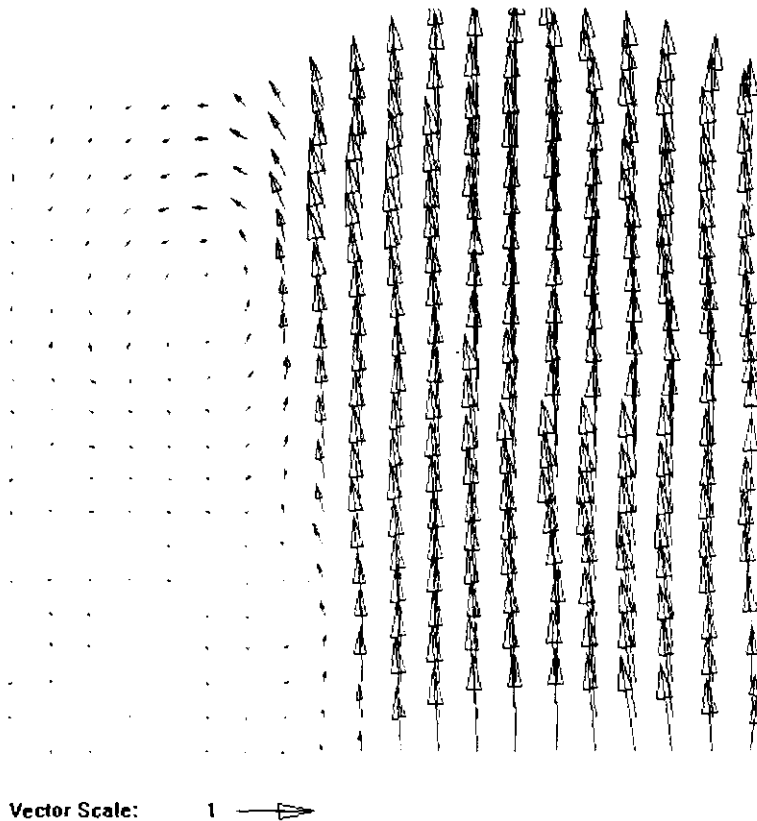
la imagen en subregiones que reciben el nombre de región de interrogación. Esta región de interrogación debe de ser lo suficientemente pequeña para que de una región a otra consecutiva no se repita el mismo vector velocidad pero debe de ser lo suficientemente grande para que sea representativa del flujo[6]. La región de interrogación debe tener aproximadamente de 10 a 20 partículas contenidas en ella. En el siguiente esquema se observa lo anterior:



Aquí tenemos 70 regiones de interrogación de las cuales vamos a obtener 70 vectores de velocidad en el centro de cada una obteniendo el campo de velocidades de esta área. El procesamiento se realiza por medio de transformadas rápidas de Fourier bidimensionales (2D FFT), y son transformadas rápidas de Fourier sencillas pero una aplicada en cada columna de información seguida de otra aplicada en cada renglón

de información. La información de entrada a la 2D FFT es real, y la salida es compleja, con una parte real y una imaginaria. La parte compleja de la salida se lleva al espectro real de potencias, sin la información de fase. El espectro de potencias contiene información de la distancia que recorrió la partícula de una imagen a otra, mientras que la fase contiene información de la posición de las partículas.

Una vez realizada la correlación cruzada entre la imagen 1 y la imagen 2 se obtiene el campo de velocidades del flujo el cual se observa a continuación:



Este campo de velocidades nos proporciona un guía visual de cómo es el flujo para un análisis cualitativo, pero también se puede realizar un análisis cuantitativo ya que cada vector tiene una posición y una magnitud que el programa obtiene y despliega de la siguiente forma:

posición x	posición y	velocidad x	velocidad y	snr
[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	
17.007839,	4.094480,	0.003532,	-0.004523,	37.576069
19.763741,	4.094480,	-0.001884,	-0.004705,	41.822239
22.598381,	4.094480,	-0.001857,	-0.005366,	67.553360
25.354280,	4.094480,	-0.006592,	-0.006774,	83.463287
28.188921,	4.094480,	-0.014433,	-0.006665,	66.790955
30.944820,	4.094480,	-0.016710,	-0.000737,	79.064323
33.779461,	4.094480,	-0.022024,	0.020726,	65.523453
36.535362,	4.094480,	-0.026682,	0.040269,	33.954082
39.369999,	4.094480,	-0.022189,	0.081080,	32.798359
42.125900,	4.094480,	-0.014943,	0.113554,	43.516998
44.960541,	4.094480,	-0.019416,	0.152841,	46.047424
47.716442,	4.094480,	-0.012507,	0.199780,	31.943382
50.551079,	4.094480,	-0.009892,	0.230928,	26.618576
53.306980,	4.094480,	-0.002135,	0.217649,	33.481998
56.141621,	4.094480,	-0.025566,	0.196602,	22.377783
58.897522,	4.094480,	-0.022158,	0.171604,	21.220221
61.732162,	4.094480,	-0.017962,	0.160945,	26.228840
64.488060,	4.094480,	-0.014243,	0.145465,	31.541695
67.322701,	4.094480,	0.003528,	0.119304,	24.304575
70.078598,	4.094480,	-0.013518,	0.063096,	13.815187
17.007839,	6.535420,	0.000105,	-0.003065,	5.780261
19.763741,	6.535420,	-0.001787,	-0.006701,	46.840088
22.598381,	6.535420,	-0.003078,	-0.004545,	57.167103
25.354280,	6.535420,	-0.007415,	-0.005191,	32.303673
28.188921,	6.535420,	-0.011210,	-0.005095,	59.499882
30.944820,	6.535420,	-0.022325,	0.001081,	53.999722
33.779461,	6.535420,	-0.029050,	0.016735,	65.055649
36.535362,	6.535420,	-0.030940,	0.045180,	45.616512
39.369999,	6.535420,	-0.019769,	0.089482,	41.856430
42.125900,	6.535420,	-0.013164,	0.126705,	34.441532
44.960541,	6.535420,	-0.015464,	0.158026,	23.942606
47.716442,	6.535420,	-0.008114,	0.212335,	34.346817
50.551079,	6.535420,	-0.008158,	0.233744,	58.022511
53.306980,	6.535420,	-0.005196,	0.224274,	50.265785
56.141621,	6.535420,	-0.006822,	0.213854,	33.734787
58.897522,	6.535420,	-0.024272,	0.192164,	32.331562
61.732162,	6.535420,	-0.018576,	0.177222,	41.942436
64.488060,	6.535420,	-0.017977,	0.155135,	36.810535
67.322701,	6.535420,	-0.004307,	0.141126,	18.353529
70.078598,	6.535420,	-0.002062,	0.133167,	24.564558

El número de Reynolds se calculó de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Donde V es la velocidad del flujo medida a 1cm de la expansión en el canal de entrada (pequeño), D es la altura del canal de entrada (0.04m) y ν es la viscosidad cinemática del agua.

Para el ejemplo anterior se obtuvo un $Re=7600$.

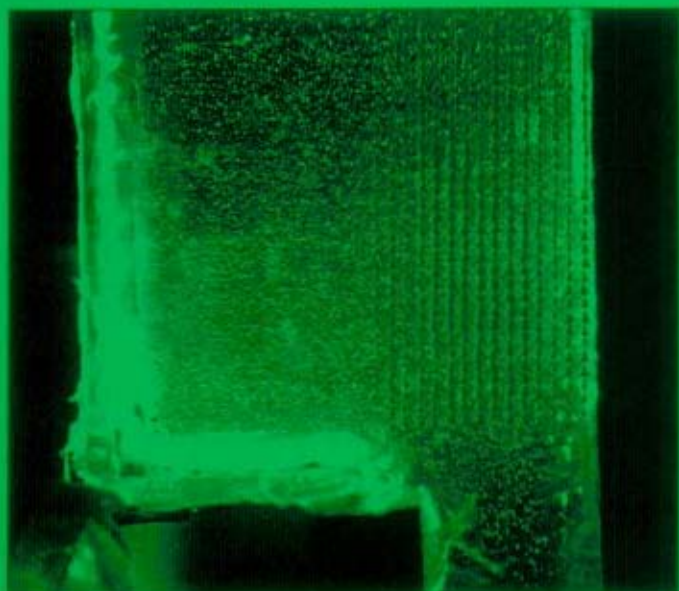
2.5 Análisis de resultados

Se han reportado [4] varios tipos de flujo en este problema clásico, inestabilidades globales para un número de Reynolds mayor que 750, mientras que otras investigaciones han reportado flujo en estado permanente para $Re = 1474$. Más recientemente en 1993 se ha demostrado que el flujo en el escalón es permanente a perturbaciones temporales bidimensionales para Reynolds menores a 800. Cabe mencionar que en experimentos de laboratorio el flujo aparenta ser tridimensional e inestable para Re menores que 1000.

Bajo este conocimiento llevamos a cabo experimentos con diferentes números de Reynolds para observar dicho comportamiento. A continuación se muestran lo obtenido posterior al análisis de PIV.

Caso 1

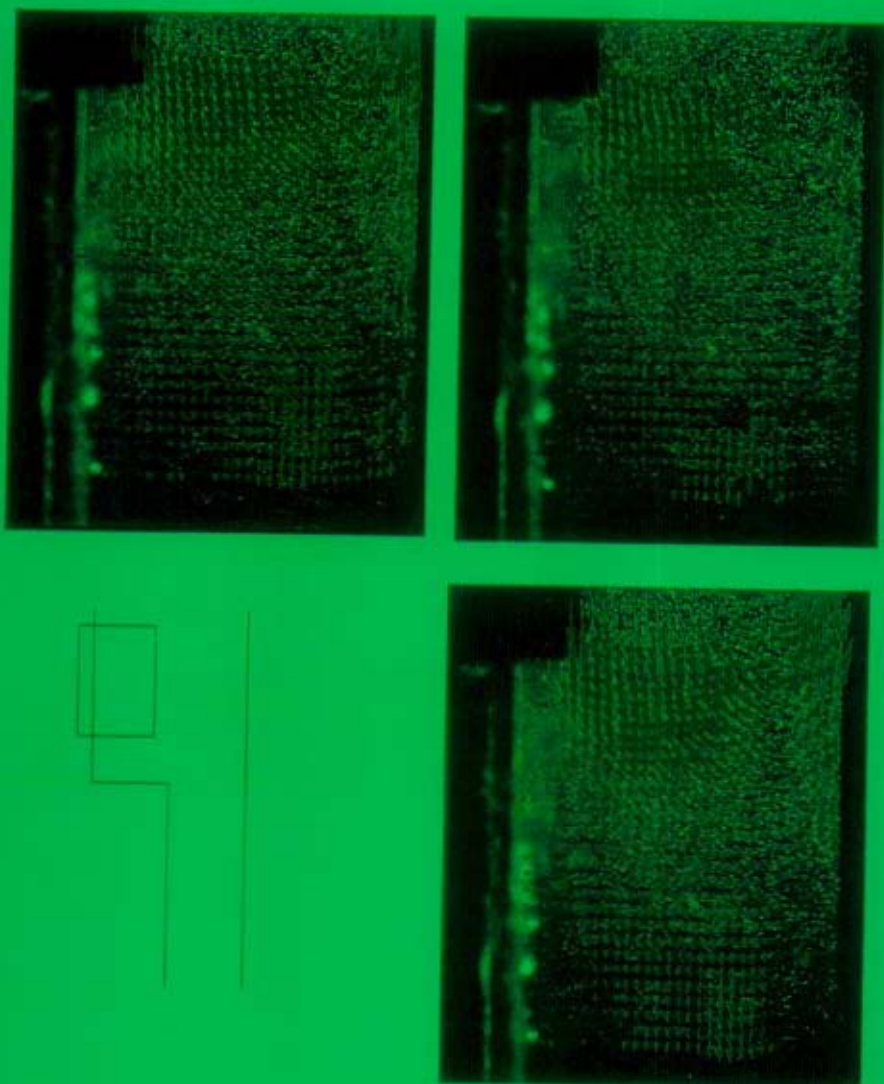
Para este primer ejemplo decidimos realizar mediciones a baja velocidad, es decir, con la válvula de entrada al experimento casi cerrada, el número de Reynolds se calculará después de obtenido el primer par de imágenes.



Este primer par de imágenes se tomó con una separación entre pulsos de 0.01s y midiendo la velocidad de entrada de 0.01 m/s se obtuvo un $Re = 400$. Sin embargo, debido a que la velocidad del flujo es tan baja no podemos observar que sucede en la zona de recirculación, es por eso que debemos de hacer un acercamiento a esta zona, de esta forma las partículas recorrerán una mayor distancia en la pantalla de una imagen a otra y será más claro el campo de velocidades, a su vez,

se cambia el tiempo entre pulsos, ahora será de 0.05 s, es decir, existirá un mayor retardo entre el primer pulso y el segundo con respecto al primer par de imágenes.

Se muestra la secuencia de imágenes de la zona de recirculación:



El primer par de imágenes se toma como el inicio del evento y se encuentran a un tiempo de 0 s, el segundo par se tomó 549ms después del primero y el tercer par se tomó 1043ms después. Esta información se registra en un archivo xxx.tim que es un archivo de tiempo y se basa en el reloj de la computadora para así saber el tiempo transcurrido entre cada par de imágenes.

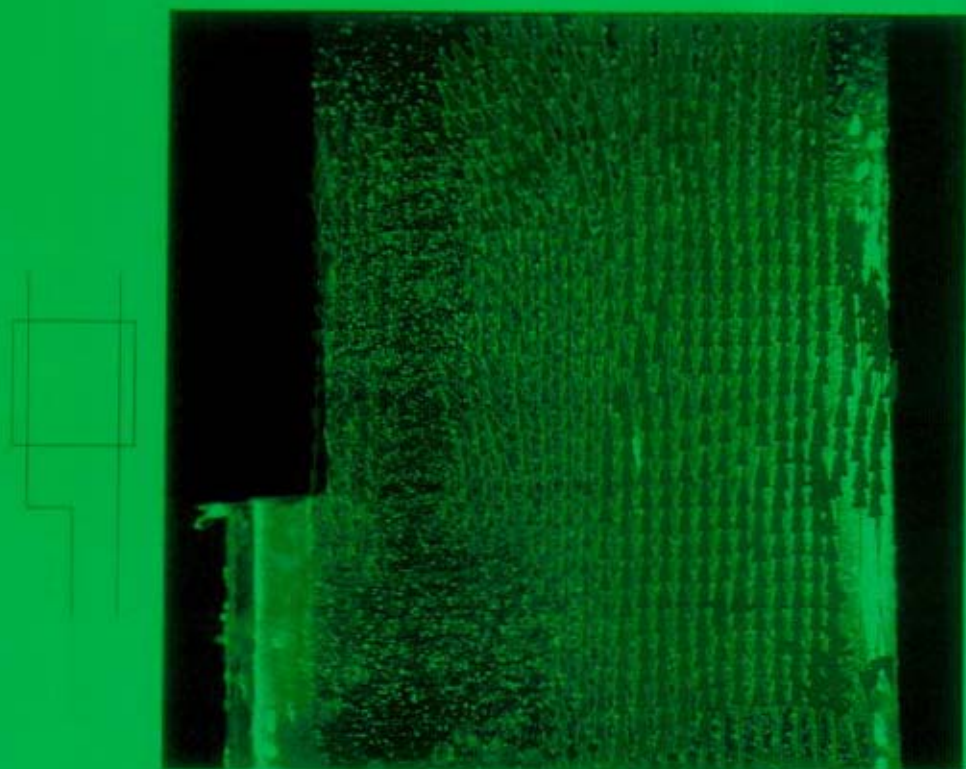
En estas imágenes se puede ver que con un $Re=400$ la zona de recirculación no varía con el tiempo, es decir, se encuentra en estado permanente. Por esta razón es posible promediar los tres campos de velocidades y obtener uno general, y así obtener cantidades relevantes como se muestra a continuación:



contornos de magnitud de velocidad

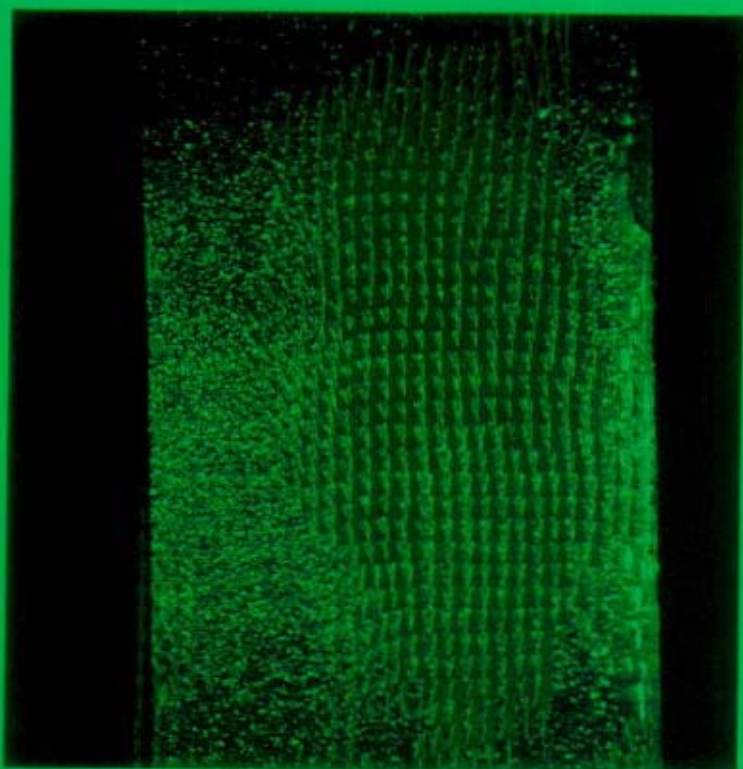
En la figura anterior se observan contornos de igual magnitud de velocidad siendo la zona azul la de mayor magnitud y la zona oscura de menor magnitud.

Para poder analizar completamente el tamaño de las zonas de recirculación fue necesario adquirir dos secuencias más, una arriba de la imagen anterior y otra abajo, con el fin de lograr cuantificar su tamaño:



Como se puede observar, no alcanzamos a ver el final de la zona de recirculación, es por eso que necesitamos subir un poco más para

poder medirla:



Una vez realizadas estas mediciones se puede obtener un mapa aproximado de cómo son las zonas de recirculación así como su localización:

Para $Re = 400$



Caso II

Debido a que PIV es una técnica muy poderosa para la visualización de flujos tanto en estado permanente como en no permanente se mostrará un segundo caso en estado no permanente, mostrando una secuencia de imágenes en donde se ve el desarrollo de un vórtice con el tiempo:

Imagen 0 y 1 en $t = 0$ ms

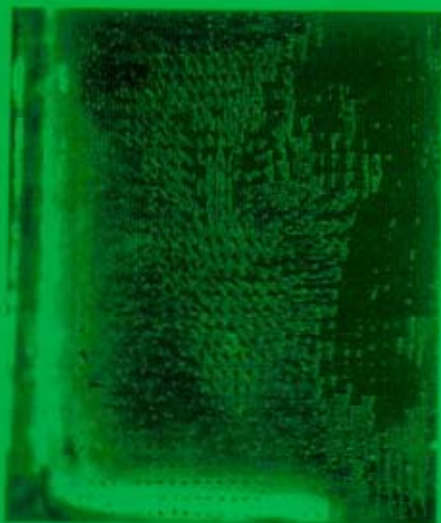


Imagen 2 y 3 en $t = 550$ ms



Imagen 4 y 5 en 1044 ms

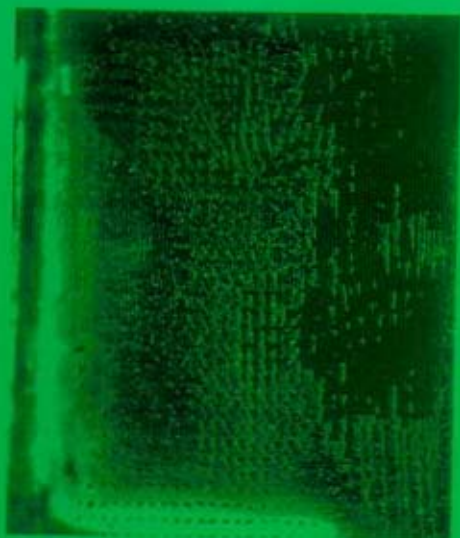


Imagen 6 y 7 en 1593 ms

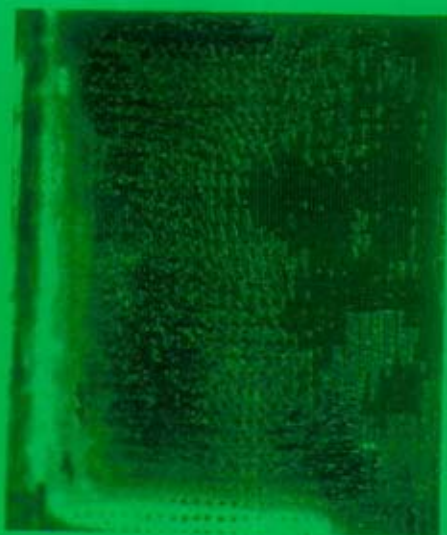
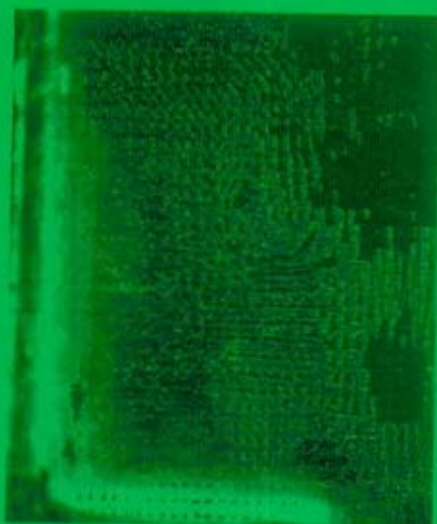


Imagen 8 y 9 en $t = 2142$ ms



Imagen 10 y 11 en $t = 3241$ ms



Como podemos observar en la secuencia de imágenes, PIV es una excelente técnica para flujos turbulentos, ya que podemos conocer como se desarrolla el flujo y como es en cada instante de tiempo. Aquí se muestra cómo es intermitente el desarrollo del vórtice central, e incluso sabemos de una manera aproximada el tiempo que tarda en volverse a formar.

2.6 Conclusiones

En este capítulo se mostró de una manera breve cómo es la técnica PIV y su aplicación a la medición del campo de velocidades de un problema de fluidos.

Son evidentes las ventajas que representa este método sobre otros ya que podemos obtener el campo de velocidades en un área y así tener una visión global del flujo. Como se mostró en ambos casos, es ideal tanto para flujos en estado permanente como para flujos en estado no permanente, ya que conocemos el tiempo transcurrido entre cada par de imágenes.

Con esta técnica fácilmente se pueden corroborar teorías existentes debido a la rapidez con que se pueden obtener resultados una vez instalado el experimento. Se realizaron 10 eventos con diferentes números de Reynolds y obtuvimos estado permanente para $Re < 700$ y se obtuvieron flujos inestables y turbulentos para $1500 < Re < 6000$.

Por último cabe mencionar que es la primera vez que se utiliza esta técnica y se carecía de experiencia en ciertos aspectos, sobre todo

en el cambio de enfoque de la cámara al tomar diferentes partes del canal ya que no es posible juntar dos tomas diferentes debido a la diferencia de escala de una a otra por lo tanto no se pudo realizar un mapa completo del canal y se tuvo que analizar cada evento por separado.

Capítulo III

3.1 Descripción del problema de los medios granulados.

Introducción

Uno de los sistemas físicos más simples construidos por el hombre para la medición del tiempo son los relojes de arena. En efecto, desde su aparición en la Edad Media se sabía con detalle que el gasto de arena que fluye por unidad de tiempo de un contenedor a otro a través de un orificio es aproximadamente constante [9].

Pero la existencia de dispositivos en donde la sustancia de trabajo son medios granulados no se limita relojes de arena, ya que se presentan en infinidad de procesos industriales, así como en la naturaleza (en el fondo de los ríos, las dunas en los desiertos, etc.).

En la industria, el vaciado de los granos es parte esencial en su manejo y transportación y esto se realiza por medio de dispositivos conocidos como silos o tolvas. No obstante su amplio uso, la física de estos sistemas no es bien conocida y apenas está en procesos de construcción.

Al igual que los relojes de arena, la mayor parte del conocimiento sobre el comportamiento de los silos proviene, sobre todo, de estudios experimentales y de campo. Algunas investigaciones experimentales han permitido detectar, a pesar de los gastos, que existen intensas fluctuaciones en la presión y en la densidad. Su naturaleza es tan compleja que resulta sorprendente que el gasto se mantenga constante. Los estudios experimentales han tenido una fuerte motivación en

estudios de campo en donde se han detectado vibraciones en las estructuras, inducidas por el flujo granular, los cuales han llegado a colapsar silos de grandes dimensiones [10].

Hasta ahora el análisis experimental de las fluctuaciones en la presión o en la densidad sólo manifiestan la complejidad del flujo granular pero no permiten identificar las condiciones bajo las cuales se producen fluctuaciones periódicas, es decir, oscilaciones que podrían ser el origen, mediante resonancia, de las vibraciones mecánicas de las paredes de los silos. En este trabajo se introduce por primera vez una técnica de mecánica de fluidos a los medios granulados por medio de la cual pudimos observar claramente las oscilaciones internas durante el flujo granular en un silo idealizado

Aplicación de PIV a medios granulados

PIV o Velocimetría de Imágenes de Partículas es aplicable a una infinidad de casos existentes en la industria, la ciencia, la naturaleza etc. Se puede analizar el flujo de agua en un pequeño canal hasta el flujo en una presa de grandes dimensiones, el flujo entre los álabes de una turbina, el humo producido por una flama y la flama misma, y de las aplicaciones más novedosas a los medios granulados [12].

Recordemos que para realizar un análisis de PIV se requieren 4 puntos esenciales:

- a.- Se tengan dos imágenes consecutivas del flujo a analizar
- b.- Se conozca el tiempo entre las imágenes
- c.- Se tenga un contraste en dichas imágenes dado por los tonos de gris los cuales utilizará el software para el análisis.
- d.- Se tenga un número adecuado de partículas alimentando el flujo.

Estos 4 principios se cumplieron con las imágenes digitalizadas del medio granulado al cual aplicamos la técnica de PIV para medir de una manera muy precisa el desplazamiento así como las velocidades de las partículas dentro del flujo.

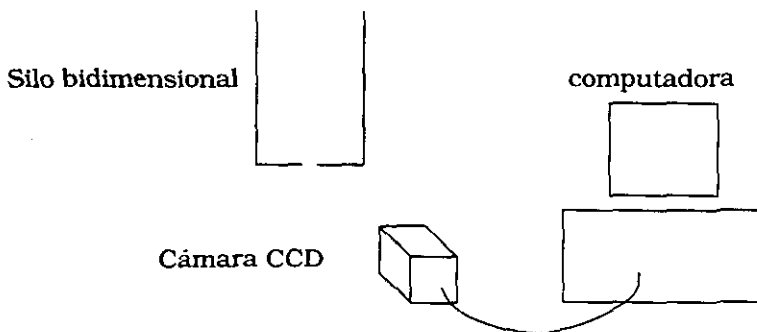
Objetivo

En este estudio, principalmente nos centramos en observar experimentalmente el carácter no estacionario del campo de velocidades de un medio granular durante la descarga de granos monodispersos en un recipiente rectangular de fondo plano. Este flujo producido por la gravedad comúnmente tiene un comportamiento regular e intermitente en algunas de sus cantidades relevantes. Un comportamiento regular sucede en el flujo másico, esta cantidad mantiene un valor aproximadamente constante durante la descarga del dispositivo. El patrón intermitente en el flujo sucede con fluctuaciones tanto en la densidad como en la presión dentro del silo [11].

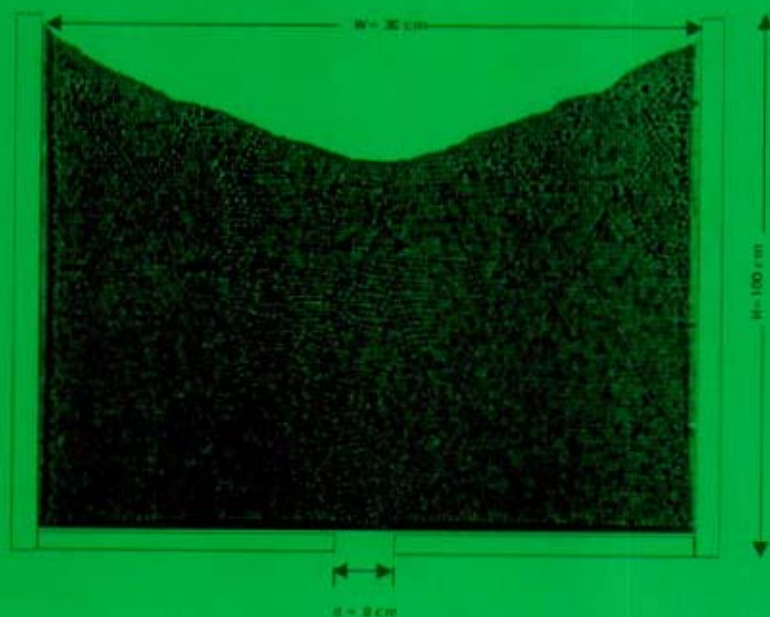
3.2 Equipo experimental y procesamiento de imágenes

En este experimento se realizaron mediciones del campo de velocidades en un área del flujo en un silo rectangular bidimensional.

En la siguiente figura se observa la disposición del equipo experimental:



Los experimentos se realizaron en un silo vertical rectangular con paredes de vidrio con 1m de alto, 30 cm de ancho y 3.8 mm de profundidad. Se llenó a una altura de 82cm con material granular monodisperso compuesto de cuentas de vidrio esféricas con un diámetro de 3.15mm y con coeficiente de fricción de 0.57 así como con una densidad de grano de 2.45 gr/cm³. Debido a las características del grosor del equipo experimental, se dispone con una monocapa de partículas, es decir, no se encimarán una con otra. En la parte inferior del equipo se encuentra un orificio de 2 cm localizado en el centro. Esto se ve en la siguiente figura:



Justo en el momento de la apertura del orificio, el flujo inducido por la gravedad fue registrado o grabado por una cámara de alta velocidad de obturador (1/500), registrando a una frecuencia de 30 cuadros por segundo. El tiempo total del experimento fue de 20s, es decir, 600 cuadros consecutivos. Cada imagen fue digitalizada y alimentada a la computadora en donde fue analizada por el software de PIV de TSI. En la siguiente figura se observa un par de imágenes consecutivas que se utilizaron para el procesamiento:

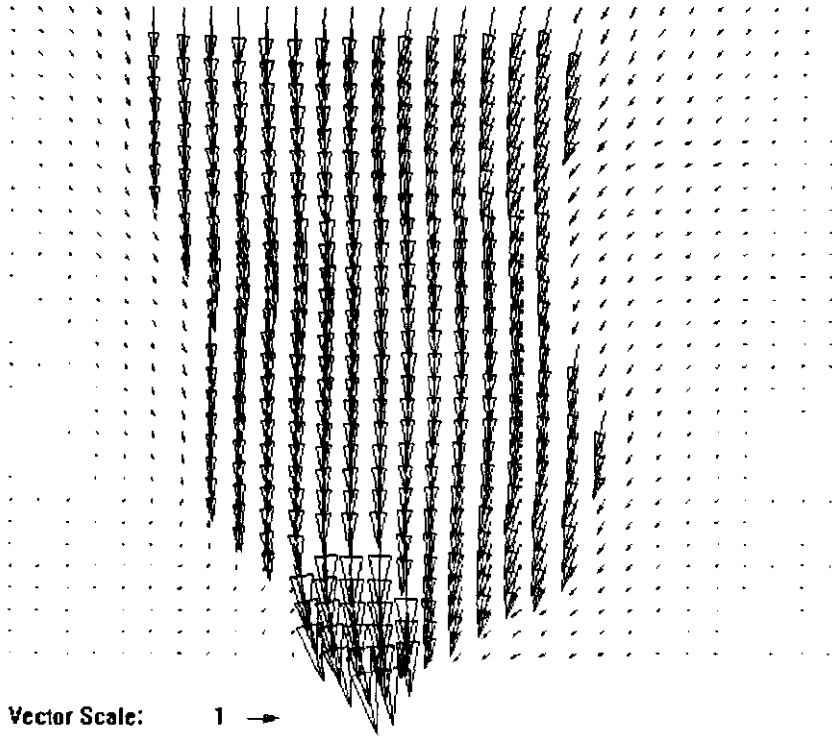
Imagen 1



Imagen 2



Como ya se ha mencionado, esta técnica consiste básicamente en determinar la distancia que las partículas se han movido en el tiempo transcurrido entre dos imágenes consecutivas. El software comercial utilizado asigna a los centros de los granos un valor en la escala de grises, entonces, dependiendo de la velocidad del flujo, de la concentración de las partículas y del tiempo transcurrido entre una imagen y otra vamos a seleccionar un tamaño adecuado de zona de interrogación para obtener el vector velocidad de dicha zona así como el campo de velocidades en toda el área de interés como se observa en la siguiente imagen:



Por esto tenemos que dimensionar esta región de interrogación de un tamaño adecuado al flujo, es decir, necesitamos que sea lo suficientemente grande para que sea representativa del movimiento de los granos, pero lo suficientemente pequeña para que no se encimen las regiones de interrogación y se obtengan vectores repetidos que no describan el flujo con precisión.

Las imágenes digitalizadas de las cuales vamos a obtener el campo de velocidades representan una zona bidimensional del silo o

tolva de aproximadamente 30 cm de alto por 30 cm de ancho (542 por 542 píxeles, donde 542 píxeles equivalen a los 30 cm de ancho). Recordemos que el tamaño de los granos es de 3.15mm de diámetro aproximadamente. La región de interrogación para obtener el campo las fue variada de 32 x 32 píxeles (alrededor de 18 pares de granos) hasta 64 x 64 píxeles (50 pares). Se obtuvieron resultados similares en ambos análisis, tanto en los vectores de velocidad como en otras cantidades importantes. El número de regiones de interrogación en la dirección x (a lo ancho) y en y (longitudinalmente) deben ser lo suficientemente grandes para obtener una buena resolución del campo de velocidades.

Para poder medir con precisión el desplazamiento de las partículas en la región de interrogación, el espectro de potencias de las imágenes digitalizadas es tratado como un patrón de Young. Es decir, debido a que la distancia que se mueven las partículas es muy pequeña y el número de partículas es muy alto, es posible aplicar Transformadas Rápidas de Fourier en cada región de interrogación y así obtener una medida promedio del desplazamiento de las partículas. Los patrones pueden ser evaluados en uno o más pares de direcciones ortogonales y posteriormente evaluar las correspondientes frecuencias espaciales. La proyección ortogonal de los centroides se realiza primero, sustituyendo cada partícula con su píxel correspondiente al centroide de la misma. Los píxeles de un mismo centroide en un par de imágenes consecutivas tienen un mismo valor dentro de la escala de grises por lo tanto no es posible confundir la partícula de una imagen a otra. Los valores de

cada columna y de cada renglón de cada imagen nueva se suman para obtener sus proyecciones en x y en y. Los resultados se presentan en dos arreglos lineales diferentes. La magnitud del desplazamiento promedio de las partículas se reduce a un análisis del desplazamiento de centroides promedio a lo largo de los 2 ejes. Esto se realiza evaluando el espectro de potencias correspondiente a cada eje.

3.3 Análisis de resultados

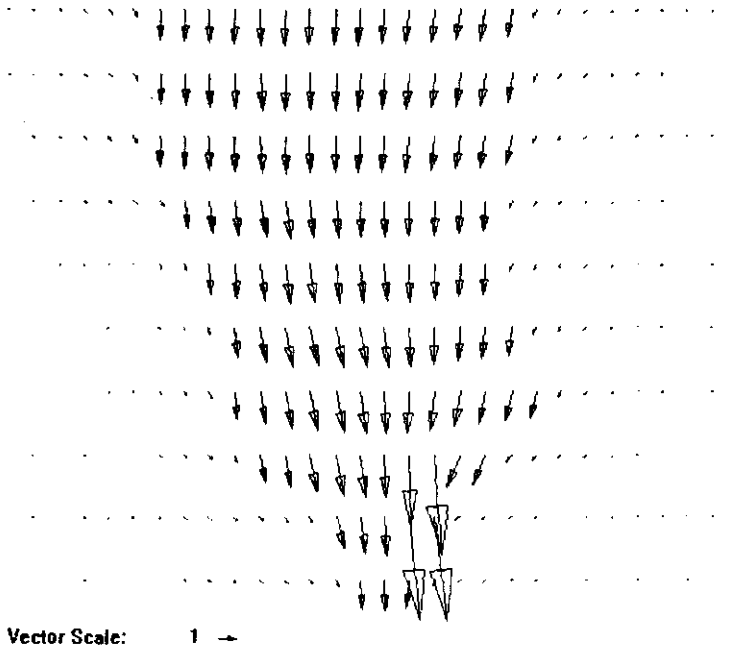
El campo de velocidades y sus propiedades

Con el equipo experimental descrito en secciones anteriores, se estudió el carácter no estacionario del flujo y sus propiedades promedio, para tratar de obtener información importante sobre aspectos relevantes.

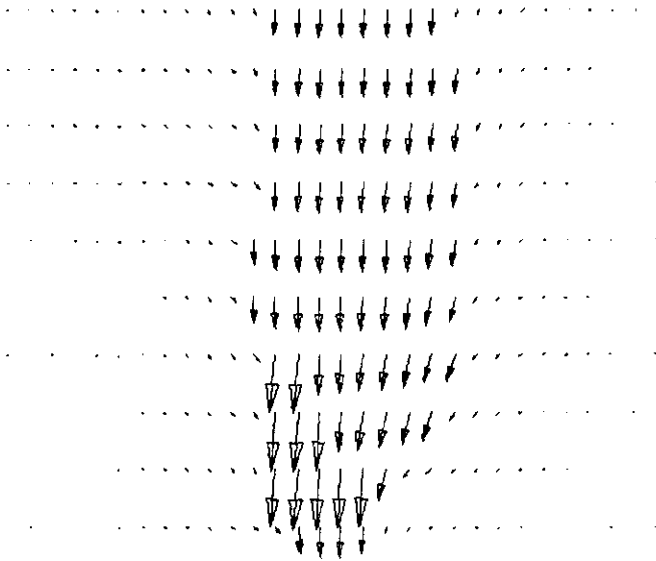
La descripción del movimiento promedio de los granos en la región de interrogación esta dada por un cuadro euleriano debido a que el centro de las regiones de interrogación de todas las imágenes está en una misma coordenada del silo debido a que el número de regiones así como el tamaño de las mismas se fija antes de realizar el análisis. Para cada par consecutivo de imágenes y para cada centro de cada región de interrogación se obtuvo un vector velocidad promedio $v=(u,v)$ y al obtenerlo para todas las regiones se obtuvo el campo de velocidades de cada par de imágenes. Como ya mencioné variamos el número de regiones de interrogación de 10 a 50 pero no existió ninguna diferencia

considerable entre ambos análisis.

Como ejemplo de las estructuras inestables detectadas en el campo de velocidades, se observan tres imágenes diferentes. En la primera, en el tiempo t_0 el flujo es asimétrico y está cargado a la izquierda, mientras que en el tiempo t_1 el flujo es aproximadamente central, por otra parte, en el tiempo t_2 el flujo vuelve a ser asimétrico y está cargado a la derecha. Esto es una evidencia visual de la naturaleza oscilatoria del flujo granular.

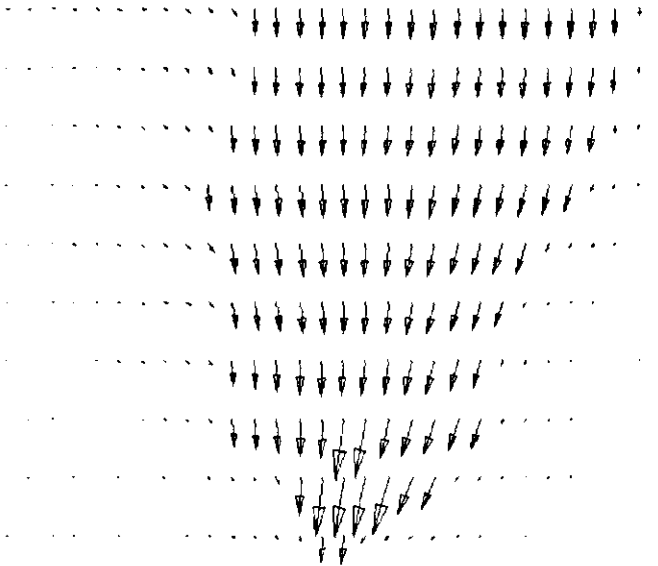


tiempo $t_0 = 2.066$ s. flujo granular cargado a la izquierda



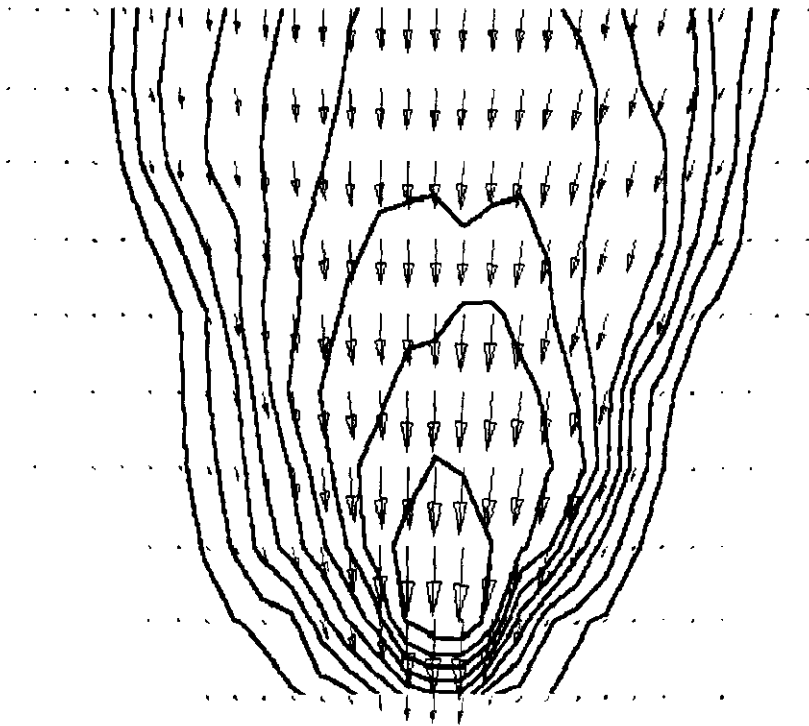
Vector Scale: 1 →

tiempo $t_1 \approx 2.170s$, flujo granular cargado hacia el centro



tiempo $t_2 \approx 2.274 s$.- flujo granular cargado a la derecha

Es necesario también obtener promedios de los campos de velocidades para poder obtener contornos de velocidad importantes para observar el desarrollo del flujo de un segundo al otro, a continuación se muestra un segundo promediado (30 campos de velocidades) junto con los contornos de magnitud de velocidad, haciendo evidente que en el centro se encuentra la mayor velocidad de flujo y en las orillas es prácticamente nulo.



Contornos de magnitud de velocidad

Las oscilaciones se presentaron todas las veces en las que se realizó el experimento y todas tuvieron una frecuencia característica. Para comodidad en los cálculos y ya que el programa INSIGHT de TSI así lo realiza el sistema coordenado (x,y) es ubicado en la parte superior izquierda de la imagen y es tal que x es perpendicular a la pared y y va en la dirección perpendicular del flujo. Dichas oscilaciones transversales en el flujo, mostradas en la secuencia de imágenes anteriores, pueden ser analizadas mediante el cálculo del espectro de potencia de la cantidad

$$G(t) = \frac{1}{Nv_{av}} \sum_{i=1}^n x_i v_i - \left\langle \frac{1}{Nv_{av}} \sum_{i=1}^n x_i v_i \right\rangle$$

En donde $\langle \rangle$ denota el promedio temporal, N corresponde al número total de regiones cuadradas i (30, en nuestro caso) a una altura dada y = cte., x_i es el valor x en el nodo i medido desde el lado izquierdo de la tolva. La cantidad

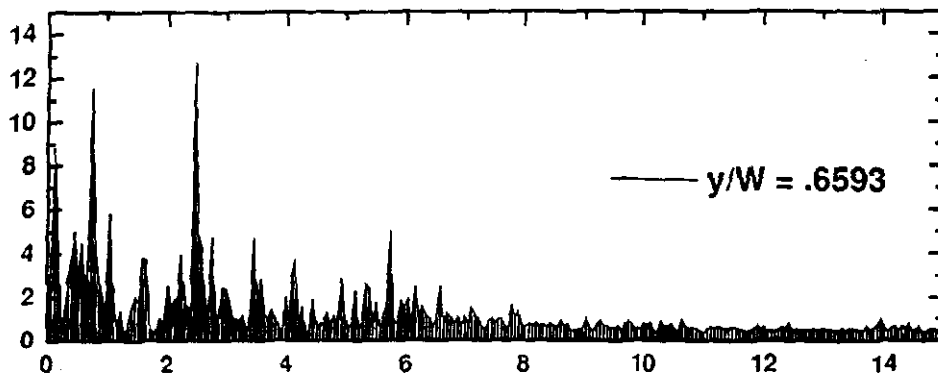
$$v_{av} = \left(\sum_{i=1}^n v_i \right) / N$$

es el valor medio espacial de la velocidad v. Nótese también que G(t) es una medida, a una altura constante respecto a la base del silo, del momento de la velocidad y, por tanto, constituye una adecuada

cantidad para la medida de las oscilaciones en el campo de velocidades.

Además, se cumple que $\langle G(t) \rangle = 0$.

La siguiente figura muestra el espectro de potencia de la cantidad $G(t)$ a la altura $y=24$ cm (medida desde el fondo del silo).



Esta gráfica se obtuvo con una secuencia de aproximadamente 800 imágenes (secuencias temporales) y en ella destaca el pico máximo alrededor de $f_c=2.4$ Hz. Esta frecuencia característica corresponde a la frecuencia principal de oscilación del campo de velocidades, es decir, $t_c=1/f_c$ es el tiempo que toma a la oscilación ir y regresar desde cualquiera de los extremos, a la altura $y = 24$. Este fenómeno de oscilación fue reportado por otros autores, aunque tal fenómeno no se caracterizó por sus frecuencias características.

A partir de la secuencia mostrada de imágenes en donde se observan las oscilaciones y de la discusión previa es fácil notar que el valor de la frecuencia característica disminuye conforme lo hace la altura del silo y llegar a anularse muy cerca del fondo. Este mismo hecho se observa mediante el cálculo del espectro de potencia $G(t)$ para

cuando y tiende a cero, en donde y es medida desde el fondo del silo. Este resultado implica que la parte superior del flujo granular oscila periódicamente y lo hace para mantener más o menos simétrica (aunque con una fuerte depresión en el centro) la superficie libre del material granular. Claramente, las oscilaciones del campo de velocidades se atenúan o francamente dejan de ocurrir muy cerca del orificio de salida.

3.4 Conclusiones

Mediante el uso de la técnica PIV pudimos caracterizar el campo completo de velocidades en un medio granulado. Hasta donde se sabe, es la primera vez que esta técnica, ideada para fluidos, es utilizada en estos materiales.

Por otro lado, es importante destacar que la existencia de fluctuaciones y oscilaciones periódicas en el campo de velocidades hasta ahora no ha sido predicha por ninguno de los modelos para el flujo granular en tolvas. Casualmente, las frecuencias de las oscilaciones principales del campo de velocidades cerca de la superficie libre son del orden de magnitud de la frecuencia natural de las estructuras metálicas usadas en la construcción de silos. Esto podría implicar la posibilidad de resonancia de las estructuras de los silos, aunque en realidad hay dos problemas para que esto ocurra: por una parte, los silos reales son tridimensionales y, por otra, el espectro de potencia deja ver la existencia de otras oscilaciones que al superponerse

IV. Conclusiones generales

Velocimetría de Imágenes de Partículas o PIV es una técnica que rápidamente se está volviendo un método estándar para la medición y obtención de campos de velocidades en flujos. Muchas características hacen a esta técnica atractiva para su uso en el laboratorio tales como la facilidad de la instalación y adaptación del equipo experimental, su no-intrusividad, su capacidad de medición multidimensional y todo el procesamiento digital de información debido a la gran compatibilidad del software de adquisición. Por otra parte, la técnica de correlación tiende a ser mucho mejor que otras técnicas como el seguimiento de partículas o "particle tracking velocimetry" ya que es la adecuada para ambientes con mucho ruido, y porque produce mediciones en mallas regulares dependiendo de la resolución espacial fijada siendo esta la misma para todos los pares de imágenes analizados haciendo posible la obtención de promedios. Sobre todo, la correlación es indicada para flujos con gran número de partículas ya que el seguimiento de partículas individuales es muy complicado.

Evidentemente existen desventajas o puntos en los que hay que poner especial atención para poder tener una correcta medición de la velocidad. Sobre todo hay que tratar de minimizar el ruido que se puede introducir a una imagen, es decir, la parte del experimento por donde entra el haz luminoso así como la parte donde se registran las imágenes por medio de la cámara deben estar limpias para poder obtener buenas imágenes.

Otro punto importante es la alimentación de partículas al flujo.

Estas deben ser seleccionadas adecuadamente para que sigan el flujo, es decir, su tamaño debe ser lo suficientemente pequeño para que su peso sea despreciable pero deben ser a su vez reflejantes para que puedan ser captadas por la cámara.

Por último es importante que no existan reflejos en el cuarto donde se realiza el experimento ya que se convertirán en ruido que provocará mediciones erróneas dentro del flujo. Recordemos que las imágenes son traducidas a escalas de grises y si existen reflejos modificarán los valores de gris asignados a cada píxel en la pantalla.

Por medio de este trabajo hemos podido observar la versatilidad del sistema PIV ya que hemos podido aplicar esta técnica al estudio de los medios granulados. Esto lo pudimos realizar gracias a la digitalización de una filmación y a la alimentación a la computadora. La parte más importante de este proceso es digitalizar las imágenes de tal manera que exista un contraste adecuado para que una partícula sea fácilmente reconocible de una imagen a otra y el procesamiento sea el correcto.

A parte de las ventajas mencionadas anteriormente, una de las más importantes es la medición de la velocidad en un área lo que nos da una visión clara de cómo es el flujo, ya que con la mayoría de las técnicas existentes la medición sólo puede ser puntual haciendo necesario un barrido en intervalos regulares para poder obtener una medición en un área. Además este movimiento del equipo ocasiona errores en las mediciones ocasionadas por las vibraciones. Adicionalmente, en este tipo de mediciones es necesario recoger la

frecuencia con un osciloscopio haciendo obligatoria la estabilidad mecánica en el experimento y en el equipo. Con PIV no es necesaria esta precisión ya que no se recoge ninguna frecuencia, recordemos que el láser sólo es una fuente luminosa, por lo tanto, sólo se requiere que el haz luminoso y la cámara se encuentren perpendiculares entre si para evitar deformación en las imágenes.

Por último, cabe mencionar que PIV es una técnica fácil de usar y adaptable a una infinidad de casos, con tener dos imágenes consecutivas y conocer el tiempo entre ellas es suficiente para poder obtener un campo de velocidades.

REFERENCIAS

1. TSI Incorporated, PIV SYSTEM Operation Manual, (1996).
2. M. P. Wernet, *Application of Optical Correlation Techniques to Particle Imaging Velocimetry*, Lewis Research Center, (1988).
3. TSI Incorporated, PIV SYSTEM Installation Manual, (1996).
4. TSI Incorporated, Insight Operation Manual, (1996).
5. L. Kaiktsis, G. Karniadakis y S. Orszag, *Unsteadiness and convective instabilities in two-dimensional flow over a backward-facing step*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 321, pp. 157-187, (1996).
6. T. P. Chiang, T. W. Sheu y S. F. Tsai, *Topological flow structures in backward facing step channels*, Computers and Fluids, vol. 26, No. 4, pp. 321-337, (1997).
7. T. Roesgen, R. Totaro, *Two-dimensional on-line particle imaging velocimetry*, Experiments in fluids, vol 19, pp. 188-193, (1995).
8. A. Medina, A. Taméz, y C. Sandoval, *Flujos lento y Rápido de un medio granulado: la influencia de la gravedad y la fricción*, Ciencia (ergo sum), vol. 4, No. 2, (1997).
9. A A. Mills, S. Day y S. Parkes, *Mechanics of the Sandglass*, Eur. Jour. Phys. vol. 17, pp. 97-109, (1982).
10. J. Andrade, C. Treviño y A. Medina, *Experimental evidence of density fluctuations in 2D bins*, Physics Letters A, pp 105-110, (1996).
11. J. Westerweel, D. Dabiri y M. Gharib, *The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings*, Experiments in Fluids, vol. 23, pp. 20-28, (1997).
12. A. Medina, J. A. Córdova, E. Luna y C. Treviño, *Velocity field measurements in a near 2D silo*, International Journal of Modern Physics B, (1998).

**ESTA LIBRO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**