



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN COMUNICACIÓN OPTICA  
FACULTAD DE CIENCIAS

**VELOCÍMETRO DE PARTICULAS BASADO EN IMÁGENES  
DIGITALES**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRIA EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

ING. JUAN DAVID MARTINEZ RAMÍREZ

ASESOR:

DR. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ CONTRERAS

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P., OCTUBRE 2006



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN COMUNICACIÓN OPTICA  
FACULTAD DE CIENCIAS

**VELOCÍMETRO DE PARTICULAS BASADO EN IMÁGENES  
DIGITALES**

---

ING. JUAN DAVID MARTINEZ RAMÍREZ

**SINODALES**

---

DR. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ CONTRERAS  
(ASESOR)

---

DR. SALVADOR GUEL SANDOVAL

---

DR. GUSTAVO RAMÍREZ FLORES

Esta tesis es un reconocimiento  
a la memoria de mis abuelos  
y de aquellas personas que conocí  
pero que ya no están entre nosotros.

A mis padres y hermanos  
los cuales me han ayudado a lograr este meta

A mi esposa y a mi hijo  
los cuales fueron mi principal inspiración  
para seguir adelante en las buenas y malas

Juan David Martínez Ramírez

## **Agradecimientos**

Al DR. Francisco Javier González Contreras por su asesoría en la realización de esta tesis, además de su paciencia y entusiasmo para llevarla a cabo.

A las autoridades directivas y administrativas, del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica.

A los Doctores, los cuales me orientaban cuando tenía dudas.

A mis amigos que me apoyaron.

Al CONACYT por la beca de postgrado No. 192545.



## RESUMEN

Desde hace algunos años se han desarrollado métodos que permiten medir el campo de velocidad de un fluido utilizando el procesamiento digital de imágenes. De estos métodos destaca el de velocimetría de partículas PIV (particle image velocimetry). Con el avance de las computadoras y las cámaras CCD este método se empezó a denominar DPIV (digital particle image velocimetry). Estos métodos se basan en iluminar el plano que se desea medir con un haz láser utilizando una lente cóncava y otra cilíndrica para formar así un abanico de luz, e introducir en el campo partículas para que la luz se refleje sobre ellas e incida sobre la cámara CCD formando una imagen. Se toman dos fotografías separadas entre sí por un tiempo conocido y se analizan estas imágenes utilizando alguno de los siguientes métodos: franjas de Young, autocorrelación o correlación cruzada. En este trabajo se presenta los resultados de la fabricación y pruebas de un sistema de velocimetría digital utilizando el método de correlación cruzada para determinar el campo de direcciones y velocidades de un conjunto de burbujas en un tanque de agua, la correlación cruzada fue seleccionada debido a que remueve el problema de la ambigüedad del sentido de los vectores de velocidad.

## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Reseña histórica	1
1.2 Importancia	3
1.3 Aplicaciones	3
1.4 Objetivos	7
2. TECNICAS DE VELOCIMETRIA DE PARTICULAS EN IMAGENES (PIV)	
2.1 Velocimetria de partículas basado en imágenes (PIV)	8
2.2 Principios	9
2.2.1 Visualización de imágenes de PIV para un seguimiento del sembrado de partículas	11
2.2.2 Resolución espacial y rango dinámico	11
2.3 Desarrollo	13
2.3.1 Definición de las áreas de interrogación	13
2.3.2 Aplicación de la correlación a las áreas de interrogación	14
2.3.3 Localización del pico y la interpolación de los subpíxeles	17
2.3.4 Post-procesamiento del campo de desplazamiento	20
2.3.5 Ventanas locales de cambio de posición de las partículas	22
2.4 Diferentes tipos de PIV	24
2.4.1 Anemómetro Doppler Láser (LDA)	25
2.4.2 Análisis Dinámico de la Partícula (PDA)	26
2.4.3 Fluorescencia Plana Inducida por Láser (P-LIF)	27
2.4.4 Velocimetria de Particulas basado en Imágenes Holográficas (HPIV)	28
3. VELOCÍMETRO DE PARTICULAS BASADOS EN IMAGENES DIGITALES (DPIV)	
3.1 Definición	30
3.1.1 Generación de las imágenes artificiales	33
3.2 Técnicas de procesamiento	34
3.2.1 Adquisición	34
3.2.1.1 El campo de la dislocación	34
3.2.1.2 El patrón del trazado de líneas	36
3.2.1.3 El conjunto de trazado de líneas	37
3.2.1.4 Proyección de la imagen	40
3.2.2 Interrogación	41
3.2.2.1 Correlación espacial	41
3.2.2.2 Gradientes de la velocidad	42
3.2.2.3 Polarización de velocidad	44
3.2.2.4 Puesta en práctica	45
3.2.3 Pixelización	46
3.2.3.1 Ancho de banda	46
3.2.3.2 Muestreo de la imagen	48
3.2.3.3 Cuantización	49
3.2.4 Análisis Digital	49
3.2.4.1 Correlación espacial discreta	49

3.2.4.2	Valoración de la correlación	50
3.2.4.3	Valoración de la dislocación fraccionaria	51
3.2.4.4	Error de la valoración	52
3.2.5	Exactitud del DPIV	53
3.2.6	Prueba uniforme del flujo	54
3.2.7	Prueba de la rotación del cuerpo sólido	55
3.2.8	La prueba del flujo de Couette.	55
3.2.9	Prueba válida de la probabilidad del vector	56
4. ALGORITMOS UTILIZADOS EN DPIV		
4.1	Franjas de Young	57
4.1.1.	Fragmentación de la imagen	58
4.1.2	Acercamientos posibles para detectar franjas	59
4.1.2.1	Análisis de Fourier	59
4.1.2.2	Auto-correlación	59
4.1.3.	Modelo de la forma de onda	59
4.2	Algoritmo de auto correlación	61
4.2.1	Ambigüedad direccional	63
4.2.2	Función de correlación asimétrica.	66
4.3	Correlación Cruzada	67
4.3.1	Límites en la exactitud	70
4.3.2	Límites en la resolución espacial	71
5 ARREGLO EXPERIMENTAL.		
5.1	Materiales	73
5.1.1	Láser He-Ne JDS uniphase serie 1100	73
5.1.2	Porta lentes, Porta láser y Bases	74
5.1.3	Lente plano-cóncava	75
5.1.4	Lente cilíndrica	76
5.1.5	Tanque de agua	76
5.1.6	Bomba de oxígeno	77
5.1.7	Cámara CCD	77
5.1.8	Tarjeta NI-1407	81
5.1.8.1	Instalación de la tarjeta PCI-1407	82
5.1.8.2	Componentes de la tarjeta NI-1407	82
5.1.8.3	Condiciones iniciales	84
5.1.8.4	Parámetros de Video Programación	84
5.1.8.5	Modos De Adquisición	85
5.1.8.6	Conectores BNC	85
5.1.9	LabVIEW 7.1 (VISION e IMAQ)	86
5.1.9.1	Driver NI-IMAQ	86
5.1.9.2	IMAQ Vision	86
5.2	Simulación de lentes	87
5.2.1	OSLO	88
5.2.1.1	Tipos de ventanas de OSLO	89
5.2.1.2	¿Cuáles son características de Oslo?	90
5.2.1.3	¿Cuáles son los puntos fuertes de Oslo?	90

5.2.1.4	Gráficos de OSLO	91
5.2.2	CODE V	92
5.2.2.1	Tareas típicas de CODE V	93
5.2.2.2	Ventanas de CODE V	93
5.2.2.3	Gráficos de CODE V	95
6.	SOFTWARE	
6.1	LabVIEW	97
6.1.1	Dominio de la Frecuencia	98
6.1.2	Transformada de Fourier	99
6.1.3	Representación del dominio de la frecuencia de imágenes	100
6.1.4	Instalación de un Sistema de Proyección de imagen	103
6.1.5	Calibración del Sistema de Proyección de imagen	104
6.2	IMAQ	104
6.2.1	Las librerías de NI-IMAQ	104
6.2.2	Programación con NI-IMAQ Vis	107
6.2.3	Localización de los ejemplos de NI-IMAQ	108
6.2.4	Parámetros Comunes NI-IMAQ VI	109
6.2.5	Manejo del buffer	109
6.3	Tipos de Adquisición de NI-IMAQ	110
6.3.1	Captura de imagen	110
6.3.2	Grabación de imágenes	110
6.3.3	Secuencia	111
6.3.4	Ciclo	112
6.3.5	VIs de Adquisición	112
6.3.6	Disparador	113
6.3.7	Exhibición De la Imagen	114
6.4	VISION	114
6.4.1	Definición de una imagen Digital	115
6.4.1.1	Características de una imagen digitalizada	115
6.4.1.2	Resolución De la Imagen	115
6.4.1.3	Definición(tipos) De la Imagen	115
6.4.1.4	Número de planos.	116
6.4.1.5	Tipos De Imagen.	116
6.4.1.6	Imágenes en escala de grises	117
6.4.1.7	Imágenes De Color	118
6.4.1.8	Imágenes Complejas	118
6.4.1.9	Archivos De la Imagen.	118
6.4.1.10	Paleta de control de IMAQ-VISION	119
6.4.2	Paleta de funciones de IMAQ-Vision	119
6.4.2.1	Utilidades De Visión	119
6.4.2.2	Procesamiento de imágenes	121
6.4.2.3	Machine Visión.	123
6.4.3	Combinaciones de la entrada y de la salida	123
6.4.3.1	Análisis De Imagen	123
6.4.3.2	Máscaras De la Imagen	123
6.4.3.3	Relleno De la Imagen	124

6.4.3.4	Proceso De Imagen	124
6.4.3.5	Operaciones aritméticas y lógicas	125
6.4.4	Análisis Del Dominio De la Frecuencia en IMAQ-Visión	125
6.4.4.1	Conceptos de la transformada rápida de Fourier	127
6.4.4.2	Representación de FFT	127
6.4.4.2.1.	Representación Estándar	127
6.4.4.2.2	Representación Óptica	128
6.4.5.	Transformada de Fourier	129
6.4.5.1	Exhibición de FFT	130
6.4.6	Diseño de los programas en LabVIEW	131
6.4.6.1	Programa de captura de imágenes	131
6.4.6.2	Programa DPIV	133
6.4.6.3	Programa de muestreo de imágenes	136
7.	RESULTADOS	
7.1	Pruebas preliminares	137
7.2	Pruebas finales	139
8.	CONCLUSIONES	
8.1	Conclusiones sobre el DPIV	149
8.2	Puntos Importantes para hacer un DPIV más útil	150
8.3	Recomendaciones para una mayor exactitud	150
9.	TRABAJO A FUTURO	
9.1	DPIV 3D	152
10.	REFERENCIAS	156

# CAPITULO I INTRODUCCIÓN

## 1.1 Reseña historica

El análisis de velocidad de un fluido o gas en movimiento es de fundamental importancia. Desde hace algunos años se están desarrollando métodos que permiten medir el campo de velocidad de los fluidos y gases utilizando un procesamiento digital de imágenes. De estos métodos se destaca el PIV (particle image velocimetry) o bien conocido en español como velocimetría de imagen de partículas, la cual es un método efectivo, instantáneo y no intrusivo, que fue desarrollado hace mucho tiempo y perfeccionado por distintos autores. El método consiste en iluminar el plano que se desea medir con un abanico de luz láser, e introducir en el campo partículas de igual densidad que el fluido en nuestro caso para que la luz se refleje sobre ellas e incida sobre la cámara formando una imagen. Se toman dos fotografías separadas entre sí por un tiempo conocido y se analizan estas imágenes. Generalmente los métodos PIV se basan en registrar las imágenes consecutivas del fluido y posteriormente analizar las mismas.

En un principio los primeros investigadores para alcanzar tales medidas utilizaron el método de punto del láser, que se convertiría posteriormente en la mecánica de sólidos, y demostraron que podría ser aplicada para calcular la velocidad en los fluidos. Específicamente, tres diversos grupos de investigación, D. B. Barker y M. E. Fourny (1977), T. D. Dudderar y P. G. Simpkins (1977), y R. Grousson y S. Mallick (1977), cada uno demostró la viabilidad del método LSV para el flujo del fluido midiendo el perfil parabólico en un flujo por un tubo de lamina. Los elementos principales de la velocimetría de punto láser (LSV) eran el uso de las imágenes de doble-exposición, iluminadas por un abanico de luz láser, y formando las franjas de Young de interferencia. Roland Meynart (1979-1983) un estudiante doctoral de la universidad de Bruselas, era el principal practicante de este método, y él había demostrado que las medidas prácticas se podrían hacer en flujos turbulentos de líquidos y de gases.

La primera contribución de R. J. Adrián(1984) fue la siguiente la iluminación de partículas en los flujos por un abanico de luz, la cual debe siempre crear un patrón de los puntos en la imagen. El plano de imagen contendría imágenes de partículas individuales. El nombre "velocimetría de imagen de partículas (PIV)" fue propuesto para distinguir este modo de operación del modo del punto del láser o LSV. Dependiendo de lo que se desea adquirir se utilizara un método u otro usando siempre un número sin dimensiones llamó la "densidad de la fuente". La densidad de la fuente iguala el número de partículas en un volumen de la resolución, y el número de imágenes traslapadas en el plano de imagen se puede expresar en términos de él. Para los líquidos la concentración permisible de dispersiones era normalmente demasiado pequeña producir las densidades de la fuente bastante grandes para tener patrones del punto formado traslapado de imágenes. Concentraciones más altas de partículas no eran realizables o no deseables dinámicamente. Por lo tanto, uno vería casi siempre imágenes más bien que los puntos de las partículas. Independientemente, también C. J. D. Pickering y N. H. Halliwell (1984) también

publicaron un artículo en el cual también utilizó el término de "velocimetría de imagen de partículas"[1][2].

El diagnóstico óptico del flujo se basa en la interacción, es decir refracción, absorción o dispersión, de la luz (visible) con medios no homogéneos. En un líquido ópticamente homogéneo no hay interacción significativa de la luz del incidente con el líquido, tal como refracción, por la cual la información del campo de la velocidad del flujo puede ser recuperada. En la velocimetría de imagen de partículas (PIV) el movimiento del fluido es hecho visible agregando partículas pequeñas para el trazo de líneas y de las posiciones de estas partículas en dos casos con un tiempo conocido, es decir con dislocación de la partícula, es posible deducir la velocidad en el campo del flujo. La base inicial para una teoría de PIV fue colocada por Adrián que describieron el valor de la expectativa de la función auto-correlación para una imagen PIV continua de doble-exposición. Esta descripción proporcionó el marco para las reglas experimentales del diseño[3]. Más adelante, la teoría fue generalizada para incluir grabaciones de múltiple exposición [4] y análisis de la correlación cruzada [5]. La teoría proporcionó una descripción adecuada para el análisis de las imágenes altamente resueltas de PIV, que era el modo de operación común por un tiempo considerable. Sin embargo, el PIV es utilizado hoy en día con las cámaras digitales para la grabación directa de las imágenes de las partículas. Pues la resolución y el formato de las imágenes digitales son de varios órdenes de magnitud más bajas que las de un cámara fotográfica normal. La teoría fue ampliada más a fondo por Westerweel para incluir imágenes digitales de PIV y la valoración de la dislocación en el nivel de sub-pixe[6].

En 1998 el término velocimetría digital de imagen de partículas (DPIV) fue adquirido por la división de mecánica de fluidos en Lund. Las modificaciones al software incluyen la mayoría de las técnicas más últimas descritas en la literatura reciente, consideran a Westerweel y Raffel [7][8]. Los ejemplos de las modificaciones son las ventanas locales del cambio de posición de las partículas de una imágenes respecto a otra, interpolación gaussiana del sub-pixel con la corrección diagonal, y post-proceso mejorado del vector. Usar las imágenes artificiales generadas para probar la exactitud es una técnica establecida, por Raffel [9]. Aunque no todas las fuentes del error se consideran en las imágenes artificiales, es fácil probar la influencia de parámetros importantes tales como densidad, diámetro de la imagen de la partícula, gradientes de la velocidad y movimiento de sembradores hacia fuera del plano.

Otra aportación de Adrián (1998), es la siguiente: El PIV 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. Perpendicular al plano de la medida se coloca una cámara, que toma la luz reflejada por las partículas sembradas en el fluido, en dos instantes de tiempo. Para calcular las velocidades se utiliza el método de la correlación cruzada [10], tiene la desventaja que permite medir solo las componentes del campo de velocidad que se encuentran en el plano de medida, si tiene componentes de velocidades en la otra dimensión, la misma no es tomada cuenta y provoca además el error de bias [11] en la medida de las componentes del campo.

Para poder analizar campos de velocidades complejos se crearon los sistemas de medidas de tres dimensiones. El método de medida basado en estereografía [12] consiste en aplicar el método PIV de correlación cruzada, al campo de velocidades del fluido utilizando dos cámaras separadas una distancia determinada. Las diferencias presentes en los campos de velocidades en dos dimensiones obtenidos permiten inferir el valor de la velocidad en la tercera dimensión. Existen dos configuraciones posibles. El método de traslaciones [13], consiste en colocar paralelos los planos de imagen de las cámaras y el plano de medida. El método de desplazamiento angular consiste en ubicar los planos imagen de las cámaras y el plano de medida con distintos ángulos de forma de obtener el mayor reflejo posible de las partículas iluminadas por el láser[14]

## **1.2. Importancia**

Es importante llevar a cabo éste trabajo de tesis (velocímetro de digital de imagen de partículas), ya que es un campo que va en pleno desarrollo utilizado para estudiar las características del flujo de líquidos y gases. A través de la toma de fotografías con una cámara especial CCD que emplea luz láser acoplada a un ordenador, la distancia recorrida por partículas individuales sembradas en un líquido o gas puede rastrearse mediante imágenes sucesivas.

Muchos investigadores están interesados en PIV porque ofreció nuevos métodos y promesas para estudiar la estructura de los flujos turbulentos. Esta meta influenció fuertemente las opciones hechas en el desarrollo del método. Por su naturaleza, la turbulencia es un fenómeno que ocurre sobre una amplia gama de escalas físicas, extendiendo de las escalas más grandes del flujo y llegando abajo a la escala de Kolmogorov. En la 12vo simposio internacional sobre las técnicas de aplicación láser para la area de mecánica de fluidos ( Lisboa, julio 12-15,2004). Esta técnica de medida debe poder medir sobre una gama dinámica ancha de escalas en longitud (y velocidad). Otras características sobresalientes de la turbulencia son su aleatoriedad, que puede hacerlo imposible determinarse, a priori, la dirección del flujo. Por lo tanto, la técnica de la medida debe poder detectar flujos en todas las direcciones. La turbulencia también ocurre en el alto número de Reynolds, que significa a menudo alta velocidad. Las aceleraciones son grandes, y por lo tanto las partículas deben ser bastante pequeñas para seguir el flujo y las aceleraciones aleatoriamente que fluctúan. Esto implica el uso de las partículas muy pequeñas, algunos micrones de tamaño, y la sección representativa pequeña de la dispersión ligera de tales partículas implica el uso de la iluminación de alta intensidad. En conjunto con las exposiciones de corto tiempo para capturar imágenes de las partículas finas sin velar, estos requisitos conducidos naturalmente al uso de alta intensidad, lasers pulsados.

## **1.3. Aplicaciones**

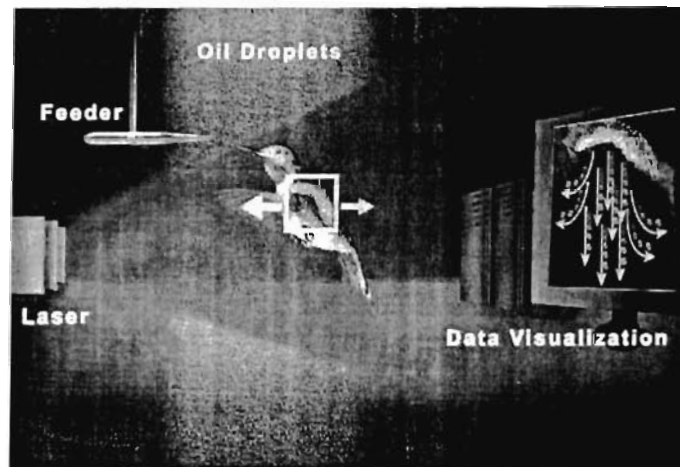
Los métodos DPIV han sido utilizados en diversas aplicaciones a continuación nombraremos algunas:

-Un sistema DPIV fue utilizado por Un equipo formado por investigadores de la Universidad del Estado de Oregón, la Universidad de Pórtland y la Universidad George Fox, Usando una sofisticada técnica de imágenes digitales, los científicos han determinado

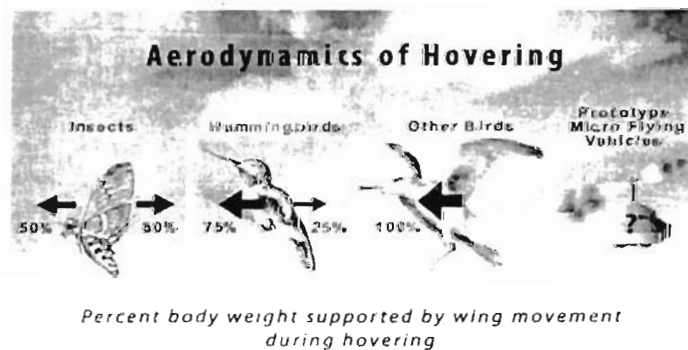


ahora la aerodinámica del vuelo del colibrí. Encontró que los colibríes apoyan el 75 por ciento de su peso durante el golpe descendente del ala y el 25 por ciento en el ascendente, en contraste con los insectos, que producen cantidades iguales de flotación en ambos golpes. Para observar al colibrí en vuelo, el aire en un túnel de viento fue sembrado con partículas microscópicas de aceite de oliva, y se capturaron imágenes digitales cada 300 microsegundos a medida que el pájaro flotaba alrededor de una fuente de alimento. Los golpes de ala causaron que el aire circulase, lo que a su vez provocó el movimiento de las partículas flotantes de aceite. El análisis informático de imágenes de la posición de cada partícula aceitosa en cuadros consecutivos permitió a los científicos reconstruir la suspensión y las características asociadas con cada uno de los movimientos ascendentes y descendentes del ala.

Estos últimos datos refutan las conclusiones de numerosos estudios anteriores de que los colibríes revoloteaban como insectos a pesar de sus profundas diferencias musculares y esqueléticas. Por consiguiente, sería natural que esta nueva descripción de la aerodinámica del colibrí proveyera a los ingenieros de un modelo refinado para el desarrollo de futuros vehículos voladores autónomos en miniatura[15].



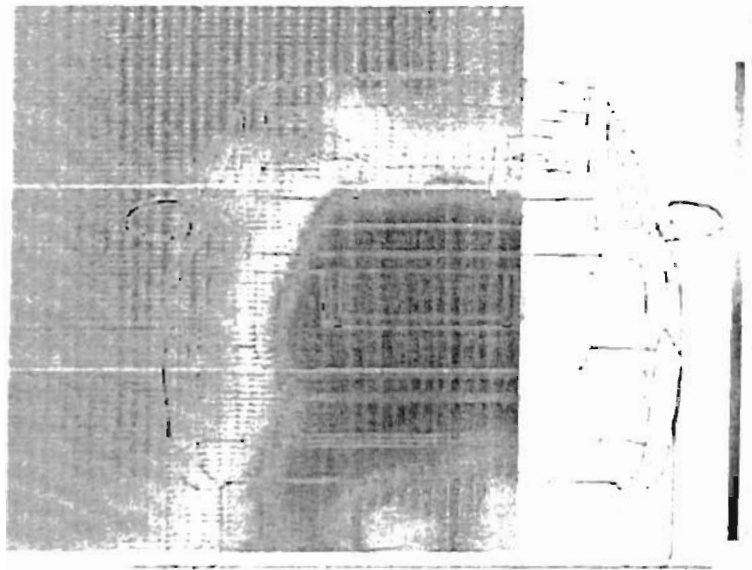
*Figura 1.1. Representación gráfica de cómo fue implementado el sistema DPIV en el vuelo del colibrí*



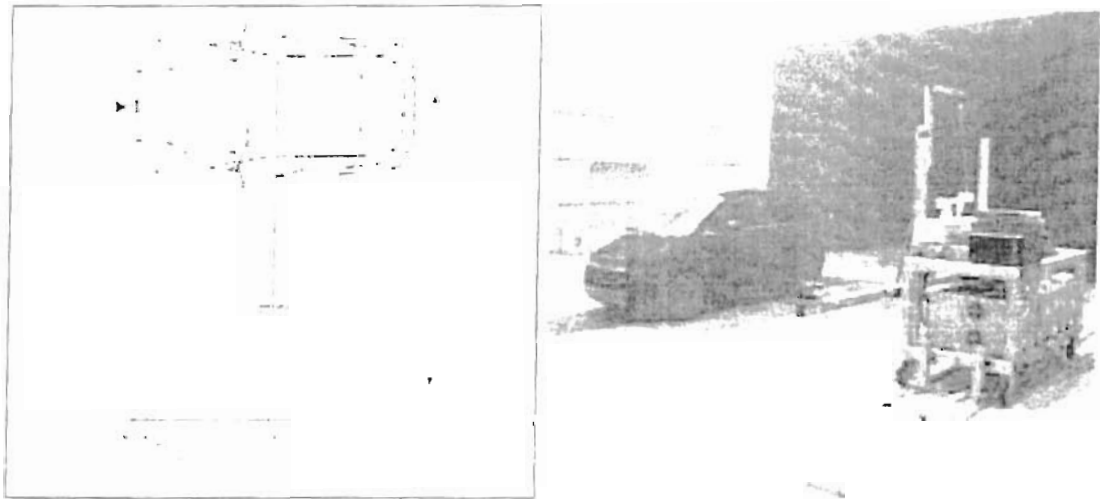
*Figura 1.2. Tipos de aerodinámica de algunas aves*

-El empleo de los sistemas DPIV en la industria mexicana es un reto ya que lo que se desea buscar es la reducción de emisiones contaminantes el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) desarrollan combustibles alternos. El doctor Bolado Estandía expone que las investigaciones de nuevas tecnologías que está realizando el Grupo de Combustión, se enfocan a desarrollar sistemas de combustión con atomizadores y estabilizadores de flama, que permitan menores tamaños de gota de combustible y una mejor distribución del combustible líquido y aire, dentro de la zona de combustión. Con esta medida se reducen contaminantes tales como las partículas y óxidos de nitrógeno, manteniendo la eficiencia de combustión. Para llevar a cabo los trabajos de investigación aplicada, el equipo científico del IMP emplea modelos físicos y de sistemas de medición, que se basan en luz láser, tales como: velocimetría (medición de velocidad de partículas), holografía (proceso fotográfico que, mediante el empleo de láser, graba y reconstruye imágenes tridimensionales de objetos), difracción (desviación de ondas o rayos luminosos al pasar por un cuerpo) y dispersión (acción de segregar los rayos de luz al pasar o reflejarse en un cuerpo). Al aplicar estos sistemas, se pueden realizar las mediciones con mayor detalle y sin estorbar el proceso que se estudia. Por otra parte, el especialista indica que la tecnología en materia de combustión ha avanzado en el abatimiento de las emisiones contaminantes en quemadores. Señala que por medio de la descripción y caracterización -modelos físicos y matemáticos- de los fenómenos de transferencia de masa y energía que originan los procesos de combustión, se conduce a la alta eficiencia de éstos. Este procedimiento científico permite especificar, ingenierilmente, las características de los equipos de los sistemas de combustión, de tal manera que en función del combustible que se use, se mejora la eficiencia y se abaten las emisiones contaminantes[16].

-En la rama automotriz son muy utilizados para mejorar el rendimiento del combustible y una mejor aerodinámica a continuación mencionaremos algunas aplicaciones. La optimización del flujo y la turbulencia detrás de un coche de Mercedes benz modelan en un túnel de viento, usando un sistema estereoscópico de 3D PIV ,el flujo de aire alrededor de un espejo se mide con un sistema de PIV en los camiones volvo. Mientras que la obtención de medidas a gama completa de PIV en una circulación de aire ha sido siempre un sueño de muchos, el equipo de investigación en Volkswagen AG ha utilizado tecnología disponible de hoy y ha integrado los componentes en un sistema que proporcionó una solución a su problema: el flujo alrededor de un coche a gama completa. Los componentes dominantes del sistema estereoscópico de 3D PIV son dos cámaras fotográficas de HiSense y un láser de gran alcance de Thomson BMI Nd:Yag. Con la integración lista de todos los componentes en un carro por encargo el sistema comprensivo se mueve en el túnel de viento listo a medir. La grabación de datos y el control del sistema se hace en una PC con el software de FlowManager en la sala de mando del túnel de viento, sólo está conectada vía red. Con ello se obtuvo mucha información del comportamiento del aire a través del automóvil y cuales son las partes que con menor aerodinámica[17].



*Figura 1.3. Esquemático de colores los cuales nos indican la velocidad del flujo del aire a través de un automóvil los rangos van de 0 a 40 m/s (azul a rojo)*



*Figuras 1.4 y 1.5. Nos muestra el posicionamiento del sistema DPIV en forma grafica y real*

-El sistema de PIV se está utilizando en la investigación en las características pulsátiles del flujo del aneurismo cerebrovascular en la universidad tecnológica de Nanyang y el hospital del Tan Tock Seng en Singapur. El término cerebrovascular se aplica a las arterias en el cerebro. Indicado simplemente, un aneurismo es como un globo hinchado en la pared de una arteria. Puede atrapar el colesterol, conduciendo a una obstrucción en la fuente de la sangre. Esto causa un movimiento si la presión del líquido estalla en la arteria. Así, una

comprensión más profunda del flujo pulsátil puede ayudar a explicar porqué ocurren los movimientos. Los estudios *in vitro* utilizan modelos de arterias. Una mezcla del sodio-yodo (NaI) y de la glicerina está siendo utilizada por los investigadores para reducir al mínimo la distorsión óptica y el ruido óptico en el interfaz del modelo del fluido. Los investigadores dicen que había previamente poca información experimental sobre flujos arteriales con el aneurismo. La mayoría de la investigación de los líquidos hasta la fecha ha utilizado la visualización del flujo con anemometría doppler láser proporcionando los datos cuantitativos. Sin embargo, el flujo instantáneo es muy diferente del medio, así que los datos instantáneos detallados del mapa del vector obtenidos por el sistema de PIV están proporcionando una nueva penetración al problema. Así como estudios de estado estacionario, un expediente del tiempo durante el ciclo del pulso es también posible. Los autores encontraron el acceso en línea a los datos del mapa de la velocidad proporcionados por el sistema de PIV particularmente provechoso en la adquisición de los datos de la medida[18].

#### **1.4. Objetivos**

Esta tesis se enfocara en los aspectos fundamentales del diseño, construcción y análisis de imágenes de partículas para un DPIV. Partiendo del diseño de un sistema PIV como en términos de la teoría (lineal) del sistema, en los cuales las partículas se ven como patrón observable que se encuentra en el líquido: los patrones observados del trazo de líneas en dos casos subsecuentes se consideran como entrada y salida del sistema, y el campo de la velocidad se deduce del análisis de las señales de la entrada y de salida. El patrón del trazo de líneas entonces se relaciona con la imagen (digital) observada.

Crearemos el diseño de 2 lentes una plano cóncava y otra cilíndrica simuladas en software como CODE V y OSLO que nos proporcionan una diversa gama de lentes para visualizar su trayectoria auxiliados de la teoría de trazado de rayos para obtener un mejor abanico de luz, para proseguir con los siguientes materiales para la construcción del DPIV los cuales serán un láser He-Ne, una lente cilíndrica, una lente plano-cóncava, un tanque para el fluido, inyector de burbujas, cámara CCD SONY XC-ST50 monocromática como la parte del hardware la cual sera manejada por medio de una interfase con la tarjeta NI-1407 de NATIONAL INSTRUMENTAL, controlada por drivers con programas de captura y procesado los librerías de VISION del programa LABVIEW 7.1. Para posteriormente evaluar la valoración de las dislocaciones de las partículas en función de la resolución espacial para determinar los vectores y las líneas aerodinámicas de la velocidad[19-26].

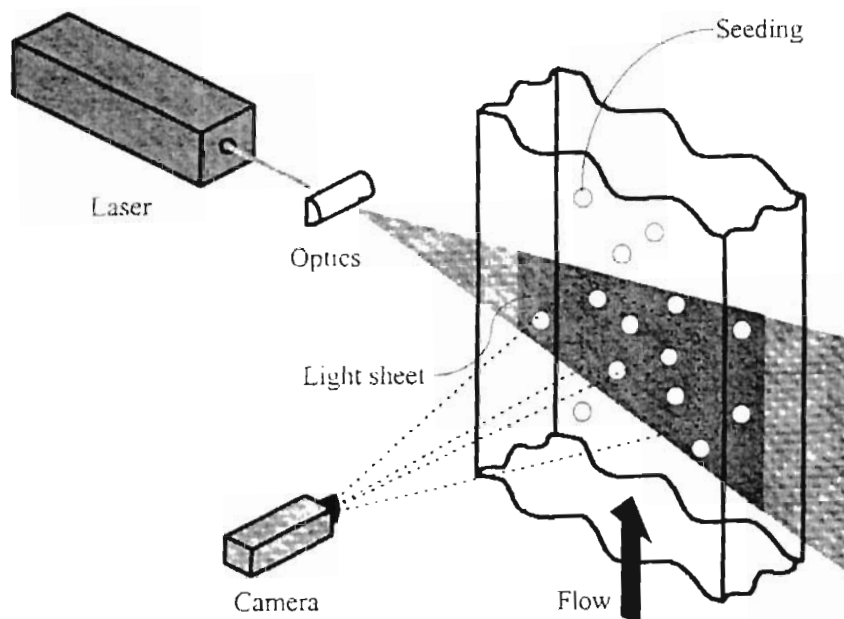
## CAPITULO II TECNICAS DE PIV

### 2.1. PIV

El velocímetro de imagen de partículas es una técnica de estudio de los fluidos, la cual nos proporciona medidas instantáneas de los vectores de la velocidad en una sección representativa de un flujo. Las muestras de velocidad son de 2 componentes, pero se usa un estereoscopio si se desea encontrar una 3er componente y obtener vectores de velocidad en 3D. El uso de las cámaras modernas CCD y una interfase de hardware nos proporcionan mejores información del fluido como son los mapas en tiempo real de la velocidad. Todo ello por medio de la implementación con un láser, 2 lentes que formaran un abanico de luz, a través de un líquido que contenga o se ha sembrado con partículas. Tomamos imágenes en sucesión rápida para ser comparadas, además de la velocidad, nosotros podemos obtener líneas aerodinámicas, y otra los datos del flujo. Una segunda cámara fotográfica se puede introducir para obtener datos espaciales y dar una profundidad del campo. La figura 2.1 nos muestra un ejemplo de implementación de un PIV[27]

#### CARACTERISTICAS

- La técnica es no-intrusiva
- Muestra las velocidades de partículas con un seguimiento en el flujo
- Los rangos de velocidades son de cero a supersónicas
- Nos proporcionan mapas de los vectores de velocidad instantánea en secciones del flujo



*Figura 2.1. Ejemplo de implementación de un PIV*

## 2.2. Principios

La velocimetria de imagen de partículas (PIV) es una técnica de la medida para obtener velocidades enteras instantáneas del campo. Se basa en la ecuación tan conocida

$$velocidad = \frac{dis\ tan\ cia}{tiempo} \quad (1)$$

El principio general de PIV es iluminar partículas para el trazado de líneas en el campo del flujo del interés con un abanico de luz, y adquirir dos imágenes del campo del flujo con una separación de tiempo. Cuando una cámara fotográfica digital del CCD se utiliza para la adquisición de la imagen, se utilizan las siglas DPIV. El campo de la dislocación determina el movimiento de las partículas entre las dos imágenes, y dividiendo entre el tiempo se obtiene el campo de la velocidad. El problema en PIV es determinar el campo de la dislocación. La separación del tiempo se asume para ser sabida con suficiente exactitud. En PIV el campo de la dislocación se determina como dislocaciones medias dentro de las áreas de interrogación del plano de imagen. Un tamaño típico de estas áreas de interrogación es de 32 x 32 píxeles, esto significa que uno consigue cerca de 1000 vectores de una imagen con una resolución de 1000 x 1000 píxeles.

El píxel es una abreviatura fonética del concepto inglés *picture element*. Se trata de un punto en una rejilla rectilínea de miles de puntos tratados individualmente, para formar una imagen en la pantalla de la computadora. Igual que un bit es la unidad de información más pequeña que puede procesar un ordenador o computadora, un píxel es el elemento más pequeño que el *hardware* y el *software* de pantalla para manipular al crear cartas, números o gráficos.[28]

Para las imágenes expuestas, la dislocación es determinada por la correlación cruzada de las áreas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes. La localización del pico más alto de la correlación del plano corresponde a la dislocación medio más probable de la partícula en el área de interrogación. La exactitud del Sub-píxel de dislocación es obtenida usando una función gaussiana al pico de la correlación, y encontrando la localización máxima exacta. Puesto que el método de la correlación cruzada utiliza toda la información dentro del área de interrogación para encontrar la dislocación, el método es robusto y proporciona a menudo los resultados razonables uniformes para las condiciones no-ideales. Otra ventaja es que el campo de la dislocación está obtenido en una área regular.

Para la iluminación es preferible utilizar un láser, puesto que el rayo láser es fácil de utilizar para formar un abanico de luz con una lente cilíndrica. Un láser pulsado de preferencia, puesto que uno obtiene una alta energía durante un intervalo muy corto del tiempo (típicamente de 5 ns para un láser YAG), esto significa que las imágenes de la partícula serán congeladas prácticamente incluso para las altas velocidades (>100 m/s). El índice de la repetición de un láser YAG es típicamente 10-30 hertzios, que es demasiado bajo a excepción de velocidades muy bajas (< 1 cm/s).

Para poder adquirir dos imágenes expuestas con una separación de tiempo del orden de microsegundos, uno utiliza una cámara CCD. La idea básica es que la imagen expuesta por el primer pulso del láser está transferida muy rápidamente a las áreas del chip de la cámara CCD. Esto se hace sobre una base de píxel por píxel, es decir cada píxel tiene su propio sitio de almacenaje en el área sensible a la luz en el chip de la cámara. Después de la segunda exposición, ambas imágenes se transfieren a la computadora.

Puesto que muchos datos tienen que ser transferidos, es solamente posible tomar algunas imágenes dobles por segundo.

Una muy importante decisión para obtener medidas exactas de PIV es el sembrado apropiada del flujo para el trazado de las partículas. Las partículas deben ser tan pequeñas como sea posible, pero por otra parte pueden no ser imágenes demasiado débiles demasiado pequeñas, porque entonces no dispersarán bastante luz. Para los flujos líquidos generalmente el diámetro de las partículas es de  $d_p = 10-20 \mu\text{m}$ . En flujos gaseosos las partículas tienen que ser más pequeñas para seguir el flujo, debido a la densidad más baja del gas comparada al líquido. Por otra parte, debido a la mayor diferencia en índice de refracción del gas comparada al líquido, una partícula en aire dispersará más luz que en un líquido, así que un tamaño de una partícula más pequeña es aceptable. En flujos gaseosos el tamaño de partícula es de  $d_p = 1-5 \mu\text{m}$ . Da la siguiente fórmula para determinar el diámetro de la partícula en la imagen  $d_i$  [4]

$$d_i = \left( M^2 d_p^2 + d_s^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

donde

$$d_s = 2.44(1+M) f^* \lambda \quad (2)$$

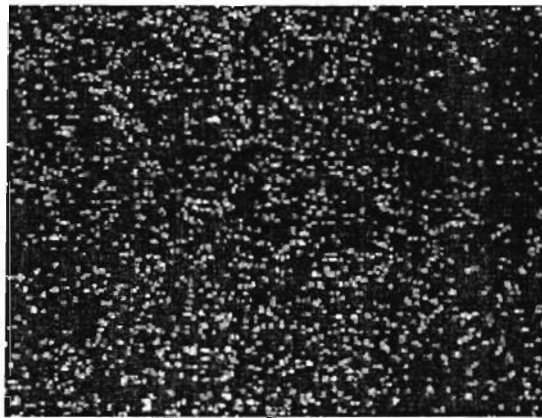
Es la anchura en función a la respuesta del punto de difracción de una lente limitada.  $M$  es la ampliación de la lente, es decir el tamaño de la imagen dividido por el tamaño del objeto. Para una cámara CCD el tamaño del chip es típicamente cerca de 10 mm, y para estudios de una región de un flujo es de una dimensión de 50 mm, uno obtiene una ampliación de 0.2. Para un número de abertura  $f^* = 8$  y una longitud de onda  $\lambda = 532 \text{ nm}$  (2do armónico del láser YAG), uno obtiene  $d_s = 12.5 \mu\text{m}$ . Estas partículas más pequeño son cerca del tamaño de  $50 \mu\text{m}$ , el diámetro de la imagen será determinado por el  $d_s$ , y la única manera de cambiar el diámetro de la imagen para una ampliación dada es cambiar el número de la abertura.

Para la buena exactitud de la densidad de imagen de la partícula ( $N_i$ ), se define como el número de las imágenes de la partícula por área de interrogación, debe ser alto. Según lo demostrado la exactitud aumenta con el aumento del  $N_i$ , pero uno debe evitar tal alta densidad que las imágenes de la partícula formen un patrón continuamente traslapado, esto aumenta el error del rms. Las altas densidades sembradoras con las características del flujo pueden afectar el desplazamiento de las partículas, llamado acoplador de dos vías. Para una fracción del volumen de la partícula debajo de  $10^{-6}$  el acoplador de dos vías puede ser

descuidado totalmente, [29]. Para diez partículas esféricas con un diámetro de  $10 \mu\text{m}$  en un volumen de la interrogación de  $1 \text{ mm}^3$ , la fracción del volumen de la partícula es  $5 \cdot 10^{-6}$ . Así los efectos de dos vías del acoplador pudieron ser de importancia en medidas de PIV.

### 2.2.1. Visualización de imágenes de PIV para un seguimiento del sembrado de partículas

El grabado de las imágenes para el trazado del movimiento de las partículas es dado en un sentido visual claro en la estructura del flujo. En flujos de aire el sembrado de las partículas es comúnmente utilizar gotas de aceite en rangos de  $1 \mu\text{m}$  a  $5 \mu\text{m}$ . Para aplicaciones en el agua, el sembrado comúnmente utilizado son con poliestireno, poliamida o esferas de cristal huecas de rangos de  $5 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ . Cualquier partícula que siga el flujo satisfactoriamente y disperse bastante luz será capturará por la cámara CCD. El número de partículas en el flujo es de una cierta importancia en la obtención de una buena señal de pico en la correlación cruzada. En general, 10 a 25 imágenes de la partícula se deben considerar en cada área de la interrogación.



*Figura 2.2. Imágenes de partículas de doble-exposición.*

Cuando el tamaño de la área de interrogación, la amplificación de la imagen y el grosor del abanico de luz son conocidos, podemos definir el volumen de medida del área muestreo

### 2.2.2. Resolución espacial y rango dinámico.

Fijando una medida de PIV, la longitud lateral del área de interrogación,  $D_{IA}$ , y la ampliación de la imagen,  $s$ 's son igualadas con el tamaño de las estructuras del flujo que se resolverán. Una forma de expresar esto es tomar un gradiente de la velocidad pequeño dentro del área de la interrogación:

$$\frac{s'}{s} \cdot \frac{|V_{\max} - V_{\min}|_{IA} \cdot \Delta t}{d_{IA}} < 5\% \quad (4)$$



Una velocidad más alta en consideración de las partículas que viajan más lejos que el tamaño del área de la interrogación dentro del tiempo. El resultado es una correlación perdida entre los dos marcos de la imagen y así pérdidas de información de la velocidad. En general:

$$\frac{s' - V \cdot \Delta t}{d_{IA}} < 25\% \quad (5)$$

La vorticidad es un término meteorológico y también usado en mecánica de fluidos que sirve para cuantificar la rotación de un fluido. Para ejemplificar podemos suponer un río en el que cada partícula se mueve con una velocidad fija en una sola dirección (flujo laminar). En este caso la vorticidad del fluido es nula. Una manera simple de observar la vorticidad es imaginar una pequeña aspa o molinillo que es puesta en la corriente. Dado que la velocidad en el fluido es constante, un aspa puesta en cualquier parte del río del ejemplo no girará, lo que indica que la vorticidad es cero. Ahora podemos imaginar que cualquier cambio en la velocidad en la dirección perpendicular al flujo del río (cizalle) hará girar el aspa, lo cual es indicio de vorticidad. La figura siguiente es un ejemplo de la derivada de la vorticidad ( $\omega$ ) y los mapas de vectores

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

matemáticamente la vorticidad en la rotación de los vectores de velocidad



Figura 2.3 vorticidad y mapas de vectores

### 2.3. Desarrollo

A continuación una descripción detallada del algoritmo de PIV. la figura nos muestra los pasos que son llevados a cabo para obtener los vectores de velocidad en un fluido.



*Figura 2.4. pasos del piv*

Primero se describen las áreas de interrogación se definen en lo referente al límite de la imagen. Entonces se computa la correlación cruzada, seguido por una descripción de la interpolación gaussiana sub-píxel. El post-procesamiento del campo de la dislocación, incluyendo la prueba mediana local, y finalmente el algoritmo de las ventanas locales del cambio de posición de las partículas.

#### 2.3.1. Definición de las áreas de interrogación.

El flujo es iluminado por medio de un abanico de luz. Las imágenes son capturadas por medio de una cámara CCD y separadas una imagen de otra cierto tiempo. Las imágenes son divididas en pequeñas subdivisiones llamadas áreas de interrogación (IA). A las áreas de interrogación de cada imagen se les aplica la correlación cruzada píxel por píxel una de otra.

El espaciamiento de la area del vector  $h_{vec}$  se da en los términos del tamaño de la área de interrogación  $D_i$  y el porcentaje de traslapo  $O$ .

$$h_{vec} = D_i (1 - O \cdot 100) \quad (7)$$

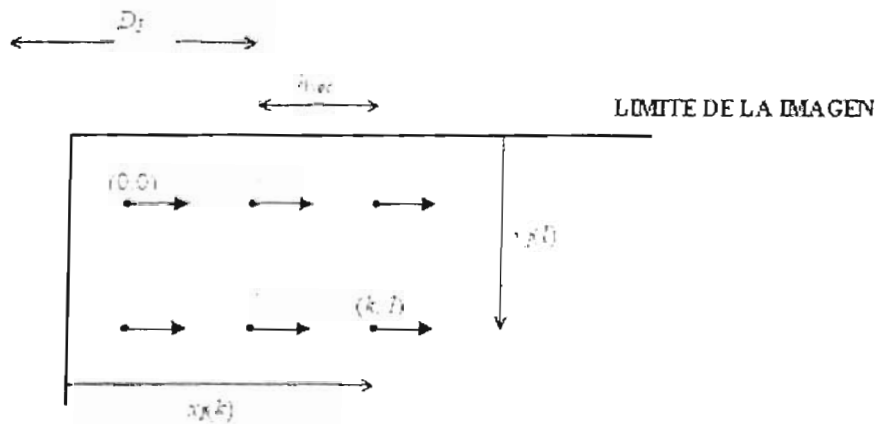
Para aumentar la resolución y para hacer un uso más eficaz de los datos, es común tener un traslapo del 50 %. Puesto que los vectores vecinos entonces utilizarán en parte los mismos datos, ellos no son completamente independientes.

Al hacer traslapeo finito, se harán vectores falsos más fáciles de identificar. Un vector falso ocurre cuando el pico más alto de la correlación no representa la dislocación verdadera de las partículas. Esto puede suceder en particular si la densidad de imagen de la partícula  $N_1$  es baja. La localización del centro de las áreas de interrogación, y por lo tanto de las localizaciones del vector, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$x_l(k) = (k + 0.5) * h_{vec} \quad (8)$$

$$y_l(l) = (l + 0.5) * h_{vec} \quad (9)$$

Donde  $x_l$  y  $y_l$  son las distancias de la izquierda y límite superior de la imagen respectivamente, vea la Figura 2.5.



*Figura 2.5. localizaciones del vector en el centro de las áreas de interrogación para un caso con  $O = 50\%$ , es decir  $h_{vec} = 0.5 * D_I$ . El área de interrogación para el vector (0,0), que baja en la parte de fuera de la imagen, se indica.*

Los índices del vector (k, l) comienzan en (0, 0) en la esquina superior izquierda de la imagen. Para un traslapeo distinto a cero, las áreas de la interrogación más cercanas al límite de la imagen bajarán en parte fuera de la imagen. Esas piezas se asignan la intensidad cero. Para reducir la discontinuidad que aparece en el límite de esta operación, la menor intensidad se resta de cada imagen antes de la fragmentación en áreas de la interrogación, de modo que la menor intensidad se convierta en cero.

### 2.3.2. Aplicación de la correlación a las áreas de interrogación.

La correlación cruzada discreta de dos áreas de interrogación  $IA_1(i, j)$  e  $IA_2(i, j)$  es definida por

$$C(r, s) = \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{j=0}^{m_1-1} IA_1(i, j) IA_2(i+r, j+s) \quad (10)$$

Donde

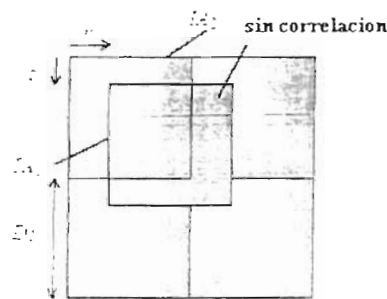
$$r, s = D_1/2, \dots, D_1/2 - 1. \quad (11)$$

Usando el teorema Wiener-Kinchin, éste puede ser computado con las transformadas de Fourier como,[9]:

$$C(r, s) = \text{Re} \left[ \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT}^* (IA_1) \cdot \text{FFT} (IA_2) \right\} \right] \quad (12)$$

Donde \* denota la conjugación compleja. La ventaja de usar la ecuación (12) en vez de la ec. (10) es que el cómputo con FFTs es más rápido que el cómputo directo, pero también requiere el tamaño de las áreas de interrogación  $D_1 = 2^n$ , donde n es un número entero obteniendo así  $D_1 = 8, 16, 32, 64$  o  $128$ . Este problema se podría superar con el cero-acolchado, es decir el área de interrogación se amplía con ceros en los límites hasta que el tamaño se conforma a  $2^n$ . El cero-acolchado aumentará la resolución en el plano de la correlación, pero es más costoso. La discontinuidad del borde introducida con el cero-acolchado contaminará los espectros de los datos con ruido de alta frecuencia. Este problema podría sin embargo ser reducido con preprocesado de las imágenes restando el mínimo nivel de ruido antes de la interrogación. Según lo demostrado este preprocesamiento también reducirá el error del rms, y con ello la contribución del ruido en la función de la correlación cruzada  $C(r, s)$  es reducida[9].

La ecuación (10) requiere obviamente que  $IA_2$  sea el doble de tamaño que  $IA_1$ . Ésto no es ningún problema si se utiliza el método de computación directa. Es algo de ventaja, puesto que el error bias descrito a continuación se evita. El método de FFT descrito por Ec. (12) requiere que  $IA_1$  e  $IA_2$  sean del mismo tamaño. Lo que sucede realmente es que la correlación computada muestra una repetición periódica de  $IA_2$ . Esto da lugar al error bias, que puede ser explicado como sigue: Para la dislocación cero ( $r = s = 0$ ), la correlación se computa con no-repetido, o "correcta", los datos solamente. Para las dislocaciones diferentes a cero, una pérdida de correlación es obtenida debido a la contribución sin correlación de los datos periódicamente repetidos, considera figura 2.6.



*Figura 2.6. En el plano se indica la pérdida de la correlacion (área marcada), debido a la repetición periódica de áreas de interrogación  $IA_2$  las cuales son empleadas por el algoritmo de FFT.*

La pérdida de aumentos de la correlación con el aumento de dislocaciones. El efecto neto es un bias de los datos de la correlación hacia la dislocación cero. La pérdida de correlación se puede cuantificar en los términos de un plano en el interior " la perdida de correlación " donde la función  $F_1$ , se define por :

$$F_1(r,s) = \iint W_1(x,y)W_2(x+r,y+s) dx dy / \iint W_1(x,y)W_2(x,y) dx dy \quad (13)$$

Donde  $W_1$  y  $W_2$  son funciones de la ventana del mismo tamaño que las áreas de interrogación  $IA_1$  y  $IA_2$ . Para igualdad en el tamaño de las áreas de interrogación uno debe tomar en cuenta lo siguiente:

$$W_1(x,y) = W_2(x,y) = \begin{cases} 1, & |x|, |y| < D_I / 2 \\ 0, & \end{cases} \quad (14)$$

para obtener

$$F_1(r,s) = \left(1 - \frac{|r|}{D_I}\right) \left(1 - \frac{|s|}{D_I}\right) \quad (15)$$

Así,  $F_1$  se puede interpretar como el cociente del área correlacionada  $(D_I - |r|)(D_I - |s|)$  para el área total de interrogación  $D_I^2$ . La variación del  $F_1$  en una dimensión. Al compensar la correlación en polarización negativa uno divide simplemente  $C$  de  $F_1$ , es decir.

$$C_{\text{IMPACTO}}(r,s) \equiv C^*(r,s) = C(r,s) / F_1(r,s) \quad (16)$$

Observe que esta corrección da solamente una correlación cruzada en el medio. Para una correlación específica no puede tener ningún efecto, dependiendo de la localización de las imágenes de la partícula en las áreas de interrogación. Semejantemente, para la pérdida de correlación fuera del plano, uno define la función  $F_D$  según

$$F_D(w\Delta t) = \int I_1(z)I_1(z+w\Delta t) dz / \int I_1^2(z) dz \quad (17)$$

Donde  $w\Delta t$  es el desplazamiento fuera del plano y  $I_1(z)$  es el perfil de intensidad del abanico de luz, el cual se asume como la igualdad de los 2 pulsos de luz. Para un perfil de intensidad gaussiana esta dada como:

$$I(z) = I_0 \exp\{-8z^2 / d^2\} \quad (18)$$

la cual da como resultado

$$\begin{aligned}
 F_O(w\Delta t) &= \int \exp\left(-8\left(z^2 + (z + w\Delta t)^2\right) / d_i^2\right) dz / \int \exp(-16z^2 / d_i^2) dz \\
 &= \int \exp\left(-16\left((z + w\Delta t / 2)^2 + (w\Delta t)^2 / 4\right) / d_i^2\right) dz / \int \exp(-16z^2 / d_i^2) dz = \\
 &= \exp\left(-4(w\Delta t)^2 / d_i^2\right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

desde

$$\int \exp\left(-16(z + w\Delta t / 2)^2 / d_i^2\right) dz = \int \exp(-16z^2 / d_i^2) dz$$

Cuando integramos el abanico de luz. La variación de  $F_O$  con la dislocación fuera del plano. Usando el  $F_i$  y  $F_O$ , uno puede definir una densidad de imagen eficaz de la partícula por  $N_i F_i F_O$ , que considera la pérdida dentro del plano y fuera del plano de los pares de la imagen.

Cuando la correlación se computa con una repetición periódica de  $IA_2$ , las dislocaciones negativas son obtenidas para  $r$  y  $s$  mientras más grande  $D_i/2$ , por una substracción de  $D_i$ . Así, los cuadrantes en el plano de la correlación tienen que ser mezclados para conseguir una representación continua.

### 2.3.3. Localización del pico y la interpolación de los subpíxeles.

Una vez determinada la función de correlación según la ec.(12). Se localiza el pico más alto ( $r_0, s_0$ ) del plano de la correlación. Esto da una valoración de la dislocación media más probable de la partícula dentro del área de interrogación.

Para conseguir una valoración más exacta del sub-píxel de la localización máxima del pico, uno interpola los valores de la correlación más cercanos al pico. Si las imágenes de la partícula tienen una forma gaussiana, después el pico de la correlación es también gaussiano, con un diámetro levemente más grande que el diámetro de la imagen de la partícula. Considere un ejemplo de una dimensión con una imagen de la partícula centrada en  $x = 0$ , con un diámetro de  $d_i$ , y una intensidad máxima ( $I_{pp}$ ),

$$I_r(x) = I_{pp} \exp(-8x^2 / d_i^2) \tag{20}$$

la auto correlación de esta función esta dada por

$$R(s) = \int I_r(x) I_r(x+s) dx = \int I_{pp}^2 \exp\left(-8\left(x^2 + (x+s)^2\right) / d_i^2\right) dx =$$

$$= \int I_{pp}^2 \exp\left(-16\left((x+s/2)^2 + s^2/4\right)/d_c^2\right) dx = \quad (21)$$

$$= I_{pp}^2 \exp(-4s^2/d_c^2) \int \exp\left(-16(x+s/2)^2/d_c^2\right) dx =$$

$$= \frac{\sqrt{\pi}}{4} d_c I_{pp}^2 \exp\left(-8s^2/(\sqrt{2}d_c)^2\right)$$

las siguiente identidad fue usada[30],

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (22)$$

Uno obtiene así el resultado que la auto correlación es una función gaussiana de diámetro  $\sqrt{2}d_c$ . Para una correlación discreta, esto no pudo ser exactamente verdad, especialmente si las imágenes de la partícula no están bien resueltas. Para las imágenes de la partícula con un diámetro más pequeño cerca de 4 pixeles, el método recomendado para la interpolación del sub-píxel debe ser una función gaussiana unidimensional al pico de la correlación en las direcciones de x y y, respectivamente. En la dirección x, esta función tiene la forma

$$f(r) = C_p \exp\left(-8(r-r_p)^2/d_c^2\right) \quad (23)$$

Es decir, hay tres parámetros desconocidos: La altura máxima interpolada del pico  $C_p$ , el diámetro del pico  $d_c$ , y la localización interpolada del pico del sub-píxel,  $r_p$  que es la variable deseada. La ecuación (23) abarca exactamente estos tres puntos sobre el pico en el plano de la correlación.

Es natural elegir la posición del pico  $r_0$ , con la correlación imparcial  $C^*_0 = C^*(r_0, s_0)$ , y los dos puntos más cercanos de cualquier lado, es decir  $r_{-1} = r_0 - 1$  y  $r_{+1} = r_0 + 1$ , con las correlaciones  $C^*_{-1}$  y  $C^*_{+1}$ , respectivamente. Esto da un sistema de tres ecuaciones

$$\begin{cases} C^*_0 = C_p \exp\left(-8(r_0 - r_p)^2/d_c^2\right) \\ C^*_{-1} = C_p \exp\left(-8(r_{-1} - r_p)^2/d_c^2\right) \\ C^*_{+1} = C_p \exp\left(-8(r_{+1} - r_p)^2/d_c^2\right) \end{cases} \quad (24)$$

Para eliminar  $C_p$  y  $d_c$ , uno primero divide las ecuaciones en parejas y después tomamos el logaritmo. el resultado final es

$$r_p = r_o - 0.5 \frac{\ln(C_0^* / C_{+1}^*) + \ln(C_{-1}^* / C_0^*)}{\ln(C_0^* / C_{+1}^*) - \ln(C_{-1}^* / C_0^*)} \quad (25)$$

Una fórmula similar se obtiene para la posición del pico del sub-píxel en la dirección  $y$ ,  $S_p$ . En el algoritmo la localización del sub-píxel de los cuatro picos más altos de la correlación se determina y se almacena para cada área de interrogación. Si la prueba mediana local, falla para el vector de la dislocación que corresponde al pico más alto de la correlación, el pico más alto siguiente se prueba, y así sucesivamente al cuarto pico más alto. La búsqueda máxima en el plano de la correlación se puede también confinar a cierta gama de dislocaciones en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente, basados en un conocimiento anterior de las dislocaciones reales en el flujo.

La restricción de la gama de dislocaciones es ventajosa, pues reduce la cantidad de vectores falsos perceptiblemente. La restricción es demasiada sin embargo dará resultados totalmente erróneos. Según la prueba de precisión presentada a continuación, la interpolación gaussiana del sub-píxel es óptima para un diámetro de la imagen de la partícula entre aproximadamente 2 y 4 píxeles. Esto no es relevante cuando uno considera que la interpolación está basada en tres puntos consecutivos en el plano de la correlación. Por ejemplo, un diámetro de la imagen de la partícula  $d_i = 2$  píxeles, daría un diámetro del pico de la correlación igual a  $d_c \approx 1.4 d_i = 2.8$ . Para un pico de la correlación centrado en el  $r_0$ , es decir con  $r_p = r_0$  (ver Ec. 25), éste corresponde a una intensidad relativa  $C_{+1}/C_0 = C_{-1}/C_0 = \exp(-8 / 2.8^2) = 0.36$ .

Semejantemente  $d_i = 4$  píxeles da una intensidad relativa aproximada de 0.77. Así, para las imágenes de la partícula más pequeñas de 2 píxeles que la correlación, esta valora los siguientes valores del pico lo cuales serán relativamente débiles, y pueden ser eliminados con el ruido. Para las imágenes de la partícula mayor de 4 píxeles, por otra parte, la diferencia relativa entre los valores usados de la correlación son pequeños, que da una mayor sensibilidad para divulgar, y por lo tanto menos exactitud. En el último caso sería mejor tomar la guarnición del pico (peak-fitting) en más valores de la correlación, usando un ajuste de mínimos cuadrados, pero esto también sería más costoso. Alternativamente, uno podría utilizar una valoración del centro de masa de la dislocación del sub-píxel, que es apropiada para los picos bien-resueltos de la correlación. [9]. Para los picos estrechos de la correlación, calculo de centro de masa sufre lo llamado fijación del pico, es decir un bias hacia las dislocaciones

La fijación del pico también ocurre para un pico gaussiano, si el pico de la correlación es muy estrecho, como se puede considerar en la ec (25): Cuando  $C_{-1}^*$  y  $C_{+1}^*$  acerca al nivel del ruido, serán aproximadamente iguales, y el numerador en (25) se aproximara a cero, y por lo tanto  $r_p = r_0$ . Esto es que ninguna interpolación del sub-píxel trabajará para los picos muy estrechos, puesto que no hay realmente nada interpolar en medio.



#### 2.3.4. Post-procesamiento del campo de desplazamiento.

Si todos los pasos de la adquisición y del proceso de la imagen se optimizan allí es una probabilidad finita que el pico más alto de la correlación no corresponde a la dislocación verdadera. Uno entonces obtiene un vector falso. Las razones de la ocurrencia de vectores falsos pueden ser por ejemplo una densidad de imagen localmente baja de la partícula, o ruido que perturbe de reflexiones

El método recomendado para detectar vectores falsos es utilizar una prueba mediana local [31], que significa que cada vector de la dislocación es comparado con dislocación mediana en una region local sobre el vector. Si se desvía el vector de la dislocación más que una cantidad aceptada del punto medio local se considera un falso vector. Otros métodos para detectar vectores falsos incluyen medio global, medio local y pruebas de la detectabilidad. La prueba global es similar a confinar la gama de dislocaciones aceptables en el plano de la correlación. Da solamente una clase hacia fuera de los vectores totalmente inverosímiles. La prueba local es similar a la prueba mediana local, pero puesto que el valor medio local es más sensible a los vectores falsos vecinos que el punto medio local, es menos robusta. La detectabilidad se define como el cociente del pico más alto al pico más alto siguiente del plano de la correlación.

La prueba mediana local según lo utilizado trabaja como sigue: La dislocación mediana local ( $r_{med}$ ,  $s_{med}$ ), es decir el valor medio en una lista, se computa para cada vector para las direcciones en "x" y "y" por separado. El punto medio se basa en el vector sí mismo y los ocho vecinos más cercanos, es decir un valor local.

Si un vecino cercano es no existente, en el limite de la imagen o si el vector ha sido desechado por una prueba mediana anterior. Si la componente "x" o "y" del vector probado se desvía más que una cantidad prescrita del valor mediano, es decir si

$$\left| r_p - r_{med} \right| > \varepsilon, \quad \text{o} \quad \left| s_p - s_{med} \right| > \varepsilon \quad (26)$$

el vector no es aceptado, y la dislocación que corresponde al pico más alto siguiente de la correlación en lugar de otro se comprueba. Esto continúa hasta que se encuentra un vector válido, o si nadie de las cuatro opciones almacenadas del vector pasan la prueba, el vector está marcado como "lisiado". La desviación permitida  $\varepsilon$  (en píxeles) del punto medio se fija a un valor antes del cómputo, y es igual para el campo entero del vector. Una desviación permitida de los píxeles del  $\pm 2$  se ha encontrado alrededor para ser apropiada para muchos casos del flujo. Si el flujo se resuelve bien, un valor más bajo podría ser utilizado, se sugiere que para tener un valor localmente se adapta a [9], según.

$$\varepsilon = C_1 + C_2 \sigma(k, l) \quad (27)$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes y  $\sigma$  es un valor local del rms de la dislocación, basado en los 8 vecinos más cercanos. Obviamente, la incertidumbre en el valor rms es muy alta.

debido a la cantidad pequeña de datos, pero cuando los gradientes son muy grandes están presentes en el flujo, causado por los choques de la compresión, Raffel encontró la adaptación local de  $\epsilon$  para ser más eficaz.

Un funcionamiento mejorado de la prueba mediana local ha sido encontrado repitiendo la prueba algunas veces (típicamente tres). Puesto que los vectores falsos se quitan después de cada paso de la prueba, los valores medianos del paso siguiente serán más confiables. Para aumentar la confiabilidad, los vectores lisiados son reemplazados por un medio de los vecinos más cercanos después de cada paso de la prueba mediana, es decir "hoyos" del campo del vector son rellenados. Usando un filtro de kernel gaussiano, para los lugares adyacentes al límite o adyacente a otros vectores lisiados, el kernel se modifica para excluir los vectores no-existentes.

En los casos donde la parte límite de la imagen coincide con una pared sólida, hay una opción para utilizar el conocimiento de la velocidad cero en la pared en el algoritmo del post-procesamiento. Esto es hecho extendiendo la matriz de la dislocación con una fila o una columna apropiada de ceros. Esta estrategia mejora la confiabilidad del post-procesamiento del vector cerca de la pared.

En el proceso subsecuente de los datos de la dislocación es a menudo impráctico tener "hoyos" de vectores lisiados. Puesto que el número de vectores lisiados en general es muy bajo, puede ser justificado para llenar los agujeros usando una operación de filtración con un kernel .

$$\frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

En algunos casos, cuando la vorticidad de los campos debe ser computada, es deseable reducir el ruido de alta frecuencia en los datos de la dislocación para conseguir un campo más liso del vector. Una manera de obtener esto es aplicar la convolucion del campo del vector  $v(x,y)$  con una función gaussiana normalizada  $G(x, y)$  de una deseada de la anchura  $d_v$  (en las unidades del  $h_{vec}$  del espaciamiento del area del vector), es decir

$$v_{iso}(x, y) = \iint G(x-r, y-s) v(r, s) dr ds \quad (29)$$

Donde

$$G(x, y) = \frac{\exp(-8(x^2 + y^2)/d_v^2)}{\iint \exp(-8(x^2 + y^2)/d_v^2) dx dy} \quad (30)$$

Para los datos discretos, la integral es substituida por una adición, y el kernel gaussiano es representado por una matriz de los factores de peso. Si solamente consideran a los vecinos más cercanos de un vector en la operación que alisa una matriz 3x3 es apropiada, según la siguiente ecuación:

$$G = \frac{1}{(2+a)^2} \begin{bmatrix} 1 & a & 1 \\ a & a^2 & a \\ 1 & a & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

donde el factor

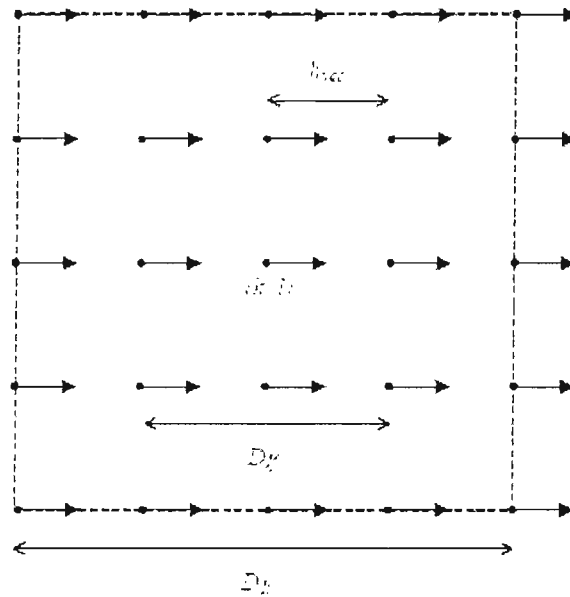
$$a = \exp(8/d_v^2) \quad (32)$$

Determina la fuerza del filtro que alisa. Un valor grande de  $a$ , es decir un  $d_v$  pequeño del diámetro del kernel, da una alisada ligera, mientras que un valor pequeño ( $\geq 1$ ) da una alisada más fuerte. Por ejemplo, con un diámetro  $d_v = 2.4$  espaciamentos del area del vector, se obtiene una  $a = 4$ , es decir una alisada bastante ligera.

### 2.3.5. Ventanas locales de cambio de posición de las partículas.

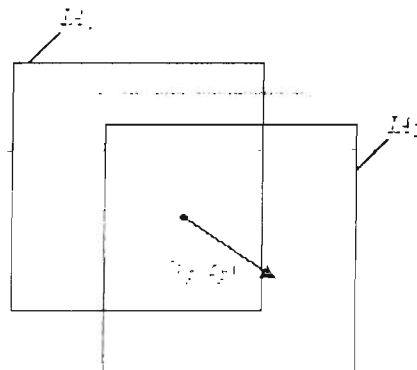
La correlación cruzada utiliza las áreas de interrogación una y dos,  $IA_1$  y  $IA_2$ , tienen la misma localización en las imágenes respectivas. Cambiando de posición  $IA_1$  y  $IA_2$ , así que ellas son compensadas por una distancia igual a la dislocación local, la pérdida dentro del plano de la correlación casi será eliminada, dando así una fuerza creciente del pico de la correlación. El cambio de posición local de la ventana se ha demostrado para reducir el ruido de la toma de muestras (el error del rms) [7][9][32].

En el algoritmo de cambio posición de la ventana se determina de la manera siguiente: El cómputo comienza a usar un tamaño inicial de la área de interrogación  $D_i$ , que sea más grande que el tamaño final  $D_f$ , por un factor de 2 o 4 o posiblemente más alto. En el paso inicial del cambio de posición de la ventana es tener un valor de cero o constante para la imagen entera. El centro de las áreas de interrogación es igual para todos los pasos del algoritmo, el  $h_{cc}$  (el espaciamento del area del vector) es constante según lo determinado por el tamaño del área final y el traslapo según la Ec.(7). Esto significa que el traslapo es mayor para el paso inicial (o los pasos), vea la Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Definición del área inicial de la interrogación con el tamaño  $D_{ii} = 2 \cdot D_{if}$  para el vector  $(k, l)$ . El traslape final es 50 %, que implica un traslape inicial de 75 %, para obtener el mismo  $h_{vec}$  del espaciamiento del área del vector. El área final de la interrogación, que se demuestra punteada, está en una posición recorrida.

El campo de la dislocación del paso inicial se post-procesa usando una prueba mediana local y un completo llenado de todos los vectores lisiados. En el paso siguiente, se parte en dos el tamaño del área de interrogación, y las ventanas de la interrogación se cambian de puesto simétricamente sobre el centro según la dislocación estimada del paso anterior. Si esta dislocación es la dirección  $x$ , después se cambia de posición a  $IA_1 - \text{round}(0.5 \cdot \text{round}(r_p))$  relativamente para un cambio de posición, y  $IA_2$  es el  $\text{round}(r_p)$  relativo a  $IA_1$ . Una cambio similar se hace en la dirección  $y$ , considera Figura 2.8.



**Figura 2.8.** El cambio de posición simétrico de  $IA_1$  y de  $IA_2$ , concerniente a la posición punteada.  $(r_p, S_p)$  es la dislocación estimada de la partícula.

Esas partes del área de interrogación que caigan fuera del límite de la imagen se les asignan la intensidad cero. La ventaja de usar una ventana de cambio simétrica es la estimación de la velocidad es más cercana a una diferencia central que a una diferencia delantera o posterior, y es así más exacta. Cuando el campo de la dislocación se ha determinado para las áreas localmente cambiadas de puesto de la interrogación, los cambios aplicados se agregan para obtener las dislocaciones verdaderas de la partícula. Si el tamaño final del área de interrogación no se ha alcanzado, el campo de la dislocación se post-procesa y se utiliza para cambiar de puesto las ventanas de interrogación del paso siguiente, donde se parte en dos el tamaño del área. Se continúa esto hasta que se alcanza el tamaño del área final, donde la interrogación cambiada de puesto se repite dos veces hasta que se obtiene el campo final de la dislocación.

La ventaja de usar un paso inicial con un tamaño de área más grande de la interrogación es que las dislocaciones estimadas son mucho más confiables para el tamaño de área más grande, debido a la densidad de imagen más alta de la partícula. Otra ventaja es que dislocaciones más grandes de la partícula pueden ser utilizadas, que implica una gama dinámica creciente de las medidas. La dislocación máxima que se puede medir para las áreas fijas de la interrogación usando la correlación basada en FFT es  $D_i/2$  (para una dislocación negativa, porque una dislocación positiva el máximo es  $D_i/2 - 1$ , vea Ec. (10)). Dislocaciones más grandes serán reafirmadas, es decir doblado nuevamente dentro del plano de la correlación. Más exacto, si la dislocación verdadera de la partícula en la dirección  $x$   $r_p$  es mayor que  $D_i/2 - 1$  (pero menos que  $D_i$ ), reafirmar el pico de la correlación el cual aparecerá en  $r_p - D_i$ . Igualmente en la dirección  $y$ . Aunque el límite superior teórico para la dislocación de la partícula es  $D_i/2$ , el límite práctico para las medidas confiables es  $D_i/4$ , [33]. Para el algoritmo, la dislocación máxima de la partícula es  $D_i/4$ , que en principio es independiente del tamaño de área final. Sin embargo, para las dislocaciones más grandes, es decir con una separación de un largo tiempo, la estimación local de la velocidad  $(r_p, s_p) / \Delta t$  será menos exacta.

## 2.4. Diferentes tipos de PIV

La velocimetría de partículas basado en imágenes (PIV) es una técnica de medida ópticamente robusta, puesto que su introducción en los años 80's ha recibido la atención y la utilización extensa. Es una técnica cuantitativa robusta que confía en el principio básico de distancia entre tiempo igual a velocidad, típicamente a lo largo de un plano de dos dimensiones dentro de un flujo particular. PIV se diferencia de la técnica de anemometría doppler láser (LDA), en el PIV la velocidad simultánea se determina en muchos puntos en el flujo, mientras que con LDA solamente en un punto en el flujo.

Esta ventaja de PIV sobre LDA hace ideal para la puesta en práctica medidora del flujo, puesto que en tales usos la velocidad de atravesar un conducto que tiene ciertas características es de interés primario. Uno quisiera idealmente obtener el valor de la velocidad integrando la componente corriente de la velocidad a lo largo de la sección representativa del conducto, y la información espacial simultánea de la velocidad generada por el PIV.

### 2.4.1. LDA

La técnica de Doppler se ha modificado para ser utilizada para detectar no solamente una gama de los factores fluidos, también es utilizada en varias escalas de la radiación electromagnética. Uno de ellos utilizado más con frecuencia es el anemómetro Doppler láser (LDA). LDA utiliza un solo láser partido en dos haces, que se centran en una región. La luz reflejada detrás de partículas se mide para determinar la información sobre el área[34-36].

Características

- No intrusiva
- No requiere calibración
- La gama de la velocidad de cero a supersónica,
- Medida de dos o tres componentes de la velocidad simultáneamente
- Distancia de muestreo de centímetros a los metros
- Puede ser de alta resolución espacial y temporal
- Medidas instantáneas

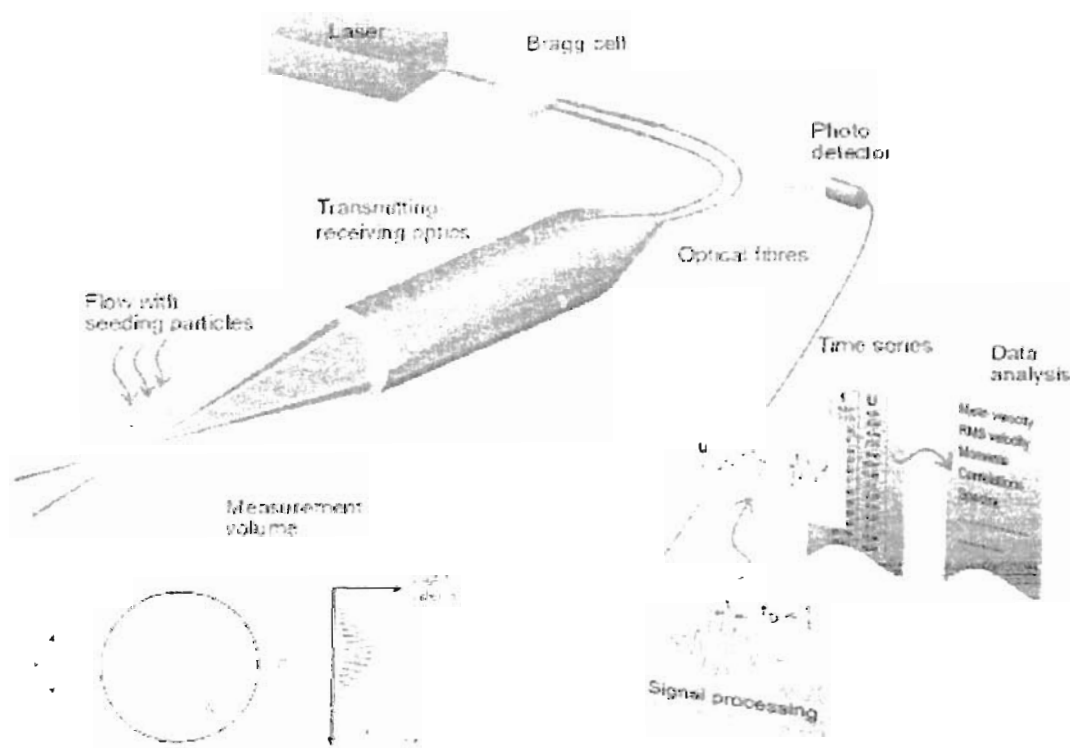


Figura 2.9. Configuración básica para un sistema LDA



### 2.4.3. P-LIF

Los láseres también se han utilizado en una técnica de la medida conocida como Fluorescencia Plana Inducida por Láser (P-LIF). PLIF reduce al rayo láser fino, a un medio líquido e introduciéndolo a él. La técnica permite la medida de los campos de la concentración y de la temperatura. Como otros datos de la velocidad, factores tales como flujo, la difusión de la turbulencia, entre otros datos[39-41].

#### Características

- Tecnología No-intrusiva
- Medidas cuantitativas y exactas de los campos de la concentración o de la temperatura
- Conjuntamente con medidas de la velocidad, se hacen experimentos

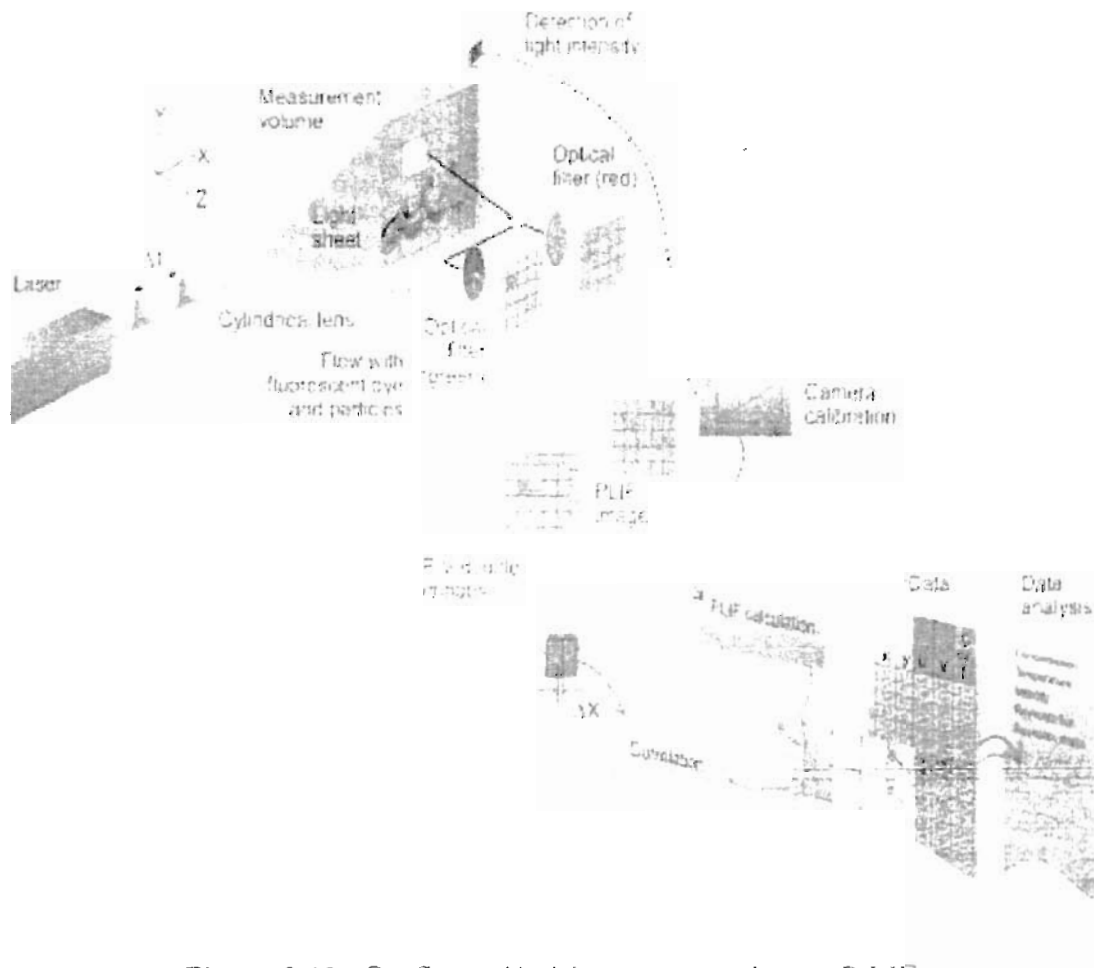


Figura 2.12. Configuración básica para un sistema P-LIF



#### 2.4.4. HPIV

El HPIV es una técnica conocida como velocimetría de partículas basados en imagen holográfica. Desarrollada en 1994, la cual usa 2 láseres en una configuración semi-estándar de imágenes holográficas de los patrones de interferencia del flujo de fluidos dinámicos sobre una placa holográfica[42-43]. El resultado es una representación en 3D del líquido. El PIV holográfico no es usado más extensamente, Primero, es costoso, segundo requiere una habilidad considerable, y el tercero uno no puede grabar realmente bastantes hologramas para dar una estadística estable de la turbulencia. Esta situación cambiaría dramáticamente si electrónicamente los medios ópticos legibles y escribibles de la grabación fueran disponibles con la resolución y la sensibilidad adecuada. Las cámaras fotográficas actuales de Megapíxeles son ya adecuadas a esta tarea si uno está dispuesto a confinar la atención a un volumen muy pequeño. Esta holografía en línea microscópica ha demostrado ser una promesa considerable en posteriores estudios de investigación.

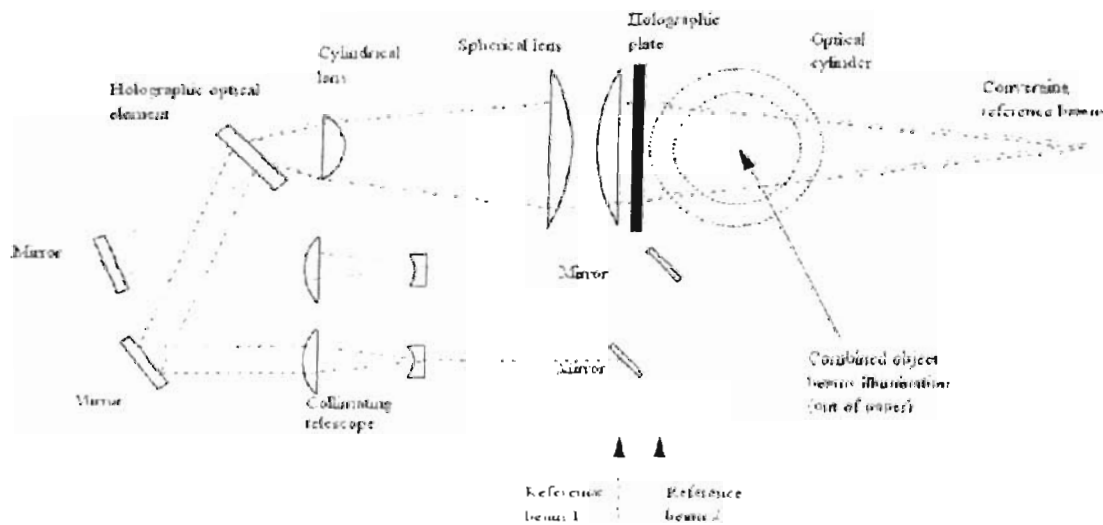


Figura 2.13. Configuración típica de una holo-cámara para un HPIV

Los "PIV de super resolución" refiere a los medios de la interrogación que mejoran la resolución espacial más allá del punto básico de la interrogación de la correlación. Según lo propuesto por R. D. Keane, R. J. Adrian y Y. Zhang, (1995) los vectores de un análisis estándar de la correlación fueron utilizados para permitir que la imagen confiable que se apareaba en un esquema de seguimiento de partícula, de tal modo obteniendo cerca de 5-7 vectores individuales de la partícula para cada punto de la interrogación. Muchas mejoras

se han propuesto a este método, todos con la meta de ampliar el acercamiento de seguimiento de la partícula en el reino de la alta densidad de imagen. Los grupos de investigación del profesor F. Yamamoto y T. Kobayashi y K. Okamoto han avanzado el proceso de la interrogación considerablemente. Una segunda línea del ataque es el método de correlación jerárquico en el cual los resultados de la correlación de puntos grandes de la interrogación se utilizan para dirigir el análisis de la correlación de puntos más pequeños, hasta puntos muy pequeños son utilizados. Otro acercamiento, basado en la correlación, es rotar y filtrar la segunda ventana y realizar la correlación usando seis parámetros: dos traslaciones, dos rotaciones y dos tensiones.

Muchos progresos también ocurrieron en el lado óptico del sistema de PIV. La proyección estereográfica de imagen fue utilizada para hacer medidas para el seguimiento de partículas en volúmenes. La experiencia del consenso era que la proyección de partículas del espacio 3-D sobre los planos de imagen de la cámara en 2D creó los traslapes de las imágenes de las partículas que limitaron el número de las partículas que podrían ser reflejadas a cerca de 3.000. Las imágenes traslapadas se podían aparear desigualmente.

La proyección de imagen estereoscópica de partículas en abanicos de luz no encuentra esta limitación porque el volumen proyectado de partículas es mucho más pequeño. En este acercamiento uno puede utilizar el trazo del rayo para determinar la relación entre las localizaciones y la localización de la partícula, o la calibración generalizada con un blanco en el flujo[12]. El estereográfico PIV soluciona el problema del error de la perspectiva así como dar el tercer componente de la velocidad, y ha demostrado ser una generalización práctica de monoescopico PIV [44-47].

La adaptación del PIV a los flujos de microescala redujo el volumen típico de la medida de PIV a partir de un milímetro a 10 micrones y a menos. Incluso esto proporcionó una herramienta nueva útil para el estudio de microfluidos.

## CAPITULO III DPIV

### 3.1. Definición

El diagnóstico óptico del flujo se basa en la interacción, es decir, refracción, absorción o dispersión, de la luz (visible) con medios no homogéneos. En un fluido ópticamente homogéneo no hay interacción significativa de la luz incidente con el fluido, tal como refracción, por la cual la información del campo de la velocidad del flujo puede ser recuperada. En la velocimetría de partículas basados en imágenes (PIV) el movimiento fluido se hace visible por el agregado de partículas pequeñas para el trazo de líneas y de las posiciones de estas partículas en dos casos del tiempo, es decir la dislocación de la partícula, se puede deducir con la velocidad del flujo.

La base inicial para una teoría de PIV fue puesta por Adrián (1988) que describió la expectativa del valor de la función auto-correlación para una doble exposición de imágenes continuas de PIV. Esta descripción proporcionó el marco para el diseño experimental [33]. Más adelante, la teoría fue generalizada para incluir grabaciones de múltiple-exposición [48] y análisis de la correlación cruzada [5]. La teoría proporcionó una descripción adecuada para el análisis de fotografías altamente resueltas de PIV, que era el campo común del modo de operación para un tiempo considerable. Sin embargo, PIV hoy en día utiliza cámaras fotográficas digitales para la grabación directa de las imágenes de la partícula [49]. La teoría fue ampliada más a fondo por Westerweel (1993) al incluir imágenes digitales de PIV y la valoración de la dislocación en el nivel de sub-píxel [50].

El principio de la medida se describe en términos de la teoría (lineal) del sistema, en los cuales las partículas para el trazo de líneas se ven como patrón observable en el fluido; los patrones observados del trazo de líneas en dos casos subsecuentes se consideran como entrada y salida del sistema, y el campo de la velocidad se deduce del análisis de las señales de entrada y salida. El patrón del trazo de líneas entonces se relaciona con la imagen (digital) observada. La descripción estadística de las imágenes discretas de PIV se aplica posteriormente para evaluar valoración de la dislocación de la imagen de la partícula como función de resolución espacial. El desarrollo de la teoría se basa en descripciones de procesos al azar y de campos al azar dados por Priestley (1992) y Rosenfeld y Kak (1982)[51][52].

Uno de los cambios más importantes de PIV era el movimiento fotográfico a la grabación gráfica del video. Este cambio profundo influenció el renombre de PIV. Por supuesto, muchos investigadores habían estado utilizando cámaras digitales en preferencia para filmar sus experimentos. Por ejemplo, la mayoría de los investigadores en Japón utilizó el video. Pero, a mediados de los años 90's varios investigadores, C. E. Willert y M. Ghacib (1991) y J. Westerweel (tesis de Ph.D., 1993) publicaron los resultados que indicaban que la resolución digital (12vo simposio internacional sobre usos de las técnicas del láser a la mecánica de fluidos, Lisboa, julio 12-15, 2004) de cámaras fotográficas no era tan seria, y que PIV digital podría ser tan exacto como la película PIV [49][50]. La película fotográfica poseyó líneas muy altas de la resolución 100 líneas por mm para T-Max y 300 líneas por

mm para la técnica pan en 25mm por 35mm, o aún 100 x125mm. En la comparación, la resolución digital de la cámara era típicamente 500 por 500 píxeles. Sin embargo, las cámaras digitales poseyeron alta regularidad en la localización de los píxeles relativo a las localizaciones de las partículas en una película, y los métodos listos eran desarrollados para realzar la exactitud de la interrogación de imágenes digitales. Por otra parte, la resolución de las cámaras digitales creció rápidamente a 1000 x 1000 píxeles, y actualmente acercando a los 2500 por 3500 píxeles que serían esencialmente equivalente a la película de 35 milímetros.

Estaba claro que la proyección de imágenes digitales se convirtió en el estándar en un cierto punto en el futuro. Qué quizás no fue apreciada en los años 90 era el grado al cual la proyección de imagen digital podría simplificar PIV y hacerle un proceso con el cual todos estaban dispuestos a repartir. El trabajo de K. Nishino, N. Kasagi y M. Hirata (1989) era extremadamente influyente. Presentaron la mejor estadística de la turbulencia disponible de PIV en ese entonces. Alcanzaron promedios altamente estables asumiendo el control de 19.000 imágenes de video. Estos resultados eran lejanos más allá que cualquier cosa podría hacer con la película fotográfica. El número máximo de las fotografías de PIV tomadas por los investigadores era raramente excedido de 1000. Si uno deseaba estadísticas buenas, exacta de la turbulencia, era necesario utilizar PIV digital. Por lo tanto, la utilización del PIV digital fue aumentando a mediados de los 90's, y ahora él se utiliza casi exclusivamente. La posibilidad de tomar millares de imágenes de PIV hizo deseable acelerar el proceso de la interrogación y automatizar el proceso de la limpieza del vector.

El otro impacto excepcional de PIV digital vino con el advenimiento de las cámaras fotográficas de la transferencia del interline que podrían llevar a cabo dos imágenes registradas en la sucesión rápida transfiriendo la primera imagen registrada por cada píxel a un almacenaje en el chip de la cámara, y después de registrar una segunda imagen grabar. Louis Lourenco (1993) realizo cámaras fotográficas para el mercado de PIV. Estas cámaras fotográficas permitieron tres mejoras importantes. Primero, era sabido teóricamente que la correlación cruzada de imágenes por separado registradas de las primeras y segundas exposiciones era superior a la auto correlación de exposiciones dobles. En segundo lugar, las cámaras de la correlación cruzada eliminaron la necesidad de cambiar de puesto de la imagen: la dirección del flujo fue determinada automáticamente por el orden de las exposiciones. Tercero, y lo más importantemente posible, el traslape pequeño de la imagen de la dislocación fue eliminado totalmente, de modo que una gama dinámica grande fuera posible. La introducción de estas cámaras fotográficas era ciertamente uno de los progresos más importantes del campo de PIV.

Con la aparición de la tecnología de la computadora y las cámaras CCD este método se empezó a denominar DPIV (digital particle image velocimetry) y alcanzó un gran desarrollo. En 1998 el termino de velocimetría de partículas basado en imágenes digitales (DPIV) fue adquirido por la división de la mecánica de fluidos en Lund

La velocimetría de partículas basado en imágenes digitales (DPIV) es una técnica óptica de medida que proporciona medios para medir la velocidad de las partículas sembradas (~1 - 50 micras (en aire)) en el flujo del interés sobre un plano usando una cámara CCD. El área de la medida dentro del campo del flujo es definida por la posición y la dimensión física de

un abanico de luz láser. Con la iluminación de dos flashes del láser de duración corta en el área de la medida, una doble-exposición del campo del flujo se captura (a través de la cámara CCD a la tarjeta) en la computadora. Una vez que las imágenes espaciales desplazadas se almacenan en dos marcos separados, cada vector de la velocidad es extraído realizando análisis matemático de la correlación en un racimo de partículas dentro de cada región de interrogación entre los dos marcos (que eliminan el problema de la ambigüedad direccional). Se repite el proceso de interrogación en el DPIV hasta que toda la información requerida de la velocidad se extrae del expediente capturado. Debe haber bastante concentración sembradora de las imágenes de las partículas dentro del área de interrogación para reducir al mínimo cualquier error de polarización potencial que se presente de datos que caen hacia fuera[53].

DPIV es ahora utilizado por muchos como el método de opción en los datos de la velocidad que miden la validación del código en la dinámica de fluidos computacional (CFD). La información generada es lo que llamaríamos visualización del flujo cuantitativa. La técnica de DPIV (PIV estereoscópico) se puede ampliar para medir la componente de la velocidad fuera del plano con una cámara adicional, una cierta óptica que utilicen técnicas estereoscópicas de la proyección de imagen. La atracción de esta técnica está en la generación de un mapa de dos dimensiones del vector de la velocidad en plano al ángulo de la detección de la señal de  $90^\circ$  (lado-dispersante) que lo hace de uso fácil. La tendencia actual ha demostrado que hay una necesidad de desarrollar Micro-PIV para los usos en flujos del micro-canal y flujos biológicos [54].

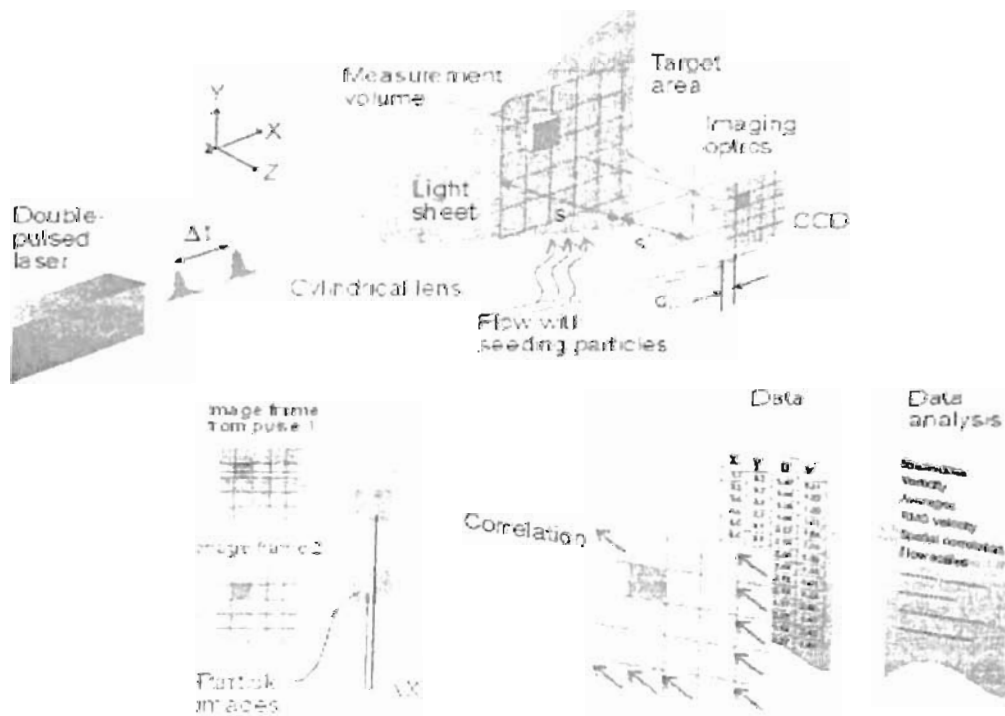


Figura 3.1. Implementación de un DPIV

### 3.1.1. Generación de las imágenes artificiales

A la utilización de imágenes artificiales para probar la exactitud de PIV también se le conoce simulación de Montecarlo [48]. La gran ventaja con este método es que uno puede controlar exactamente las dislocaciones, la densidad y el tamaño de las partículas para el trazo de líneas. Uno también tiene el control de la intensidad, del grueso del abanico de luz, y el nivel del ruido de fondo.

El método siguiente para la generación de la imagen se utiliza en la actual investigación. Primero un ruido de fondo se agrega a cada píxel  $(i, j)$  de las imágenes según:

$$I_1(i, j) = I_{mean} + I_{fluct} \cdot rand(-1, 1) \quad (33)$$

$$I_2(i, j) = I_{mean} + I_{fluct} \cdot rand(-1, 1) \quad (34)$$

Donde  $I_{mean}$  es el nivel de profundidad constante,  $I_{fluct}$  a la amplitud de la fluctuación constante, y  $rand(-1, 1)$  es un número al azar del punto flotante entre -1 y 1.  $I_1$  e  $I_2$  son variables del número entero, es decir se truncan las intensidades. En el paso siguiente, las localizaciones al azar de los puntos flotantes  $(x_i, y_i, z_i)$  de las partículas en la primera imagen se generan, y las partículas se agregan a la primera imagen según el esquema siguiente: Primero la intensidad ligera del abanico de luz se encuentra en la localización de la partícula, así se asume que es un perfil gaussiano en la dirección  $z$  e intensidad del uniforme en el plano  $x-y$ , es decir,

$$I_{zp} = I_{ip} \exp(-8z_i^2 / d_i^2) \quad (35)$$

Donde  $I_{ip}$  es la intensidad del pico del abanico de luz y  $d_i$  el grosor del abanico de luz, definido en el nivel de la intensidad  $I_{ip}e^{-2}$  (donde  $z = d_i/2$ ). Entonces se asume que la intensidad de la imagen de la partícula es dada por una distribución gaussiana en dos dimensiones, centrada en  $(x_i, y_i)$  y con la intensidad del pico  $I_{pp}$  y el diámetro  $d_i$  según

$$I_p(x, y) = I_{pp} \exp\left(-8\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2\right] / d_i^2\right) \quad (36)$$

Esto es bastante correcto para pequeñas partículas, con  $Md_i < d_s$ , de la siguiente formula  $d_i = \left(M^2 d_p^2 + d_s^2\right)^{1/2}$ . La distribución de la intensidad de la partícula  $I_p(x, y)$  es entonces adicionada a la primera imagen en la pequeña región de  $(x_i, y_i)$  según:

$$I_1(i, j) = I_1(i, j) + I_p(i, j) \quad (37)$$

Se asume así que la partícula contribuye solamente a la intensidad de la imagen en  $(i, j)$  por su intensidad en el centro del píxel actual (los valores del número entero de  $x$  y de  $y$ ). Habría estado más correcto integrar la función  $I_p(x, y)$  sobre el área sensible a la luz del

píxel. Esto sin embargo requiere el conocimiento de la acumulación física del chip de la CCD, que puede ser complejo, con las micro-lentes sobre cada píxel. La intensidad de la imagen se limita a cierto máximo para simular la saturación. Para una cámara fotográfica de 12 bit el máximo es  $2^{12} - 1 = 4095$ .

Las localizaciones de la partícula en la segunda imagen se determinan según un campo deseado de la dislocación. Tres clases de dislocaciones se han utilizado en la actual investigación: Dislocación uniforme en la dirección  $x$ , la rotación del cuerpo sólido, y la dislocación que corresponde al flujo plano de Couette. Un movimiento uniforme hacia fuera del plano en la dirección  $z$  se puede también agregar a los casos antedichos. Las imágenes de la partícula se agregan a la segunda imagen de manera semejante en cuanto a la primera imagen

### 3.2. Técnicas de procesamiento

#### 3.2.1. Adquisición

##### 3.2.1.1. El campo de la dislocación

En el PIV la velocidad del fluido se deduce del movimiento de las partículas. El trazo de las partículas se considera como *ideal* cuando (1) siguen exactamente el movimiento del fluido, (2) no alterar el flujo o las características fluidas y (3) no interactuar unas con otras. Se mide la velocidad indirectamente, como la dislocación  $D(X; t', t'')$  del trazo de partículas en un intervalo finito del tiempo  $\Delta t = t'' - t'$ , es decir,

$$D(X; t', t'') = \int_{t'}^{t''} v[X(t), t] dt \quad (38)$$

Donde  $v[X(t)]$  es la velocidad de la partícula. Para las partículas ideales la velocidad  $v$  es igual a la velocidad fluida local,  $u(X, t)$ . Sin embargo, en la situación práctica el concepto de ideales puede solamente aproximarse. Además, la Ec.(38) implica que el campo de la dislocación proporciona solamente la información sobre la velocidad media a lo largo de la trayectoria en un determinado tiempo  $\Delta t$ . Esto se ilustra en el figura 3.2.

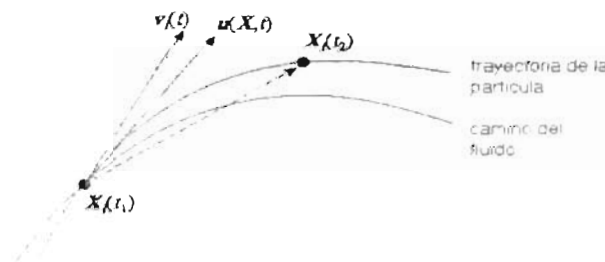


Figura 3.2. El trazo de líneas de La dislocación de las partículas es aproximación de la velocidad fluida

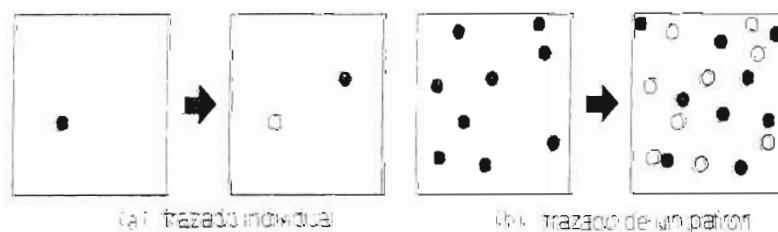
Así,  $D$  no puede conducir a una representación exacta de  $u$ , pero la aproxima dentro de un error finito  $\varepsilon$ :

$$\|D - u, \Delta t\| < \varepsilon \quad (39)$$

El error asociado es a menudo insignificante, a condición de que las escalas espaciales y temporales del flujo sean grandes con respecto a la resolución espacial, la exposición de retraso, y la dinámica de las partículas[55].

La información del flujo se obtiene solamente de localizaciones en las cuales las partículas presentes. Puesto que éstas se distribuyen aleatoriamente sobre el flujo, la dislocación de las partículas individuales constituyen el muestreo del campo de la dislocación, y diferentes realizaciones rinden diversas estimaciones de  $D$ . Obviamente, estas diferencias se pueden descuidar mientras el campo reconstruido de la dislocación satisface la Ec.(39). Esto implica que el campo de la dislocación debe ser muestreado en una densidad de menor escala de la longitud de las variaciones espaciales en  $D$ .

Puesto que  $D$  puede ser mirado como representación filtrada de un pasa bajos de  $u$ , con un corte de filtrado de la longitud a la cual es igual a  $\|D\|$ , la dislocación del campo se debe muestrear con una distancia media que sea más pequeña que la dislocación de la partícula. Esto implica una medida en entre la cual la distancia media Las imágenes distintas de la partícula son más grandes que la dislocación (la idea es seguir la partícula: ver la figura 3.3(a)) no se puede resolver el campo completo de la dislocación. Sin embargo, cuando la concentración sembradora es alta (de modo que el espaciamiento entre las partículas es más pequeño que la dislocación) no es posible identificar la partícula; vea la figura 3.3(b). Es más conveniente describir el trazo de las partículas en términos de un patrón.



**Figura 3.3.** (a) En la densidad sembradora baja los trazos individuales determinan el movimiento fluido; (b) en la alta densidad sembradora que los trazos constituyen un patrón en el flujo.



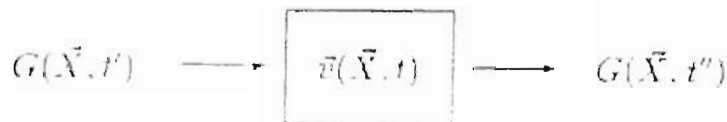
### 3.2.1.2. El patrón del trazado de líneas

Las partículas del trazado de líneas constituyen un patrón al azar que es relacionado al fluido y el movimiento del fluido es visible a través de cambios del patrón del trazado de líneas. El patrón del trazado en líneas en  $X$  en el tiempo  $t$  está definido como:

$$G(X, t) = \sum_{i=1}^N \delta[X - X_i(t)] \quad (40)$$

Donde  $N$  es el número total de partículas en el flujo,  $\delta(X)$  es la función de Dirac  $\delta$  y  $X_i(t)$  es el vector de posición de la partícula con índice  $i$  en el tiempo  $t$ . La Integración de  $G(X, t)$  en un volumen proporciona el número de partículas en ese volumen.

El patrón del trazado de líneas en un tiempo  $t'$  puede verse como una señal espacial  $G'(X) = G(X, t')$  como entrada de una caja negra de un sistema (que representa el flujo) esos actos en la señal de entrada, y retorno de una nueva señal  $G''(X) = G(X, t'')$  como salida; Vea la figura 3.4.



**Figura 3.4.** El campo de velocidad  $v(X, t)$ , es visto como un sistema de caja negra en donde se toma a  $G(X, t')$  como entrada y  $G(X, t'')$  como salida.

Para las partículas ideales la adición de una nueva la partícula no afecta la acción del sistema, es decir el sistema es lineal. Por lo tanto, la señal de salida se puede escribir como la convolución de la señal de entrada con una respuesta al impulso ( $H$ ) del sistema definida como:

$$G''(X) = \int H(X, X') G'(X') dX' \quad (41)$$

La respuesta al impulso es un cambio de la entrada a la dislocación  $D$  en la Ec.(38):

$$H(X', X'') = \delta[X'' - X' - D] \quad (42)$$

El cambio depende formalmente de  $X$ , de la Ec.(39), él puede ser asumido que  $D$  está localmente uniforme, de modo que  $H$  pueda ser mirado como un cambio invariante, es decir,  $H(X', X'') = H(X'' - X')$ .

Según la teoría lineal del sistema, la respuesta al impulso en un sistema de caja negra puede obtenerse de la covariación cruzada  $R_{G'G''}$  de una señal de entrada al azar con señal de salida correspondiente:

$$R_{G'G'}(s) = H * R_G(s) \quad (43)$$

Donde \* denota una integral de la convolución, y  $R_G$  es la auto-covariación de la señal de entrada. Para un caso especial donde la señal de entrada es un proceso blanco homogéneo (es decir  $R_G(s) = \alpha \delta(s)$ ), la correlación cruzada directamente proporciona la respuesta del impulso[51].

### 3.2.1.3. El conjunto de trazado de líneas

Las características estadísticas del trazado de líneas son evaluadas considerando el conjunto de todas las realizaciones posibles de  $G(X, t)$  para de un flujo (fijo) dado en un campo  $u(X, t)$ . El conjunto de covariación cruzada se define como[3]:

$$R_{G'G'}(X', X'') = \langle G'(X') G''(X'') \rangle - \langle G'(X') \rangle \langle G''(X'') \rangle \quad (44)$$

Donde  $\langle \dots \rangle$  denota el promedio del conjunto.

Para evaluar los términos en la Ec.(44), el patrón del trazado de líneas definido en la Ec. (40) se representa como un solo vector en 3 N- dimensional de fase espacial:

$$\Gamma(t) = \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ \vdots \\ X_N(t) \end{pmatrix} \quad (45)$$

Para las partículas *ideales* la trayectoria  $\Gamma$  se prescribe por el campo de la velocidad en las posiciones de las partículas:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = u(\Gamma, t) \quad \text{con} \quad u(\Gamma, t) = \begin{pmatrix} u(X_1, t) \\ u(X_2, t) \\ \vdots \\ u(X_N, t) \end{pmatrix} \quad (46)$$

El medio del conjunto de  $G(X)$  esta dado por

$$\langle G \rangle = \int G(\Gamma) \ell(\Gamma) d\Gamma \quad (47)$$

Donde  $\ell(\Gamma)$  es la función de la densidad de la probabilidad (pdf) para  $\Gamma$ . La estadística del segundo orden  $\langle G'G'' \rangle$  esta dada por:

$$\langle G'G'' \rangle = \iint G(\Gamma') G(\Gamma'') \ell(\Gamma') \ell(\Gamma'') d\Gamma' d\Gamma'' \quad (48)$$

Donde  $\ell(\Gamma''|\Gamma')$  es la condicional PDF para  $\Gamma''$  dado el estado inicial  $\Gamma'$ . Para un flujo  $I''$  está únicamente determinado por la Ec.(46), y por lo tanto

$$\ell(\Gamma''|\Gamma') = \delta[\Gamma'' - \Gamma' - D] \quad \text{con } D = \int_0^t u[\Gamma(t)] dt \quad (49)$$

Como una consecuencia directa la Ec.(48) se reduce a:

$$\langle G'G'' \rangle = \int G(\Gamma)G(\Gamma + D)\ell(\Gamma)d\Gamma \quad (50)$$

Así, la estadística primero y segundo orden del conjunto es determinado por  $\ell(\Gamma)$  (para las partículas ideales). Puesto que no hay partículas que aparecen en o desaparecen del conjunto,  $\ell$  satisface una ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \ell}{\partial t} + u \cdot \text{grad } \ell + \ell \text{div } u = 0 \quad (51)$$

(Ésta es esencialmente una formulación del teorema de Liouville). Considerar el caso especial de un flujo incompresible con sembradura espacial homogénea, es decir,

$$\text{grad } \ell = 0 \quad \text{y} \quad \text{div } u = 0 \quad (52)$$

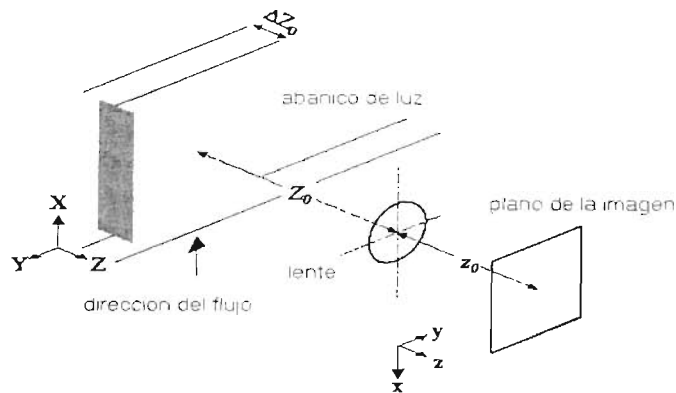
La inserción de esto en la Ec.(51) proporciona inmediatamente:

$$\frac{\partial \ell}{\partial t} = 0 \quad (53)$$

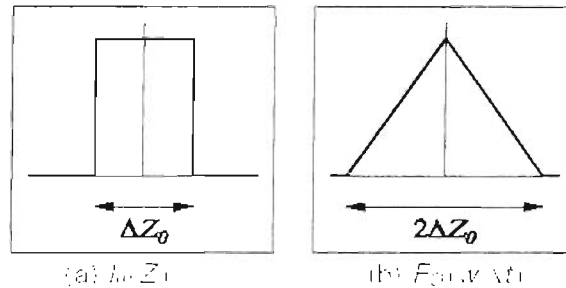
El cuál implica que  $\ell(t)$  es constante y no depende en el campo del flujo. Por lo tanto, un patrón homogéneo de trazado de líneas solamente se mantenga para las partículas ideales en el campo incompresible del flujo.

En el límite para  $V \rightarrow \infty$  y  $N \rightarrow \infty$ , con  $NV = C$  es constante, donde  $C$  es número de Densidad sembradura, la estadística del primer y segundo orden esta dada por

$$\begin{cases} \langle G'(X') \rangle = \langle G''(X'') \rangle = C \\ \langle G'(X')G''(X'') \rangle = C\delta[X'' - X' - D] + C^2 \end{cases} \quad (54)$$



**Figura 3.5.** Representación esquemática de la disposición de la proyección de imagen en PIV.



**Figura 3.6.** La pérdida de la correlación  $F_D$  (a) con un movimiento hacia fuera del plano ( $W\Delta t$ ) para (b) un abanico de luz  $I_0(Z)$  con un perfil de intensidad uniforme

Así pues, la Ec.(44) produce:

$$R_{C, C'}(X', X'') = C\delta[X'' - X' - D] \quad (55)$$

Esto implica que una interpretación de la covariación cruzada en términos de la dislocación son solamente apropiados para un flujo incompresible con una sembradura homogénea ideal. En otros casos la localización del pico de la correlación está no puramente resuelta por el campo del flujo, pero se predispone con respecto a la distribución de la sembradura sobre el flujo. Para esos casos donde no está apropiado el análisis de la correlación. El análisis se podía hacer usando un algoritmo que sigue de la partícula [56].

Este análisis también demuestra la diferencia en medio sembrado para la visualización del flujo para el PIV. Para el flujo la visualización, la puntería es hacer ciertas estructuras del flujo o regiones del flujo visibles. Esto puede ser logrado introduciendo el sembrado en una localización particular (es decir sembrado no homogénea). Por el contrario, una simple exposición de PIV de un flujo incompresible con el sembrado homogénea (ideal) aparece sin rasgos distintivos; cualesquiera fluyen la estructura llega a ser solamente visible cuando el campo de la velocidad es evaluado.

### 3.2.1.4. Proyección de la imagen

En el dominio plano PIV, una sección transversal del flujo está iluminada con un abanico de luz, y los trazos de las partículas se proyectan sobre un medio de grabación en el plano de imagen de una lente, según lo ilustrado en la figura 3.5. La intensidad del grosor del abanico es  $\Delta Z_0$ , se asume un cambio solamente en la dirección  $z$  se asume que la óptica consiste en una lente circular de aberración libre con una apertura numérica  $f^\#$ , y esa toda observaron partículas están en el foco[48]

La proyección de imagen del patrón de las partículas es esencialmente una proyección del patrón de trazado de líneas sobre el dominio plano, es decir,

$$g(x,y) = \frac{1}{I_0} \int I_0(Z) G(X,Y,Z) dZ \quad (56)$$

Con  $x = MX$  y  $y = MY$ , donde  $I_0(Z)$  es el perfil de la intensidad del abanico de luz, con un máximo en  $I_Z$  y  $M$  es la imagen ampliada. Se asume una aproximación paraxial, tan que la proyección de  $G$  sobre  $g$  solamente implica una integración a lo largo de la coordenada  $Z$ . Por analogía con  $G(X,Y,Z)$ , la integral  $g(x,y)$  de excedente al área dada proporciona un número de las imágenes de la partícula en esa área. El conjunto de covariación cruzada de  $g'$  y  $g''$  esta dado por:

$$R_{g'g''}(s) = F_0(\Delta Z) \cdot C \Delta Z_0 \cdot \delta(s - s_D) \quad (57)$$

con

$$F_0(\Delta Z) = \int I_0(Z) I_0(Z + \Delta Z) dZ / \int I_0^2(Z) dZ \quad (58)$$

Donde  $s_D = M \cdot (\Delta X, \Delta Y)$  está en el plano de dislocación de las imágenes[3]. El término  $F_0$  representa la pérdida de correlación debido a las partículas que entran o salen a través del abanico de luz.

Para un abanico de luz uniforme,  $F_0$  es proporcional a magnitud de la dislocación del hacia fuera del plano; vea la figura 3.6. Esta información se puede utilizar para determinar la magnitud de la dislocación del hacia fuera del plano [57].

La imagen de una sola partícula se denota por  $I(x,y)$ , que tiene una anchura finita  $d_f$  (es decir el diámetro de la imagen de la partícula). El aspecto de la imagen depende de concentración de las partículas en el abanico de luz. Se define la densidad de la fuente como:

$$N_s = C \Delta Z_0 M^{-2} \frac{\pi}{4} d_f^2 \quad (59)$$

En una densidad baja de la fuente ( $N_S \ll 1$ ) la distancia media entre las partículas es mucho más grande que el diámetro de la imagen de la partícula, y la imagen consiste en *aislado de* imágenes de la partícula: en una alta densidad ( $N_S \gg 1$ ) las imágenes se traslapan, y para la iluminación coherente el resultado de la imagen es un patrón de interferencia al azar, mejor conocido como punto[1]

El sistema óptico descrito en la figura 3.5 puede ser considerado como sistema lineal, un sistema de cambio invariante, con  $u(x,y)$  de respuesta de sistema a una sola partícula. Entonces, para partículas idénticas, la intensidad de la imagen  $I(x,y)$  en el punto bajo de la densidad de la fuente esta dado por:

$$I(x,y) = I_z \iint t(s-x, t-y) g(s,t) ds dt \quad (60)$$

La covariación cruzada del conjunto de imágenes esta dada por:

$$R_{I'}(s) = F_0(\Delta Z) \cdot R_I * \delta(s - s_D) \quad (61)$$

donde  $R_I(s)$  es la auto correlación de la imagen:

$$R_I(s) = C \Delta Z_0 M^{-2} I_z^2 t_0^2 Ft(s) \quad (62)$$

$Ft$  es la imagen de la partícula de la correlación misma y  $t_0^2$  es el término de la normalización ( $t_0^2 Ft = t * t$ ). Para imágenes de partículas pequeñas,  $R_{II}$  tienen la forma de un pico estrecho con una anchura que es proporcional a  $d_i$ . La localización de este pico es determinada por la dislocación de las imágenes de las partículas en el plano, y la amplitud del pico es proporcional al número de partículas por unidad de área que sigue estando dentro del abanico de luz (es decir  $F_0 C \Delta Z_0 M^2$ ).

### 3.2.2. Interrogación

#### 3.2.2.1. Correlación espacial

Hasta ahora, un conjunto de todas las realizaciones posibles del trazado de líneas se ha considera el patrón. En la practica el campo del fluido no puede reproducirse debido a que es un fluido en turbulencia y solamente una realización de  $I'$  y  $I''$  está disponible. En este caso el conjunto promedio es substituido por hacer un promedio espacial, definido como

$$C(s) = \iint W'(x) I'(x) W''(x+s) I''(x+s) dx \quad (63)$$

Donde  $W'$  y  $W''$  son las funciones de las ventanas eso se asocian a los dominios de la interrogación en  $I'$  y  $I''$  respectivamente[3].

Una condición necesaria es que es hacer un promedio espacial con respecto al conjunto promedio, que implica que el promedio espacial sobre el dominio de la interrogación el cual converge al promedio del conjunto cuando el área del dominio va al infinito [51][52]. Esta condición está satisfacen cuando el patrón es homogéneo y la respuesta del impulso es invariante. Por lo tanto, la correlación espacial se puede escribir como la suma de un valor medio del conjunto  $\langle C(s) \rangle$  y de una fluctuación  $C'(s)$  con respecto al medio:

$$C(s) = \langle C(s) \rangle + C'(s) = R_D(s) + R_C(s) + R_F(s) + C'(s) \quad (64)$$

Donde  $R_D(s)$  es el desplazamiento del pico de la correlación,  $R_C$  es una correlación constante del fondo y  $R_F$  representa la correlación entre el medio e intensidades de la imagen que fluctúan[3]. El desplazamiento del pico de la correlación esta dado por:

$$R_D(s) = N_I F_I F_O \cdot I_z^2 F_i * \delta(s - s_D) \quad (65)$$

con la densidad de imagen  $N_I$  dada por:

$$N_I = C \Delta Z_0 D_I^2 / M^2 \quad (66)$$

[1] y

$$F_I(s) = \frac{1}{D_I^2} \int W''(x) W''(x+s) dx \quad (67)$$

Donde  $D_I^2$  es el área asociada a dominio de la interrogación[3].

Los términos  $R_C$  y  $R_F$  pueden ser eliminados restando la intensidad media de la imagen de  $I'$  y  $I''$ . El término de la correlación al azar  $C'(s)$  refleja la fluctuación simple con respecto al valor medio del conjunto.

Así, la correlación espacial es esencialmente igual a la correlación del conjunto, multiplicada por un término que cuenta la pérdida de la correlación en el plano (debido a las partículas incorporan y salen de la área de interrogación). La amplitud del pico de la correlación es proporcional a  $N_I F_I F_O$ , donde  $N_I$  es la densidad de la imagen que refleja el número promedio de las imágenes de la partícula adentro de una ventana de la interrogación.

### 3.2.2.2. Gradientes de la velocidad

La evaluación de imágenes por una correlación cruzada espacial implica que  $R_{GG}$  se evalúa sobre una medida finita volumen, es decir,  $\Delta V(X') = \Delta Z_0 D_I^2$ , ver representación en la figura 3.7.

debido a las variaciones espaciales en la dislocación  $\Delta V(X')$ , el valor de la dislocación se representa por la función  $\delta$  en la Ec.(61) es substituida por una función de distribución de la dislocación

$$R_D(s) = N_l F_l F_D \cdot I_2^2 t_0^2 F_l * \rho(s - s_D) \quad (68)$$

Donde  $s_D$  es un vector de la referencia con respecto a la posición de la distribución de la dislocación. Por lo tanto, la dislocación es no más larga únicamente se define como:  $s_l$  puede ahora definirse como el máximo de  $\rho$  (es decir la dislocación más probable) o el primer momento de  $\rho$  (es decir la dislocación media local) o, para esa materia, cualquier otro parámetro conveniente es caracterizado por  $\rho$ .

La distribución tiene una anchura finita a la cual es proporcional a la variación local  $|\Delta u|$  de la velocidad. El volumen total de la constante de la distribución, por lo tanto cuando la distribución llega a ser más amplia, la amplitud del pico disminuye. Figura 3.8 demuestra la distribución (unidimensional) de la dislocación encima una región finita.

El ensanchamiento de la dislocación del pico de la correlación tiene un efecto insignificante sobre  $R_D$  cuando las diferentes velocidades sobre el volumen de integración son pequeñas con respecto a anchura correspondiente de  $R_l$ , es decir:

$$|\Delta u| \Delta t \ll d_l / M \quad (69)$$

Y el campo de la dislocación se puede considerar como localmente uniforme. En una situación práctica  $d_l / D_l$  está cerca de 3-5%; para gradientes más grandes, la forma del pico de la correlación puede cambiar perceptiblemente, y puede incluso dividirse en varios picos.

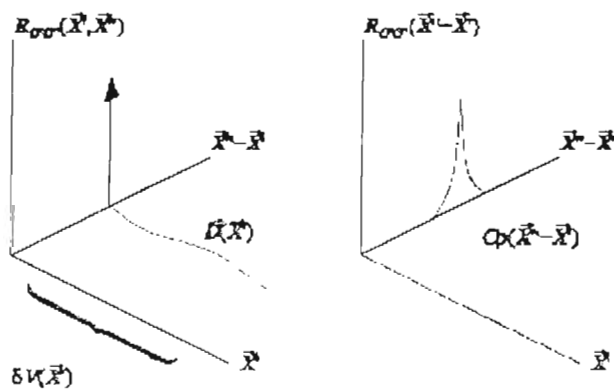


Figura 3.7. La integración de  $R_{GG}$  sobre un volumen pequeño  $\delta V(X')$  es substituida por una distribución de la dislocación.



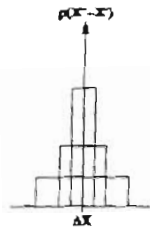


Figura 3.8. Los gradientes de la velocidad ensanchan la dislocación del pico de la correlación y reduce la amplitud del pico.

### 3.2.2.3. Polarización de velocidad

El resultado en la Ec.(65) implica la expectativa de la estimación de correlación espacial es igual al pico de la covariación del conjunto multiplicado por  $F_l$ . Si  $W''$  y  $W'''$  están del mismo tamaño, entonces  $F_l$  siempre disminuirá como una función de la magnitud de la dislocación. Por lo tanto, el pico en  $R_D$  se desvía levemente hacia el centro del dominio de la correlación, de modo que el máximo y el primer momento de la correlación espacial son desviados hacia valores más pequeños según lo mostrado en la figura 3.9[3].

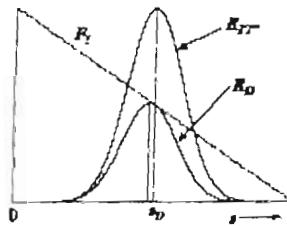


Figura 3.9. la dislocación del pico de la correlación se desvía hacia la dislocación cero como resultado de la anchura finita del pico y el tamaño finito de la región de la interrogación

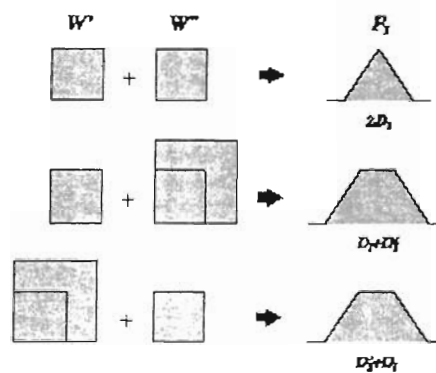
El efecto es proporcional a la anchura del pico de la correlación. Esto implica que la polarización se incrementa proporcionalmente al diámetro de la imagen de la partícula. Se realiza la polarización cuando hay gradientes significativos de velocidad sobre ventana de la interrogación, este aumenta posteriormente la anchura del pico de la correlación.

El efecto de polarización se explica a menudo en términos del número de pares de imágenes de partículas que pueden ser contenidas en  $W$ . Esto se ilustra en la figura 3.10. Si hay un excedente del gradiente de velocidad en  $W$  entonces el número de las medidas de las dislocaciones más pequeñas son más grandes que el de las dislocaciones más grandes.



**Figura 3.10.** El número de los pares de las imágenes de la partícula que se pueden contener en una región de la interrogación se reduce para aumentar dislocaciones.

Un valor típico de la polarización es de  $32 \times 32$  píxeles en la región de interrogación es cerca de 0.1 px. Esto puede conducir a los errores significativos en la valoración del flujo, estadística de la velocidad, o en el cómputo del flujo. La polarización puede ser eliminada dividiendo la correlación espacial en  $F_i$  [50]. Otro método que se puede utilizar para eliminar la polarización es utilizar ventanas uniformes de la interrogación con diversos tamaños[5]. En ese caso, la parte de  $F_i$  es una constante de modo que sea el pico de la dislocación no se desvía como se representa en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** El efecto de usar varios tamaños de ventanas de interrogación

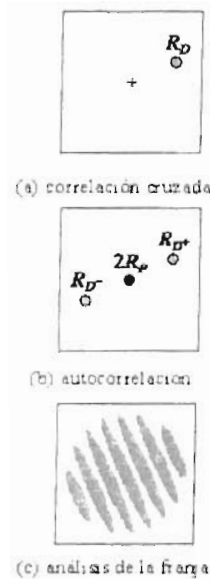
### 3.2.2.4. Puesta en práctica

Para evaluar la correlación cruzada espacial es necesario que cada imagen esté registrada por separado. No es siempre posible o práctico hacer esto, por ejemplo en alta velocidad. Por lo tanto las dos imágenes se superponen a menudo en una sobre otra, y la imagen se analiza con la auto correlación espacial.

En ese caso tres dominantes picos aparecen: aparte la dislocación del pico de la correlación (debido a la correlación de  $I'$  con  $I'$ ), un pico espejo aparece (debido a la correlación de  $I''$  con  $I''$ ) en el lado opuesto un pico central de la misma correlación (debido a la correlación de  $I'$  con  $I''$  y  $I''$  con  $I'$ ) [3]. Puesto que no es posible hacer una distinción entre los dos picos de la dislocación de la correlación, existe una ambigüedad direccional de  $180^\circ$  para la dirección de la dislocación. Por lo tanto, la ambigüedad direccional se considera como limitación del método.

La transformada de Fourier de la auto correlación espacial proporciona un patrón de la franja donde está la orientación de la franja perpendicular a la dirección de la dislocación

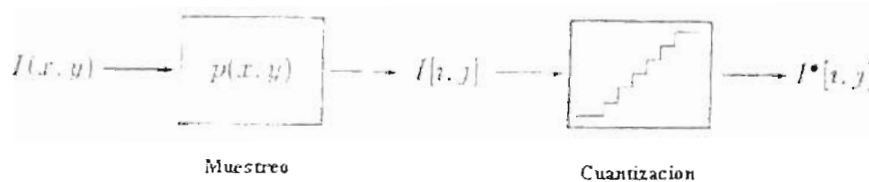
y el espaciamiento de la franja es inversamente proporcional a la magnitud de la dislocación; . La transformada de Fourier se puede implementar ópticamente, que hace posible realizar el análisis instantáneamente. En el pasado era una práctica común, pero hoy en día se convierten a imágenes digitales y con un procesado numéricamente.



**Figura 3.12.** Diversos métodos para la valoración del término de la dislocación de la correlación.

### 3.2.3. Pixelización

Esta sección discutirá los aspectos relacionados con el análisis de imágenes digitales de PIV. La Pixelización consiste en el muestrear una señal en los elementos pequeños de la imagen (píxeles) y el posteriormente cuantización de la amplitud de la señal.



**Figura 3.13.** Pixelización de una imagen continua consiste en el muestreo espacial y el cuantización de los valores de la intensidad.

#### 3.2.3.1. Ancho de banda

Un aspecto importante de la digitalización es la opción del muestreo la cual se requiere para la imagen digital proporcione la representación correcta de la imagen original en

forma continua. El teorema del muestreo (figura 3.14) indica que a la señal con un límite de banda se puede reconstruir en forma de muestreos discretos sin pérdidas cuando el índice del muestreo de la señal está por lo menos el doble de la anchura de banda de la señal[58].

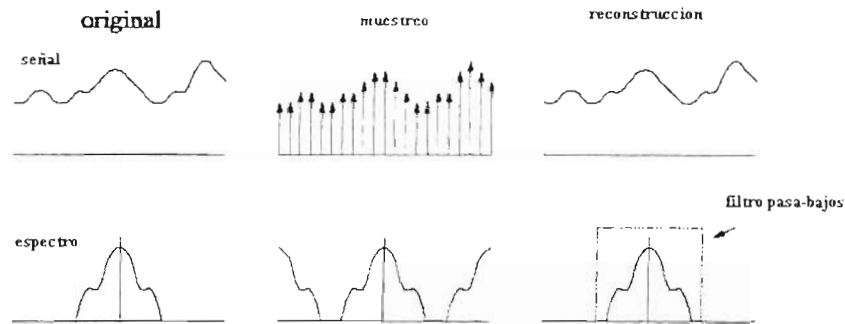


Figura 3.14. El teorema del muestreo.

El sistema óptico demostrado en la figura 3.5 con un límite de banda con un ancho de banda dada por:

$$W = [(M + 1) f^{\#} \lambda]^{-1} \quad (70)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda. Para  $f^{\#} = 8$ ,  $M = 1$ , y  $\lambda = 0.5 \mu m$ , la anchura de banda es de  $125 mm^{-1}$ . Esto implica que una  $1 \times 1 mm^2$  área de interrogación debe muestrear con una resolución de (por lo menos)  $256 \times 256$  píxeles[59].

Una definición alternativa de la anchura de banda de la señal es la anchura de un cilindro que tiene el mismo volumen total que el espectro y la misma altura con cero número de onda se muestra en la figura 3.15. es decir:

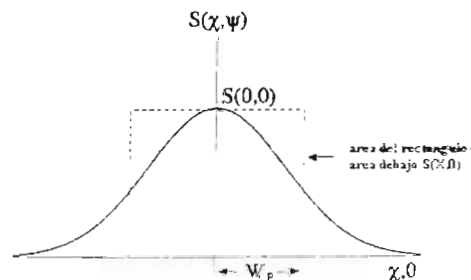


Figura 3.15. La anchura de banda de la señal según Parzen

$$W_p = [\pi S(0,0)]^{-1} \quad (71)$$

Nos referimos como la anchura de banda de Parzen[58]. La anchura de banda refiere a una escala de la longitud que caracterice el excedente de la longitud cuando la correlación decae a cero. (nota que  $s(0,0)$  es igual a la integral sobre el pico de la correlación, el cual es proporcional a  $d_i^2$ )

### 3.2.3.2. Muestreo de la imagen

La imagen  $I(x, y)$  es comúnmente discretizada con dispositivo electrónico de proyección de imagen (generalmente una CCD) que integra la intensidad de luz sobre un área pequeña, designada a un píxel. Se asume que el dispositivo tiene una respuesta lineal con respecto a la intensidad de luz y se hace cuadrado y de contiguos píxeles del área  $d_r^2$ . La imagen discreta  $I[i, j]$  esta dada por:

$$I[i, j] = \iint p(x - id_r, y - jd_r) I(x, y) dx dy \quad (72)$$

donde  $p(x, y)$  es la sensibilidad espacial del píxel, es decir:

$$p(x, y) = \begin{cases} 1/d_r^2 & |x|, |y| < d_r/2 \\ 0 & \text{otra parte} \end{cases} \quad (73)$$

La covariación cruzada discreta de dos imágenes  $I'$  y  $I''$  es definido como:

$$R[r, s] = \langle I'[i, j] I''[i+r, j+s] \rangle - \langle I'[i, j] \rangle \langle I''[i+r, j+s] \rangle \quad (74)$$

y sustitución en la Ec.(71):

$$R[r, s] = \{ \Phi_{pp} * R \} (rd_r, sd_r) \quad (75)$$

Donde  $\Phi_{pp}$  es la misma correlación de la sensibilidad del píxel, figura 3.16. Por lo tanto, la correlación discreta esta dada por la convolución de la correlación continua con  $\Phi_{pp}$ , eso es muestreado posteriormente en los valores del píxel.

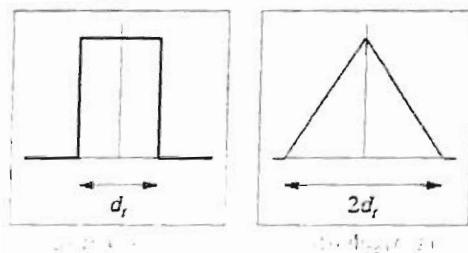
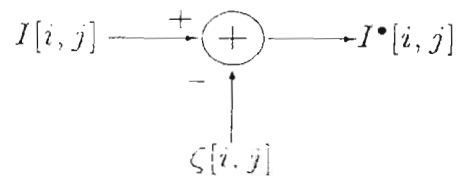


Figura 3.16. La sensibilidad espacial del píxel  $p(x, y)$  y la correspondiente correlación misma  $\Phi_{pp}(r, s)$

### 3.2.3.3. Cuantización

El paso subsiguiente al muestreo de la imagen es cuantización, por cuál la intensidad de la imagen  $I$  es mapeada sobre una variable discreta  $I^*$  que toma valores de un sistema finito de números[52][60].

La relación de la cuantización entre la entrada y la salida visualizarse en la figura 3.17



**Figura 3.17.** El error de la cuantización se puede considerar como ruido aditivo al sistema.

y puede escribirse como

$$I[m, n] = I^*[m, n] + \zeta[m, n] \quad (76)$$

Donde  $\zeta$  denota el ruido de la cuantización. A condición de que el número de niveles sea grande con respecto a la gama de la señal de entrada,  $\zeta$  tiene (aproximadamente) una distribución uniforme, con las siguientes características:

$$E\{\zeta\} = 0 \quad E\{I^* \zeta\} = 0 \quad E\{I \zeta\} = E\{\zeta^2\} \quad (77)$$

Por lo tanto, el efecto del Cuantización puede ser modelado como ruido blanco aditivo al sistema. Esto aparecerá en correlación como pequeño  $\delta$  impulso en cero compensación, es decir[60].

$$R^*[u, v] = R[u, v] + E\{\zeta^2\} \cdot \delta[0, 0] \quad (78)$$

Así, para las deslocaciones diferentes a cero el error de cuantización no influencia la evaluación del pico de la correlación. Esto ha sido confirmada por las simulaciones de Monte Carlo las cuales demuestran que al azar el error de medida para la deslocación es independiente del número de los niveles del cuantización[61].

### 3.2.4. Análisis Digital

#### 3.2.4.1. Correlación espacial discreta

La covariación cruzada espacial para 2 imágenes de interrogación  $I'$  y  $I''$  de tamaño se estiman como:

$$\hat{R}[r, s] = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I'[i, j] - \bar{I})(I''[i+r, j+s] - \bar{I}) \quad (79)$$

Donde  $\bar{I}$  es la intensidad media de la imagen. La intensidad media de la imagen se resta para eliminar los términos  $R_C$  y  $R_F$  en la Ec. (64). El valor para la Ec.(79) es igual a:

$$E\{\hat{R}[r, s]\} = F_1[r, s] \cdot R[r, s] \quad (80)$$

con

$$F_1[r, s] = \left(1 - \frac{|r|}{N}\right) \left(1 - \frac{|s|}{N}\right) \quad (81)$$

La correlación espacial de imágenes discretas puede ser evaluada directamente o usando la transformada discreta de Fourier (DFTs). Debe observarse que la transformada rápida de Fourier(FFT) es algoritmo más rápido y exacto para evaluar la doble adición en la Ec.(79).

Uno debe estar enterado del hecho que la DFT se aplica a las señales periódicas. El dominio de la correlación para la Ec.(79) en los rangos de  $-N+1$  a  $N$  para a cada componente. Por lo tanto, el DFT si realizarse en un dominio de  $2N \times 2N$ . Esto puede ser logrado rellenando  $I'$  y  $I''$  con ceros. Cuando el DFT se realiza sobre un dominio más pequeño, entonces parte de la correlación que no se resuelve se dobla detrás sobre la correlación.

Cuando la dislocación se conforma con el diseño de PIV en la siguiente ecuación:

$$N_r F_r F_o > 7 \quad \text{y} \quad M|\Delta u| \Delta t / D_r \approx 0.03 - 5 \quad (82)$$

Es decir,  $|s_D| < 1/4 D_r$ , entonces la correlación es cero para  $|r|, |s| > 1/4 N$ . En ese caso, el cero acolchado no se requiere, y el DFT se puede realizar en un dominio de  $N \times N$ . Sin embargo, uno debe ser cauteloso al evaluar múltiples exposiciones. En ese caso, correlación armónica de los picos aparece en los múltiplos de número entero de la posición de  $R_D$ . El alisado de los picos armónicos puede interferir con la evaluación de  $R_D$  [48].

### 3.2.4.2. Valoración de la correlación

Los valores estimados de la correlación no son independientes de las muestras de la correlación continua de la imagen pero es correlacionado sobre una rango finito. Esto se puede expresar en términos de un área  $L^2$  de la correlación, es decir.

$$L^2 = \sum_i \sum_u \frac{\text{cov}\{\hat{R}_D[r_D, s_D], \hat{R}_D[r_D + L, s_D + u]\}}{\text{var}\{\hat{R}_D[r_D, s_D]\}} \quad (83)$$

Donde  $[r_D, s_D]$  está la localización de la dislocación del pico de la correlación. El valor de  $L^2$  se puede interpretar como el número de muestras correlacionadas, de modo que el cociente de  $N^2$  a  $L^2$  nos proporcionara el número eficaz independiente de la muestra[49][50].

Para  $dt/dr > 1$  la anchura del pico de la correlación es proporcional a  $dt$ , y  $L$  es proporcional a  $N$ . Una mejora de la resolución no es agregar información adicional, es la misma información pero distribuida simplemente sobre más muestras, y adyacente a los valores de la correlación se correlacionan más fuerte. Por lo tanto, los restos del contenido de información incrementa la resolución. Observar que la resolución para las cuales  $L$  se convierte proporcional a  $N$  (es decir  $N > 64$ ) se conforma con el muestreo basado en el ancho de banda de Parzen[58].

La resolución de muestreos determinado por  $d_t D_t$  y no por  $d_r D_r$  por lo tanto no hay diferencia en la resolución y precisión de las imágenes fotográficas y digitales de un PIV. Esto puede ser verificado comparando PIV fotográfico y digital de medidas en igual geometría del flujo bajo equivalentes condiciones del flujo[62]. Los resultados demostraban que no había prácticamente diferencias entre los resultados fotográficos y digitales de PIV, a pesar del hecho de que la resolución de las fotografías eran varios órdenes de magnitud más grande que la cámara CCD. Sin embargo, las fotografías pueden contener un número más grande de píxeles en comparación con órdenes de la CCD, de modo que las fotografías pueden ver un área más grande del flujo[55].

### 3.2.4.3. Valoración de la dislocación fraccionaria

Considere la dislocación del pico de la correlación con un píxel de bajo resolución, es decir  $Dr/dr \sim 2$ . Si solamente la localización de la correlación máxima debía ser utilizada, entonces el absoluto error de medida sería  $dr/2$ ; para un área de interrogación de  $32 \times 32$  píxeles con una dislocación de  $(1/4 \times 32 =) 8$  px, esto corresponde a un error relativo del 6%. Esto no es bastante exacto.

Cuando el pico de la correlación cubre más de un píxel, la dislocación se puede determinar en el nivel del sub-píxel por interpolación. Esto es incluso posible cuando el diámetro de la imagen de la partícula es menor que un píxel: Observar que es la anchura  $\Phi_{pp}$  es  $2 d_r$  (para los píxeles contiguos), que implica que el pico de la correlación discreto cubre siempre más de un píxel del dominio de la correlación.

El efecto más fuerte de la localización del sub-píxel se encuentra en valores de la correlación adyacente al máximo: éstos sostienen la mayoría de la información con respecto a la dislocación fraccionaria. Solamente los vecinos directos del máximo exceden el nivel de ruidos. Por lo tanto, para valores pequeños  $dt/dr$  solo 3 valores de la correlación contienen información significativa con respecto a la dislocación de la imagen de la partícula en la dirección asociada. Estos tres valores de la correlación se denotan posteriormente como  $R^*$ ,  $R^*_{-1}$  y  $R^*_0$  respectivamente. Observar que en la correlación imparcial se utiliza la estimación (es decir  $R^* = \hat{R} F_t$ )



Dos métodos de la interpolación que se utilizan con frecuencia son el pico del centroide y el arreglo del pico gaussiano. El (sub-píxel) pico del centroide está dado por:

$$\hat{\varepsilon}_c = \frac{R_{+1}^* - R_{-1}^*}{R_{-1}^* + R_0^* + R_{+1}^*} \quad (84)$$

La estimación del centroide se basa en el hecho que el centroide de un objeto simétrico es igual a la posición del objeto[63]. Para la correlación discreta esto es verdad para  $\varepsilon=0$  y  $1/2$ . Consecuentemente, la estimación del centroide para la dislocación fraccionaria está fuertemente predispuesta hacia los valores del número entero de la dislocación en unidades de píxeles. Este efecto se conoce como fijación máxima.

El arreglo del pico gaussiano se basa en la noción que la dislocación del pico de la correlación tiene una aproximación a una forma gaussiana:

$$\hat{\varepsilon}_g = \frac{\ln R_{-1}^* - \ln R_{+1}^*}{2(\ln R_{-1}^* + \ln R_{+1}^* - 2 \ln R_0^*)} \quad (85)$$

Esta estimación proporciona una mejor aproximación actual de la forma del pico, el efecto de la fijación del pico de reduce considerablemente[49]. A pesar de las diferencias en comportamiento, las dos estimaciones se describen absolutamente similar: el numerador solamente contiene  $R_{+1}^*$  y  $R_{-1}^*$ , mientras que el denominador es una función de los tres elementos. Esto refleja la observación anterior que una dislocación fraccionaria afecta más fuertemente a  $R_{+1}$  y  $R_{-1}$ .

#### 3.2.4.4. Error de la valoración

La variación de la dislocación fraccionaria estimada es aproximada por:

$$\text{var} \{ \hat{\varepsilon} \} \approx \sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} \frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_i^*} \frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_j^*} \text{cov} \{ R_i^*, R_j^* \} \quad (86)$$

Donde  $\partial \hat{\varepsilon} / \partial R^*$  denota la derivada parcial de  $\hat{\varepsilon}$  con respecto a  $R^*$ . Dado eso, para  $\varepsilon=0$

$$\frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_0^*} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_{\pm 1}^*} = \frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_{\mp 1}^*} \quad (87)$$

La expresión para  $\text{var} \{ \hat{\varepsilon} \}$  se reduce a.

$$\text{var} \{ \hat{\varepsilon} \} \approx \left( \frac{\partial \hat{\varepsilon}}{\partial R_{\pm 1}^*} \right)^2 \left[ \text{var} \{ R_{-1}^* \} + \text{var} \{ R_{+1}^* \} - 2 \text{cov} \{ R_{-1}^*, R_{+1}^* \} \right] \quad (88)$$

El primer término depende solamente de la función de interpolación del sub-píxel, que refleja la observación que la precisión se mejora cuando la interpolación se empareja a la forma del pico de la correlación. El segundo término depende solamente de características estadísticas de la dislocación del pico de la correlación. Este término desaparecería si  $R^*_{-j}$  y  $R^*_{+j}$  son correlacionados perfectamente. Esto ocurre solamente para el caso de cero dislocación.

Fue demostrado por Westerweel (1993) que el primer término es proporcional a  $I, R^2_D = O(N_I^{-2})$ , mientras que el segundo término es proporcional  $R^2_D = O(N_I^{-2})$ . Esto conduce a la conclusión que  $var \{ \hat{\epsilon} \}$  no depende la densidad de imagen, es decir al aumentar la densidad sembradora no mejorar la precisión de la valoración. Esto puede también estar observado en los resultados de la simulación de Monte Carlo [61]. Una explicación para esto es que el análisis de la correlación es válido para las dislocaciones uniformes, de modo que todos los pares de la imagen de la partícula tienen la misma dislocación; aunque la adición de la imagen de la partícula provoca aumentos en la amplitud de  $R_D$ , que realza la detectabilidad de la dislocación del pico de la correlación, no agrega nueva información con respecto a la dislocación (es decir todas las dislocaciones son idénticas). Así pues, la precisión de la medida se determina por  $d_i, D_i$ , mientras que la medida de la confiabilidad se determina por  $N_i$ .

### 3.2.5. Exactitud del DPIV

Se prueba la exactitud de DPIV usando imágenes artificiales generadas. Las tres clases siguientes de campos de la dislocación se utilizan: Dislocación uniforme en la dirección  $x$ , la rotación del cuerpo sólido, y la dislocación que corresponde al flujo plano de Couette. Para la dislocación uniforme se computan la polarización y los errores rms, y para la rotación y las dislocaciones de Couette solamente se computa el error rms. La estadística del error se basa en  $N = 1024$  vectores, obtenidos con las 12 ventanas sin traslape de la interrogación. Si la dislocación computada en la dirección  $x$  es denotada por el  $r_p$ , y la dislocación real en el centro del área de interrogación es denotada por el  $r_p$ , la polarización y los errores del rms se definen como:

$$E_{rms} = \frac{1}{N} \sum_1^N (r_p - \tilde{r}_p) \quad (89)$$

$$E_{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_1^N (r_p - \tilde{r}_p - E_{rms})^2 \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{N} \sum_1^N (r_p - \tilde{r}_p)^2 - E_{rms}^2 \right]^{1/2} \quad (90)$$

Donde la última expresión en la Ec.(90) es a menudo más conveniente de utilizar. Las expresiones similares solicitan la polarización y los errores del rms en la dirección  $y$ . El error rms total para la rotación del cuerpo sólido se define como el promedio de los errores del rms en las direcciones  $x$  y  $y$ . La dislocación de la partícula que corresponde a una rotación del cuerpo sólido en el ángulo  $\alpha$  dado como:

$$\begin{aligned} dx &= x(\cos \alpha - 1) - y \sin \alpha \\ dy &= y(\cos \alpha - 1) + x \sin \alpha \end{aligned} \quad (91)$$

Esta expresión se utiliza en el algoritmo de la generación de la imagen para determinar las localizaciones de la partícula en la segunda imagen. Como dislocación "verdadera" en el centro de las áreas de la interrogación se toma

$$\begin{aligned} d\bar{x} &= -y\alpha \\ d\bar{y} &= x\alpha \end{aligned} \quad (92)$$

La cuál corresponde a la dislocación infinitesimal de una rotación del cuerpo sólido con la velocidad angular  $da/dt$ . El valor de alfa usado en la simulación era  $8.5/512 = 0.0166$  rad, que da una dislocación máxima de cerca de 8.5 píxeles en la imagen de los medios píxeles de la anchura 512. Para este valor pequeño de las Ecs. (91) y (92) elasticidad casi el mismo resultado.

Para el flujo plano de Couette las dislocaciones de la partícula son dadas por

$$dx = ky \quad (93)$$

donde está una constante  $k$

Las imágenes artificiales estaban en general dadas las características siguientes: diámetro de la imagen de la partícula  $d_i = 2.5$  píxeles, densidad de imagen de la partícula  $N_i = 16$ , movimiento cero del hacia fuera-de-plano, perfil gaussiano del abanico de luz en la dirección  $z$  con la intensidad máxima 4000, y ruido de fondo cero. La mayoría de los cómputos fueron realizados para un tamaño de la imagen de los píxeles  $1024 \times 1024$ , con un  $D_i$  del tamaño del área de interrogación de 32 píxeles, y las ventanas sin traslapo de la interrogación. La gama de dislocaciones aceptables no fue confinada. Los campos del vector fueron postprocesados usando una prueba mediana local solamente, con una desviación permitida e del punto medio de cerca de 0.5 píxel, es decir solamente se permite una desviación pequeña. Esto quita con eficacia todos los vectores falsos antes de que se compute el error. Un solo vector falso con una desviación grande del valor verdadero dominaría de otra manera el error, y por lo tanto da resultados no fiables.

### 3.2.6. Prueba uniforme del flujo

Todos los esquemas emplean una interpolación gaussiana de sub-píxel, y una prueba mediana local para quitar vectores falsos. Los esquemas de polarización corregidos todavía dan una polarización que fluctúa pequeño debido a la localización del pico, es decir una polarización hacia la dislocación más cercana.

El error para el esquema adaptante cambiado de puesto demuestra un comportamiento periódico y es independiente del valor del número entero de la dislocación según lo esperado. Para las dislocaciones menos que mitad de un píxel, el error rms aumenta

linealmente con la dislocación [9]. El esquema adaptante cambiado de puesto funciona siempre en el régimen lineal, y da así el error más pequeño de todos los esquemas.

El error de polarización es más grande para las partículas más grandes, y la corrección de polarización se parece dar un sobre compensación leve del error de polarización. El efecto de la localización del pico no aparece para las partículas más grandes, y el esquema adaptante cambiado de puesto demuestra realmente una fijación levemente reversa del pico ("rechazamiento máximo"). También el error del rms es más grande para las partículas más grandes, que es un efecto previsto con la interpolación gaussiana del sub-píxel del tres-punto.

### 3.2.7. Prueba de la rotación del cuerpo sólido

La rotación del cuerpo sólido implica un campo más complejo de la dislocación que una traducción pura. Tan bien como siendo traducido, los elementos fluidos también se rotan, pero no hay deformación angular o dilatación volumétrica. Para el actual caso con un ángulo de la rotación de 0.0166 rad, y un  $D_I$  del tamaño de área de interrogación = 32 píxeles, la variación en la dislocación de la partícula a través de las áreas de la interrogación es cerca de 0.5 píxel. En detalle el esquema cambiado de puesto es menos sensible al tamaño de la imagen de la partícula para despegue mayor que cerca de 2 píxeles. La interpolación gaussiana de sub-píxel conjuntamente puede cambiar de puesto local de la ventana parece ser apropiada para los diámetros de la imagen de la partícula hasta por lo menos 5 píxeles.

La razón es que un fondo diferente a cero levantará el nivel del fondo en el plano de la correlación, y reduce la fuerza relativa del pico de la correlación. Si se define esto pues el cociente del valor máximo de la correlación a la correlación del fondo es inversamente proporcional al cuadrado de la intensidad del fondo. Especialmente los picos estrechos con los valores pequeños de la correlación más cercanos al valor máximo son sensibles a una intensidad diferente a cero del fondo. La técnica de PIV no es sensible a una intensidad del fondo aleatoriamente que varía, puesto que el ruido al azar es sin correlación. Un fondo estructurado, debido a las reflexiones, que da una contribución finita a los valores de la correlación, es sin embargo más serio para la exactitud de la medida.

Una medida simple de mejorar la exactitud es bajar el nivel del fondo restando la intensidad mínima de cada imagen antes de la interrogación. Esto hará que la curva para 5 % de la intensidad uniforme del fondo coincide con la curva para 0 % de la intensidad del fondo. La curva para 0-5 % de la intensidad al azar del fondo sin embargo no es afectada por esta medida. Mejor debería restar la intensidad media del fondo, pero éste rendiría las intensidades negativas de la imagen que no se podrían manejar [7]

### 3.2.8. La prueba del flujo de Couette

El flujo de Couette del plano es conveniente para probar la sensibilidad de la exactitud de PIV a los gradientes de la dislocación a través de las áreas de interrogación. El cambiar de puesto local adaptante de la ventana se utiliza con un tamaño de área inicial de la interrogación de 64 píxeles y un tamaño final de 32 píxeles. Para el  $D_{II}$  menor que cerca de

0.5 píxel, el diámetro de la imagen de la partícula de 2.5 píxeles da el menor error en el acuerdo con la prueba de la rotación del cuerpo sólido, pero para una variación más grande de la dislocación, el diámetro de la imagen de la partícula de 4 píxeles da el menor error.

La razón es que imágenes más amplias de la partícula dan un pico más amplio de la correlación, que es menos sensible al ensanchamiento adicional causado por el gradiente de la dislocación. La corrección de polarización quita con eficacia este error y también reduce el error rms. Para las ventanas adaptante cambiadas de puesto de la interrogación se obtiene un campo localmente simétrico de la dislocación, que no da lugar a ningún error de polarización.

Para los gradientes pequeños de la dislocación, menos que cerca de 0.02,  $D_I = 64$  da el menor error debido a la alta densidad de imagen de la partícula, pero para los gradientes mayor de 0.05 el error aumenta rápidamente para ese tamaño de área. Para los gradientes mayor que cerca de 0.07 de la dislocación, el  $D_I = 16$  da el menor error. La conclusión es que para los gradientes grandes de la dislocación aumenten en exactitud puede ser obtenido disminuyendo el tamaño del área de interrogación. Qué fija un límite en el tamaño del área más pequeña que puede ser utilizado es la densidad de imagen de la partícula, que si abajo alrededor 5 dan lugar a una cantidad inaceptable de vectores falsos. Se recomienda un gradiente menos de 0.03 de la dislocación[48]. Una manera de aumentar la resolución espacial incluso más futura es seguir los pares individuales entre las exposiciones, es la llamada velocimetría de trazado de partículas (PTV). Uno puede primero hace un análisis de PIV para conseguir una estimación del campo de la dislocación y después intenta identificar pares el emparejar de la partícula[56]. Keane divulgan una resolución espacial mejorada por un factor de 2.5 comparados a PIV convencional.

### 3.2.9. Prueba válida de la probabilidad del vector

La probabilidad que el pico más alto de la correlación corresponde a la dislocación real de la partícula es dependiente en la densidad de imagen eficaz de la partícula  $N_I F_I F_O$ , es decir la densidad de imagen de la partícula corregida para la pérdida de la correlación dentro y fuera del plano. Otro factor que también afecta la probabilidad válida del vector es una intensidad del fondo de no-uniforme, debido a las reflexiones. La razón es para las dislocaciones de la partícula menores que un píxel, la probabilidad de encontrar la dislocación correcta es especialmente alta, por lo menos una partícula en el área de interrogación.

Para el arreglo el esquema  $N_I F_I F_O > 7$  rinde a probabilidad válida del vector más arriba de 95 %. [48]. Para el esquema adaptante cambiado de puesto, sin el movimiento hacia fuera del plano, el  $N_I > 2$  es suficiente obtener la misma probabilidad válida del vector. Un movimiento finito hacia fuera-de-plano aumenta rápidamente la probabilidad de conseguir vectores falsos, pero el funcionamiento del esquema adaptante cambiado de puesto sigue siendo superior al esquema del arreglo. Para obtener una buena exactitud de la medida, una densidad de imagen de la partícula debe ser mayor de 10.

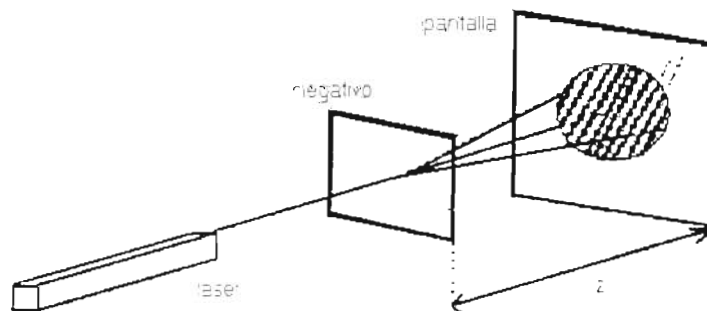
## CAPITULO IV ALGORITMOS UTILIZADOS EN DPIV

### 4.1. Franjas de Young

La transparencia y el plano en los cuales se observa el patrón de difracción, es decir, las franjas de Young se ponen en el plano focal principal de una lente convergente. El patrón de las franjas es entonces una transformada de Fourier de la fase y amplitud de la luz transmitida del área de interrogación. El espaciamiento y la dirección de las franjas se utilizan para calcular la amplitud y la dirección de los desplazamientos de la imagen. El tamaño de la imagen de la partícula se puede obtener del halo de la franja, mientras que la visibilidad de la franja se puede relacionar directamente con la variabilidad del flujo

La transformada de Hough se utiliza para encontrar el espaciamiento, orientación y fase de franjas en imágenes interferométricas. El método fue ideado para el uso en ingeniería civil, aunque puede ser aplicado más generalmente. Las Franjas de Young son producidas por la iluminación de un plano con rayo láser y el espaciamiento de estas franjas se relaciona con los efectos de la tensión en un espécimen. Una variante de la transformada de Hough es las medidas de los espaciamientos de la franja, y los modelos de la forma de onda.

Una sección de la columna es fotografiada por el láser antes y después la tensión se aplica para producir una negativa exposición doble. El láser produce un esquema equivalente a un sistema de fuentes del punto de la luz coherente dando por resultado un sistema de longitudes de onda dispersadas en contacto con el blanco: estas longitudes de onda interfieren con uno a para producir punto brillante y oscuro. Por lo tanto la negativa exposición doble se llama punto grama. Cuando alternadamente un rayo láser brilla a través del puntograma, las franjas de interferencia (las franjas de Young) se pueden observar en una pantalla colocada a una distancia apropiada del sistema.



**Figura 4.1.** Franjas de Young de interferencia. El espaciamiento de las franjas proporciona la información alrededor la deformación del espécimen.

Técnicas tradicionales del análisis de imágenes, tales como transformadas de Fourier, autocorrelación y de la maximización de intensidad a lo largo de los radiales no puede ser conveniente cuando la calidad de los datos son bajos, pues están en nuestro uso. Una buena alternativa es la transformada de Hough la cual funciona bien incluso cuando los datos son ruidosos o a desaparecidos y es utilizada para detectar y localizar líneas, círculos y otro formas[64][65]. Acumula la evidencia para las características de la imagen por un esquema de votación, y refiere generalmente cualquier algoritmo que genere un espacio del parámetro con la intención de encontrar picos que representen las características en los datos originales.

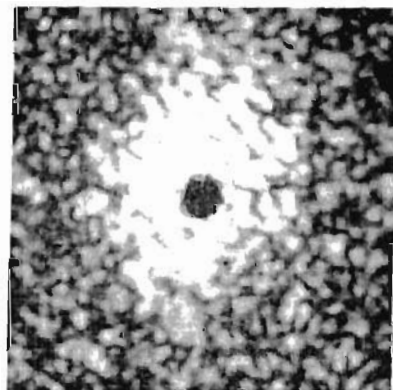


Figura 4.2. Imagen de franja

Un ejemplo de una imagen de franjas que se analizará se demuestra en la figura 4.2. Puede ser visto que la imagen consiste en tres secciones: una sección externa ruidosa que es relativamente oscura, sección más ligera interna, y una central "un hoyo negro" de espesor circular.

#### 4.1.1. Fragmentación de la imagen

En general la imagen siempre contiene una sección más ligera interna en la cual la mayoría de los datos de la franja pueden ser encontrados. El primer paso es dividir en segmentos la imagen para obtener esta región más ligera. Describimos 2 modelos para representar las franjas: un "hierro acanalado" y una plantilla de paso (o onda cuadrada).

Para localizar el agujero circular, la imagen se vela usando una máscara larga promedio para obtener una imagen alisada con una región externa con mediados de intensidad reducida; una región en el centro con alta intensidad y un área central con intensidad muy reducida.

Esta imagen es manipulada con cualquier técnica estándar para fijar intensidades sobre el umbral blanco, y el resto al negro. La región blanca que rodea el centro de la imagen tiene el área más grande. Un heurístico para encontrar el agujero de centro es la región negra que tiene el área más grande dentro de esta región interna. Algunas sugerencias son las siguientes: (a) el agujero debe estar de cierto tamaño; (b) debe ser compacto; (c) debe estar cerca del centro de la región blanca.

#### 4.1.2. Acercamientos posibles para detectar franjas

Dividiendo en segmentos fuera de la sección interna de la imagen en franjas es más fácil la observación. se consideren posibles técnicas para medidas del espaciamiento de las franjas.

##### 4.1.2.1. Análisis de Fourier

La transformada de Fourier es utilizada para analizar las formas de onda regulares para obtener el análisis de franjas. La gráfica de magnitud en espacio de Fourier contiene un pico en el nivel de D.C. y un segundo pico en una cierta frecuencia más alta que indica el espaciamiento de la franja. Mastin y Ghiglia [66] acentúan la utilidad de simplificación de la tarea a un problema 1-D: esto da lugar a un Aumento significativo de la velocidad.

Kaufmann [64] también mide el espaciamiento de franjas usando el análisis de Fourier y los estados del halo de la difracción (la variación de la intensidad a través de la imagen) puede tener un efecto perjudicial en el cálculo. Afortunadamente, este efecto se puede ser removido usando los métodos de Fourier.

Las transformadas de Fourier en 2-D también se utilizan en el análisis de la franja: la imagen de la magnitud se interpreta como sigue: La distancia de un pico al centro es proporcional a la frecuencia. La dirección del pie de la normal de la línea al origen se encuentra del ángulo que hace el pico con el origen[67]. Como con la transformada de Fourier en 1-d, una cantidad grande de ruido estará presente en el nivel de D.C.

##### 4.1.2.2. Auto-correlación

Esta técnica se utiliza a menudo en la clasificación de las texturas. tomas a las series de píxeles adyacentes, y los correlacionan consigo mismos. Los picos marcados en la curva indican a la periodicidad, y el tamaño del pico indica cómo fiable la textura de su repetición periódica. Se asume que las franjas están en dirección horizontal, y promedio junto con todos los píxeles en dirección vertical para reducir ruido[68].

#### 4.1.3. Modelo de la forma de onda

Las franjas de Young, también llamadas franjas  $\cos^2$ , se caracterizan por una *orientación* ( $\theta$ ), *frecuencia* ( $\omega$ ) y *fase* ( $\phi$ ) (figura 4.3). La orientación puede variar entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (debido a simetría): la fase entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  y la frecuencia se relaciona con el espaciamiento de las franjas medidas. Este modelo se describe como "hierro acanalado" porque toma el aspecto de una forma de onda sinusoidal que se ha estirado hacia fuera en dos dimensiones. La precisión requerida de los parámetros determina cuantización de su eje en el espacio de Hough: más grueso para la velocidad y más fino para la exactitud. La *intensidad compensada* ( $i$ ) y *amplitud* ( $a$ ) puede ser determinado por la normalización apropiada de los datos.

Li [69] da una ecuación para modelar las franjas de Young, y utilizamos una modificación puesto que somos inciertos de localización del centro del patrón de la franja.



$$f(x, y) = \alpha \cos(\phi + \omega(x \cos \theta + y \sin \theta)) + I \quad (94)$$

donde dentro de la región brillante de la imagen:

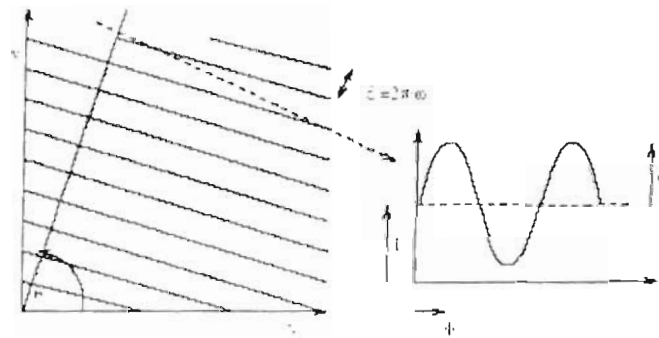
$\alpha$  es la amplitud (un valor de nivel de grises);

$\phi$  es la fase, con la gama  $0 \dots 2\pi$ ;

$\omega$  es la frecuencia, con la gama  $0 \dots \infty$ ;

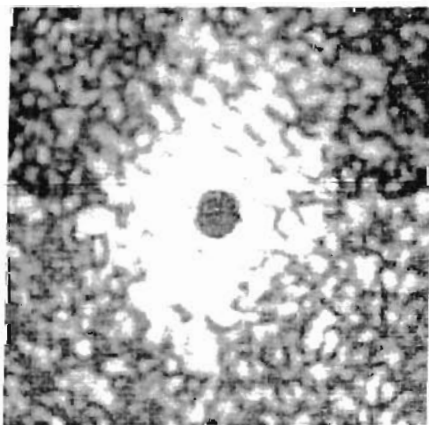
$\theta$  es la orientación, con la gama  $0 \dots \pi$ ;

$I$  es la compensación (un valor de nivel de grises).

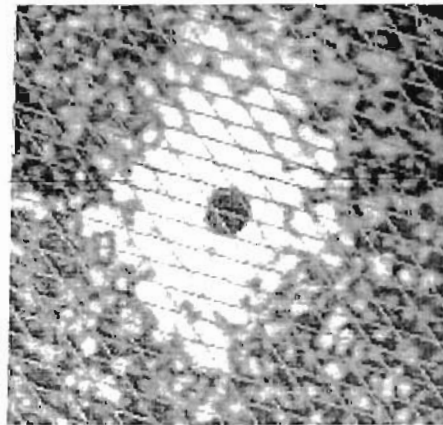


**Figura 4.3.** Forma de onda de  $\text{Cos}^2$  con parámetros orientación, frecuencia y fase y normalización parámetros intensidad y amplitud.

Esta función es equivalente a una función  $\text{cos}^2$  con una compensación, y puede ser modificada fácilmente para producir la onda de paso. El modelo anterior representa más exactamente la forma verdadera de las franjas, no obstante el último puede ser apropiado porque es matemáticamente más simple y caben las franjas casi también. Nos referimos solamente a frecuencia, a la orientación y a la compensación como los parámetros restantes pueden ser encontrados normalizando imagen apropiadamente.



**Figura 4.4.** Imagen de franja



**Figura 4.5.** Ajuste sobrepuesto

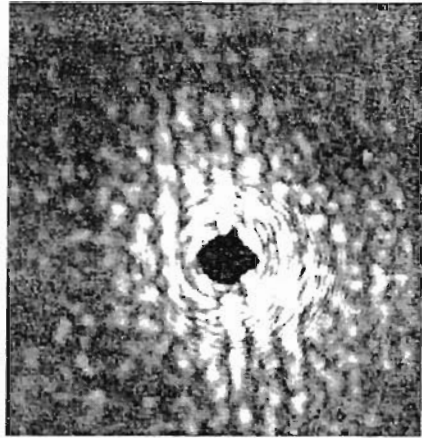


Figura 4.6. 2da Imagen de la franja

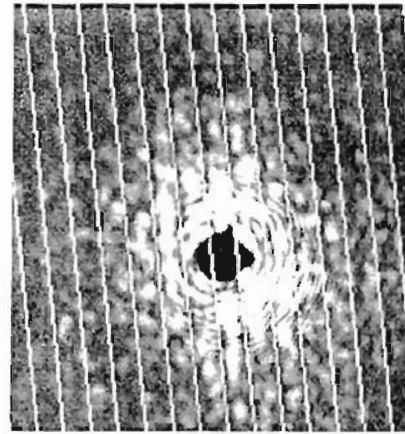


Figura 4.7. Ajuste sobrepuesto

Un sistema de las imágenes de franjas de Young se presenta a continuación: La intensidad compensada ( $i$ ) y la amplitud ( $\alpha$ ) fue determinada antes de comenzar el ajuste. Se demuestra la imagen de la franja (figura 4.4) con el ajuste que resulta sobrepuesto (figura 4.5). Esto se exhibe como sistema de líneas en los valles (las regiones más oscuras) de las franjas y él observado que corresponde entre las franjas y el ajuste es el punto mas alto. El ejemplo contiene la franja de dos patrones: la solución principal está cerca de la horizontal: un segundo patrón, causado posiblemente por el agregado del fondo de la columna, está a  $30^\circ$  de la vertical y tiene una cantidad grande de evidencia hacia ella en el extremo derecho superior también necesita ser mejorada. Las franjas ocurren como dos picos agudos entre ajustes razonablemente buenos en un área estrecha y ajustes más pobres. Se sugiere que las franjas están sobre un área más amplia: el último se siente para estar más correcto. Distinguido midiendo los tamaños relativos de las áreas. Se demuestra un segundo ejemplo (figura 4.6) el cuál contiene solamente un solo patrón de la franja, y éste es detectado con éxito (figura 4.7).

#### 4.2. Algoritmo de autocorrelacion

La transformada de Fourier del patrón de las franjas produce la función espacial de la autocorrelacion, de la intensidad de la luz  $I$ . Transmitido desde la área de interrogación de la transparencia de la imagen del flujo.  $R$  es la posición medida en el plano y  $Rd$  es el desplazamiento del vector.

$$R_{AV}(r_d) = \int I(r)I(r+r_d)dr \quad (95)$$

La función de la autocorrelacion tiene un pico de orden cero en el origen y 2 picos de 1er orden en el desplazamiento menor y mayor del desplazamiento entre las imágenes de las partículas. Los picos también ocurren debido a la aleatoria correlación entre las imágenes de las partículas adyacentes. El radio del 2do pico mas alto al pico más alto es utilizado para validar la selección actuando como un operador variable del umbral.

La velocidad estimada desde las distancias entre los centroides de los picos de orden cero y los picos de 1er orden es un promedio del volumen de la velocidad en las áreas de interrogación.

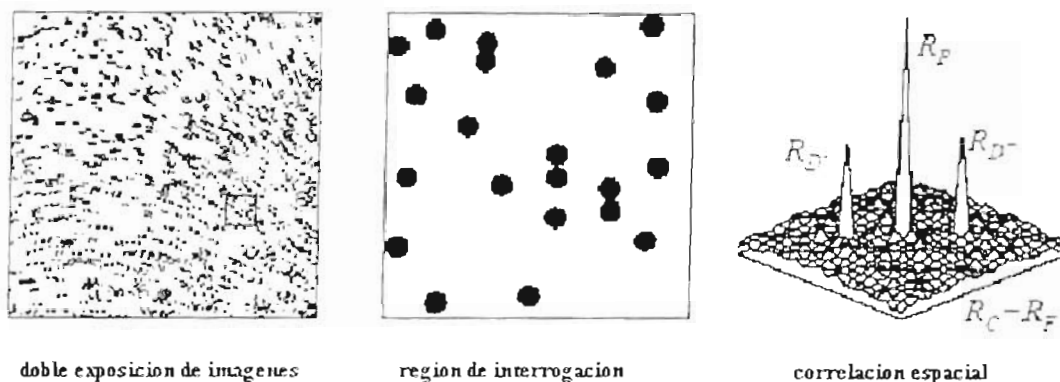


Figura 4.8. Análisis PIV de la autocorrelacion

Autocorrelacion de una imagen de doble-exposición. a diferencia de la correlación cruzada entre dos imágenes, produce una función de correlación que es simétrica sobre el origen. Así, mientras que es posible calcular la velocidad y la dirección de las partículas del trazado de líneas en una imagen PIV usando la autocorrelacion, es imposible decir si la velocidad es en dirección positiva o negativa. Esta ambigüedad puede ser resuelta cambiando de puesto espacialmente una exposición concerniente al siguiente o exposiciones de etiquetado con color o la polarización, pero la complejidad y las limitaciones de estos métodos pueden ser prohibitivas. Es, sin embargo, posible resolver la muestra de la velocidad de una imagen de triple-exposición usando intervalos desiguales del tiempo en medio exposiciones.

Las imágenes de Triple-exposición, como imágenes de doble-exposición, correlacionan simétricamente cerca de cero. La ambigüedad direccional, sin embargo, puede ser resuelta calculando la probabilidad de las tres exposiciones ocurren en una orden temporal específica; es decir, si se asume que la correlación tiene una muestra y una prueba específicas para ver si la asunción está correcta. Se presenta adjunto un asimétrico de cómputo eficiente función de correlación que puede distinguir el temporal orden de imágenes expuestas triples.

Típicamente, PIV procede por la correlación cruzada o la autocorrelacion. Para la correlación cruzada, una sola exposición las partículas en el flujo se registran en dos imágenes tomadas en diversos tiempos, mientras que para la autocorrelacion, las exposiciones múltiples se registran en una sola imagen. Correlación cruzada de las imágenes de PIV no es en muchos casos prácticos para los flujos de alta velocidad: el tiempo intervalo entre los marcos o el tiempo necesario para avanzar la película es suficientemente largo y se podría perder cualquier correlación de las posiciones de la partícula [49]. Autocorrelacion, por otra parte, permite que las exposiciones sean

espaciadas tan cerca como la fuente de luz (a menudo un láser pulsado) permitirá, a condición de que las imágenes de la partícula no traslaparse.

Las imágenes de la partícula que resultan de diversas exposiciones son indistinguibles en una imagen diseñada para la autocorrelación. es imposible saber el orden en la cual la partícula individual de las imágenes fueron registradas. La autocorrelación conserva así 180° ambigüedad en la dirección de cada vector en el campo de velocidad. Para los usos con las estructuras del vórtice, revocaciones de la velocidad, o la turbulencia fuerte, sentidos de chorro no se puede deducir fácilmente, y es importante que la ambigüedad direccional esté resuelta. Una variedad de técnicas se ha propuesto para este propósito. Algunos se concentran en imágenes de etiquetado de la partícula de diferente las exposiciones así que ellas se pueden tratar independientemente y correlación cruzada. Los métodos de etiquetado incluyen la iluminación con distintos colores, así como polarización dependiente de la codificación de las franjas [70].

#### 4.2.1. Ambigüedad direccional

Las imágenes de PIV son procesadas típicamente por la subdivisión en una rejilla regular de las ventanas de traslape las cuales son limitadas en regiones de velocidad similar del flujo: un vector de la velocidad entonces se encuentra para cada una de las ventanas por la autocorrelación. La autocorrelación produce una tabla de los valores de la correlación sobre un rango de dislocaciones, y la dislocación total de partículas en la ventana se representa por un pico en esta tabla de correlación. Las Entradas de la correlación se computan típicamente usando cualquiera espectral (FFT) de autocorrelación o autocorrelación estadística. Para una ventana  $M \times N$ , la función estadística del autocorrelación puede ser expresado como:

$$\Phi_{\Delta x, \Delta y}^* = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m+\Delta x, n+\Delta y} + I_{m, n})}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{m, n}^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{m+\Delta x, n+\Delta y}^2}} \quad (96)$$

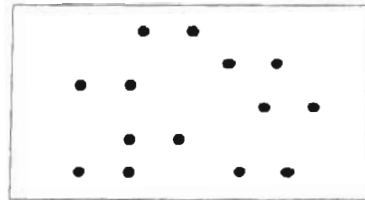
Donde  $I_{m, n}$  representa la intensidad del píxel en la localización  $(m, n)$ . Una alternativa es construir la tabla de correlación para comprimir el formato usando la función correlación error. La función correlación error puede ser expresa como:

$$\Phi_{\Delta x, \Delta y}^e = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m, n} + I_{m+\Delta x, n+\Delta y} - |I_{m, n} - I_{m+\Delta x, n+\Delta y}|)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m, n} + I_{m+\Delta x, n+\Delta y})} \quad (97)$$

tal que

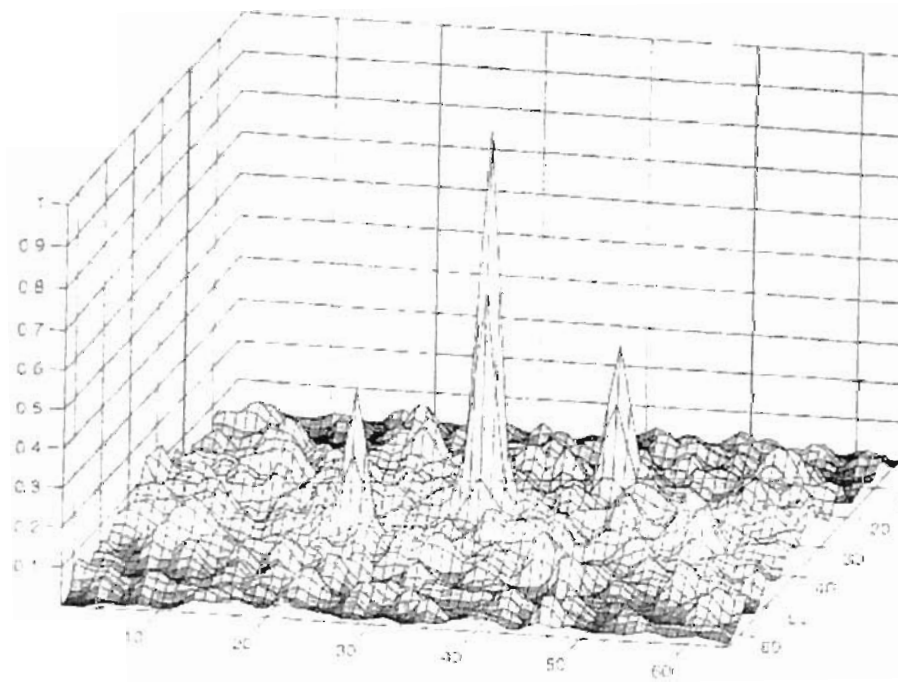
$$\Phi_{\Delta x, \Delta y}^e = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (|I_{m, n} - I_{m+\Delta x, n+\Delta y}|)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{m, n} + I_{m+\Delta x, n+\Delta y})} \quad (98)$$

Los tres métodos de correlación se normalizan tales que un valor computado de 1 indica la correlación perfecta mientras que un valor de 0 no indica ninguna correlación.



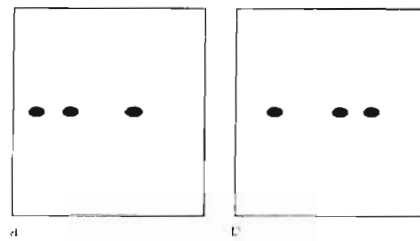
**Figura 4.9.** Diagrama esquemático de una ventana de la correlación dentro de una doble exposición de imágenes de PIV. La velocidad en la ventana es direccionalmente ambigua.

Un diagrama esquemático de una ventana de la correlación que contiene dos exposiciones de las partículas sembradas se demuestra en la figura 4.9. Es claro que esta figura no proporciona ninguna información de la polaridad no se puede obtener de una imagen PIV de doble exposición; las partículas en la imagen podían ser movidas a la izquierda o a la derecha. Observar que la ventana de correlación genera tres máximos locales en la tabla de correlación: El pico de la misma correlación centrado en el origen, y dos picos conjugados de la dislocación en los lados opuestos del origen, Figura 4.10.

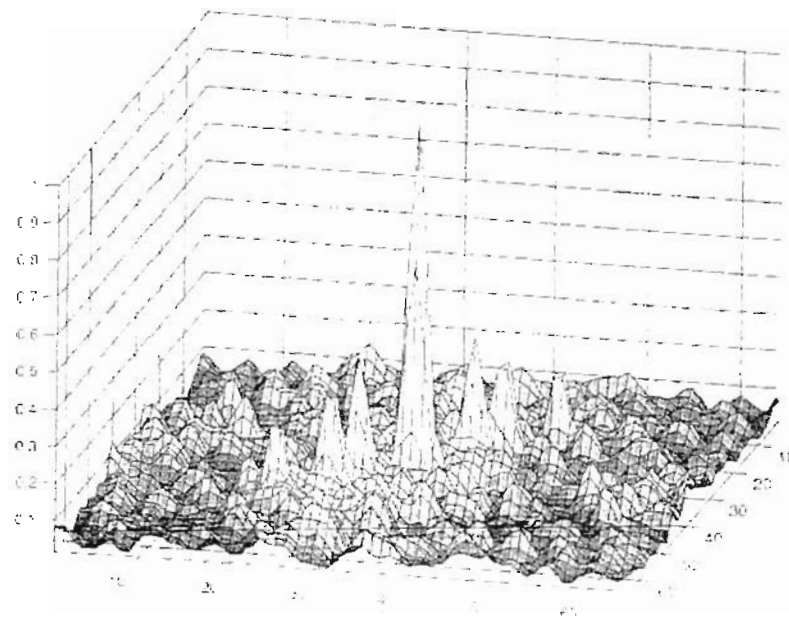


**Figura 4.10.** Tabla de la autocorrelación producido por una imagen de partículas de doble exposición, demostrando 3 picos de la correlación. El centro, el más grande, el pico representa la correlación de la dislocación en cero.

En contraste en la figura 4.11, muestra una partícula iluminado por tres láseres separados por desiguales intervalos de tiempo. Si es mas corto el intervalo de tiempo se asume que ocurre entre los 2 primeros pulsos del láser, entonces la partícula figura 4.11(a) está viajando a la derecha mientras que la partícula en figura 4.11(b) está viajando a la izquierda. La autocorrelación de cualquier figura, sin embargo, produce la misma tabla de correlación, figura 4.12. Esta tabla contiene 7 picos: el pico de la misma correlación más 2 picos por cada par de imágenes de las partículas seleccionadas en tres exposiciones.



**Figura 4.11 á, b.** Diagrama esquemático de una imagen triple-expuesta de PIV. Velocidad adentro la ventana **a** es opuesta a ésta en ventana, **b** para un pulso dado del láser secuencia



**Fig. 4.12.** Tabla del autocorrelación producido por una triple exposición de imágenes de PIV, demostrando a 7 picos de la correlación. El centro, más grande, pico representa la dislocación cero con correlación. Los dos sistemas de tres picos más pequeños representan dislocación entre la primera imagen de la partícula y la segundo, en el segundo y la tercera, y la primera y la tercera. La correlación de las imágenes ambos en direcciones positivas y negativas, generan dos sistemas de tres picos de la correlación

Aunque la direccionalidad de los flujos indicada en las figuras 4.11(a) y 4.11(b) se puede discernir fácilmente del espaciamiento desigual de las imágenes de las partículas, la correlación computa tablas de estas imágenes no proporcionan información necesaria para resolver esta direccionalidad. Así, las técnicas de cómputo tradicionales de PIV no pueden resolver muestra de la velocidad del flujo aunque existe esta información dentro de las imágenes mismas. Tal ambigüedad limita seriamente la utilidad de la autocorrelación de PIV para cuantificar los flujos complejos.

#### 4.2.2. Función de correlación asimétrica

La información de la direccionalidad que existe dentro de la triple exposición de las imágenes de PIV sugiere la existencia de un algoritmo capaz de solucionar esta información dentro de un error probable finito. Tal algoritmo se puede expresar como una función de correlación asimétrica

Considere las dislocaciones indicadas por los picos en tabla de correlación computada en la Figura 4.12. Estas dislocaciones no proporcionan la suficiente información para resolver la muestra de la velocidad del flujo. Las ocurrencias de estas dislocaciones, sin embargo, pueden ser correlacionadas en el campo para una medida de direccionalidad. Si  $(\Delta i_1, \Delta j_1)$ ,  $(\Delta i_2, \Delta j_2)$ , y  $(\Delta i_3, \Delta j_3)$  son las tres dislocaciones primarias en Fig. 4.11, con  $|\Delta i_1| > |\Delta i_2| > |\Delta i_3|$ , entonces el orden en la cual las dislocaciones ocurren relativamente al origen coordinado de la imagen puede ser determinado de la función:

$$\eta^e = \eta_{23}^e - \eta_{13}^e = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I_{m,n} + \Delta i_2, n + \Delta j_2} - I_{m,n} + \Delta i_1, n + \Delta j_1} + |I_{m,n} - I_{m,n} + \Delta i_1, n + \Delta j_1} - |I_{m,n} - I_{m,n} + \Delta i_2, n + \Delta j_2}|}{\phi_{\Delta i_2, \Delta j_2}^e + \phi_{\Delta i_1, \Delta j_1}^e} \quad (99)$$

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I_{m,n} + \Delta i_2, n + \Delta j_2} - I_{m,n} + \Delta i_1, n + \Delta j_1} + |I_{m,n} - I_{m,n} + \Delta i_1, n + \Delta j_1} - |I_{m,n} - I_{m,n} + \Delta i_1, n + \Delta j_1}|}{\phi_{\Delta i_2, \Delta j_2}^e + \phi_{\Delta i_1, \Delta j_1}^e}$$

donde  $\phi_{\Delta i, \Delta j}^e$  son las magnitudes del error de la dislocación de los picos de la correlación antes de la normalización,  $I_{m,n}$  son intensidades del pixel, y la ventana de la correlación es dada por  $M \times N$ . la función  $\eta_{13}$  es una correlación del error de las dislocaciones  $(\Delta i_1, \Delta j_1)$  y  $(\Delta i_3, \Delta j_3)$ , mientras que  $\eta_{23}$  es una correlación del error de  $(\Delta i_2, \Delta j_2)$  y  $(\Delta i_3, \Delta j_3)$ . Si  $(\Delta i_1, \Delta j_1)$  ocurre antes que  $(\Delta i_3, \Delta j_3)$  en relación con sus muestras asumidas, entonces  $\eta_{13}$  estarán cerca de 1 y  $\eta_{23}$  se acerca a 0, como en figura 4.9. Si se encuentra un píxel brillante  $(\Delta i_1, \Delta j_1)$  las unidades lejos de un píxel de la referencia, entonces un píxel brillante deben estar  $(\Delta i_3, \Delta j_3)$  unidades encontradas de la misma referencia. La situación inversa se aplica a la figura 4.11(b). Así, si  $\eta$  es mayor que cero, entonces el primer pico de la correlación ocurre antes del segundo. Si  $\eta$  es menos de cero, después el segundo pico de la correlación ocurre antes del primer concieniente a la dirección de los tres picos de la correlación.

Observar que  $\eta$  se ha definido de manera semejante como la función de correlación error. Puede también ser definida usando la relación de correlación estadística:

$$\eta^s = \frac{\sum_m \sum_n (I_{m,n} \cdot I_{m+\Delta t_1, n+\Delta t_2})(I_{m,n} \cdot I_{m+\Delta t_1, n+\Delta t_1})}{\phi_{v_1, v_2}^s \cdot \phi_{v_1, v_1}^s} \quad (100)$$

$$\frac{\sum_m \sum_n (I_{m,n} \cdot I_{m+\Delta t_2, n+\Delta t_2})(I_{m,n} \cdot I_{m+\Delta t_1, n+\Delta t_1})}{\phi_{v_2, v_2}^s \cdot \phi_{v_1, v_1}^s}$$

Donde  $\phi_{\Delta t_1, \Delta t_1}^s$ ,  $\phi_{\Delta t_2, \Delta t_2}^s$  y  $\phi_{v_1, v_1}^s$  son las magnitudes de correlación estadística de la dislocación diferente a cero de los 3 picos antes de la normalización. Mientras los picos de la correlación definidos en los denominadores de las Ecs. (99) o (100) indican la verdadera correlación relativa,  $\eta$  toma un valor positivo o negativo dependiendo de la muestra de la velocidad a una muestra asumida. Una función de correlación asimétrica normalizada, sin embargo, es útil para determinar la probabilidad calculada de una muestra válida. La función  $\eta$  se puede también definir para una correlación espectral.

La función asimétrica de la autocorrelacion proporciona una medida de la polaridad de un vector encontrada por la autocorrelacion. El campo de la velocidad en el flujo se puede calcular fuera de la ambigüedad direccional de una sola triple exposición de imágenes de PIV. Aunque la autocorrelacion asimétrica puede introducir algunos límites en la sembradura del flujo y la sincronización del pulso, pueden ser obstaculizados por gradientes o la aceleración de fuertes velocidades dentro del flujo, técnicas simples de la señal se aprovechan de la presencia de tres exposiciones en una imagen de PIV mejora sumamente la confiabilidad y la exactitud de correlaciones. La autocorrelacion mantiene así mucha promesa en alta velocidad, alta resolución PIV o usos de HPIV donde correlación cruzada o la imagen que cambia de puesto entre las exposiciones en la autocorrelacion es imposible. Está particularmente bien satisfecha al estudio de flujos de alta velocidad que contienen las estructuras complejas del vórtice o turbulencia fuerte.

### 4.3. Correlación Cruzada

Este último es el que utilizaremos debido a que remueve el problema de la ambigüedad del sentido de los vectores de velocidad. Para después implementarlo en el programa Labview para la adquisición de imágenes.

Correlación cruzada.- El siguiente es el concepto básico de la correlación: Si se tiene una sub-imagen  $w(x,y)$  de tamaño  $K \times L$  dentro de una imagen  $f(x,y)$  de tamaño  $M \times N$ , donde  $K \leq M$  y  $L \leq N$ . La correlación entre  $w(x,y)$  y  $f(x,y)$  en un punto  $(i,j)$  está dada por:



$$C(i, j) = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} w(x, y) f(x+i, y+j) \quad (101)$$

Donde:  $i=0, 1, \dots, M-L$ ;  $j=0, 1, \dots, N-L$ , y la sumatoria es tomada sobre la región en la imagen donde  $w$  y  $f$  se traslapan.

La figura 4.13, ilustra el procedimiento de correlación. Se asume que el origen de la imagen  $f$  está en la esquina superior izquierda. La correlación es el proceso de mover el patrón o sub-imagen  $w$  a través del área de la imagen y calcular el valor  $C$  en esa área. Esto envuelve una multiplicación en cada píxel en el patrón por cada píxel que es traslapado en la imagen y entonces sumando los resultados sobre todos los píxeles del patrón. El máximo valor de  $C$  indica la posición donde  $w$  se parece más a  $f$ .

Los valores de correlación no son precisos en los bordes de la imagen. La correlación básica es muy sensible a cambios de amplitud en la imagen, tales como intensidad y en el patrón. Por ejemplo, si la intensidad de la imagen  $f$  es doblada, también serán doblados los valores de  $C$ . Se puede superar la sensibilidad calculando el coeficiente de correlación normalizado, el cual se define como:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} (w(x, y) - \bar{w})(f(x+i, y+j) - \bar{f}(i, j))}{\left[ \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} (w(x, y) - \bar{w})^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{L-1} (f(x+i, y+j) - \bar{f}(i, j))^2 \right]^{1/2}} \quad (102)$$

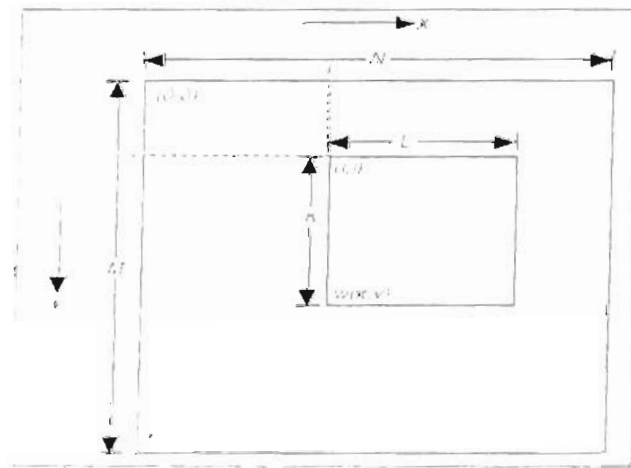


Figura 4.13. Procedimiento de la correlación

Donde  $\bar{w}$  (calculada una sola vez) es el valor de intensidad promedio de los píxeles en el patrón. La variable  $\bar{f}$  es el valor promedio de  $f$  en la región coincidente con la actual ubicación de  $w$ . El valor de  $R$  cae en el rango de  $-1$  a  $1$  y es independiente de los cambios de escala en los valores de intensidad de  $f$  y  $w$ .

Aunque la función de correlación se puede normalizar para considerar variaciones de amplitud utilizando el coeficiente de correlación, puede resultar difícil realizar dicha normalización para variaciones de tamaño y rotación. La normalización de tamaño implica la aparición de factores de escala espaciales, un proceso que por sí solo añade una cantidad significativa de cálculo.

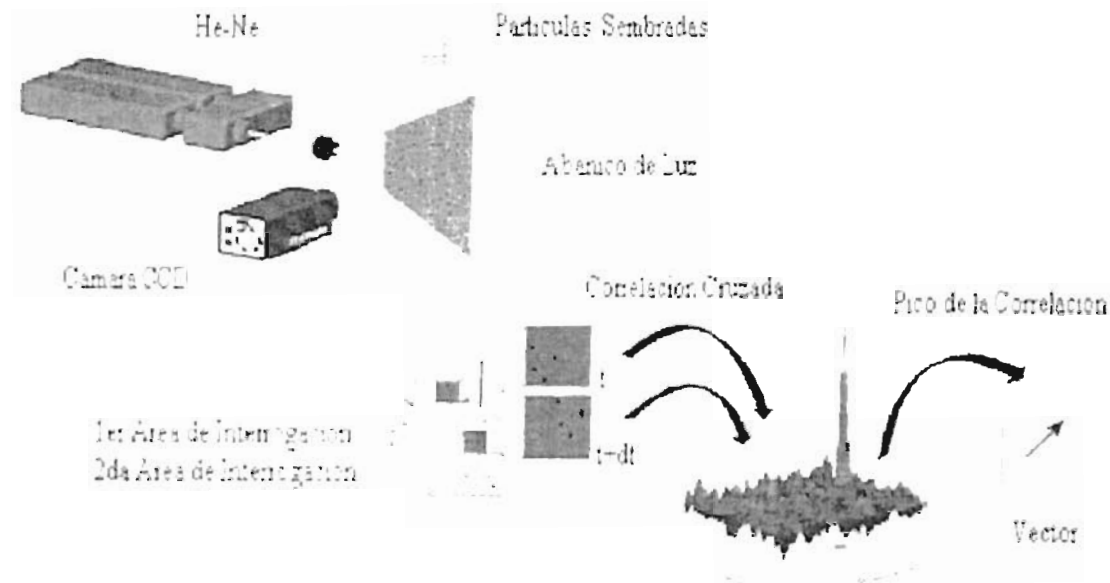
La normalización de rotación es aun más difícil. Si se le puede extraer de  $f(x, y)$  alguna pista sobre la rotación entonces simplemente se gira  $w(x, y)$  la misma cantidad de grados que  $f(x, y)$ . Sin embargo, si la rotación es desconocida, la búsqueda de ésta requiere exhaustivos giros de  $w(x, y)$ .

El método operacional para calcular la correlación cruzada consiste en: calcular la transformada de Fourier de cada una de las imágenes, obtener la conjugada de la segunda y multiplicar punto a punto ambas matrices (que contiene la información de las imágenes de las partículas en el fluido). Posteriormente se calcula la antitransformada de las matrices. En nuestro caso las transformadas se realizan en las áreas de interrogación de cada imagen para así conseguir una imagen total y encontrar el mayor pico de la correlación cruzada

El método descrito en el párrafo anterior, tiene la desventaja que permite medir solo las componentes del campo de velocidades que se encuentran en el plano de medida, si tiene componentes de velocidades en la otra dimensión, la misma no es tenida en cuenta y provoca además el error de polarización en la medida de las componentes del campo[71].

Para poder analizar campos de velocidades complejos se crearon los sistemas de medidas de tres dimensiones. El método de medida basado en estereografía consiste en aplicar el método PIV de correlación cruzada, al campo de velocidades del fluido utilizando dos cámaras separadas una distancia determinada[12]. Las diferencias presentes en los campos de velocidades en dos dimensiones obtenidos permiten inferir el valor de la velocidad en la tercera dimensión. Existen dos configuraciones posibles. El método de traslaciones, consiste en colocar paralelos los planos de imagen de las cámaras y el plano de medida[13]. El método de desplazamiento angular consiste en ubicar los planos imagen de las cámaras y el plano de medida con distintos ángulos de forma de obtener el mayor reflejo posible de las partículas iluminadas por el láser[14].

El método de la correlación cruzada se basa en la hipótesis que dentro de una dada región, un pequeño desplazamiento del fluido se realiza sin deformarse ni rotar. Por lo tanto si realizamos la correlación entre ambas imágenes la ubicación del máximo de la misma indicará el desplazamiento del fluido respecto de la posición inicial. Con este fin se divide las imágenes en pequeñas ventanas de observación, en este caso 32 x 32 píxeles cada una y para las ventanas ubicadas en la misma posición se calcula la correlación entre ambas imágenes.



**Figura 4.14.** Procedimiento del DPIV para generar los vectores

Generalmente, todos los métodos de DPIV se pueden dividir en dos pasos: En primer lugar, la registración de las imágenes de una partícula sembrada en un flujo, y en segundo lugar, la extracción de los vectores de la velocidad de las imágenes registradas en la figura 13 se muestra este procedimiento. En el método de la correlación cruzada, la correlación cruzada espacial entre dos imágenes secuencialmente expuestas del flujo se utiliza para determinar las velocidades. Una ventaja importante del método de la correlación cruzada es que este método remueve la ambigüedad direccional, que es inherente en los métodos de las franjas de Young y la autocorrelación.

Sin embargo, la correlación cruzada también tiene desventajas. La deformación de los patrones de la imagen de la partícula por fuertes gradientes de la velocidad y los resultados de los movimientos hacia fuera del patrón en errores [72], y la resolución espacial es limitada[73].

Las características en este método son el uso de FFT para simplificar y acelerar perceptiblemente el proceso de la correlación cruzada y la determinación de las compensaciones del pico medido del origen del mapa del coeficiente de la correlación cruzada a representar la dislocación espacial media.

#### 4.3.1. Límites en la exactitud

El método convencional de la correlación cruzada es usado en PIV para extraer vectores de la velocidad hace necesario que los gradientes de velocidad dentro de las ventanas de interrogación sean insignificantes. Sin embargo, en campos verdaderos del flujo, es inválida.

Considerando un elemento de un flujo por lo general un flujo en 2 dimensiones, se aplica la teoría de la velocidad de Helmholtz divide un movimiento de un elemento del flujo en tres términos subsidiarios:

$$\bar{V} = \bar{V}_o + \frac{1}{2} (\nabla_x \bar{I})_{,i} x \Delta \bar{r} + \Delta \bar{r} \bullet \bar{E} \quad (103)$$

Donde  $\bar{V}$  representa la velocidad en el elemento fluido y  $\bar{V}_o$  representa la velocidad de la transformada espacial del elemento del fluido. Los tres términos en el lado derecho de la Ec.(103) son la transformación la rotación y el elemento biaxial respectivamente.

Si la ventana de la interrogación se considera como un elemento del flujo, entonces el cambio rígido de los resultados en algunas partes de la ventana de interrogación contribuye al pico de la correlación cruzada[74]. El pico se cambia de puesto lejos desde el origen y los términos de la rotación y la deformación conducen al ensanchamiento del pico [49]. Por lo tanto, es no muy exacto determinar la dislocación sin la consideración de la rotación y algunos términos. Huang describió la limitación del método convencional de la correlación cruzada debido a la deformación de los patrones de la imagen de la partícula acerca de los gradientes de la velocidad y movimientos fuertes hacia fuera del patrón y propuesta una distorsión artificial se considera la velocidad lineal de los gradientes[75]. Jambunathan reconstruyó la segunda imagen que tomaba en la consideración transforman, rotación y escarpado[76]. Sin embargo, si la velocidad de los campos del flujo excede 1/2px, la determinación de la velocidad que usa estos métodos no son muy exactos, en vista de la deformación de los patrones de la imagen de la partícula.

Westerweel definió que el cociente de ruido en la señal (la energía total dividida por la energía de ruido total)  $SNR$  de la señal como[31]:

$$\frac{s}{N} = \frac{\text{var}\{u\}}{\int \text{var}\{\varepsilon\} f(u) du} = \frac{u'^2}{c^2} \quad (104)$$

Donde  $|u| > \frac{1}{2}$  px.

Donde  $u'$  es la variación de la dislocación que fluctúa (viz velocidad),  $c$  es una constante. Se demuestra que el  $SNR$  para un análisis de la interrogación de PIV sin la compensación de la ventana es proporcional a la variación de la dislocación que fluctúa.

#### 4.3.2. Límites en la resolución espacial

La resolución espacial de los campos de la velocidad que se pueden obtener de imágenes de PIV por la correlación de alta densidad de imagen las grabaciones son justas al tamaño de la ventana de interrogación en el líquido  $d_l = D_l / M_o$  (las letras minúsculas refieren a cantidades en las letras fluidas y mayúsculas denotan las cantidades en el plano) de la

grabación de la imagen [77]. Por lo tanto, el más pequeño tamaño de las ventanas de interrogación, más alta será la resolución espacial de los campos de la velocidad.

Sin embargo, la resolución espacial es intrínsecamente limitada por la naturaleza estadística del proceso basado correlación en dividir imágenes en ventanas de interrogación. Un equilibrio cuidadoso se debe mantener entre el número estadístico de las imágenes de la partícula dentro de la ventana de interrogación y de la dislocación relativa de las imágenes de la partícula entre las exposiciones a partir de una área de una región a otra. Si una ventana de interrogación es demasiado pequeña, dos pequeñas salidas de la partícula estarán dentro de la región y un resultado estadístico significativo para las imágenes hechas un promedio de la velocidad del flujo no se pueden obtener con la correlación. Si la ventana de la interrogación es demasiado grande, sin embargo, la dislocación de las partículas entre las exposiciones a partir de una área de la región a otra debido a los gradientes locales del flujo puede ser mayor que el diámetro de la imagen de las partículas. Esto condiciona los resultados en una disminución del cociente de ruido de la señal debido a las dislocaciones en picos individuales de la condición de la partícula también grande para agregar a la señal neta de la correlación [5].

Adrián indicó que el número de los dobletes de las imágenes de la partícula del rastro dentro de la ventana de la interrogación debe exceder valor de 10. Debido al movimiento de la transformación, rotación de las imágenes de la partícula del rastro en la primera ventana de interrogación puede salir de la segunda ventana de la interrogación, que se llama movimiento hacia fuera del patrón. Ensanchará la ventana de interrogación para extraer la velocidad, que disminuirá la resolución espacial[75].

## CAPITULO V ARREGLO EXPERIMENTAL

### 5.1. Materiales

Los Equipos Típicos de DPIV consisten en: un Sistema de rayo láser, la óptica para de la generación del abanico de luz (espejos, lentes, postes y montajes), sembrado de partículas (poliestireno o gotas de aceite), cámara fotográfica del CCD de la alta calidad, computadora del alto rendimiento tarjeta de interfase con convertidor analógico-digital y un buen software para el procesamiento de las imágenes[78].

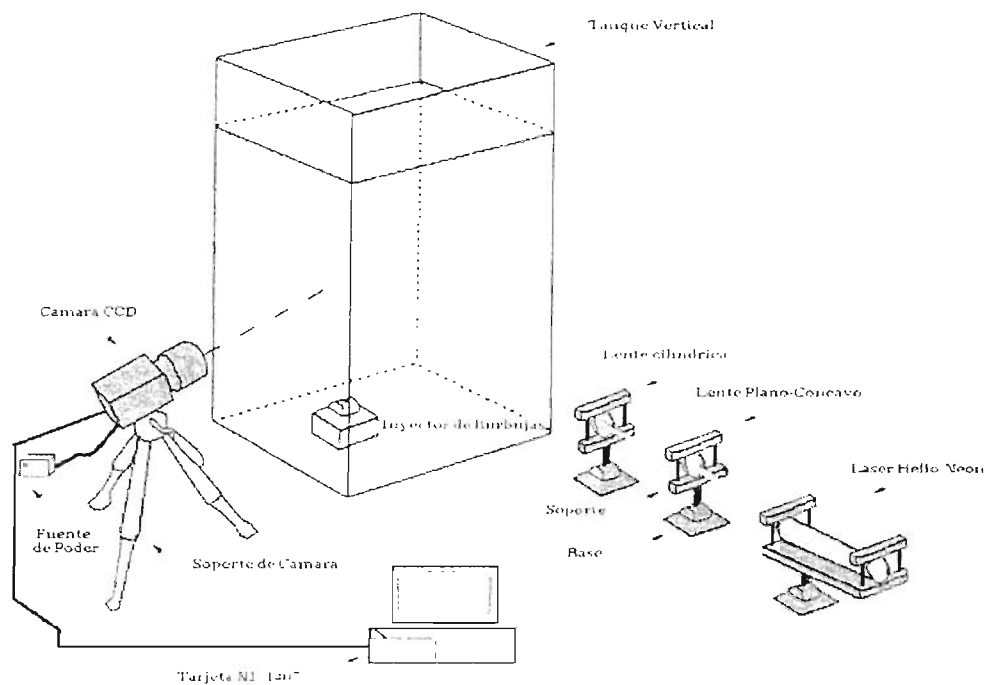


Figura 5.1. Diagrama físico del DPIV diseñado

#### 5.1.1. Láser He-Ne JDS uniphase serie 1100

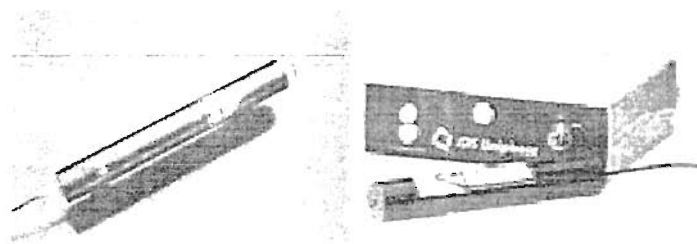


Figura 5.2. Láser He-Ne

Los láseres de He-Ne de alta potencia son ideales para aplicaciones que requieren exploración de alta velocidad. El láser utilizado es el modelo 1144P el cual cuenta con

cubiertas de láser de aluminio con un obturador mecánico en la salida. La potencia es de 15mW, una fuente de poder que utiliza 115 VAC con una corriente de 0.12 amperes cuenta con una llave que indica el encendido y apagado. y cuenta con las siguientes características[79][80][81]:

Longitud de onda	632.8nm
Pureza Del Modo	EI > 95%, Solo Modo TEM <sub>00</sub>
Clase	IIIb (CDRH), 3B (IEC)
Ruido Máximo	0.5% (rms, 30Hz a 10MHz)
Consumo	±2% (energía media sobre 8 horas)
Contribución Arrebatadora Del Modo Máximo	1%
Tiempo de calentamiento máximo (energía del 95%)	20 minutos.
Alineación estática, centrada al cilindro externo	Dentro de la pulgada ±0.01
Curso de la vida De Funcionamiento	> 40.000 horas
Temperatura De Funcionamiento	-40°C a 70°C (-40°F a 158°F)
Temperatura Del Almacenaje	-40°C a 150°C (-40°F a 302°F)
Humedad De Funcionamiento	0 a 100%
Dimensiones	Cabeza del Láser: longitud de 25.0" x diámetro 1.740" Fuente De Alimentación: 3.1" altura x el 8.5" ancho x el 9.3" largo
Peso	Cabeza Del Láser: 2 libras para 15 mW Fuente De Alimentación: 7 libras.

### 5.1.2. Portales, Porta láser y Bases

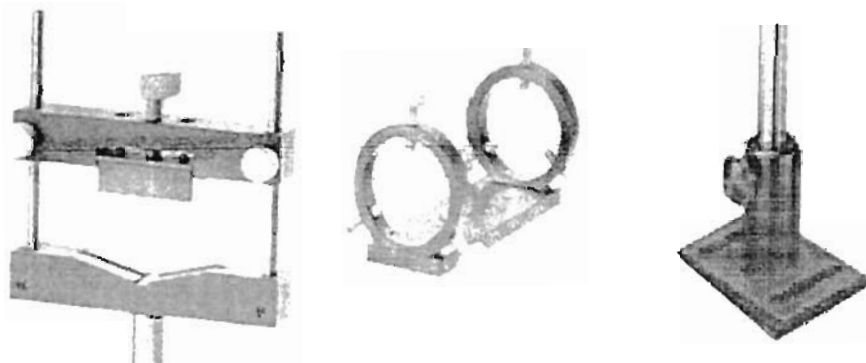


Figura 5.3. (De izquierda a derecha) Portalente, Portálaser y Base.

Los portales nos sirvieron para la fijación de las lentes se utilizaron 2 con sus respectivas bases para una mejor alineación al igual que el portaser nos sirvió para la fijación del láser. Todos ellos son de aluminio[79].

### 5.1.3. Lente plano-cóncava

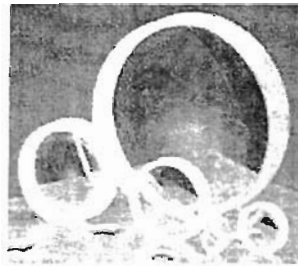


Figura 4. Lente plano-concava.

utilizamos la lente plano cóncava LENS PCV 12 x -24 VIS-NIR, el cual nos permitió enfocar la mayor cantidad de luz láser sobre la lente cilíndrica para así tener una mejor intensidad del abanico de luz la cual cuenta con las siguientes dimensiones:



Figura 5.5. Medidas físicas de la lente plano-concava.

Díámetro: 12 mm	E.F.L. : -24 mm	B.F.L. : -26.320 mm
C.T. : 3.5 mm	Radio R1 : -12.4 mm	Tipo de lente : BK7
	Capa: VIS-NIR	

El cual cuenta con las siguientes características[79]:

Calidad superficial	40-20
Díámetro de tolerancia	+0.01-0.10
Tolerancia de C.T.	=0.1
Centro de tolerancia	3 - 5 arc min.
Cartabon	Cartabón máximo = 0.25mm x 45°
Abertura clara	CA - diámetro - 1.00mm



#### 5.1.4. Lente cilíndrica

Figura 5.6. Lente cilíndrica.

La lente cilíndrica se le hizo incidir la luz láser que sale de la lente plano-concava para formarnos el abanico de luz, este lo hicimos incidir sobre el tanque de agua. La lente cilíndrica cuenta con las siguientes medidas[79],

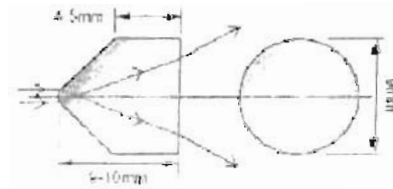


Figura 5.7. Medidas físicas de la lente cilíndrica.

y sus características son:

Tipo de lente	SF6 a 60°
Índice de refracción	1.805 a 60°

#### 5.1.5. Tanque de agua

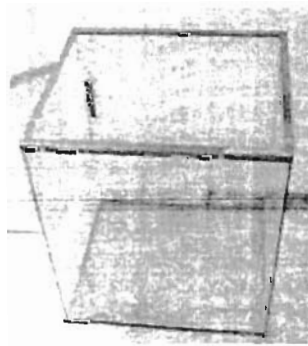


Figura 5.8. Tanque de agua.

Será nuestro ambiente donde instalaremos la bomba de oxígeno que nos generara las burbujas, el cual contendrá el sembrado de partículas de poliestireno sus dimensiones son de 40 altura x 30 ancho x 60 largo[82].

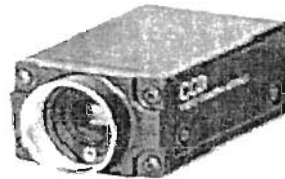
### 5.1.6. Bomba de oxígeno



**Figura 5.9.** Bomba de aire.

Esta bomba de aire nos proporcionara la gama de burbujas que pasaran atravez de abanico de luz consta de un regulador para controlar la emisión de las burbujas en el tanque tiene un consumo de 1.5 watts esta conectada en su salida a una manguera con un pequeño tubo con orificios por donde saldrán las burbujas[83].

### 5.1.7. Cámara CCD



**Figura 5.10.** Cámara CCD.

La cámara XC-ST50 es un módulo compacto, ligero. El XC-ST50 proporciona un obturador externo del disparador que pueda capturar una imagen móvil de alta velocidad usando una señal externa. Después de la captura la imagen es leída con una sincronización arbitraria. Además, la XC-ST50 permite ser fijada en paneles para una mejor operatibilidad y tienen una configuración interna para la resistencia a choques eléctricos y vibraciones de equipos, permitiendo la incorporación fácil a un equipo de visión[21].

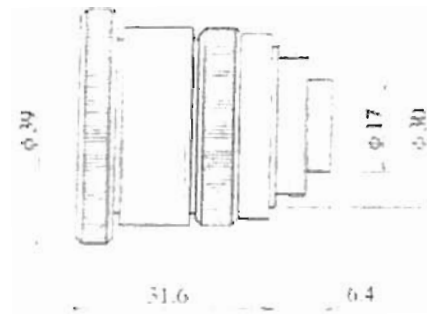


Figura 5.11. Medidas físicas de la lente enfocadora de la cámara CCD.

La cámara contará con una lente para un mejor enfoque de las burbujas la cual tiene las siguientes características[84]:

Tipo de montura para lentes	Montura tipo C
Distancia focal	12mm
Cociente de la abertura máxima	1:1.2
Formato de imagen máximo	6.4 x 4.8 mm

a continuación se presenta la figura la cual representa las partes de la cámara CCD

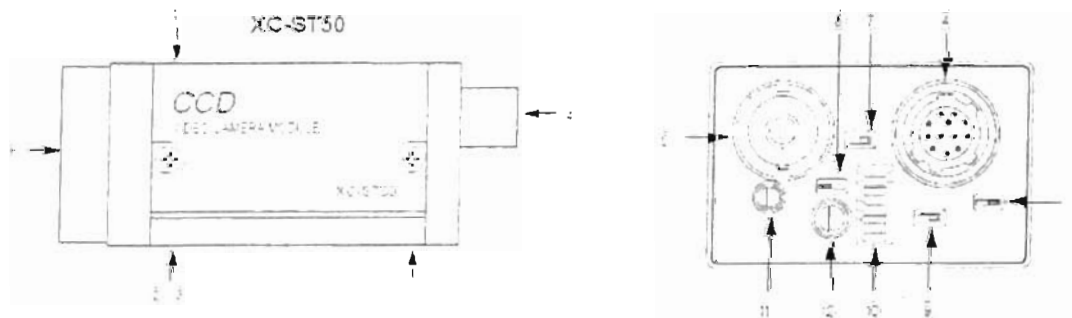


Figura 5.12. Medidas físicas de la cámara CCD.

1. Sección del montaje de la lente

Una lente comercial de montura tipo C o bien conocido como lente estándar puede ser utilizado.

2. el agujero para montaje

Estos agujeros para tornillos con utilizados para la posición con alta precisión relacionada con el sensor del CCD.

3. agujeros para tornillos  
para adaptar a un tripie o base fija

4. multiconector de 12 pines  
fuente de poder DC señal de sincronía de entrada

5. conector BNC  
salida de video

6. corrección  $\gamma$   
interruptor de encendido/ apagado

7. interruptor selector de sincronización interno; externo.  
La cámara funciona con la sincronización interna cuando no hay señal de entrada externa.  
en este caso, una señal HD/VD no se hace salir por el multiconector de 12 pines.

8. interruptor selector de la polaridad del disparador  
Este interruptor puede seleccionar la polaridad (negativa o positiva) de un pulso de disparador.

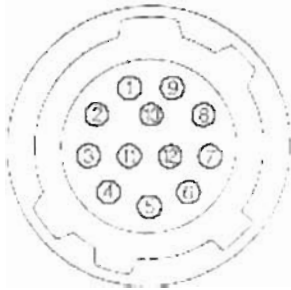
9 interruptor selector de terminación  $75 \Omega$   
encendido/apagado

10. interruptor selector de DIP  
Interruptores 1 a 4: Selecciona la velocidad del obturador.  
Interruptor 5: Selecciona el marco o el campo  
Interruptores 6 a 8: Selecciona el obturador normal, el obturador externo del disparador, y  
recomiendo/ restaurar.

11. interruptor de ganancia  
A: arregla el nivel de salida de video acorde al brillo del objeto  
(El rango es variable: 0 a 18 dB)  
F: arreglo de ganancia 0 dB  
M: ganancia variable (manual)

12. Interruptor de control de volumen  
Este interruptor se puede cambiar en el rango 0 a 18 dB cuando el interruptor de ganancia  
se fija a "M"

multiconector de 12 pines



Pin No	sincronizacion HD/VD externa	sincronizacion HD/VD interna	sincronizacion VS externa
1	tierra	tierra	tierra
2	+12 V	+12 V	+12 V
3	tierra	tierra	tierra
4	salida de video	salida de video	salida de video
5	tierra	tierra	tierra
6	entrada HD externa	salida HD interna	-
7	entrada VD externa(*1)	salida VD interna	VS
8	tierra	tierra	tierra
9	-	-	-
10	salida WEN (*2)	salida WEN (*2)	salida WEN (*2)
11	entrada TRIG	entrada TRIG	entrada TRIG
12	tierra	tierra	tierra

\*1; una señal VD de entrada es requerida cuando el modo reempezar/reestablecer es utilizada

\*2: la señal WEN de salida es valida solo cuando el modo del obturador es manejado por un disparador externo

Figura 5.13. Identificación de pines del multiconector de la cámara CCD.

Los tiempos cortos de la exposición se pueden alcanzar cualquiera teniendo una cámara de alta velocidad que registre continuamente imágenes. Con una cámara de alta velocidad hoy es posible tomar fotos de alrededor 10  $\mu$ s. Las cámaras fotográficas con arquitectura progresiva de la exploración pueden tomar dos imágenes en menos de 1  $\mu$ s. directamente después de que se haya registrado la primera imagen la carga de cada pixel se transfiere a su posición señalada en el registro de cambio del interlinee, una nueva imagen se puede ahora registrar por los pixeles. Se expone hasta que la primera imagen se ha leído hacia fuera en el registro de cambio del interlinee y después se transfiere la segunda imagen al almacenado intermediario de la imagen de la misma manera. Si las partículas son pequeñas o si la intensidad de luz es baja la cámara fotográfica necesita tener una alta sensibilidad a la luz entrante. La sensibilidad de un sensor del fotón es-tal como una cámara CCD se mide en *QE* (eficacia del cuántum) que es el número medio de los electrones que se lanzan del sensor cuando es golpeado por un fotón. El QE es a menudo dependiente de la longitud de onda con una eficacia máxima en la parte azulverde del espectro visible. Las cámaras más sensibles en el mercado tienen hoy un QE del alrededor 70%. La cámara sony XC-ST50 cuenta con las siguientes características[79]

Formato de señal	EIA (RS-170)
Interline Transfer CCD	1/2" format
Pixeles (H x V)	768 x 494
Tamaño del pixel (H x V)	8.4 x 9.8 $\mu$ m

Area (H x V)	6.4 x 4.8mm
Resolución Horizontal	570 TV Líneas
Salida de video	BNC
Tipo de montura para lentes	Montura tipo C
Distancia focal	17.5mm
Sincronía del sistema	Interna / Externa
Sensibilidad mínima	0.3 lux
Velocidad del obturador eléctrico	1/100 - 1/10,000 sec.
Gamma	0.45 / 1.0
Control de auto ganancia	On / Off / Manual
Rango de temperatura	-5°C to 45°C (23°F to 113°F)
Voltaje requerido	12V DC
Fuente de poder	110V, 60Hz
Dimensiones	44mm ancho x 29mm altura x 57.5mm largo
peso	110g

### 5.1.8. Tarjeta NI-1407

La tarjeta PCI-1407 es un dispositivo con una alta exactitud, monocromática con drivers de IMAQ para estándares de vídeo de RS-170 y CCIR. La PCI-1407 adquiere marcos en tiempo real y los transfiere directamente a la memoria de sistema. Puede capturar formatos de marcos que pueden ser de 25, 30,50 y 60 por segundo con una ganancia de calibración previa, tiene un modo de alta impedancia, y un convertidor de analógico a digital de 8-bit (ADC) estas señales video son convertidas en forma digital[25]. Porque el dispositivo 1407 es simple de configurar, usted puede instalar fácilmente el dispositivo y comenzar su adquisición de imágenes. La PCI-1407 trabaja por medio de NI-IMAQ los cuales son los drivers de configuración de la tarjeta con estos drivers fácilmente y rápidamente puedes empezar la aplicación.

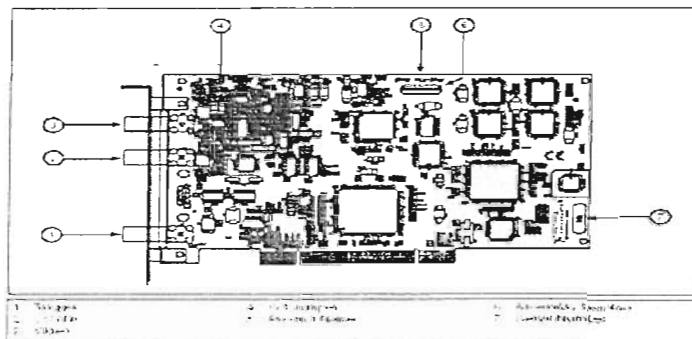


Figura 5.14. Diagrama de localización de partes de la PCI-1407

### 5.1.8.1. Instalación de la tarjeta PCI-1407

Usted puede instalar la PCI-1407 en cualquier ranura de extensión en su computadora. Apagar la computadora completamente, abrir el chasis de la misma poner la tarjeta en una de las ranuras cuidando previamente de cargas electrostáticas, poner la tarjeta lentamente cuidando las 3 salidas BNC de la tarjeta, asegurarse que quedo fija y poner el chasis. Al momento de prender la computadora se abre MAX(MEASUREMENT AND AUTOMATION) ir a devices, después NI-IMAQ devices y si la tarjeta quedo bien instalada aparecerá la IMAQ PCI-1407

La PCI-407 ofrece un ADC flash de 8-bit que convierte señales video análogo en forma digital. El dispositivo tiene una ganancia y un circuito compensador para optimizar el rango de la señal de entrada al ADC. También ofrece una transferencia de datos de alta velocidad. Los controles DMA transfieren los datos de la imagen digital de un sistema FIFO. El dispositivo también incluye un disparador para controlar la adquisición de la imagen. El diagrama de bloque en la figura 15 ilustra los componentes funcionales de la PCI-1407.

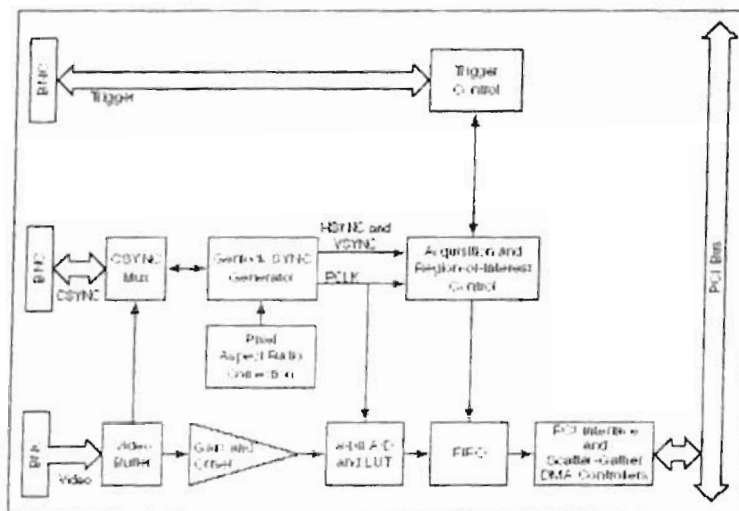


Figura 5.15. Diagrama a bloques de la PCI-1407

### 5.1.8.2. Componentes de la tarjeta NI-1407

#### Buffer de video

El buffer de video maneja la parte electrónica y proporciona 75  $\Omega$  de terminación a la entrada de la señal de video

#### Ganancia y compensación

La PCI-1407 utiliza la programación de ganancia y compensación para optimizar el rango de la señal de entrada.

### **ADC de 8-Bit y LUT**

El ADC flash de 8-bit digitaliza la imagen, la cual pasa por una tabla de búsqueda (LUT) en la memoria RAM de 256 por 8 bits. Se puede configurar la entrada de LUT para implementación de operaciones simples sobre la imagen, realce del contraste, invertir datos, manipulación de gamma, o otras funciones de transferencia no lineales.

### **Multiplexor de CSYNC**

El multiplexor encamina la señal de video o una señal CSYNC externa al circuito genlock. Si este circuito encamina la señal de video al circuito genlock, entonces internamente el CSYNC puede encaminarse a BNC como una señal de salida.

### **Generador de Sincronía ( Genlock)**

Este circuito genera las señales necesarias del reloj y de sincronización de convertir la señal a digital video entrante correctamente. El circuito del genlock puede producir frecuencias de reloj del pixel entre 11.66 MHz y 31 MHz, que pueden acomodar los estándares video RS-170 y CCIR-601 y su muestreo a una doble-velocidad

### **Circuito del cociente del Pixel**

El cociente del pixel es el cociente entre el tamaño horizontal y vertical del pixel. Este valor es usado para ajustar o para corregir el cociente de la imagen

### **Adquisición y control de Región de Interés**

La adquisición y el control de región de interés monitorean la señal video de entrada y las rutas de los pixeles activos al los buffers FIFO. La PCI-1407 puede digitalizar un marco completo y realizar un escalamiento línea pixel y la adquisición de la región de interés. En la adquisición de la región de interés, usted selecciona un área en la ventana de la adquisición para transferir al bus de la PCI.

### **Buffer FIFO**

La PCI-1407 utiliza un buffer de 4 KB FIFO para el almacenamiento temporal de la imagen que es transferida a la memoria de sistema del PCI. El buffer almacena seis líneas de video completas durante la adquisición de la imagen.

### **Controladores DMA**

La PCI-1407 utiliza tres accesos directos de memoria (DMA). Los controladores DMA transfieren datos entre los buffers FIFO y el bus de la PCI. La PCI-1407 puede realizar transferencias continuas de la imagen o hechos fragmentos de la memoria de los buffers.

### **Interface de la PCI**

La interfaz de la PCI puede transferir datos en un índice máximo de 132 MB/s en el modo principal, que maximiza la anchura de banda disponible de la PCI. La PCI-1407 puede generar 8 -, 16 -, y 32-bit ciclos de memoria de escritura y lectura. En modo esclavo, la PCI-1407 es un decodificador de velocidad mediana que acepta ciclos de configuración.

### **Control Del Disparador**

Este circuito controla la dirección y la funcionalidad de la línea externa del disparador. El disparador puede comenzar una adquisición de la imagen cuando está usando una señal de



entrada. Como señal de salida, el circuito de control puede conducir la línea afirmada o errónea a accionar un acontecimiento externo y puede conectar señales internas tales como HSYNC y VSYNC con la línea del disparador.

### **Adquisición Vídeo**

La PCI-1407 puede adquirir las señales video en una variedad de modos y transferir los campos o los marcos convertidos a digital a la memoria de sistema del PCI.

#### **5.1.8.3. Condiciones iniciales**

La PCI-1407 puede comenzar la adquisición en una variedad de condiciones:

-El control del software —la PCI-1407 apoya el control del software del comienzo y de la parada de la adquisición. Además, usted puede configurar la PCI-1407 para capturar un número fijo de bastidores. Utilizar esta configuración para capturar un solo marco o una secuencia de marcos.

-Control del disparador —usted puede también comenzar una adquisición usando la línea externa del disparador, que puede comenzar la adquisición de video.

-Adquisición retrasada —usted puede utilizar software o el disparador para comenzar y para parar adquisiciones instantáneamente o después de capturar un número deseado de marcos o de campos.

#### **5.1.8.4. Parámetros de Video Programación**

Usted puede programar los parámetros de video siguientes:

-conteo de pixel y línea programables —la tarjeta utiliza un circuito avanzado del genlock para generar un PCLK interno. Este circuito genera una frecuencia de PCLK a partir de 11.7 a 31 MHz dependiendo del número total de pixeles por línea. La muestra estándar del muestreo para las señales de video RS-170 es 12.27 MHz, y la muestra estándar del muestreo para CCIR es 14.75 MHz.

-La ventana de adquisición —después de fijar el conteo de pixel y línea, usted debe programar la región activa del pixel y la región activa de línea. La región activa del pixel selecciona el comienzo del pixel y el número de los pixeles que se adquirirán relativamente a la señal HSYNC. La región activa de línea selecciona la línea que comienza y el número de las líneas que se adquirirán relativamente a la señal de VSYNC.

-La región del interés —la PCI-1407 utiliza un segundo nivel del pixel activo y de regiones de línea activa para seleccionar una región de interés. Cuando usted inhabilita el circuito de la región de interés, el dispositivo almacena la ventana de adquisición en memoria de sistema. Sin embargo, cuando se habilita el circuito de la región de interés, el dispositivo transfiere solamente un subconjunto seleccionado de marcos digitalizados a la memoria de sistema.

-Escala en reducción —la PCI-1407 puede reducir un marco reduciendo los píxeles, las líneas, o ambas. Para la selección de píxel activo, la PCI-1407 puede seleccionar cada píxel, cada otro píxel, cada cuarto píxel, o cada octavo píxel. Para la selección de línea activa, la PCI-1407 puede seleccionar cada línea, cada línea impar, o múltiplos de líneas impares

#### 5.1.8.5. Modos De Adquisición

La PCI-1407 tiene dos modos de adquisición de video:

El modo estándar —en modo estándar, se recibe una señal video compuesta entrante del conector externo de BNC y genera señales CSYNC, HSYNC, VSYNC, y PCLK. La señal generada de CSYNC puede ser utilizada por otros dispositivos para la adquisición de la imagen o sincronizar cámaras múltiples.

El modo externo de CSYNC —en modo externo de CSYNC, se recibe una señal video entrante y una señal externa de CSYNC de un conector externo. Se toma la señal entrante de CS SYNC y genera señales de HSYNC, de VSYNC, y de PCLK.

#### 5.1.8.6. Conectores BNC

Los conectores externos de BNC proveen una conexión inmediata a las entradas de video, CSYNC, y TRIG. Utilizamos los cables de BNC para conectar una cámara con estas entradas. Usted puede configurar el conector de BNC solamente para el modo simple referido a (RSE).

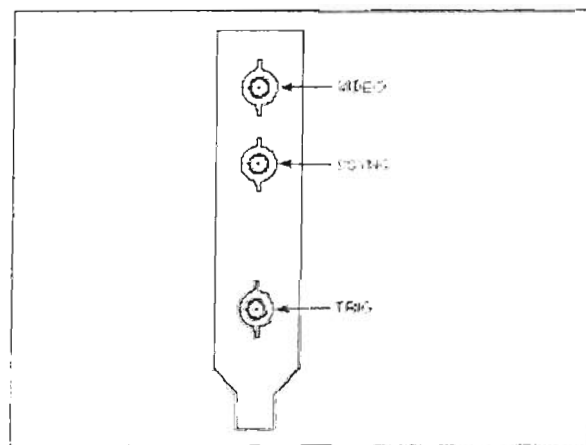


Figura 5.16. Conexiones BNC de la PCI-1407

VIDEO : permite una conexión de RSE al canal de video. La señal video entrante debe ser positiva.

CSYNC es una línea TTL puede ser programada como una entrada o una salida. Cuando la PCI-1407 está en modo externo de CSYNC, utilizar el conector para entrar una señal

de CSYNC de la cámara fotográfica. En modo estándar de la adquisición, el CSYNC internamente generado se puede encaminar a este conector como señal de salida.

TRIG: La señal del TRIG es una línea TTL de E/S es usada para comenzar una adquisición o para controlar acontecimientos externos. Usted puede programar los disparadores.

### 5.1.9. LabVIEW 7.1 (VISION e IMAQ)

#### 5.1.9.1. Driver NI-IMAQ.

Los drivers NI-IMAQ se incluyen con su dispositivo de IMAQ. El NI-IMAQ tiene una biblioteca extensa de las funciones que usted puede llamar de su ambiente de programación. Estas funciones incluyen rutinas para la configuración, la adquisición de la imagen (continua y monoestable), la asignación del buffer a la memoria, el control del disparador, y la configuración de la tarjeta, según lo demostrado en la figura 5.17.

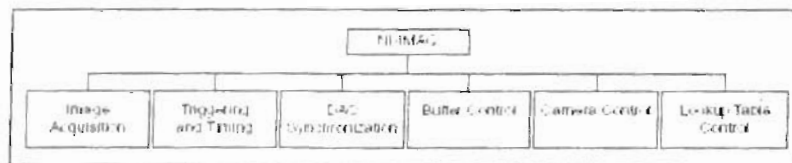


Figura 5.17. Funciones NI-IMAQ

Los drivers NI-IMAQ realiza todas las funciones requeridas para adquirir y salvar las imágenes. Sin embargo, el software NI-IMAQ no realiza análisis de imagen.

Para la flexibilidad y el funcionamiento máximos, NI-IMAQ tiene funciones de alto nivel y bajo nivel. Las funciones para adquirir imágenes en modo monoestable o continuo son ejemplos de funciones de alto nivel. La configuración de una secuencia de imagen es un ejemplo de una función baja, puesto que requiere la comprensión avanzada de su adquisición al dispositivo y de la imagen de IMAQ.

NI-IMAQ es también la trayectoria de interfaz entre LabVIEW, o un ambiente de programación convencional y el dispositivo de IMAQ. NI-IMAQ incluye una serie de bibliotecas para la adquisición de la imagen para LabVIEW[23].

#### 5.1.9.2. IMAQ Visión

IMAQ Visión es una adquisición de la imagen, un proceso, y una biblioteca de análisis de más de 200 funciones para el color, y la exhibición de la imagen binaria; Proceso de imagen; concordancia con el modelo; forma de traslapar; el calibrar; y medidas de imágenes.

Usted puede utilizar funciones de IMAQ-Vision directamente o en la combinación para el proceso de imágenes. Con IMAQ-Vision, usted puede adquirir, exhibir, manipular, y almacenar imágenes, así como realiza análisis de imagen, procesando, e interpretación.

Usando IMAQ-Vision, se puede realizar la programación gráfica de los usos más básicos o más complicados de la imagen sin conocimiento de cualquier algoritmo puestos en práctica[22].

La tarjeta NI-1407 puede ser programada desde labview donde se visualizara en sus paneles el tipo de imágenes que se están adquiriendo además de procesarlas ya que visión cuenta con una gama de herramientas para el procesamiento de todo tipo de imágenes y es donde nosotros realizaremos en proceso de la correlación cruzada[26].

### 5.2. Simulación de las lentes

La simulación de las lentes que utilizamos las realizamos en 2 diferentes programas de simulación de lentes los cuales nos proporcionaron el tipo de lentes mas adecuados que podríamos utilizar para obtener un mejor abanico de luz, además de visualizar las posibles trayectorias del haz láser al cambiar el ángulo de incidencia, entre otro tipo de datos. podemos simular el lente físico en estos 2 programas con todas sus características físicas reales como se aprecia en la siguiente figura:

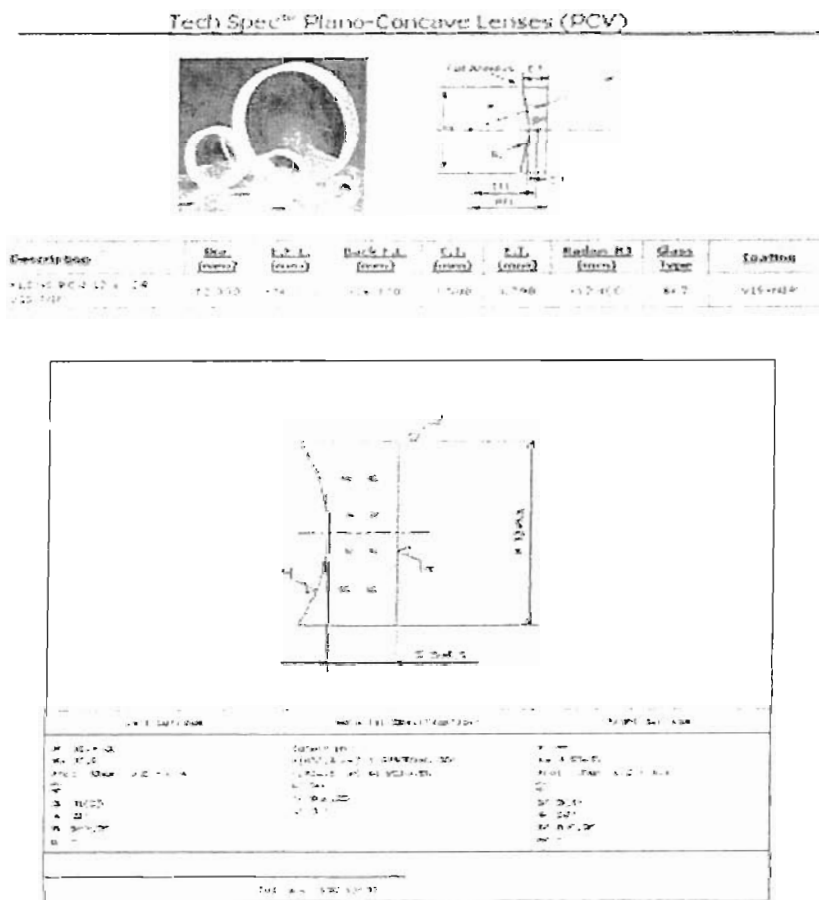


Figura 5.18. Representación grafica de la lente simulada y la lente física

### 5.2.1. OSLO

OSLO : software de óptica para disposición y la optimización de sistemas ópticos. Utilizamos la Versión EDU 6.3.2. una versión educativa, OSLO pertenece a la corporación de Investigación Lambda. OSLO se utiliza sobre todo para determinar los tamaños y las formas óptimos de los elementos en sistemas ópticos en cámaras fotográficas, productos de consumo, sistemas de comunicaciones, para uso militar, espacial, instrumentos científicos, etc. Además, se utiliza para simular el funcionamiento de sistemas ópticos, por medio de las herramientas del software para el diseño óptico, probado, y fabricación de sistemas ópticos[19][85].

OSLO tiene un alto grado de flexibilidad, no solamente en el tipo de tareas ópticas del diseño que puedan ser solucionadas, pero también en la configuración de su interfaz gráfica. Este asunto proporciona tres configuraciones del ejemplo de la ventana principal, cada uno conveniente para cierta clase de operaciones. Cada configuración de la ventana se demuestra como imagen de la captura de pantalla que usted puede ver la función de los varios componentes del sistema

Hay tan muchas posibilidades de la especificación de los datos de la lente en OSLO que el proceso sería muy complejo, a excepción de dos simplificaciones: Primero, solamente algunos tipos de datos (por ejemplo radios superficiales, gruesos, e índices refractivos) están presentes en todas las lentes; tipos especiales (tales como coeficientes esféricos, coeficientes difrangentés de la fase, etc.) se asignan en memoria según lo necesitado. En segundo lugar, todos los tipos de datos tienen valores prefijados, y los valores no necesitan ser especificados a menos que sean diferentes de los defectos. Normalmente, los valores prefijados son lo que usted esperaría naturalmente (grueso = 0, curvatura = 0, índice de refracción = 1, etc.).

Casi cualquier sistema óptico que implique el propagar de ondas ligeras. Los siguientes son algunos ejemplos típicos de los sistemas que se pueden diseñar usando OSLO:

Lentes convencionales

Áreas de las lentes

Cavidades láser / haz gaussiano

acoplamiento de fibras ópticas

Sistemas de iluminación

Sistemas de propagación no secuenciales

Optica de polarización sensitiva

Sistemas de imágenes de alta resolución

también para sistemas con superficie del índice gradiente, esféricas, superficies difrangentés y hologramas, arreglo de lentes, deformaciones interferométricas, etc.

### 5.2.1.1. Tipos de ventanas de OSLO

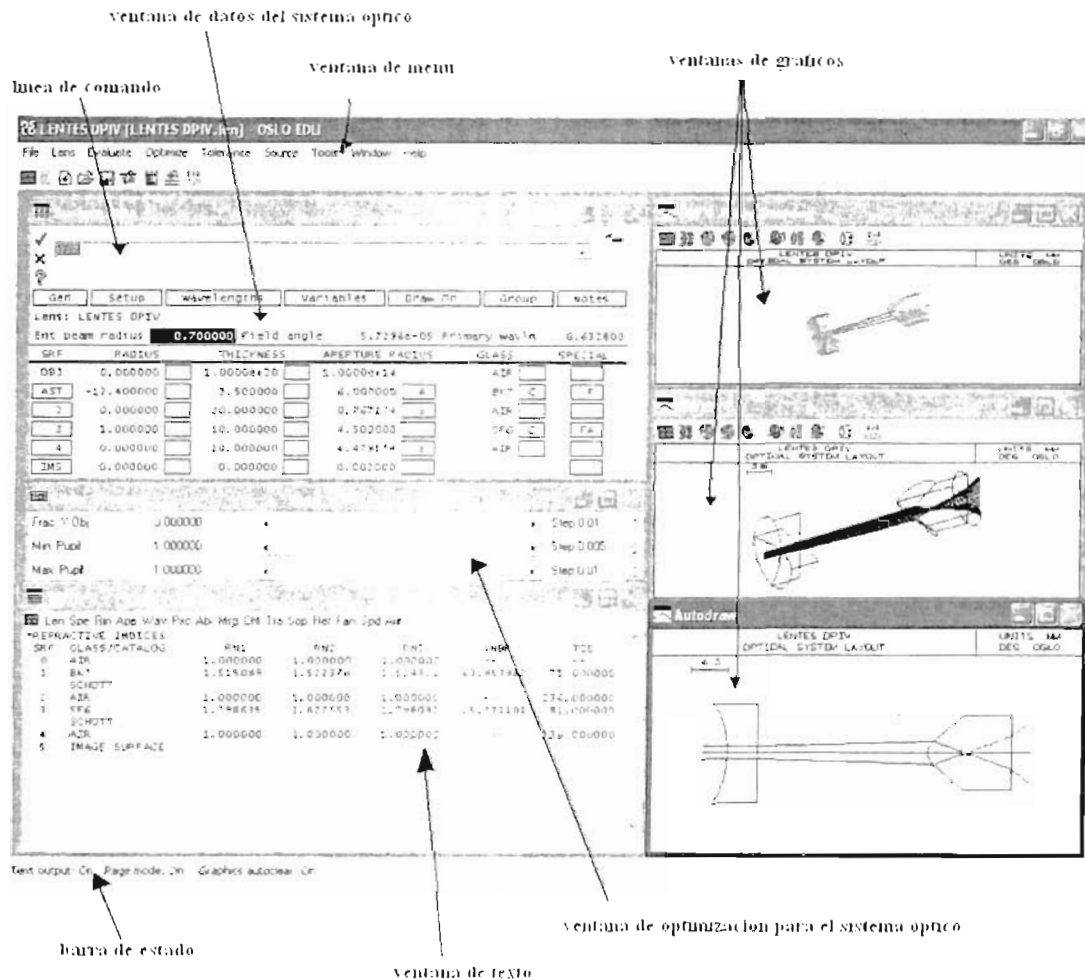


Figura 5.19. Ventanas de OSLO

**Ventana de menú** - es el menú principal donde podemos salvar y guardar el diseño del sistema óptico e ir variando parámetros como tolerancia, seleccionar el tipo de lente de un catalogo existente, evaluación de las aberraciones, el comportamiento de los rayos de incidencia, etc.

**Ventana de datos del sistema óptico** - es una hoja de base de datos donde ingresamos el tipo de lente al igual que sus características radio, grosor, apertura del radio, tipo de la longitud de onda a utilizar tipo de lente, además de la distancia de separación de las lentes entre otros parámetros.

**Línea de comando** - si no deseamos utilizar la hoja de base de datos podemos utilizar comandos para ir definiendo nuestro sistema óptico.

**Ventana de gráficos** - existen diversas ventanas para la graficación de nuestro sistema las cuales nos ofrecen una variedad de herramientas podemos observar el sistema en 2D, 3D, cual es el comportamiento de los rayos que inciden sobre nuestro sistema por dentro de las lentes, rotación de gráficos, visualización de zonas del sistema. etc

**Barra de estado** - nos indica el tipo ventanas utilizadas.

**Ventana de texto** - nos proporciona toda la información del tipo superficie, índices de refracción, datos de abertura, longitudes de onda, constantes paraxiales, sumas de aberraciones, datos del trazado de rayos entre otras.

**Ventana de optimización para el sistema óptico** - nos muestra un grafico con 3 barras deslizadoras las cuales nosotros podemos variar y en el gráfico se muestra el comportamiento de los rayos que inciden en el sistema donde nosotros podemos optimizar nuestro sistema para mejores resultados.

#### 5.2.1.2. ¿Cuáles son características de Oslo?

OSLO es un programa grande, con millares de comandos y de funciones internas. Por otra parte, el módulo ejecutable de OSLO se modifica y recompilando rutinariamente por los usuarios. Consecuentemente, no es posible dar una lista exacta de las especificaciones de lo que puede hacer el programa. Los varios acoplamientos en la lista abajo proporcionan un examen general de las características en OSLO, pero esto no es una lista formal de la especificación.

- Base de datos de las lentes y materiales
- Superficies especiales
- Sistemas de múltiple configuración y zonas
- Grupos no secuenciales y arreglos
- Aberturas especiales
- Datos de elementos y tolerancias
- Polarización y capas de delgadas
- Trazado de rayos
- Coherencia parcial y difracción
- Optimización de metodos
- Análisis de tolerancia
- Láser, fibras y haces gaussianos
- Análisis de iluminación
- Lentes perfectas

#### 5.2.1.3. ¿Cuáles son los puntos fuertes de Oslo?

**Diseño Diseñador-Orientado.** OSLO es utilizado para el diseño óptico interactivo. Esto permite que el diseñador tome las decisiones críticas de la compensación.

**Energía y exactitud.** Aplicaciones de OSLO, incluyendo la optimización múltiple y métodos de tolerancia, el trazo de rayos no secuencial de alto rendimiento, y fuente estocástica para modelar y analizar.

Flexibilidad. Una razón primordial por la cual OSLO se ha convertido en la herramienta de la opción para los diseñadores principales alrededor del mundo es que es fácil modificar y adaptar el programa para requisitos particulares a nuestras necesidades. OSLO esta hecho en lenguaje CCL es más comparable a SUN de JAVA o VISUAL BASIC de Microsoft.

#### 5.2.1.4 Gráficos de OSLO

A continuación mostramos el diseño de las lentes que ocupamos en las figuras 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23 muestran la pantalla principal en la cual nosotros especificamos el tipo de lente que deseamos utilizar la anchura, radio, tipo de lente, etc. además de cambiar el tipo de ángulo de incidencia, espaciamiento de las lentes y que tipo de láser se utilizara con su respectiva longitud de onda.

SPK	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e-14	WIP	
AST	-12.400000	1.500000	4.000000	A	B/C/F
2	0.000000	20.000000	0.747174	S	ADP
3	1.000000	18.000000	4.150000		SFK/C/EA
4	0.000000	18.000000	4.479179	S	ADP
IMF	0.000000	5.000000	0.261000		

Figura 5.20. Ventana de datos del sistema óptico DPIV en OSLO

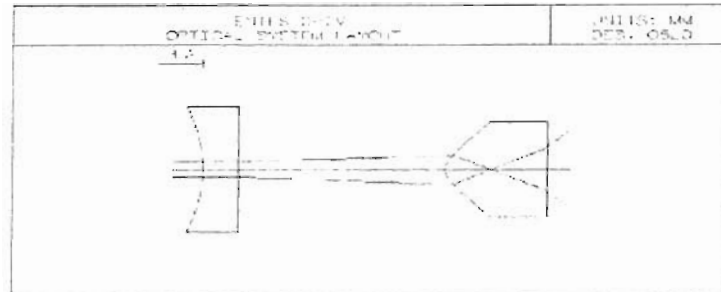


Figura 5.21. Simulación de las 2 lentes utilizadas en el sistema DPIV

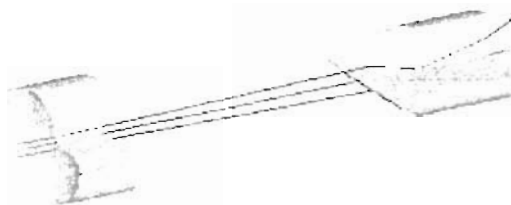


Figura 5.22. Simulación de las 2 lentes utilizadas en el sistema DPIV en 3D



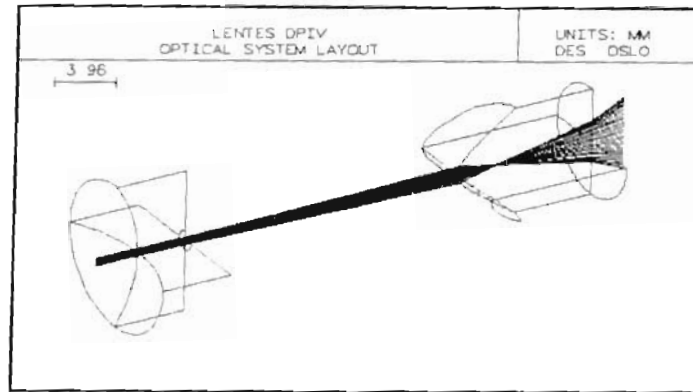


Figura 5.23. Representación gráfica del comportamiento de los rayos incidentes sobre las 2 lentes en el sistema DPIV

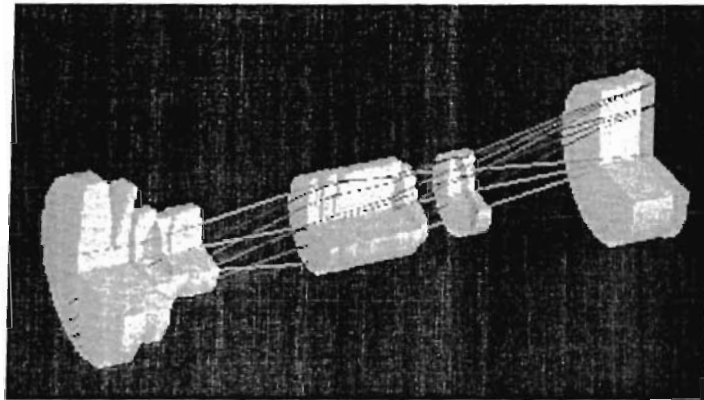


Figura 5.24. Ejemplo de un sistema más complejo de lentes realizado en OSLO

### 5.2.2. CODE V

Los asociados ópticos de la investigación (ORA) crearon el programa CODE V nos familiarizamos con la versión 9.4. Desde su introducción mundial en 1975, CODE V ha sido instrumental en el desarrollo de sistemas ópticos avanzados. Se ha utilizado en el desarrollo de usos revolucionarios tales como el disco compacto. Los algoritmos de CODE V son una tecnología dominante y dominante en el diseño de las lentes microlitográficas que permiten la proyección de imagen de líneas ultra-finas en el ingrediente necesario de los chips de la computadora en la mejora de continuación de las velocidades de la computadora. El software de CODE V ha contribuido perceptiblemente a los avances tecnológicos importantes a través de una amplia gama de campos tales como exhibiciones de la proyección, instrumentación médica, tecnología militar avanzada, y exploración del espacio. CODE V tienen las siguientes capacidades para el análisis: Muchas opciones de diagnóstico de la evaluación (aberración transversal del rayo o curvas de OPD). Muchos geométricos y la difracción basaron opciones de la evaluación de la imagen (los diagramas de punto y MTF). Trazo no secuencial del rayo. Propagación general del haz de la

difracción, Coherencia parcial para el análisis de imágenes en 1-D y 2-D. Eficacia del acoplador de la fibra. Análisis de la iluminación, etc.

Para un análisis especializado, CODE V proporciona Macro-PLUSTM- un lenguaje de programación de gran alcance incluye la ayuda de funciones matemáticas avanzadas como la transformada rápida de Fourier (FFT) y el acceso de base de datos a una amplia gama de datos calculados[20][86].

#### 5.2.2.1. Tareas típicas de CODE V

CODE V se puede utilizar para muchos propósitos. Aquí están algunas tareas típicas. Evaluar y adaptar un diseño óptico existente para la conveniencia en un nuevo uso, o reducir costes de la fabricación. Los plásticos, las esferas, o los componentes disponibles se pudieron evaluar en tal reajuste. Crear un nuevo diseño basado en los requisitos para un producto o un uso específico. Elaborar un diseño óptico para la fabricación a través de análisis de la tolerancia, de dibujos de la fabricación, e incluso de la exportación de IGES (CAD). ¿Cuáles son los usos? En amplios términos, hay tres áreas de aplicación:

- sistemas de formación de imágenes
- sistemas de telecomunicaciones y fónicos
- Iluminación y otros sistemas

Históricamente, el 80% o más han usado CODE V ha estado probablemente en la imagen que formaba la categoría, que es muy amplia. Los ejemplos incluyen las cámaras fotográficas, lentes de acercamiento, sistemas de discos ópticos, sistemas médicos, telescopios, espectroscopios, copiadoras, proyectores, exploradores, sistemas del microlitográficos, y muchos usos aeroespaciales, militares y civiles.

Aunque estos usos han existido por muchos años, el nuevo trabajo continúa siendo hecho como tecnología avanzada. Las cámaras se convierten en cámaras fotográficas digitales, CDs llevan a DVDs, etcétera. El campo de la fotonica ha estado creciendo mucho en años recientes, mientras que la iluminación y otros sistemas son un segmento significativo debido a la gran flexibilidad de CODE V

#### 5.2.2.2. Ventanas de CODE V

Como la mayoría de los software basados en ventanas, CODE V tiene una ventana principal la cual contiene otras ventanas y controles. Con pocas excepciones, todas las ventanas y otros elementos se pueden mover, volver a clasificar según el tamaño, y modificar para requisitos particulares para satisfacer sus necesidades y gusto. A continuación una figura del tipo de ventanas que maneja CODE V.

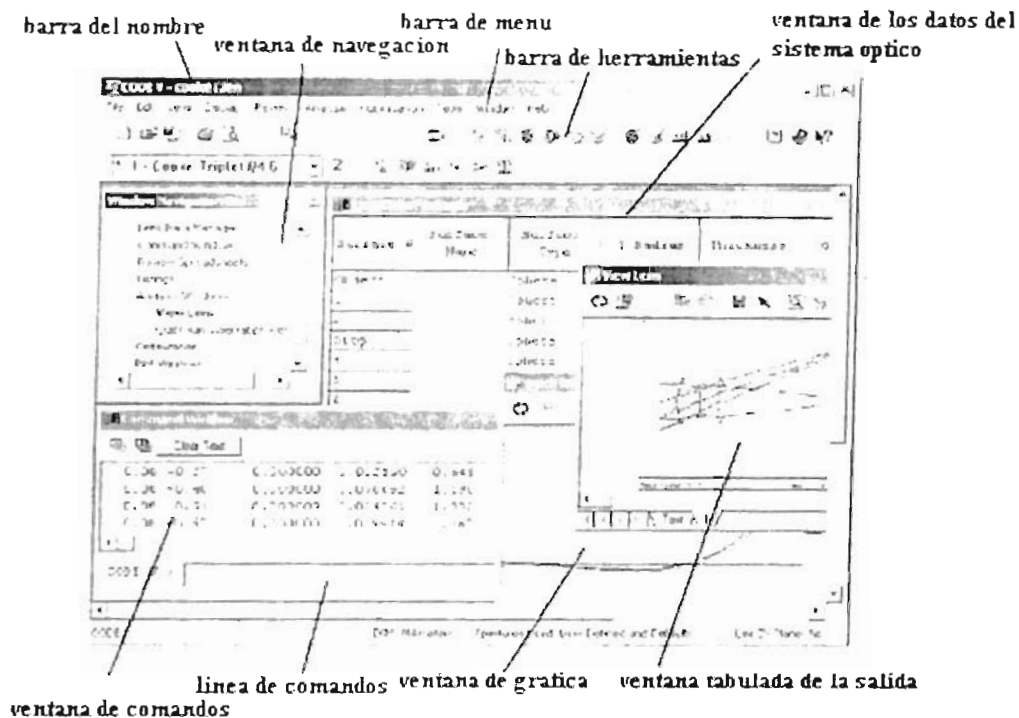


Figura 5.25. Ventanas de CODE V

**Nombre del archivo de la lente** - nombre del archivo actual de la lente.

**Ventana de navegaci3n** - proporciona una manera de no perder de vista todas las ventanas que usted est1 trabajando con esta barra de la navegaci3n puede ser localizado un documento a lo largo de un borde de la ventana de CODE V.

**Barra de men1** - contiene la mayor1a de las funciones del programa. Usted puede agregar art1culos de men1 adicionales.

**Barra de herramientas** - atajos de un Solo-tecleo para muchas funciones comunes. Colocar el indicador de rat3n sobre una herramienta para ver un mensaje descriptivo de la herramienta. Usted puede mover la barra de herramientas alrededor arrastr1ndolos con el rat3n. Usted puede tambi3n modificar contenido de la barra de herramientas con las herramientas - modificar el di1logo para requisitos particulares.

**Ventana de los datos 3pticos del sistema (LDM)** - esta ventana muestra los datos primarios de la lente. Como son espesor, radio, distancia entre las lentes, etc.

**Ventana del comando** - la ventana del comando para todo el texto basado en salida del sistema, y el espacio de trabajo principal para los resultados que entran y los comandos que pueden ser utilizados.

**Ordenar la línea de la entrada** - parte de la ventana del comando, éste es el lugar es para mecanografiar comandos del programa si usted desea utilizarlos (los comandos y las operaciones que se integran el CODE V - usted puede utilizar cualquier método en cualquier momento).

**Ventana de gráfica** - los gráficos que son generados por operaciones de comando o por macros se crean en ventanas dedicadas a graficar. Usted puede tener hasta 100 tales ventanas, aunque 3 o 4 es más comunes.

**Ventana tabulada de la salida** - los cálculos especializados tales como MTF son llamados opcionales en CODE V pueden ser modificados por la barra de menú, cada opción tiene su propia ventana de salida al tabulador tienen muchas características especiales y útiles.

### 5.2.2.3. Gráficos de CODE V

CODE V al igual que OSLO nos proporciona una gama diversa de lentes su panel es semejante a OSLO aunque nos proporciona mayor información acerca de la simulación de los lentes que utilizamos para el DPIV a continuación se muestran las lentes simuladas en CODE V en las figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30.

Surface #	Surface Name	Surface Type	Z Radius	Y Radius	Thickness	Glass	Reflect. Mode	Focal Length
1	Object	Sphere	Infinity	Infinity	Infinity		Transparent	
2		Sphere	21.0000	Infinity	5.0000	ATF	Reflect	6.2605
3		Sphere	11.0000	6.0000	10.0000	STG_GLASS	Reflect	4.2400
4		Sphere	Infinity	Infinity	2.0000	ATF	Transparent	3.6000
5		Sphere	9.0000	8.0000	10.0000	STG_GLASS	Reflect	3.7471
6		Sphere	Infinity	Infinity	10.0000	ATF	Transparent	2.2247
Stop		Sphere	Infinity	Infinity	0.0000		Transparent	1.0000
Image		Sphere	Infinity	Infinity	0.0000		Transparent	1.5625

Figura 5.26. Ventanas de datos del sistema óptico DPIV en CODE V

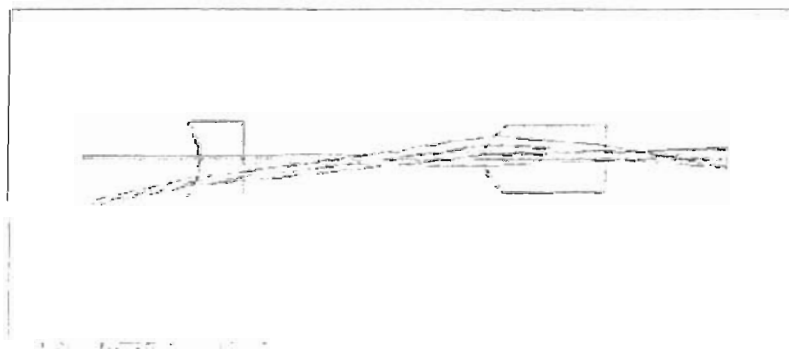


Figura 5.27. Representación gráfica de sistema de lentes DPIV en CODE V

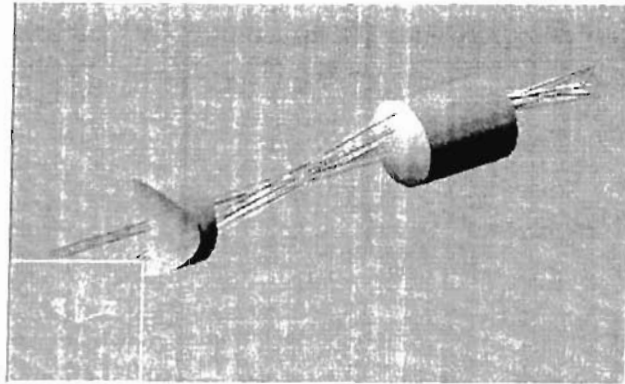


Figura 5.28. Representación del sistema de lentes DPIV en 3D

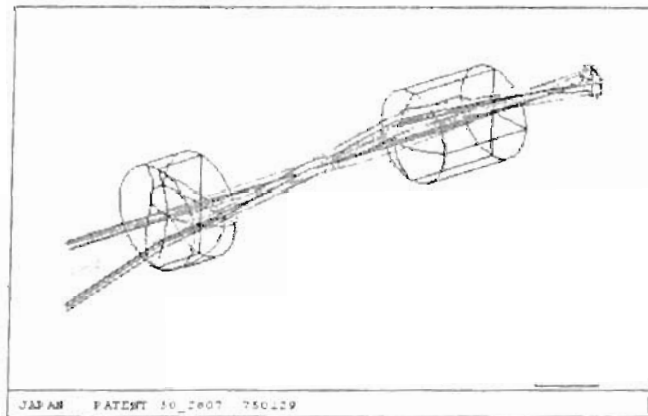


Figura 5.29. Visualización gráfica del comportamiento de los rayos de incidencia en el interior de las 2 lentes

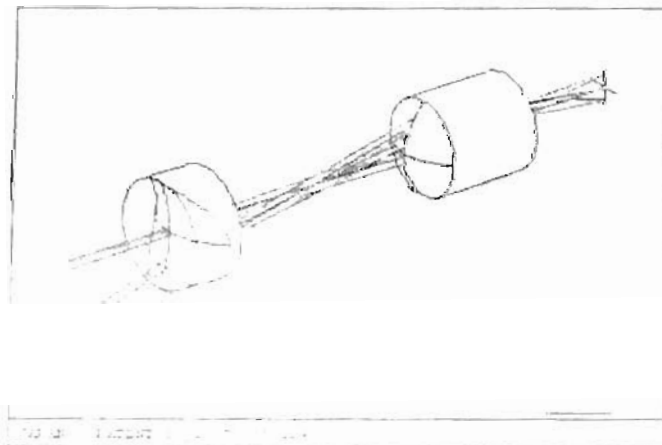


Figura 5.30. Visualización gráfica de diferentes tipos de ángulos de incidencia sobre el sistema DPIV y sus posibles salidas

## CAPITULO VI SOFTWARE

### 6.1. LabVIEW

El procesamiento de imágenes digitales está llegando a ser rápidamente popular entre muchas en usos científicos y aplicaciones en la ingeniería. La facilidad de la programación de LabVIEW y de las muchas funciones de proceso de imagen incorporadas en VISION-IMAQ permite la puesta en práctica de los algoritmos simples y eficientes para el procesamiento de las imágenes digitales.

Las imágenes son una manera de la grabación e información de la presentación en una forma visual. Así, las imágenes se pueden pensar en cuadros, no obstante en el sentido más amplio una imagen puede corresponder a cualquier clase de datos de dos dimensiones. El procesamiento de imágenes Digitales refiere a las imágenes que son manipuladas por los medios digitales, lo más comúnmente posible computadoras. La forma naturalmente que ocurre de imágenes no es conveniente para procesar con las computadoras, pues las computadoras no pueden funcionar directamente en datos ilustrados sino que requieren datos numéricos. Por lo tanto las imágenes necesitan ser convertidas en los datos numéricos, designados por imágenes digitales, para permitir la manipulación en la computadora.

Una imagen digital corresponde a un arreglo de números verdaderos o complejos representados por un número finito de bits, demostrando la información visual en una forma discreta. Aunque en algunos casos las imágenes digitales se pudieron sintetizar directamente en forma discreta, se traducen lo más comúnmente posible de una imagen física. La traducción de una imagen física en una forma digital apropiada es lograda por un convertidor análogo-digital(ADC) que realiza el muestreo y la cuantización.

El muestreo es el proceso de medir el valor de la imagen física en los intervalos discretos en espacio. Cada muestra de la imagen corresponde a una región pequeña de la imagen física, y se llama *un elemento de imagen*, o *pixel*. El proceso del muestreo se demuestra en la figura 6.1 Una imagen digital corresponde así a un arreglo de dos dimensiones de píxeles.

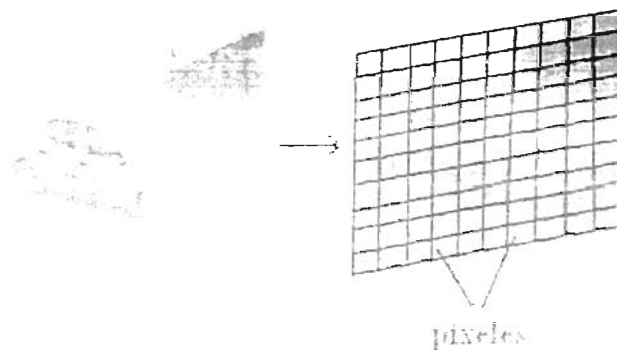


Figura 6.1. Conversión de imagen física a un arreglo de 2 dimensiones

Comúnmente es poner en un índice de los píxeles de la imagen digital por coordenadas  $X$  y  $Y$  con la esquina izquierda superior tomado como origen, con  $X$  y  $Y$  como valores enteros. Como se muestra en la figura 6.2.



**Figura 6.2.** Conversión de la imagen a un sistema de coordenadas

Los índices horizontales y verticales del muestreo, así el número de píxeles en la dirección horizontal y vertical, dan las dimensiones de píxeles de la imagen. Una imagen digital construida por 640 muestras en la dirección horizontal y 480 muestras en la dirección vertical se refiere como una imagen de 640 x 480. Una dimensión del píxel de la imagen de 640 x 480 es el estándar video de la difusión común. Las cámaras Digitales producen directamente las imágenes digitales donde la dimensión de la imagen se puede fijar generalmente por el usuario, tal como 1024 x 768, 1280 x 1024, etc.

El tamaño físico de un píxel en una imagen es definido como resolución espacial. La resolución espacial de una imagen se expresa comúnmente en términos de punto por pulgada (dpi) o píxel por pulgada (ppi). Para una región física fija de la imagen, el muestreo denso dará lugar a una imagen de alta resolución con una gran cantidad de píxeles cada uno contribuye una parte pequeña de la escena, mientras que el muestreo dará lugar a una imagen con un número pequeño de píxeles contribuye a una parte grande de la escena.

La relación entre las dimensiones físicas de la imagen, las dimensiones del píxel de la imagen y la resolución espacial es de la siguiente: Las dimensiones del píxel de una imagen pueden ser obtenidas multiplicándose respectivamente la anchura y la altura físicas de la imagen por la resolución. Por ejemplo una imagen de 10"x 12" con un dpi de 300 dará lugar a una imagen digital de las dimensiones 3000 x 3600 píxeles[26][87].

$$\text{Dimensiones del píxel} = \text{dimensiones físicas} \times \text{resolución}$$

### 6.1.1. Dominio de la Frecuencia

Las imágenes exhibidas tienen variaciones de brillo o de color en espacio, y por lo tanto se definen en el dominio espacial. Varias técnicas de proceso de imagen se ocupan de imágenes en el dominio espacial y algunas la manipulación de imágenes con operaciones del punto u operaciones espaciales. Una representación alternativa del contenido de la imagen está disponible en el dominio de la frecuencia, el cual se representa como el contenido de la imagen basó en las frecuencias de la variación del brillo o del color. Es

posible convertir una imagen del dominio espacial al dominio de la frecuencia, y viceversa, sin ninguna pérdida de información. Además es posible procesar una imagen en el dominio de la frecuencia manipulando su espectro de la frecuencia.

Observar eso cuando hablamos del dominio de la frecuencia de imágenes, en la frecuencia espacial esto no es considerado en la relación del tiempo-frecuencia de señales que varían en el tiempo. Mientras que las imágenes se pueden considerar como funciones del brillo o del color en el espacio, es decir direcciones espaciales horizontales y verticales, la frecuencia espacial es característica por el paso del cambio de los valores del brillo o del color para cierta distancia espacial. Los cambios periódicos asumidos de los valores de la imagen, por la definición, frecuencia espacial refiere a lo contrario de la periodicidad con la cual los valores de la imagen cambian. Las características de la imagen que demuestran un gran cambio sobre una distancia espacial corta, tal como bordes, corresponderán al alto contenido espacial de la frecuencia, mientras que las características de la imagen que son lisas y demuestran un cambio pequeño corresponde al contenido espacial bajo de la frecuencia.

### 6.1.2. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es de importancia fundamental en el procesamiento de imágenes digitales porque se utiliza para convertir una imagen del dominio espacial al dominio de la frecuencia (o Fourier). La transformada de Fourier descompone típicamente una imagen en componentes seno y coseno de diversas frecuencias. La transformada de Fourier produce una imagen en el dominio de Fourier, en la cual cada punto representa una frecuencia particular contenida dentro de la imagen.

Porque las imágenes digitales constituyen datos muestreados, se utiliza la transformada discreta de Fourier (DFT) y no la transformada de Fourier continua. La DFT corresponde a la transformada de Fourier de los muestreos y por lo tanto contiene solamente un sistema de muestras de la frecuencia bastante grande para describir completamente la imagen en el dominio espacial de modo que no se introduzca ninguna pérdida de la información por transformación. El número de las frecuencias requeridas para representar completamente una imagen es igual al número de píxeles en el dominio espacial. Así la imagen en el dominio espacial y el dominio de Fourier están del mismo tamaño. Porque las imágenes son función de dos dimensiones, se utiliza la transformada de Fourier de dos dimensiones.

La DFT bidimensional para una imagen cuadrada de tamaño  $N \times N$  es definida como

$$F(u, v) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left( \frac{xu}{N} + \frac{yv}{N} \right)} \quad (6.5)$$

El término exponencial constituye las funciones básicas del dominio de Fourier. La DFT puede ser interpretada como una suma de la multiplicación de los valores espaciales de la imagen con la función base correspondiente. Las funciones básicas son ondas senos y cosenos con incrementos de frecuencias así corresponde al componente DC y representa el brillo medio de la imagen. La frecuencia más alta es representada por la última componente



de Fourier. Note que la DFT produce una representación compleja, así una imagen real es representada en el dominio de la frecuencia en forma compleja es decir la representación del dominio de la frecuencia es una imagen compleja.

Mientras DFT transforma una imagen del dominio espacial al dominio de la frecuencia, también existe una transformada Fourier discreto inversa (IDFT) que convierte un sistema de los coeficientes de Fourier en una imagen. la IDFT se define como:

$$f(x, y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} F(u, v) e^{i \frac{2\pi}{N}(ux + vy)} \quad (106)$$

Para el proceso del dominio de la frecuencia de imágenes, la imagen se transforma inicialmente en el dominio de la frecuencia usando la DFT. Entonces la representación del dominio de la frecuencia de la imagen se manipula. Finalmente los valores manipulados de la frecuencia son transformados nuevamente dentro del dominio espacial por la IDFT. Observar que mientras que las manipulaciones realizadas en el dominio de la frecuencia pueden dar lugar a una pérdida de información, la transformada inversa de Fourier en sí misma no da lugar a cualquier pérdida de la información.

La complejidad del cómputo de la transformada de Fourier es reducida empleando la transformada rápida de Fourier (FFT). La FFT alcanza una considerable velocidad al hacer uso de la separación de la transformada de Fourier para separar la transformada de Fourier bidimensional en una transformada de Fourier unidimensional y permite el cómputo rápido de transformada de Fourier recurrentemente descomponiendo la transformada del Fourier en piezas uniformes e impares. Sin embargo en este caso el tamaño del cómputo y por lo tanto el tamaño de la imagen se restringe para ser una energía de dos: Así, puede ser que sea a veces necesario cosechar la imagen o rellenarla hacia fuera a las dimensiones apropiadas.

### 6.1.3. Representación del dominio de la frecuencia de imágenes

La transformada de Fourier de una imagen produce una imagen compleja. La representación del dominio de la frecuencia de una imagen se puede establecer usando las partes reales e imaginarias de la imagen compleja, no obstante esta representación no es particularmente informativa. Por lo tanto es preferida comúnmente para representar la imagen compleja por la magnitud y los componentes de la fase que representan la transformada de Fourier de una imagen, la magnitud y la fase están dadas por:

$$|F(u, v)| = \sqrt{\text{Re}\{F(u, v)\}^2 + \text{Im}\{F(u, v)\}^2} \quad (107)$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{F(u, v)\}}{\text{Re}\{F(u, v)\}} \quad (108)$$

Mientras que se prefiere comúnmente para exhibir los espectros de imágenes también en la forma de imágenes, varios ajustes necesitan ser hechos para un resultado satisfactorio.

Usualmente el rango dinámico de las magnitudes de los coeficientes de Fourier son generalmente grandes para ser exhibidos directamente. Los coeficientes DC son grandes coeficientes y aunque es posible un escalamiento lineal la magnitud es tal que el coeficiente de DC. Corresponde al valor más grande del pixel (255 para las imágenes de 8-bits), el resto de los coeficientes son comparablemente más pequeño dando por resultado todos los coeficientes de Fourier excepto el valor de DC el cual aparece como negro. Por lo tanto comúnmente se emplea un mapeado logarítmico para realzar el contraste para la visualización. Es posible implementar un mapeado logarítmico del espectro de la magnitud dado por:

$$|F(u, v)|_{\log} = C \log [ |F(x, y)| + 1 ] \quad (109)$$

Donde el coeficiente  $C$  es elegido de modo que los valores que resultan ocupen el rango dinámico completo. Observar que antes del cómputo del logaritmo, los espectros de la magnitud están incrementados para asegurarse de que los coeficientes valorados originalmente en cero están traídos en el rango logarítmico mientras que el logaritmo de cero es indefinido.

El espectro de la fase por otra parte incluye valores en el rango. o. En este caso es preferible utilizar un mapeado lineal de los valores de la fase en el rango dinámico de la imagen usado para la exhibición (0 -255 para representaciones de 8-bits) como distribución uniforme de los valores de la fase se encuentran virtualmente.

Otro punto que tiene que ser tomado con cuidado es la localización de los componentes de la frecuencia después de la transformada de Fourier. Las rutinas de FFT dan lugar a las frecuencias bajas que se situarán en las esquinas del espectro de dos dimensiones resultante, mientras que los de alta frecuencia se agrupan en el centro. Para los propósitos de la visualización, sin embargo, se prefiere poner frecuencias bajas en el centro del espectro, mientras que los de alta frecuencia pueden ser localizados en el exterior. Para este propósito puede ser que sea requerido mover de un tirón los cuadrantes del espectro para producir una representación simétrica central de las frecuencias espaciales.

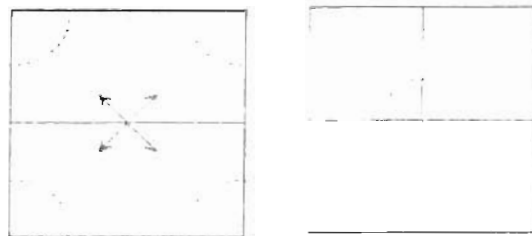
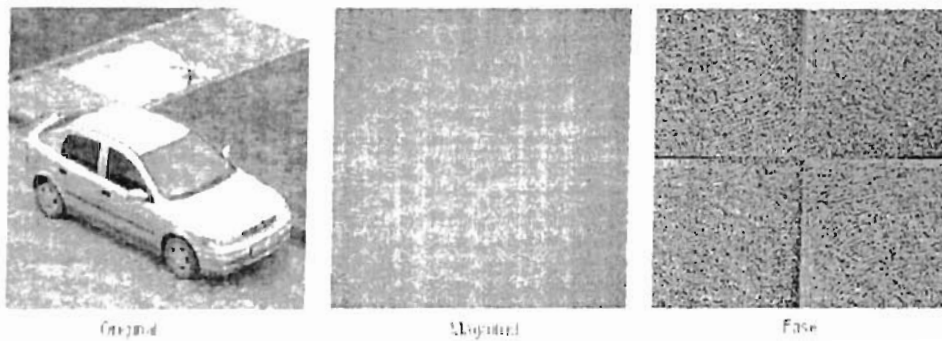


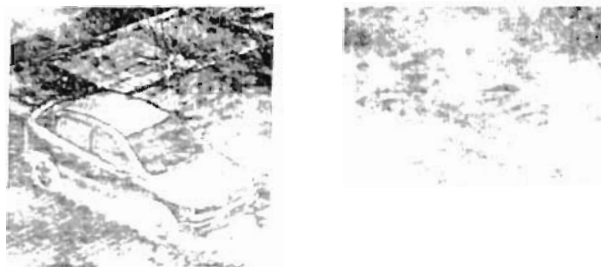
Figura 6.3. Se mueven los cuadrantes para juntar las frecuencias bajas en el centro del espectro.

La figura 6.3 demuestra un ejemplo de la representación del dominio de la frecuencia de una imagen. Se transforma el espectro de la magnitud usando un mapeado logarítmico para utilizar el rango dinámico completa de la imagen 8-bit. Partes más brillantes en el espectro indican amplitudes más altas de la frecuencia correspondiente. Los espectros son frecuencia baja centrada, así se ve que como frecuencia baja prevista los componentes tienen amplitud más alta. El espectro de la fase es mapeado linealmente tales que un valor de la fase de  $180^\circ$  es representado por el blanco y una fase  $-180^\circ$  es representada en negro



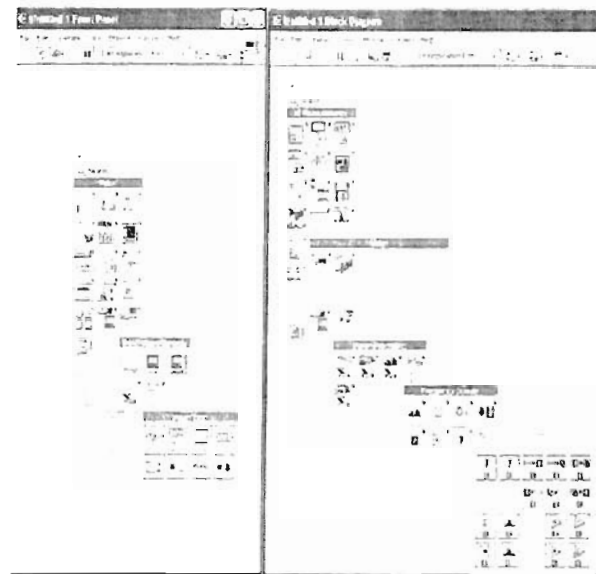
**Figura 6.4.** Representación del dominio de la frecuencia de una imagen a frecuencias bajas en las esquinas en el centro la magnitud de la imagen original FFT y la fase de FFT

Con los espectros de la magnitud y de la fase que es posible reconstruir la imagen espacial sin la pérdida de información usando la transformada inversa de Fourier. Aunque se parece de los espectros de la magnitud y de la fase de la imagen demostrada en la figura 4 como si la mayoría de la información se contenga en el plano de la magnitud, mientras que la mirada del plano de la fase tiene algo de ruido, éste no es el caso. La figura 5 demuestra las imágenes espaciales reconstruidas para el caso de la información destruida de la magnitud por fase conservada, y el caso de la información destruida de la fase por magnitud conservada. Se ve claramente que destruir la información de la magnitud da lugar solamente a cambios del brillo mientras que la información visible sigue siendo comprensible, mientras que destruir la información de la fase da lugar a un resultado totalmente sin sentido.



**Figura 6.5.** La reconstrucción de la imagen de espectros la información de la fase codifica la localización de las características de la imagen y la interrupción de la información de la fase trastorna la coherencia espacial de la imagen. Por lo tanto la mayoría de los usos del proceso de imagen se refieren solamente a la manipulación del espectro de la magnitud mientras que consisten con la información de la fase.

Para el desarrollo del sistema se utilizó LabVIEW en la versión 7.1 debido a la rápida implementación de los algoritmos de procesamiento, es decir, se tiene una alternativa relativamente sencilla y de fácil uso en la elaboración de aplicaciones. En la figura se muestran los paneles donde el gris representa la parte donde van los controles y donde se observaran las fotos, en el panel blanco es donde se realizó el algoritmo de la correlación cruzada como se puede apreciar los 2 paneles cuentan con diversas funciones para el procesamiento de las imágenes digitales



**Figura 6.6.** Paneles de control de LABVIEW 7.1

#### 6.1.4. Instalación de un Sistema de Proyección de imagen

Antes de que usted adquiera, analice, y procese imágenes, usted debe instalar su sistema de proyección de imagen. La manera de la cual usted instala su sistema depende de su ambiente de proyección de imagen y el tipo de análisis y de proceso que necesita hacer. Su sistema de proyección de imagen debe producir imágenes con alta calidad de modo que usted pueda extraer la información que necesite de las imágenes. Complete los pasos siguientes para instalar su sistema de proyección de imagen.

- I. Determinar el tipo de equipo que usted necesita y el tamaño del objeto que usted necesita examinar
  - a. Cerciorarse de que su sensor de la cámara sea bastante grande satisfacer su requisito mínimo de la resolución.
  - b. Cerciorarse de que su lente tenga una profundidad del campo alta para guardar todos los objetos en foco sin importar su distancia de la lente. También, cerciorarse de que su lente tenga una longitud focal que reúna a sus necesidades.
  - c. Cerciorarse de que su iluminación primaria sea bastante contrastante entre oponerse bajo la inspección y fondo para que usted extraiga información que usted necesita de la imagen.

2. Coloque su cámara de modo que sea paralela al objeto bajo inspección. Si su cámara adquiere las imágenes del objeto de un ángulo, los errores de la perspectiva ocurren. Mientras que usted puede compensar para estos errores con software, utilice un ángulo paralelo de la inspección para obtener la mayoría de resultados exactos.
3. Seleccione un dispositivo de adquisición de imagen que resuelva sus necesidades.
4. Configure el software para su dispositivo de adquisición de imagen. Si usted tiene un dispositivo de IMAQ, configure su driver de NI-IMAQ a través de MAX.

### 6.1.5. Calibración del Sistema de Proyección de imagen

Después de que usted instale su sistema de proyección de imagen, usted puede calibrar su sistema para asignar coordenadas reales a coordenadas del píxel y compensar para la perspectiva y los errores no lineales inherentes en su sistema de proyección de imagen. Los errores de la perspectiva ocurren cuando su eje de la cámara no es perpendicular a objeto bajo inspección. La distorsión no lineal puede ocurrir de aberraciones en la lente de cámara. Los errores de la perspectiva y las aberraciones de la lente causan imágenes torcidas. Esta distorsión desplaza la información en una imagen, pero la no destruye necesariamente la información en la imagen.

## 6.2. IMAQ

NI-IMAQ es un sistema de funciones que controla los dispositivos de National Instruments para la adquisición de la imagen y la sincronización en tiempo real de la integración de sistema (RTSI). NI-IMAQ contiene los métodos para realizar las tareas que se extienden de la iniciación del dispositivo a la adquisición de alta velocidad de la imagen.

NI-IMAQ tiene las funciones de alto nivel de E/S para la facilidad de empleo máxima y funciones bajas de E/S para la flexibilidad y el funcionamiento máximos.

Los ejemplos de funciones de alto nivel toman fotografías en instantes o graban un tiempo definido para la adquisición de la imagen. Los ejemplos de funciones bajas son disposición de almacenamiento y configuración del vídeo.

NI-IMAQ realiza el funcionamiento de los dispositivos de National Instruments IMAQ porque deja los múltiples dispositivos funcionar en su funcionamiento máximo. NI-IMAQ incluye un almacenador que deja simultáneamente adquirir y procesar datos. NI-IMAQ utiliza el acceso directo de memoria (acceso directo de memoria) para transferir todos los datos.

### 6.2.1. Las librerías de NI-IMAQ

NI-IMAQ para las bibliotecas de la función de Windows 2000/NT/XP/Me/98 son librerías acoplamiento dinámico (DLLs), que significa que las rutinas de NI-IMAQ no están ligadas en los ficheros ejecutables de usos. Solamente la información sobre las rutinas NI-IMAQ de importación NI-IMAQ se almacenan en los ficheros ejecutables. Las bibliotecas de la importación contienen la información sobre sus funciones DLL-EXPORTADAS, indicando

la presencia y la localización de las rutinas DLL. Dependiendo de las herramientas de desarrollo que usted utiliza, usted pueden dar a las rutinas del DLL la información a través de bibliotecas de la importación o con declaraciones de la función. A continuación una descripción breve de las funciones NI-IMAQ[23]

Las funciones NI-IMAQ se agrupan según las clases siguientes:

- Funciones genéricas
  
- Funciones de alto nivel
  - Funciones de control de la cámara
  - Funciones rápidas de captura de imágenes
  - Funciones de grabado de imágenes
  - Funciones de secuencia
  - Funciones de señales E/S
  - Funciones misceláneas
  
- Funciones de bajo nivel
  - Funciones de adquisición
  - Funciones de atributos
  - Funciones del manejo del buffer
  - Funciones de interfaz
  - Funciones para uso general
  - Funciones de comunicación serial

Las funciones genéricas y de alto nivel aparecen dentro de cada clase de la función en orden lógico que usted puede ser que necesite para utilizarlas. Las funciones bajas aparecen dentro de cada clase de la función en orden alfabético.

#### **\*Funciones Genéricas**

Utiliza las funciones genéricas en aplicaciones con funciones de alto y bajo nivel para realizar las tareas siguientes:

- Instalar la interfaz y la sesión.
- Cerrar la interfaz y la sesión.

#### **\*Funciones Del Alto-Nivel**

Utiliza las funciones de alto nivel capturar rápidamente y fácilmente imágenes. Si usted necesita una funcionalidad más avanzada, usted puede mezclar funciones de alto nivel con funciones de bajo nivel. El sistema de alto nivel de la función apoya cuatro tipos básicos de adquisición de la imagen:

- La adquisición rápida de la imagen
- El grabado de imágenes
- La secuencia de imágenes
- El ciclo de imágenes

La función de alto nivel `FindGrayscale` permite tomar las imágenes más simples y la generaliza en señales gráficas en las líneas del dispositivo. A continuación la explicación de estas funciones:

### **Funciones De Control De Cámara**

Las funciones de control de la cámara consiguen y fijan cualidades para específicas cámaras y controlan los modos de la cámara.

### **Funciones Rápidas de captura de imagen**

Las funciones rápidas capturan todo o una porción del marco o la imagen para ser utilizada en el buffer.

### **Funciones de grabado de imágenes**

Las funciones de grabado de imágenes comienzan una adquisición continua de la imagen a un buffer. Cualquier marco o imagen se puede copiar del buffer de grabado de imágenes a cualquier otro buffer.

### **Funciones de secuencia**

Las funciones de secuencia comienzan y paran una adquisición continua de campos múltiples o de marcos.

### **Funciones De Señales E/S**

Las funciones de E/S controlan las líneas del disparador en los dispositivos de IMAQ.

### **Funciones Misceláneas**

Las funciones misceláneas fijan y consiguen la ventana de adquisición de la región de interés y regresa la información como sesión de estado y tamaño del buffer.

### **\*Funciones de bajo nivel**

Se Utilizan las funciones bajas cuando se requiere un control más directo del hardware.

El sistema bajo de la función apoya todos los tipos de adquisición. Utilizar las funciones bajas para realizar las tareas siguientes:

- Crear una secuencia o un ciclo de adquisición.
- Crear y manejar los buffers.
- Fijar las cualidades de la sesión y de la interfaz para ajustar calidad y tamaño de la imagen.
- Comenzar una adquisición síncrona o asincrónica.
- Extraer los buffers fuera de una adquisición viva para el análisis.

A continuación la explicación de estas funciones:

### **Funciones De Adquisición**

Se Utilizan las funciones de adquisición para configurar, para comenzar, y para abortar una adquisición de la imagen, o examinar un buffer durante una adquisición.

### **Funciones de atributos**

Utilizar las funciones de atributos se utilizan para examinar y para cambiar atributos de NI-IMAQ o de la cámara.

### **Funciones del manejo del buffer**

Se Utilizan las funciones del manejo del buffer para instalar objetos tales como listas y buffers.

### **Funciones de interfaz**

Las funciones de interfaz cargan y controlan el dispositivo seleccionado de IMAQ y cámaras. Estas funciones utilizan la información almacenada por el explorador de medida y de automatización (MAX). Se Utilizan las funciones de la interfaz para preguntar el número de interfaces disponibles, establecer una conexión, controlar el acceso, e inicializar el hardware. Todos los parámetros configurados en MAX para un dispositivo de IMAQ son asociados con un nombre de interfaz. Usted puede tener un dispositivo asociado a más de una interfaz conocida, que permite que usted tenga varias diversas configuraciones para un dispositivo. Usted utiliza el nombre de la interfaz para referirse al dispositivo en el ambiente de programación. Interconectar la información conocida se almacena en un archivo de la interfaz (iid) e incluye el número de serie del dispositivo, el archivo de la cámara asociado a cada canal en el dispositivo, y el canal del defecto. NI-IMAQ especifica todos las interfaces por un nombre.

### **Funciones Para uso general**

Utilizar las funciones para uso general para exhibir una imagen en una ventana, una imagen guardada en un archivo, o conseguir la información de error detallado.

## **6.2.2. Programación con NI-IMAQ VIs**

LabVIEW es un ambiente del desarrollo basado en la programación gráfica. En contraste con el texto basado en lenguajes de programación, donde las instrucciones determinan la ejecución de programa, LabVIEW utiliza el flujo de datos programado, donde el flujo de datos determina la ejecución. La Librería de NI-IMAQ, una serie de instrumentos virtuales (VIs) para usar LabVIEW con su dispositivo de IMAQ, se incluye con el software NI-IMAQ.

IMAQ-VISION para LabVIEW es una librería para el procesamiento y análisis de una imagen que consiste en más de 250 VIs. Algunos de estos VIs básicos de IMAQ-VISION se comparte con NI-IMAQ. Si usted utiliza estas funciones básicas, usted puede más adelante aumentar sus programas para utilizar IMAQ-VISION sin ningún cambio al VI de la adquisición de la imagen.

Antes de que usted comience a construir su aplicación en IMAQ, usted debe ser familiar con el NI-IMAQ básico con los siguientes pasos:

- Localización de los ejemplos NI-IMAQ
- Localización de VIs NI-IMAQ en LabVIEW
- Parámetros comunes de NI-IMAQ
- Manejo del buffer
- Tipos de la adquisición de NI-IMAQ
- VIs la Adquisición

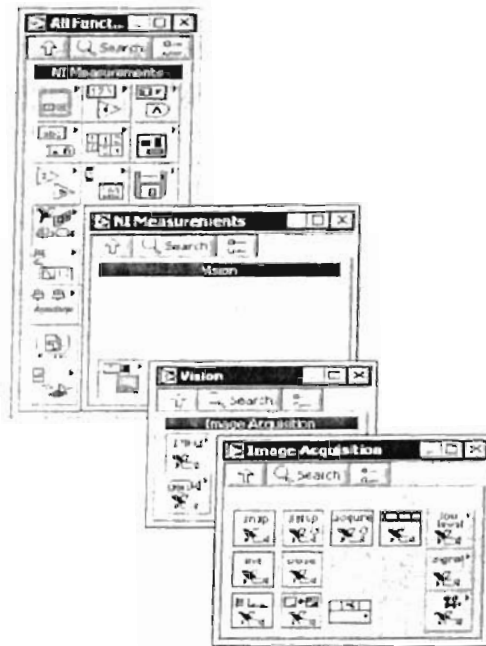


- Configuración del disparador
- Exhibición De la Imagen
- Atributos de la cámara

### 6.2.3. Localización de los ejemplos de NI-IMAQ

Los ejemplos de VI de NI-IMAQ se ilustran comúnmente como aplicaciones. Usted puede encontrar estos ejemplos en `labview\examples\imaq` en el directorio para LabVIEW. Para una breve descripción de cualquier ejemplo, abrir el ejemplo VI y elija **File»VI Info»Documentation Location of the NI-IMAQ Vis.**usted puede encontrar VIs de NI-IMAQ en la paleta de **functions** de su diagrama de bloque de LabVIEW.

En LabVIEW 7.0 y más adelante, seleccionar el icono **NI Measurements**, seleccionar la icono **Visión**, y después seleccionar el icono **Image Acquisition**, según lo demostrado en la figura 6.7.



**Figura 6.7.** Paleta de funciones de LabVIEW 7.0 con la paleta de IMAQ más comúnmente se utilizan los VIs IMAQ estos están en la paleta de **Image Acquisition**.

Usted puede encontrar los VIs para adquisiciones básicas y cambiar atributos. El icono **Image Acquisition»IMAQ Low Level** contiene VIs para usos más avanzados. El icono **Image Acquisition»IMAQ Signal IO** contiene los VIs para usar disparadores y la generación de pulso con los dispositivos de IMAQ. El icono **Image Acquisition»IMAQ Camera Control** contiene los VIs para controlar atributos específicos cualidades de la cámara y comandos seriales.

#### 6.2.4. Parámetros Comunes NI-IMAQ VI

**IMAQ Session** es un identificador único que especifica el archivo de la interfaz usada para la adquisición. Este identificador es producido por el IMAQ Init VI y utilizado como entrada al resto del VIs NI-IMAQ. NI-IMAQ usa **Session Out**, que idéntica a **IMAQ Session**, para simplificar la programación del flujo de datos. Si **la región de interés** no se define, se captura la ventana de adquisición de la imagen completa. Usted configura la adquisición de la ventana usando a **MAX**. Los VIs de adquisición usan **Step x** y **Step y** entradas para especificar un paso horizontal y vertical del muestreo. El paso de muestreo causa una reducción en la resolución espacial. **IMAQ Session Out** es similar a las sesiones duplicadas del archivo proporcionadas por los archivos VIs de E/S. La adquisición para VIs de alto nivel — IMAQ Snap, IMAQ Grab Setup, e IMAQ Sequence — requieren una entrada de **IMAQ Session In** solamente si usted está utilizando una interfaz con excepción del `img0`, si usted está utilizando los dispositivos múltiples, o si usted necesita fijar características de IMAQ antes de la adquisición.

Mucho VIs de adquisición requiere que usted provea un buffer de la imagen para recibir la imagen capturada. Usted puede crear este buffer de la imagen con el VI **IMAQ create**. La entrada que recibe el buffer de la imagen es **image in**. **image out** regresa a su salida la imagen capturada.

El uso de VIs para la adquisición de **la región de interés** como entrada se especificar como una porción rectangular de un marco de la imagen que se capturará. Usted puede utilizar **la región del interés** para reducir el tamaño de la imagen que usted desea capturar. **la región de interés** es un arreglo de cuatro

#### 6.2.5. Manejo del buffer

**IMAQ create** e **IMAQ dispose** manejan el buffer de la imagen en LabVIEW. **IMAQ create**, demostrado en la figura 6.8, asignan un buffer de la imagen. **Image Name** es una etiqueta para el buffer creado. Cada buffer debe tener un único nombre. **Image Type** especifica el tipo de imagen que es creada. Utilizan **8 bits** para las imágenes monocromáticas de 8-bits, **16 bits** para 10 -, 12 -, y las imágenes monocromáticas de 14 bits, **RGB** para las imágenes del color del RGB, y **HSL** para las imágenes del color de HSL.

**New image** contiene la información sobre el buffer, que es inicialmente vacío. Cuando usted conecta con alambre **New image** a la entrada **Image in** de un VI de adquisición de imagen, el VI de adquisición de imagen asigna la cantidad correcta de memoria para la adquisición. Si usted va a procesar la imagen, usted puede ser que necesite conectar con un alambre a **Border Size**. **Border Size** es la anchura en los píxeles creados alrededor de una imagen. Algunas funciones de proceso de imagen, tales como etiquetado y morfología, requieren una frontera.

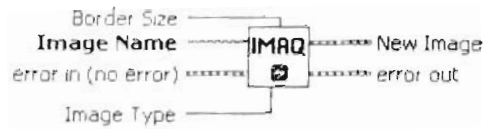


Figure 6.8. IMAQ Create

IMAQ Dispose, demostrado en la figura 6.9, libera la memoria asignada al buffer de la imagen. Llama este VI solamente después que la imagen ya fue procesada.



Figure 6.9. IMAQ Dispose

### 6.3. Tipos de Adquisición de NI-IMAQ

Cuatro tipos de adquisición de la imagen en NI-IMAQ están disponibles en LABVIEW—snap, grab, séquense y ring. Las secciones siguientes describen cada tipo de adquisición y ejemplos[24].

#### 6.3.1. Captura de imagen

Adquiere una sola imagen en el buffer de la memoria. Utiliza este modo de la adquisición para adquirir un solo marco o campo a un buffer. Cuando usted utiliza a snap, inicializa el dispositivo y adquiere el marco entrante (o el campo) a un buffer. Utilice snap para poca velocidad o una sola-captura. Utilice el VI IMAQ SNAP para las aplicaciones de snap. La figura 6.10 demuestra un diagrama a bloques simplificado para usar IMAQ SNAP



Figura 6.10. Adquirir una imagen usando IMAQ snap

#### 6.3.2. Grabación de imágenes

Es una adquisición continua, de alta velocidad de datos a un solo buffer en memoria del anfitrión. Esta función realiza una adquisición de líneas continuamente en un buffer.

Usted debe utilizar 2 VIs — IMAQ Grab Setup y IMAQ Grab Acquire—para grabar una adquisición en LabVIEW. IMAQ Grab Setup, que usted llama solamente una vez, inicializa la adquisición y comienza a capturar la imagen a un buffer interno del software. IMAQ Grab Acquire, que usted puede llamar en tiempos múltiples, copia la imagen almacenada actualmente en el buffer interno a un buffer G de la imagen. Immediate? es la entrada de IMAQ Grab Acquire, determina si ocurre la copia inmediatamente o si espera el espacio en blanco vertical siguiente. Si Immediate? es FALSE, IMAQ Grab espera la señal en blanco vertical siguiente y después transfiere la imagen del buffer interno al buffer

G de la imagen. Si **Immediate?** es VERDAD, IMAQ Grab transfiere inmediatamente la imagen del buffer interno al buffer de la imagen, que podría dar lugar a las porciones de la imagen que puede ser transferida siendo adquirida en diversos tiempos. Un uso típico para una transferencia inmediata es la adquisición de imágenes de objetos inmóviles. Después de que el programa acabe de copiar las imágenes, la llamada IMAQ Close una vez para cerrar la adquisición. La figura 6.11 demuestra un diagrama de bloque simplificado para usar IMAQ Grab Setup e IMAQ Grab Acquire. En este ejemplo, usted realiza una copia inmediata conectando la condición de VERDAD en **Immediate?** como entrada.

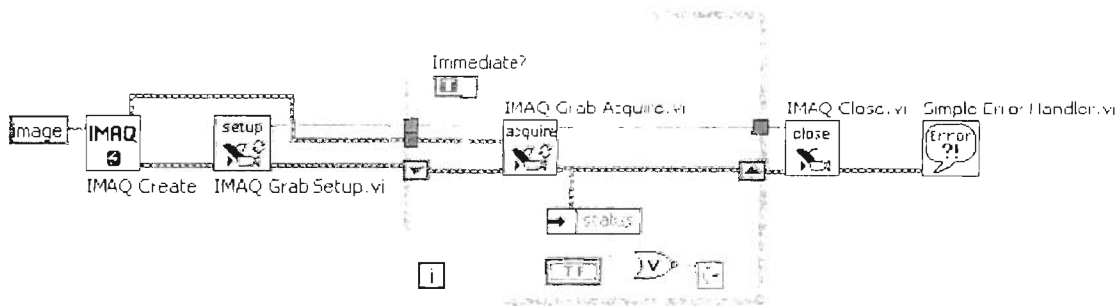


Figura 6.11. Adquirir Imágenes Usando el icono de IMAQ Grab

### 6.3.3. Secuencia

Una secuencia inicializa una longitud de variables y unos retrasos de variables para transferencia a buffers múltiples. Utilizar una secuencia para los usos que procesan imágenes múltiples. Usted puede configurar una secuencia para adquirir cada marco o para saltar a número variable de marcos entre cada imagen. Utilizar IMAQ Sequence para los usos de la secuencia. IMAQ Sequence comienza, adquiere, y lanza una adquisición en secuencia. La entrada **Skip Table** es un arreglo que contiene el número de marcos para saltar entre las imágenes. IMAQ Sequence no vuelve hasta que se adquiere la secuencia entera. La figura 6.12 demuestra un diagrama de bloque simplificado para usar IMAQ Sequence. El lugar IMAQ Create el interior del For Loop se crea un arreglo de las imágenes para la entrada **Image in** de IMAQ Sequence. **to decimal** y **concatenate** crean un nombre único para cada imagen en el arreglo.

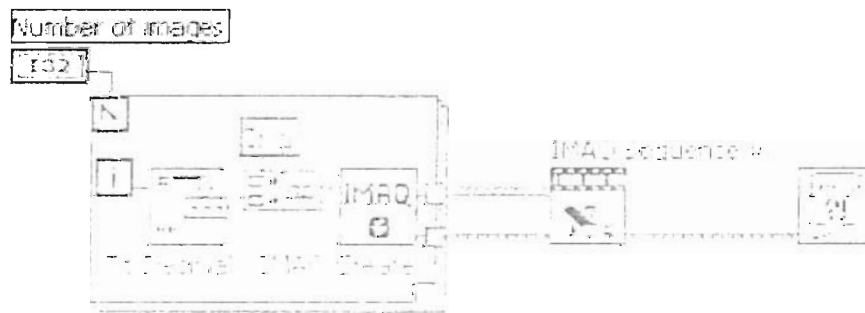


Figura 6.12. Adquirir Imágenes Usando el icono de IMAQ Sequence

### 6.3.4.Ciclo

Un ciclo inicia una adquisición de alta velocidad continua a los buffers múltiples. Se utiliza un ciclo para los usos de alta velocidad donde usted necesita realizar el proceso en cada imagen. Usted debe utilizar buffers múltiples porque los tiempos de transformación pueden variar, dependiendo de otros usos y los resultados del proceso. Usted puede encontrar un ejemplo de una adquisición en ciclo en `examples\imaq\IMAQ Level.IIb`.

Usted puede configurar un ciclo para adquirir cada marco o para saltar un número fijo de marco entre las adquisiciones. En LabVIEW, usted debe utilizar VIs de bajo nivel de NI-IMAQ para realizar un ciclo.

### 6.3.5. VIs de Adquisición

Existen Dos tipos de adquisición para VIs en LabVIEW —los de alto nivel y bajo nivel.

#### Alto-Nivel

Usted puede utilizar los VIs de alto nivel de adquisición para los usos básicos de la adquisición de la imagen. NI-IMAQ incluye VIs para snap, grab, y séquense. Usted puede encontrar ejemplos donde se utilizan los VIs de alto nivel de adquisición en `examples\imaq\IMAQ Level.IIb`.

#### Bajo-Nivel

Utilizan los VIs de bajo nivel de adquisición para usos más avanzados de la adquisición de la imagen, incluyendo adquisiciones en ciclo y adquisiciones a la memoria. Los VIs de bajo nivel configuran una adquisición, comienza una adquisición, recupera las imágenes adquiridas, y detiene una adquisición. Usted puede utilizar estos VIs conjuntamente con los VIs de acontecimiento para construir usos avanzados de IMAQ.

Complete los pasos siguientes para realizar una adquisición de bajo nivel:

1. Llamar IMAQ Init para inicializar el dispositivo y para crear **IMAQ Session**
2. Configurar la adquisición con IMAQ Configure List e IMAQ Configure Buffer. IMAQ Configure List configuran una lista de buffers que se utilizarán en una adquisición. La lista de buffers contiene un número específico de los buffers que contendrán las imágenes adquiridas. Los buffers se pueden almacenar en memoria de sistema.
3. Se llama IMAQ Configure Buffer una vez para cada buffer en la lista de buffers. El buffer contiene el canal por el cual se puede adquirir y el número de los marcos a saltar antes de adquirir en el buffer.
4. Después de configurar la lista de buffers y los buffers individuales, se llama a IMAQ Start para comenzar la adquisición asincrónicamente. IMAQ Start devuelve inmediatamente después que la adquisición ha comenzado.

5. Tener acceso a las imágenes adquiridas utilizando IMAQ Get Buffer o IMAQ Extract Buffer. IMAQ Get Buffer regresa las imágenes adquiridas de la lista del buffer y se utilizan normalmente para adquisiciones de captura de imágenes y secuencias de imágenes.

IMAQ Get Buffer espera a que el buffer haya adquirido la imagen para regresarla. Usted también puede utilizar este VI para volver todas las imágenes en la lista de buffers. IMAQ Get Buffer puede recuperar imágenes de una continua adquisición solamente si se ha parado la adquisición. IMAQ Extract Buffer extrae del buffer una adquisición continua y permiten la examinación de un buffer durante la adquisición. Este VI quita el buffer de adquisición. NI-IMAQ no escribe nuevos datos en el buffer hasta que este VI se llama otra vez. Se utiliza IMAQ Extract Buffer en ciclos de adquisiciones cuando usted debe procesar imágenes durante la adquisición. IMAQ Copy devuelve una copia de una imagen adquirida. IMAQ Copy permite que usted cree una copia de cualquier buffer en cualquier momento durante la adquisición.

6. Después de una adquisición, se cierran los recursos asociados a la adquisición con IMAQ Close. IMAQ Close detiene la adquisición si está en marcha. Si usted desea parar la adquisición de otro modo se utiliza IMAQ Stop. Los ejemplos de VIs de bajo nivel de adquisición se incluyen en `examples/imaq/IMAQ Low Level.llb`.

### 6.3.6. Disparador

Usted puede utilizar líneas del disparador en el dispositivo de IMAQ para ligar o para coordinar una acción o una función con los acontecimientos externos a la computadora, tal como recepción de un pulso del estroboscopio para la iluminación o de un pulso de un detector infrarrojo que indique la posición de un artículo respecto a una planta de fabricación. Un disparador en un dispositivo de IMAQ puede ser cualquier señal de nivel TTL. Todas las líneas del disparador son completamente bidireccionales de modo que el dispositivo pueda generar o recibir los disparadores en cualquier línea. La PCI-1407 tienen una línea externa del disparador. La figura 6.13 demuestra cómo utilizar IMAQ Configure Trigger para realizar una adquisición rápida basada en un disparador.

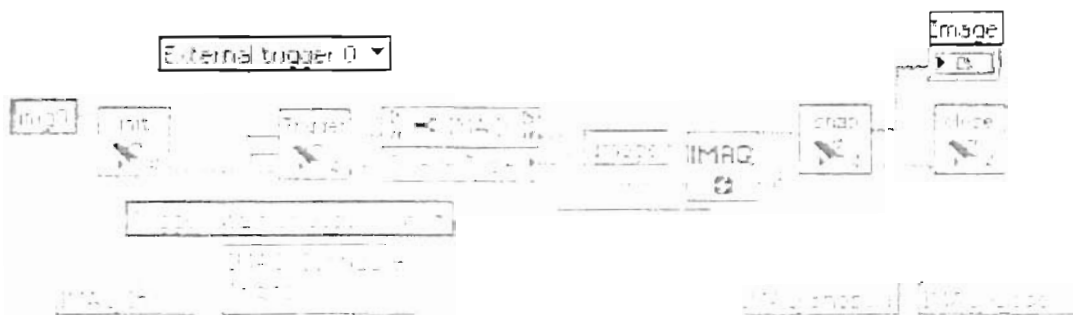


Figura 6.13. Configuración de un disparador usando librerías de IMAQ

### 6.3.7. Exhibición De la Imagen

Muchos usos de la adquisición de la imagen requieren que unas o más imágenes estén exhibidas. Usted tiene tres opciones para las imágenes se exhiban en LabVIEW. Si usted tiene LabVIEW 7.0 o más adelante, usted exhibe una imagen directamente en panel delantero usando Image Display control, que está disponible en la paleta de Vision Controls. Para exhibir una imagen en Image Display control, se pone el control de la imagen en el panel delantero de su VI. En el diagrama a bloques, se conecta con alambre **Image Out** de una adquisición VI a la terminal del control de Image Display. La figura 6.14 ilustra con un control de Image Display para exhibir una imagen. Para ver ejemplos usando Image Display en LabVIEW 7.0 y más adelante, seleccionar **Help»Find Examples**.

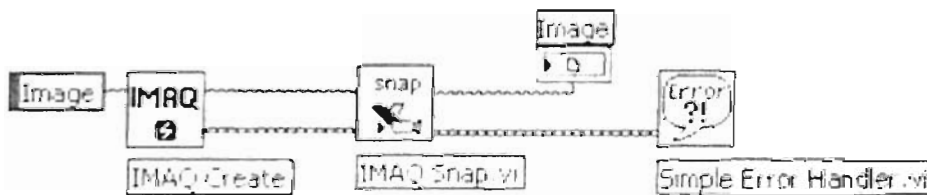


Figura 6.14. Exhibir una imagen usando un control de imagen

Si usted tiene IMAQ Vision 7 para LabVIEW, el proceso de imagen y el software del análisis para LabVIEW, usted puede exhibir una imagen en una ventana externa usando External Display en la paleta de External Display. IMAQ WindDraw, localizado en **Vision Utilities»Display**, exhibe una imagen en una ventana separada de la imagen. La figura 14 ilustra a IMAQ WindDraw para exhibir una imagen adquirida usando IMAQ Snap. Usted puede exhibir las imágenes de la misma manera usando cualquier tipo de la adquisición.

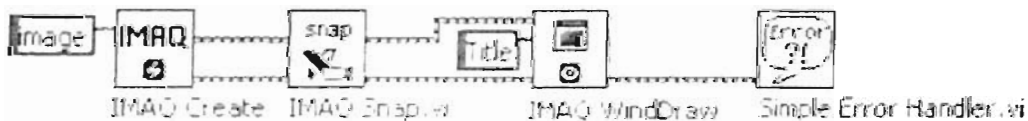


Figura 6.15. Exhibir una imagen usando IMAQ WindDraw

## 6.4. VISION

IMAQ-VISION para LabVIEW es una biblioteca de VIs de LabVIEW que se pueden utilizar para desarrollar machine vision programa utilizado en la industria que utiliza fotos para checar productividad en realización de piezas exactas, caducidades, lotes de productos comestibles, etc.) y usos científicos de la proyección de imagen.

La correlación se utiliza comúnmente para medir semejanzas entre las imágenes. Es posible utilizar la correlación para determinar la dislocación global entre dos imágenes de la misma muestra. Se utilizo la versión LabVIEW 7.1 con el uso de las librerías de IMAQ-VISION.

diseñamos un algoritmo para la captura de fotos por medio de la cámara CCD y la tarjeta NI-1407.

Ya que la tarjeta NI-1407 cuenta con un ADC las imágenes capturadas por el programa ya con imágenes digitales las medidas de muestras imágenes son de 640 x 480 píxeles. la tarjeta se inicializo por medio de IMAQ, donde especificamos el tipo de captura de forma continua o solo en instantes y cada cierto tiempo[5]

#### **6.4.1. Definición de una imagen de Digital**

Una imagen es un arreglo de dos dimensiones de valores que representan intensidad de luz. Para los propósitos del proceso de imagen, el termino imagen se refiere a una imagen digital. Una imagen es una función de la intensidad de luz  $f(x, y)$  donde está el brillo  $f$  del punto  $(x, y)$ , y  $x$  y  $y$  representan los coordenadas espaciales de un elemento de imagen (píxel ).

En el procesamiento de la imagen digital, un sensor de la imagen convierte una imagen en un número discreto de píxeles. El sensor de la imagen asigna a cada píxel una localización numérica y un nivel gris o un valor del color que especifique el brillo o el color del píxel.

##### **6.4.1.1. Características de una imagen digitalizada**

Una imagen digitalizada tiene tres características básicas: resolución, definición, y número de planos.

##### **6.4.1.2. Resolución De la Imagen**

La resolución espacial de una imagen es su número de filas y de columnas de píxeles. Una imagen es compuesta por  $m$  columnas y  $n$  filas que tiene una resolución de  $m \times n$ . Esta imagen tiene  $m$  píxeles a lo largo de su eje horizontal y  $n$  píxeles a lo largo de su eje vertical.

##### **6.4.1.3. Definición(tipos) De la Imagen**

La definición de una imagen indica el número de las cortinas que usted puede ver en la imagen. Los bits de profundidad de una imagen es el número de los bits usados para codificar el valor de un píxel. Para una bit de profundidad dada  $n$ , la imagen tiene una definición de imagen de  $2^n$ , significando que un píxel puede tener diversos valores de  $2^n$ . Por ejemplo, si  $n$  iguala a 8 bits, un píxel puede tomar 256 diversos valores que se extienden a partir de 0 a 255. Si  $n$  es igual 16 bits, un píxel puede tomar 65,536 diversos valores De 0 a 65,535 o a partir de  $-32,768$  a  $32,767$ . Actualmente, IMAQ-VISION solamente trabaja en un rango de  $-32,768$  a  $32,767$  para las imágenes de 16-bits.

IMAQ-VISION puede procesar imágenes con 8 bits, 10 bits, 12 bits, 14 bits, 16 bits, planos flotantes, o codificación del color. La manera de su cual usted codifica su imagen, depende de la naturaleza de la imagen, el tipo de proceso de imagen usted necesitar utilizar, y el tipo de análisis que usted necesita realizar. Por ejemplo, la codificación de 8bits es suficiente si usted necesita obtener la información de la norma de objetos en una imagen. Sin embargo, si usted necesita medir la intensidad de luz de una imagen o de una region en una imagen,



usted debe utilizar 16 bits o una codificación de punto flotante. Se Utilizar las imágenes codificadas a color cuando su proceso de visión depende del contenido del color de los objetos que usted está examinando o analizando.

#### **6.4.1.4. Número de planos**

El número de planos en una imagen corresponde al número de arreglos de los píxeles que componen la imagen. Una escala de grises o una imagen de pseudo color se compone de un plano, mientras que una imagen de color verdadero-color se compone de tres planos —uno para la componente rojo, la componente azul, y la componente verde.

En imágenes de color verdadero, las intensidades de componentes del color de un píxel se codifican en tres valores diferentes. La imagen del color es la combinación de tres arreglos de píxeles que corresponden a los componentes rojos, verdes, y azules en la imagen RGB. Las imágenes HSL son definidas por su tonalidad, saturación, y valores de luminiscencia.

#### **6.4.1.5. Tipos De Imagen**

Las librerías de IMAQ-VISION pueden manipular tres tipos de imágenes: escala de grises, color, e imágenes complejas. Aunque IMAQ-VISION apoya los tres tipos de la imagen, ciertas operaciones en tipos específicos de la imagen no son posibles (por ejemplo, aplicando al operador de la lógica AND a una imagen compleja).

La tabla 1-1 demuestra como se forman bytes por píxel en escala de grises, color, y complejas en la formación de imágenes. Para una resolución espacial idéntica, una imagen del color ocupa cuatro veces la memoria de una imagen de 8 bits, y de una imagen compleja ocupa ocho veces la memoria de una imagen de 8-bits.







TIPO DE IMAGEN	NUMERO DE BYTES POR DATOS DE PIXEL
8-bit <b>NUMERO ENTERO</b> <b>ESCALA DE GRISES</b> (1 byte o 8-bit)	 8 BITS PARA LA INTENSIDAD DE LA ESCALA DE GRISES
16-bit <b>NUMERO ENTERO</b> <b>ESCALA DE GRISES</b> (2 bytes o 16-bit)	 16 BITS PARA LA INTENSIDAD DE LA ESCALA DE GRISES
32-bit <b>PUNTO FLOTANTE</b> <b>ESCALA DE GRISES</b> (4 bytes o 32-bit)	 32 BITS FLOTANTES PARA LA INTENSIDAD DE LA ESCALA DE GRISES
RGB Color (4 bytes o 32-bit)	 8 BITS PARA EL VALOR DE ALFA (NO USADOS)    8 BITS PARA INTENSIDAD DEL ROJO    8 BITS PARA INTENSIDAD DEL VERDE    8 BITS PARA INTENSIDAD DEL AZUL
HSL Color (4 bytes o 32-bit)	 8 BITS NO USADOS    8 BITS PARA LA TONALIDAD    8 BITS PARA LA SATURACION    8 BITS PARA LA LUMINICENCIA
<b>COMPLEJA</b> (8 bytes o 64-bit)	 32 BITS FLOTANTES PARA LA PARTE REAL    32 BITS FLOTANTES PARA LA PARTE IMAGINARIA

Tabla 1. Bytes Por Pixel

#### 6.4.1.6. Imágenes en escala de grises

Una imagen en escala de grises se compone de un solo plano de píxeles. Cada píxel es codificado usando un solo número. Este número puede ser:

- Un entero sin signo de 8 bits que representa valores de la escala de grises de 0 a 255

- Un entero con signo de 16 bits que representa valores de la escala de grises entre  $-32768$  y  $+32767$
- Un número de punto flotante de la sola precisión (codificado usando cuatro bytes) representado en la escala de grises de valores en el rango de  $-\infty$  a  $\infty$ .

#### 6.4.1.7. Imágenes De Color

Una imagen de color se codifica en memoria como imagen de RGB o HSL. Los píxeles de la imagen de color son un compuesto de cuatro valores. Las imágenes del RGB almacenan la información del color usando 8 bits para cada uno para los planos rojos, verdes, y azules. Las imágenes de HSL almacenan la información del color usando 8 bits cada uno para la tonalidad, saturación, y luminiscencia. En todo el color modelo, un valor adicional de 8 bits va inusitado. Esta representación se conoce como codificación de 4 x 8-bits o 32-bits de codificación.

#### 6.4.1.8. Imágenes Complejas

Una imagen compleja contiene la información de la frecuencia de una imagen en la escala de grises. Crear una imagen compleja aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) a una imagen en la escala de grises. Una vez que usted transforme una imagen de la escala de grises en una imagen compleja, usted puede realizar operaciones del dominio de la frecuencia en la imagen. Cada píxel en una imagen compleja se codifica como dos valores de punto flotante de una sola precisión, que representan los componentes reales e imaginarios del píxel complejo. Usted puede extraer los cuatro componentes siguientes de una imagen compleja: la parte real, parte imaginaria, magnitud, y fase.

#### 6.4.1.9. Archivos De la Imagen

Un archivo de la imagen se compone de un patrón seguido por valores del píxel. Dependiendo del formato del archivo, el patrón contiene la información de la imagen sobre la resolución horizontal y vertical, la definición del píxel, y la gama de colores. Los archivos de la imagen pueden también almacenar la información sobre la calibración, plantillas de la concordancia con el modelo, y recubrimientos. Los siguientes son algunos formatos comunes del archivo de la imagen:

- mapa de bits (BMP)
- Formato marcado con etiqueta del archivo de imagen (tiff)
- gráficos portables de la red (png) —ofrecen la capacidad de almacenar información de la imagen sobre la calibración espacial, concordancia con el modelo
- Formato fotográfico común del grupo de expertos (JPEG)
- Formato interno del archivo de la imagen de National Instruments (AIPD) —usado para guardar imágenes de punto flotante, complejas, y HSL

Los formatos Standard de 8 bits son BMP, TIFF, PNG, JPEG, y AIPD.

Los formatos Standard de 16 bits son PNG y AIPD.

Los formatos Standard del archivo de color para imágenes RGB son BMP, TIFF, PNG, JPEG, y AIPD.

Los formatos Standard de imágenes complejas son PNG y AIPD

#### 6.4.1.10. Paleta de control de IMAQ-VISION

La paleta de control de VISION está disponible en la paleta de controles en LabVIEW 7.0 o más adelante. La paleta de control de VISION tiene los elementos siguientes:



**Figura 6.16.** Icono de control de exhibición de imágenes

- Image Display control —se utiliza este control de exhibir sus imágenes directamente en el panel delantero de LabVIEW si usted está utilizando LabVIEW 7.0 o más adelante. Usted también puede utilizar este control para crear regiones del interés (ROIs). Controles clásicos y las versiones 3D están disponibles.



**Figura 6.17.** Icono de los controles de IMAQ Vision

- IMAQ Visión controls —utilizan estos controles para conseguir la funcionalidad de Correspondiente a IMAQ-VISION controla directamente en su propio VIs.

#### 6.4.2. Paleta de funciones de IMAQ-Vision

IMAQ-Vision para LabVIEW se organiza en tres principales funciones: Utilidades de Visión, procesamiento de imágenes, y Machine Visión. A continuación una descripción de cada una de ellas:

##### 6.4.2.1. Utilidades De Visión



**Figura 6.18.** Icono de utilidades de Visión

Las funciones de utilidades de la visión permiten que usted manipular y exhibir las imágenes dentro de Visión.

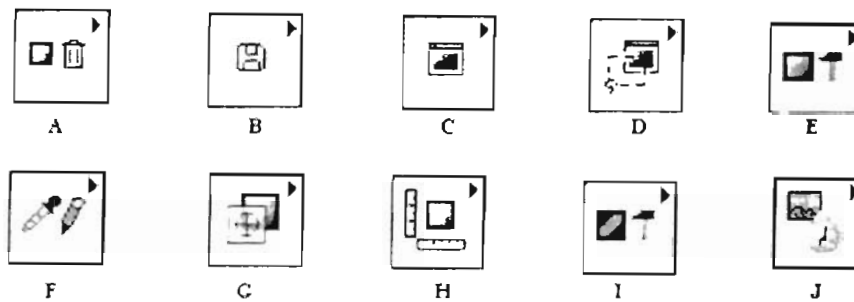


Figura 6.19. Paleta de funciones de utilidades de Visión

- **Manejo de imagen(Figura 6.19A)** —es un grupo VIs que maneja imágenes. Utilizan éstos VIs para crear y para disponer imágenes, el sistema y cualidades leídas de una imagen (por ejemplo su tamaño y compensación), y copian una imagen a otra. Usted también puede utilizar alguno de estos VIs avanzados para definir la región de frontera de la imagen y tiene acceso al indicador de los datos de la imagen.
- **Archivos(Figura 6.19B)** —Es un grupo VIs que lee imágenes de archivos, escriben imágenes a los archivos en diversos formatos del archivo, y consiguen la información sobre la imagen contenida en un archivo.
- **Grupo externo(Figura 6.19C)** —es un grupo de VIs que controla la exhibición de imágenes en ventanas externas de la imagen. Se Utilizan estos VIs para hacer lo siguiente:
  - Conseguir y fijar las cualidades de la ventana, tales como tamaño, posición, y zona
  - Asignar las paletas de colores a las ventanas de la imagen
  - desplegar la imagen en uso
  - Instala diversas herramientas de dibujo del uso para seleccionar recíprocamente ROIs en ventanas de la imagen
  - Recuperar la información sobre ROIs dibujados en la ventana de la imagen
- **Región de interés(Figura 6.19D)** —es un grupo de VIs que maneja ROIs. Utilizan estos VIs para la programación, definen ROIs y convierten ROIs a mascarar de imagen.
- **Manipulación de imágenes(Figura 6.19E)** —es un grupo de VIs que modifica el contenido espacial de imágenes. Se Utilizan estos VIs para reemplazar una imagen, extraer partes de una imagen, rotar, cambiar de puesto, y desempaqueta imágenes.
- **Manipulación de píxeles(Figura 6.19F)** —es un grupo de VIs que lee y modifica píxeles individuales en una imagen. Se Utilizan estos VIs para leer y fijar valores en un píxel en la imagen o a lo largo de una fila o de una columna en una imagen, llena los píxeles en una imagen con un valor binario, y convertir una imagen a un arreglo de 2D de LabVIEW.

- **Sobreponer(Figura 6.19G)** —es un grupo de VIs que sobrepone gráficos en un ambiente de la exposición de la imagen sin alterar los valores de los píxeles de la imagen. Se Utilizan éstos VIs para sobreponer los resultados de una aplicación sobre imágenes que se examinan.

- **Calibración(Figura 6.19H)**—es un grupo de VIs que calibra la espacialidad de una imagen para tomar medidas exactas reales sin importar la perspectiva de la cámara o distorsión de la lente. Se Utilizan estos VIs para fijar una calibración simple o dejar que IMAQ-vision obtenga automáticamente los datos de la calibración de una imagen. Entonces se utilizan los VIs para convertir coordenadas de píxel a coordenadas reales para las medidas simples.

- **Utilidades de color (Figura 6.19I)**—es un grupo de VIs que tiene acceso a datos de imágenes del color. Se Utilizan estos VIs para extraer diversos planos de color de una imagen, substituirlo los planos de una imagen del color con nuevos datos, convierten una imagen de color a un arreglo de 2 dimensiones, leer y fijar valores a los píxeles en una imagen de color, y convertir valores de píxeles a partir de un espacio de color a otro.

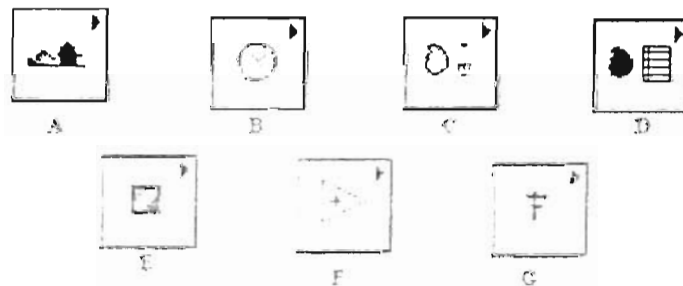
- **IMAQ RT(Figura 6.19J)** —es un grupo de VIs que proporciona la funcionalidad para usar NI-IMAQ y IMAQ Vision con e LabVIEW RT. Se utilizan estos VIs a las imágenes exhibidas en vídeo de salida del sistema RT, control de imágenes enviadas sobre la red.

#### 6.4.2.2. Procesamiento de imágenes



**Figura 6.20.** Icono de procesamiento de imágenes

Se Utilizan las funciones de procesamiento de imagen para analizar, filtrar, y procesar imágenes en IMAQ Vision.



**Figura 6.21.** Paleta de funciones de procesamiento de imágenes

- **Procesamiento(Figura 6.21A)** —es un grupo de VIs que procesan imágenes en la escala de grises e imágenes binarias. Se Utilizan estos VIs para convertir una imagen de escala de grises a imágenes binarias usando diversas técnicas. Usted también puede utilizar estos VIs para transformar las imágenes usando predefinidas o las tablas de encargo de las operaciones de búsqueda, cambian la información de contraste en la imagen, e invierte los valores en la imagen.
- **Filtros(Figura 6.21B)** —es un grupo de VIs que filtran una imagen para realzar la información en la imagen. Se Utilizan estos VIs para alisar una imagen, quitar el ruido, y destacar o realzar los bordes en la imagen. Usted puede utilizar una predefinido convolucion con un kernel.
- **Morfología(Figura 6.21C)** —Es un grupo de VIs que realiza operaciones morfológicas en una imagen. Algunos de estos VIs realizan morfología básica de operaciones, tales como dilatación y erosión, en imágenes en escala de grises y binarias. Otros VIs mejoran la calidad de imágenes binarias llenando los agujeros en partículas, quitando las partículas que tocan la frontera de la imagen, quitando partículas pequeñas, y quitan las partículas indeseadas basadas en diferentes características de la forma de las partículas.
- **Análisis (Figura 6.21D)**—es un grupo de VIs que analiza el contenido de imágenes en escala de grises y imágenes binarias. Se Utilizan estos VIs para computar la información del histograma y la estadística de la escala de grises de una imagen, recupera la información de los píxeles y la estadística a lo largo de cualquier perfil unidimensional en una imagen, y detecta y muestrea partículas en imágenes binarias.
- **Procesamiento de Color(Figura 6.21E)** —es grupo de VIs que analiza y procesa imágenes de color. Se utilizan estos VIs para computar el histograma de las imágenes de color; Aplicar las tablas de operaciones de búsqueda a las imágenes del color; Cambiar el brillo, contraste, y la información gamma se asocia a una imagen de color.
- **Operadores(Figura 6.21F)** —es un grupo de VIs que realiza aritmética básica y operaciones lógicas en imágenes. Se utilizan algunos de estos VIs para sumar, restar, multiplicar, y dividir una imagen con otras imágenes o constantes.
- **Dominio de la Frecuencia(Figura 6.21G)** —Es un grupo de VIs que analiza y procesa imágenes en el dominio de la frecuencia. Se utilizan estos VIs para convertir una imagen del dominio espacial al dominio de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT) de dos dimensiones y convertir del dominio de la frecuencia al dominio espacial usando la inversa de FFT. Estos VIs también extrae magnitud, fase, planos reales e imaginarios de la imagen compleja.

### 6.4.2.3. Machine Visión



Figura 6.22. Icono de Machine de Visión

IMAQ Machine Visión –son un grupo de herramientas con las cuales podemos obtener información de una o varias imágenes como son las regiones de interés, sistemas de coordenadas, conteo y muestra de objetos, muestra de distancias, muestra de intensidades,, encontrar patrones, calibrar, análisis geométrico, etc.

### 6.4.3. Combinaciones de la entrada y de la salida

Dependiendo del tipo de función que realice un VI, diversas combinaciones de entrada y de salida pueden ser posibles. Usted puede utilizar esta flexibilidad de decidir qué imagen se procesara y donde almacenar la imagen que resulta. Si no conecta con alambre la imagen de destinación, la imagen fuente se utiliza y se pasa a salida de destinación. Las figuras en las secciones siguientes demuestran varios casos de como conectar VIs usado IMAQ-Vision[88].

#### 6.4.3.1. Análisis De Imagen

El caso siguiente de conectar se aplica solamente a VIs que analizan una imagen y por lo tanto no modifican el tamaño o el contenido de la imagen. Los ejemplos de estos tipos de operaciones incluyen análisis de la partícula y cálculos *del histograma*.

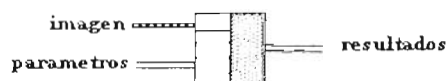


Figura 6.23. Ejemplo de conexión de la imagen

#### 6.4.3.2. Máscaras De la Imagen

El caso siguiente de conectar introduce *image mask*.

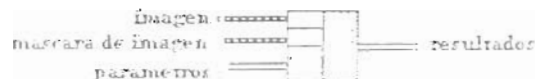


Figura 6.24. Ejemplo de conexión de una imagen con una máscara de imagen

La presencia de una entrada de *image mask* indica que el proceso o el análisis es dependiente en el contenido de otra imagen (*image mask*). Los únicos píxeles en *image* se procesan son los que corresponden los píxeles en *image mask* son diferentes a cero. Si



un píxel **image mask** es 0, el píxel correspondiente **image** no se cambia. **Image mask** debe ser una imagen de 8-bits. Si usted desea aplicar una función del proceso o del análisis a la imagen entera, no conecte a la entrada **image mask**. Conecte la misma imagen a ambas las entradas **image** y **image mask** también da el mismo efecto que yéndose a entrada **image mask** no conectada, a menos que en este caso **image** deba ser imagen 8-bit.

### 6.4.3.3. Relleno De la Imagen

El caso siguiente de conectar se aplica a VIs que realiza una operación de llenado de una imagen. Los ejemplos de este tipo de operación incluyen la lectura de un archivo, el adquirir imagen de un dispositivo de IMAQ, o de transformar un arreglo de números de 2D en una imagen. Este tipo de VI puede modificar el tamaño de una imagen.

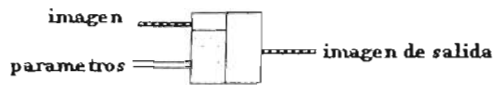


Figura 6.25. Ejemplo de conexión del relleno de una imagen

### 6.4.3.4. Proceso De Imagen

El caso siguiente de conectar se aplica a VIs que procesan una imagen.

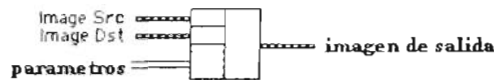


Figura 6.26. Ejemplo de conexión de una imagen a procesar

Este conector es el más común del tipo de IMAQ-Vision. **Image Src** recibe la imagen para procesar. La entrada **image Dst** puede recibir cualquiera otra imagen o la original, dependiendo de sus metas. Si dos diferentes las imágenes están conectadas con las dos entradas, la imagen original **image Src** no es modificado. Según lo demostrado en los diagramas siguientes, si **image Dst** y la entrada **image Src** reciben la misma imagen, o si no se conecta nada con en **image Dst**, la imagen procesada se pone en la imagen original, y se pierden los datos originales de la imagen.

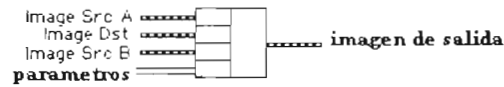


Figura 6.27. Tipos de conexiones de imágenes a procesar

La imagen **image Dst** es la imagen que recibe los resultados de proceso. Dependiendo de la funcionalidad del VI, esta imagen puede ser cualquiera, iguales o un diverso tipo de la imagen como la imagen de fuente. La imagen conectada con **image Dst** se recalibrará al tamaño de la imagen fuente.

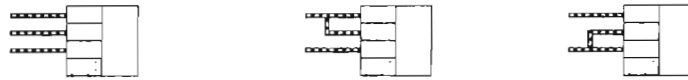
### 6.4.3.5. Operaciones aritméticas y lógicas

El caso siguiente de conectar se aplica a VIs que realizan aritmética o operaciones lógicas entre dos imágenes.



**Figura 6.28.** Ejemplo de conexión de una imagen a aplicarse una operación específica

Dos imágenes de fuente existen para la imagen de destinación. Usted puede realizar operación entre dos imágenes, A y B, y entonces cualquiera almacena el resultado dentro de otra imagen (**image Dst**) o en una de las dos imágenes de fuente, A o B. En el último caso, usted puede considerar los datos originales para ser innecesarios después de que el proceso ha ocurrido. Las combinaciones siguientes son posibles adentro de este caso.



**Figura 6.29.** Tipos de conexión de una imagen a la cual se le aplicara una operación aritmética o lógica

En el caso de la izquierda, las tres imágenes son todas diferentes. **Image Src A** y **image Src B** están intactas después de procesar y los resultados de esta operación se almacenan en **image Dst**. En el caso del centro, **image Src A** también está conectada con **image Dst**, La cuál por lo tanto recibe los resultados de la operación. En esta operación, De los datos de fuente para **image Src A** se sobrescriben. En el caso de la derecha, **image Src B** recibe los resultados se sobrescribe la operación y sus datos de fuente. La mayoría de las operaciones entre dos imágenes requieren que las imágenes tengan el mismo tipo y tamaño. Sin embargo, las operaciones aritméticas pueden trabajar en medio dos diversos tipos de imágenes.

### 6.4.4. Análisis Del Dominio De la Frecuencia en IMAQ-Vision

Los filtros de frecuencia alteran valores del pixel con respecto a la periodicidad y distribución espacial de las variaciones en intensidad de luz en la imagen. Desempejante los filtros espaciales, filtros de frecuencia no se aplican directamente a una imagen espacial, pero a su representación de la frecuencia. La representación de la frecuencia de la imagen se obtiene con una función llamada Transformada Rápida de Fourier-FFT. Revela la información sobre la periodicidad y la dispersión de los patrones encontrados en la imagen de fuente. Usted puede filtrar las frecuencias espaciales vistas en una imagen de FFT. La función inversa de FFT entonces restaura una representación espacial del filtrado de la imagen de FFT [3-8]



Figura 6.30. Diagrama a bloques de la transformada de Fourier

El proceso de la frecuencia es otra técnica para extraer la información de una imagen. En vez de usar la localización y la dirección de la intensidad de la luz de las variaciones, usted puede utilizar el procesamiento de la frecuencia para manipular la frecuencia de ocurrencia de estas variaciones en el dominio espacial. Este nuevo componente se llama frecuencia espacial, la cual es la frecuencia con la intensidad de luz en una imagen la cual varía la función de las coordenadas espaciales.

Las frecuencias espaciales de una imagen se computan con la transformada rápida de Fourier (FFT). La FFT se calcula en dos pasos —con una transformada rápida de Fourier transformamos las filas, después con otra transformada de Fourier transformamos las columnas de los resultados anteriores. Los números complejos que componen El plano de FFT se codifica en una imagen de punto flotante de 64 bits llamada una imagen compleja. La imagen compleja es formada por 32 bits de punto flotante representando la parte real y una de 32 bits que es la representación de la parte imaginaria.

En una imagen, los detalles y los bordes agudos se asocian a medios de frecuencias espaciales altas porque introducen variaciones significativas en los niveles de grises sobre distancias cortas. Los patrones gradualmente que varían se asocian a frecuencias espaciales bajas. Filtrando frecuencias espaciales, usted puede quitar, atenuar, o destacar los componentes espaciales con los cuales se relacionan.

Se utiliza un filtro pasabajos para atenuar o para quitar (truncar) altas frecuencias presentes en la imagen. Este filtro suprime la información relacionada a las variaciones rápidas de intensidades de luz en la imagen espacial. La inversa de FFT, utiliza después de un filtro pasabajos, produce una imagen donde se alisan los detalles, la textura, y los bordes agudos son ruido en la imagen.

Un filtro de pasaltos atenúa o quita (trunca) las frecuencias bajas presentes en la imagen compleja. Este filtro suprime la información relacionada con las variaciones lentas de la intensidad de luz en la imagen espacial. En este caso, la inversa FFT utiliza después de un filtro de pasaltos que produce una imagen en la cual se afilen los patrones totales y son los detalles acentuados.

Un filtro de máscara quita las frecuencias contenidas en una máscara especificada por el usuario. Con una máscara para alterar la transformada de Fourier de una imagen ofrece más posibilidades que la aplicación los filtros pasabajos o pasaltos. La imagen máscara esta compuesta por el usuario y puede describir frecuencias muy específicas y direcciones en la imagen. Usted puede aplicar esta técnica, por ejemplo, para filtrar frecuencias dominantes así como sus armónicos en el dominio de la frecuencia.

Una imagen puede tener ruido extraño introducido durante el proceso de digitalización, tal como rayas periódicas. En el dominio de la frecuencia, el patrón periódico se reduce a un sistema limitado de altas frecuencias espaciales. El trincar estas frecuencias particulares y convertir la imagen filtrada de FFT de nuevo al dominio espacial produce una nueva imagen en la cual el patrón de tenga que desaparecer, mientras que sigue habiendo las características totales.

#### 6.4.4.1. Conceptos de la transformada rápida de Fourier

La FFT de una imagen es un arreglo de dos dimensiones de números complejos, también representado como imagen compleja. Representa las frecuencias de las variaciones de la intensidad de la luz en el dominio espacial. Las frecuencias bajas corresponden para alisar patrones de la imagen de fuente. Las frecuencias altas corresponden a las variaciones de intensidad corta encontradas en píxeles ruidoso alrededor de los objetos.

#### 6.4.4.2. Representación de FFT

Hay dos representaciones posibles de la transformada rápida de Fourier de la imagen: *la representación estándar* y *la representación óptica*.

##### 6.4.4.2.1. Representación Estándar

En la representación estándar, las altas frecuencias se agrupan en el centro de la imagen mientras que las frecuencias bajas están situadas en los bordes. El termino constante o la frecuencia nula, está en la esquina superior izquierda de la imagen. El rango de la frecuencia es

$$[0, N] \times [0, M] \quad (110)$$

donde  $M$  es la resolución horizontal de la imagen y  $N$  es la resolución vertical de la imagen

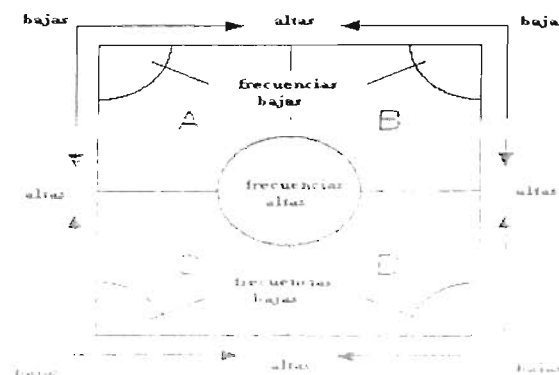


Figura 6.31. Representación estándar

La figura 6.32a muestra una imagen. La figura 6.32b muestra la FFT de la misma imagen usando la representación estándar.

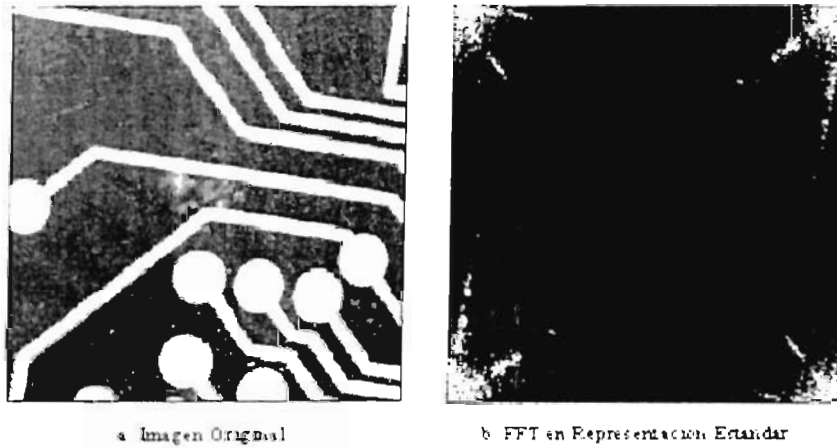


Figura 6.32. FFT de una imagen en la representación estándar

#### 6.4.4.2.2. Representación Óptica

En la representación óptica, las frecuencias bajas se agrupan en el centro de la imagen mientras que los de alta frecuencia están situados en los bordes. El termino constante, o la frecuencia nula, está en el centro de la imagen. El rango de frecuencia es

$$\left[ -\frac{N}{2}, \frac{N}{2} \right] \times \left[ -\frac{M}{2}, \frac{M}{2} \right] \quad (111)$$

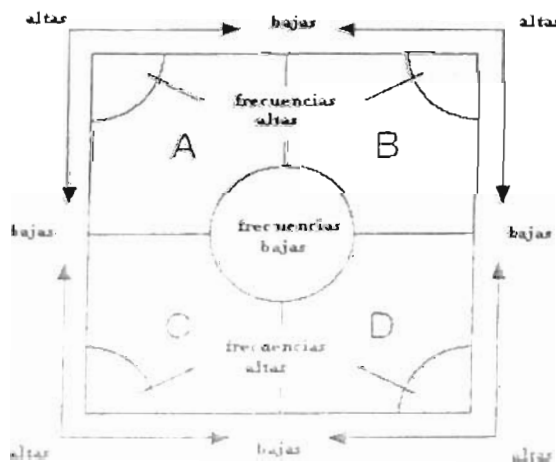
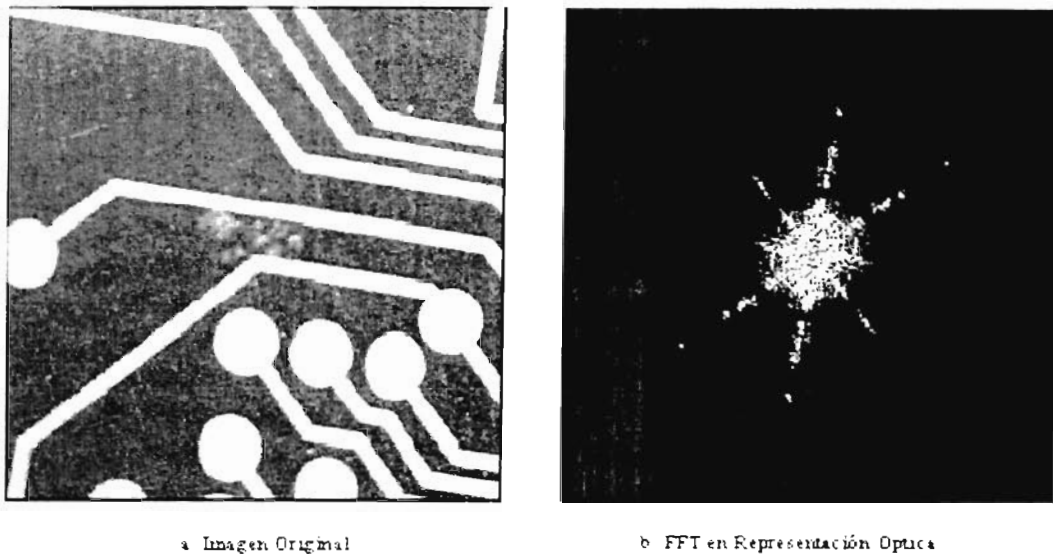


Figura 6.33. Representación óptica

La figura 6.34a muestra la imagen original y la figura 6.34b muestra la e FFT de la imagen en representación óptica.



**Figure 6.34.** FFT de la imagen en Representación Óptica

### 6.4.5. Transformada de Fourier

Las frecuencias espaciales de una imagen son calculadas por una función llamada *Transformada de Fourier*. Se define en el dominio continuo como

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(xu + yv)} dx dy \quad (112)$$

Donde  $f(x, y)$  es la intensidad de luz del punto  $(x, y)$ , y  $(u, v)$  son las frecuencias espaciales horizontales y verticales. La transformada de Fourier asigna un número complejo a cada sistema  $(u, v)$ . Inversamente, La transformada Rápida de Fourier  $F(u, v)$  se puede transformar una imagen espacial  $f(x, y)$  de resolución  $NM$  usando la fórmula siguiente:

$$f(x, y) = \sum_{v=0}^{M-1} \sum_{u=0}^{N-1} F(u, v) e^{-i2\pi \left( \frac{u}{N}x + \frac{v}{M}y \right)} \quad (113)$$

En el dominio discreto, la transformada de Fourier se calcula con un eficiente algoritmo llamado Transformada Rápida de Fourier (FFT).

$$F(u, v) = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left( \frac{ux}{N} + \frac{vy}{M} \right)} \quad (114)$$

Donde  $N \times M$  es la resolución de la imagen espacial  $f(x, y)$ .

Porque  $e^{-j2\pi ux} = \cos 2\pi ux - j \sin 2\pi ux$ .  $F(u, v)$  se compone de la suma infinita de términos de senos y cósenos. Cada par  $(u, v)$  determina la frecuencia de su seno correspondiente y coseno. Para un sistema dado  $(u, v)$ , notar que todos los valores  $f(x, y)$  contribuye a  $F(u, v)$ . Debido a esto la complejidad.

Dada una imagen con una resolución  $N \times M$  y dado  $\Delta x$  y  $\Delta y$  como incrementos espaciales, la FFT de la imagen de fuente tienen la misma resolución  $NM$  y sus incrementos de frecuencia de  $\Delta u$  y  $\Delta v$  se definen como:

$$\Delta u = \frac{1}{N \Delta x} \quad \Delta v = \frac{1}{M \Delta y} \quad (115)$$

#### 6.4.5.1. Exhibición de FFT

Una imagen de FFT se puede visualizar usando cualquiera de sus cuatro componentes complejas: parte real, parte imaginaria, magnitud, y fase. La relación entre éstos los componentes se expresan como:

$$F(u, v) = R(u, v) + jI(u, v) \quad (116)$$

donde  $R(u, v)$  es la parte real y  $I(u, v)$  es la parte imaginaria, y

$$F(u, v) = |F(u, v)| x e^{j\phi(u, v)} \quad (117)$$

donde  $|F(u, v)|$  es magnitud y  $\phi(u, v)$  es la fase.

La magnitud de  $F(u, v)$  también se llama el espectro de Fourier y es igual a

$$|F(u, v)| = \sqrt{R(u, v)^2 + I(u, v)^2} \quad (118)$$

El espectro de Fourier elevado a la 2da potencia se conoce como el espectro de energía o densidad espectral. La fase  $\phi(u, v)$  también se llama el ángulo de la fase y es igual a

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \frac{I(u, v)}{R(u, v)} \quad (119)$$

Por defecto, cuando usted exhibe una imagen compleja, el plano de la magnitud de la imagen compleja utiliza la representación óptica. Para visualizar los valores de la magnitud correctamente, los valores de la magnitud son escalados por factor  $m$  antes de que se exhiba. el factor  $m$  se calcula como

$$\frac{128}{w \times h} \quad (120)$$

Donde  $W$  es la anchura de la imagen y  $h$  es la altura de la imagen.

#### 6.4.6. Diseño de los programas en LabVIEW

Se diseñaron 3 programas en LabVIEW:

1. Captura de imágenes
2. DPIV
3. Muestreo de imágenes

##### 6.4.6.1. Programa de captura de imágenes

Con este programa nosotros capturamos las imágenes del DPIV. se ingresa el tiempo de captura de la imagen. las imágenes son guardadas en una dirección definida previamente nosotros también ingresamos el numero de imágenes que necesitamos. este programa nos proporciona las imágenes. el tiempo de cada imagen al ser capturada y nos despliega la imagen en una pantalla. A continuación mostraremos el programa por partes:

1era parte

Nosotros inicializamos la cámara y sus parámetros en la figura 6.35 visualizamos el acomodo de los iconos para la inicialización de nuestra cámara CCD.

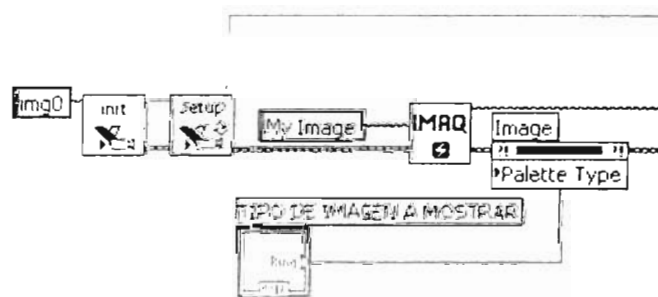


Figure 6.35. Inicialización del sistema de captura de a cámara CCD

2da parte

Es esta parte ingresamos el numero de imágenes a adquirir y el tiempo de captura de la imagen. la dirección donde se almacenaran las imágenes es previamente definida el nombre



de las imágenes es dado por un arreglo en forma de conteo. al completarse la adquisición se sale del ciclo while loop (el recuadro de color gris).

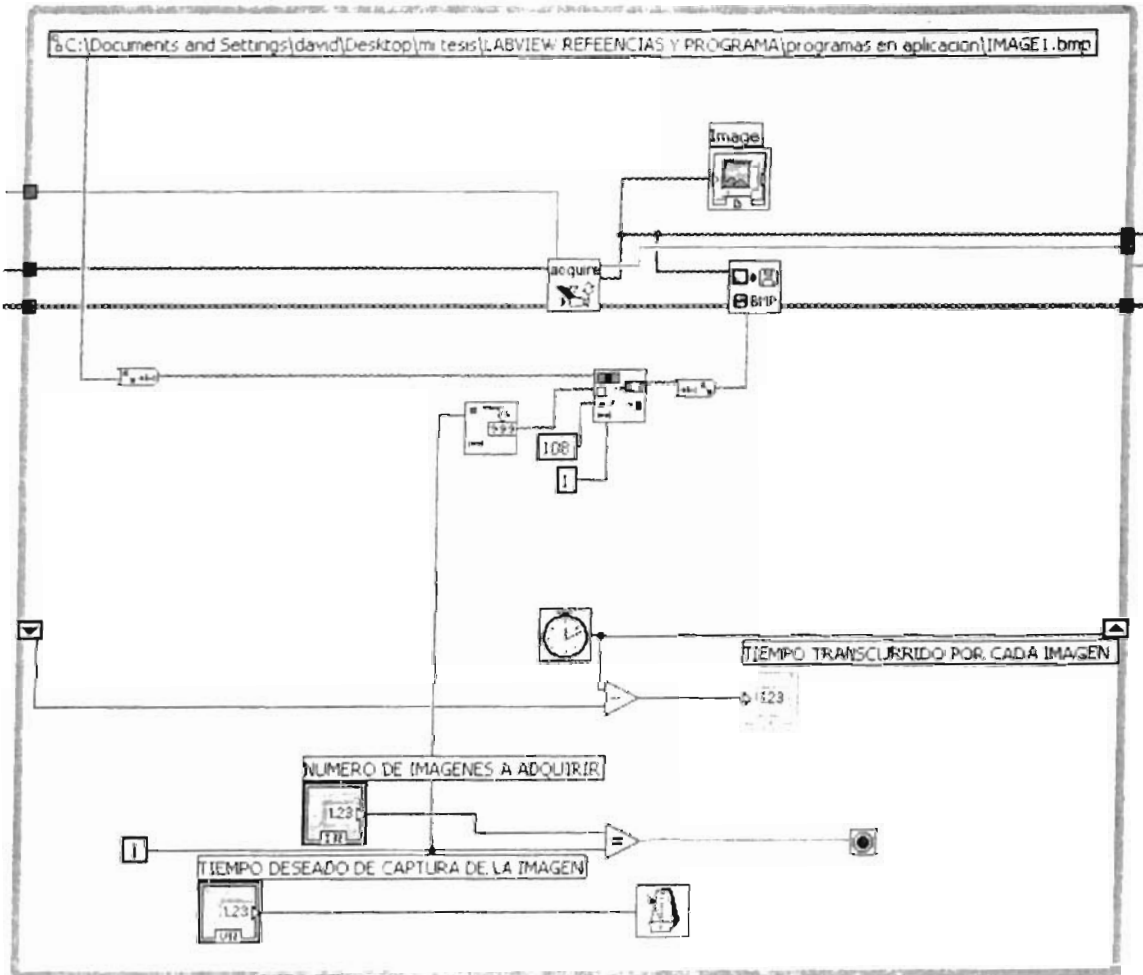


Figure 6.36. Parte del programa donde se lleva a cabo la captura y el almacenaje de las imágenes

3ra parte

en esta parte del programa nosotros finalizamos la sesión de captura de imágenes cerramos los buffers donde se almacenaron temporalmente las imágenes

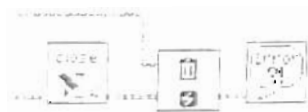


Figure 6.37. Parte del programa donde se finaliza la sesión y se cierran los buffers de almacenaje

#### 6.4.6.2. Programa DPIV

Este programa es el programa principal del procesamiento de las imágenes digitales obtenidas en el cual nosotros podemos encontrar los vectores del movimiento de las burbujas además de la velocidad nosotros debemos solamente ingresar el tipo de espaciamiento y el tamaño de la área de interrogación. Y el nos proporcionara las imágenes con los vectores. consta de 4 subprogramas que realizan las siguientes operaciones

1. read image lee 2 imágenes y si existe un vector las imágenes serán compactadas para reducir el tamaño

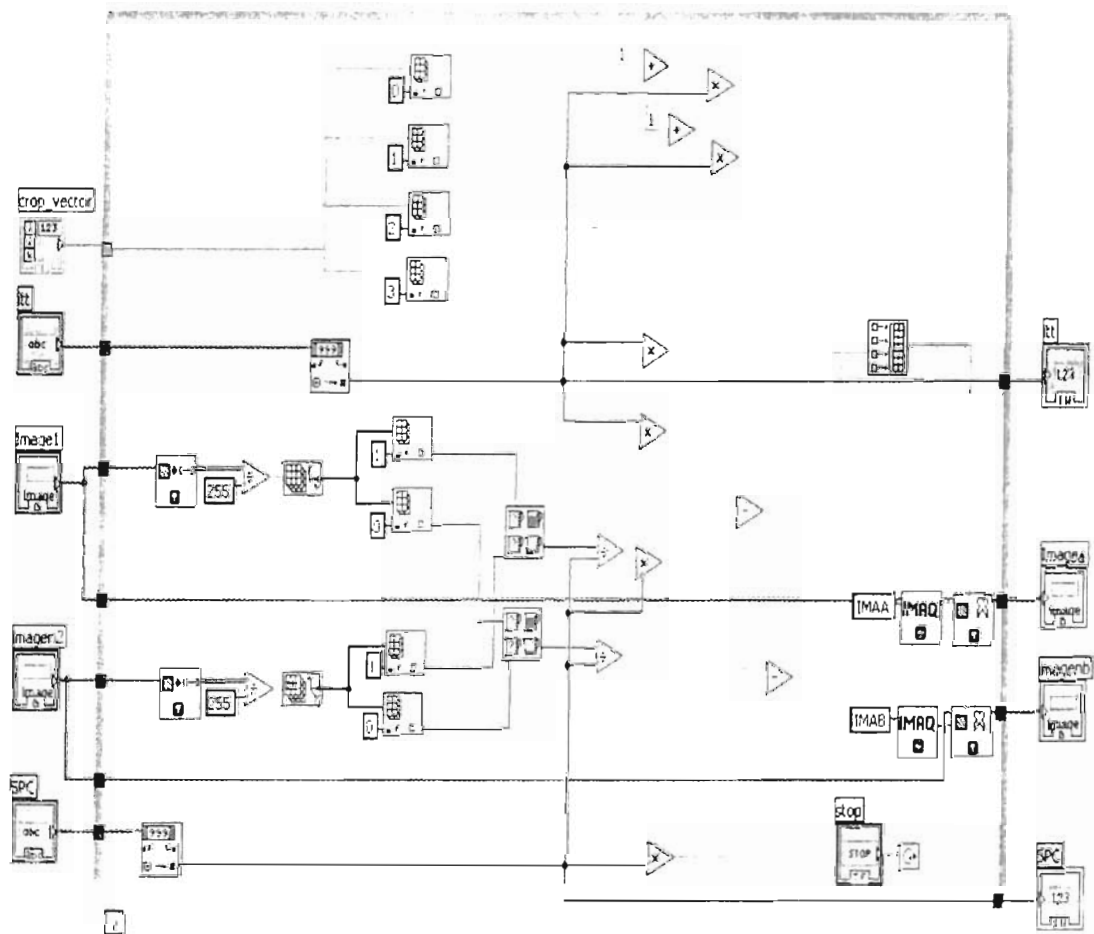


Figure 6.38. Programa Read Image

2. cross realiza el algoritmo de la correlación cruzada entre las 2 imágenes donde  $C$  es la matriz de la correlación cruzada. nos auxiliamos de matlab script para el llenado de zeros al momento de inicializar la matriz  $C$ .

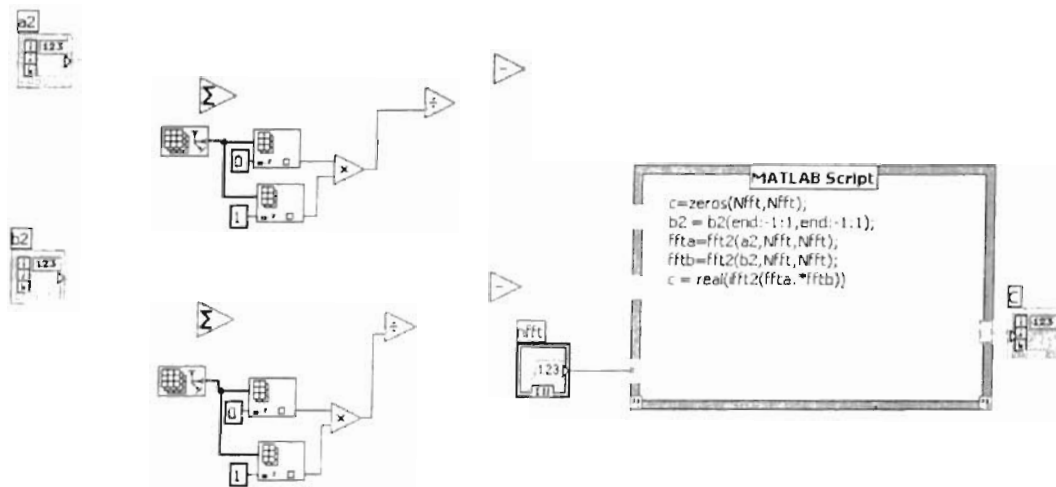


Figure 6.39. Programa Cross

3. find peaks encuentra el mas pico de la correlación cruzada y nos proporciona su localización

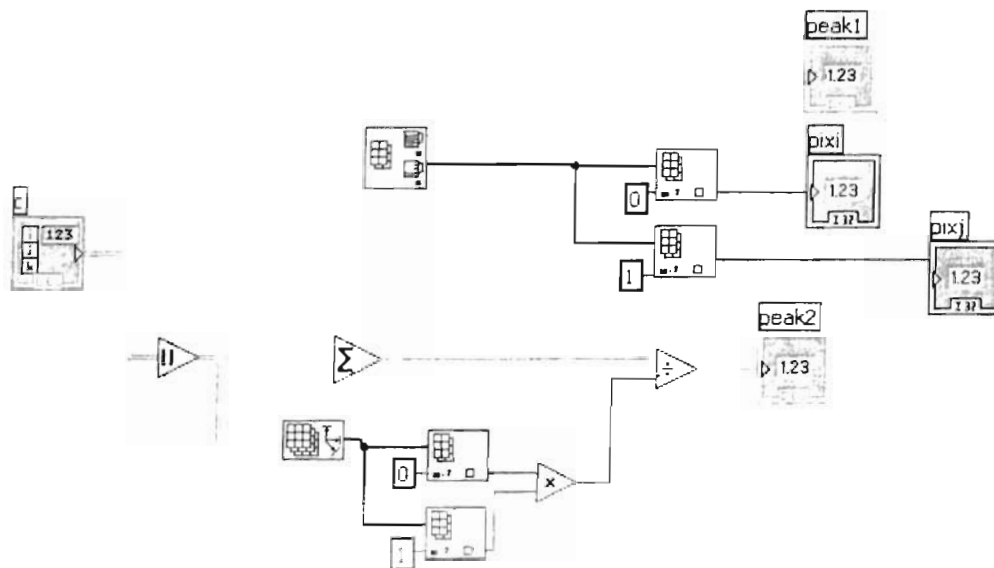


Figure 6.40. Programa find peaks

4. sub-velocity nos proporciona la velocidad real el cual cuenta con un subprograma para encontrar s2n un parámetro que utilizaremos para encontrar la señal de ruido

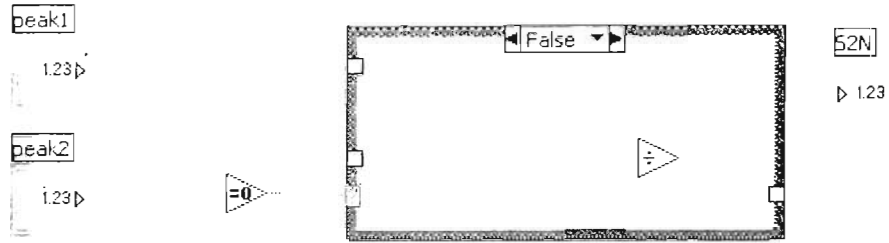


Figure 6.41. Programa s2n

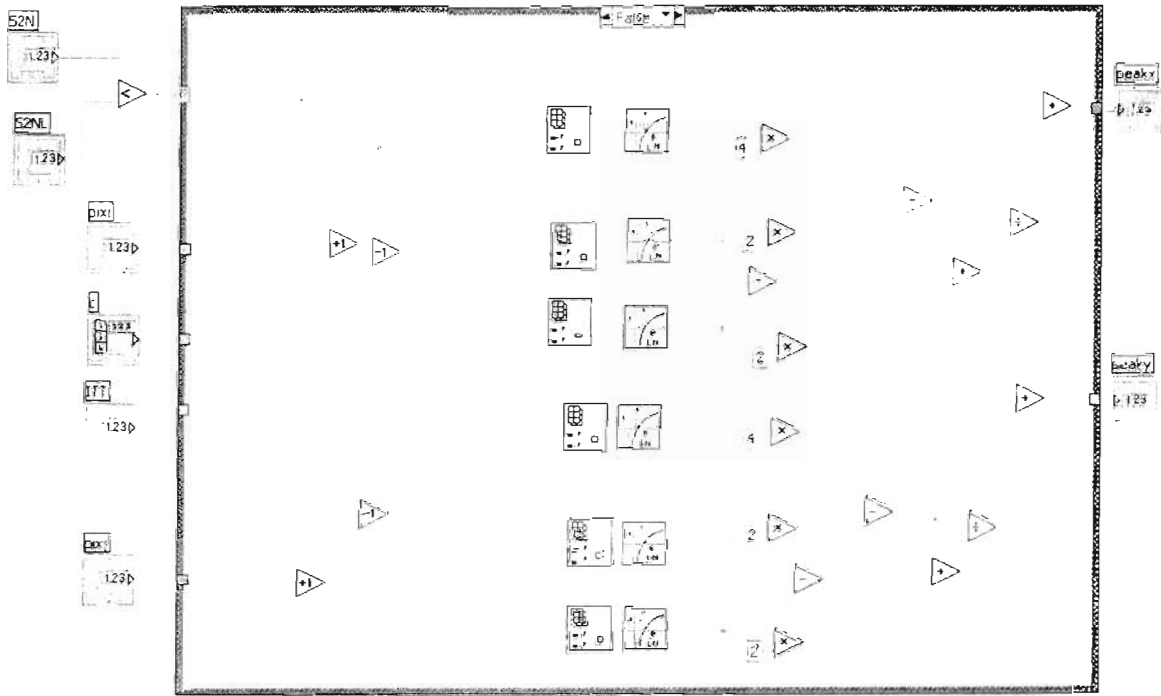


Figure 6.42. Programa sub-velocity

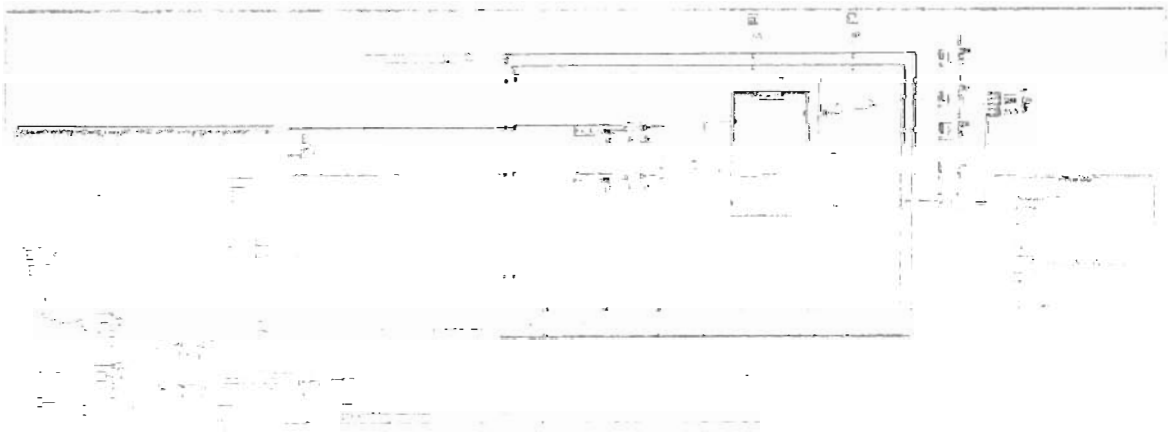


Figure 6.43. Programa DPIS



## CAPITULO VII RESULTADOS

### 7.1. Pruebas preliminares

MATERIAL:

Láser HE-NE 404nm,4mW

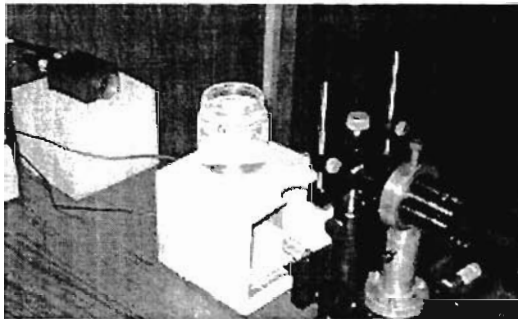
Lente Cilíndrica

Frasco con agua

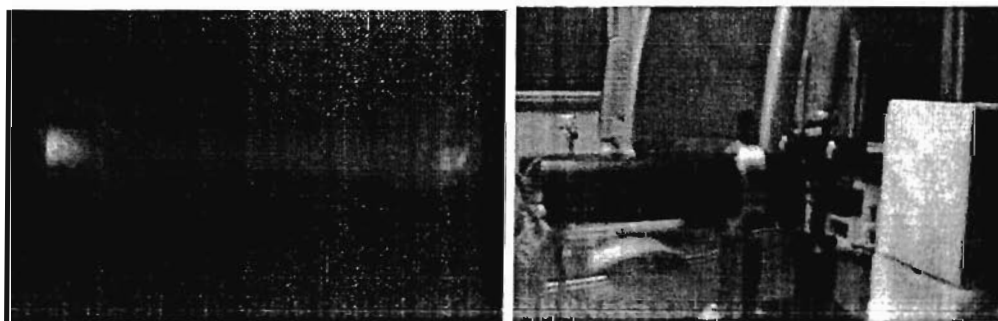
Cámara CCD

Tarjeta NI-1407

Programa LABVIEW



**Figura 7.1.** Colocación de la lente cilíndrica en el portalentes para formar así el abanico de luz láser para hacerlo incidir por un frasco con agua y capturar la imagen en la cámara CCD



**Figura 7.2.** Formación del abanico de luz láser con un láser de longitud de onda de 404 nm y una potencia de 4mW

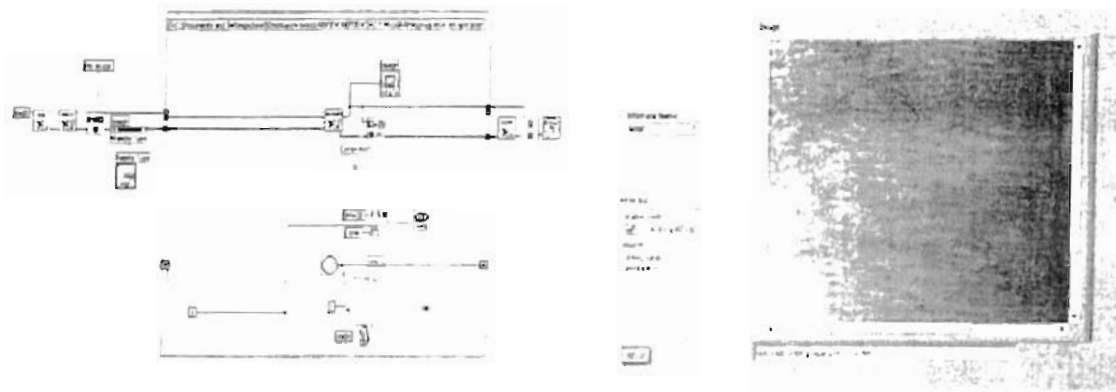


Figura 7.3. Captura de la imagen parte izq. Programa de LabVIEW. parte derecha imagen capturada por la cámara CCD, NI-1407 y LabVIEW

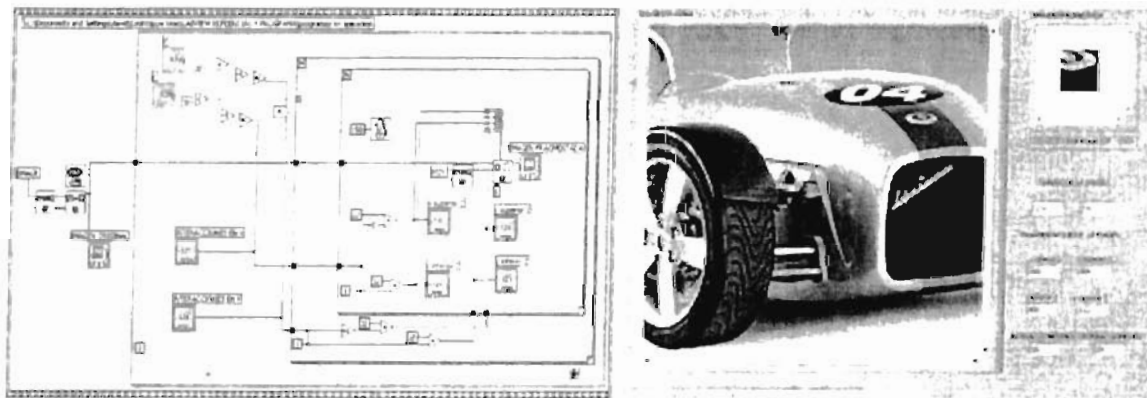


Figura 7.4. Fragmentación de la imagen parte izq. Programa de LabVIEW parte der. La imagen completa se fragmenta a una imagen de 32 x 32 pixeles

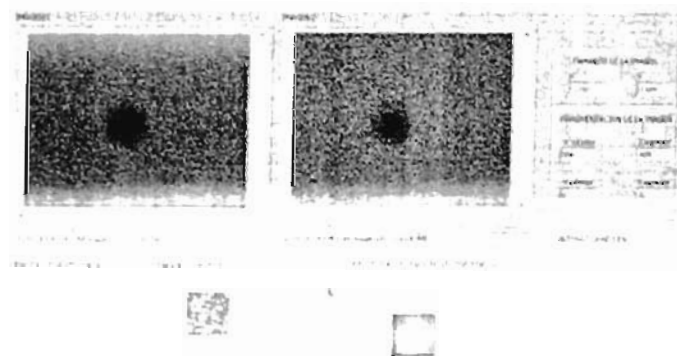
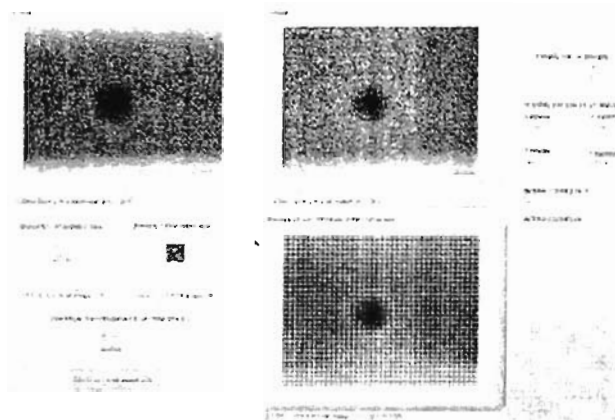


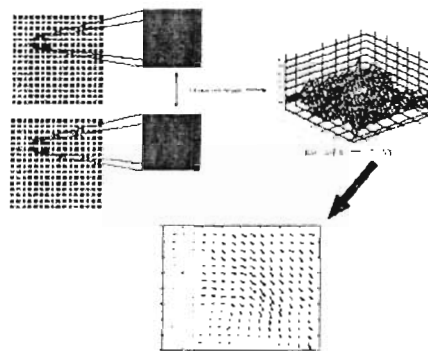
Figura 7.5. Realizamos pruebas con imágenes las fragmentamos y realizamos su correlación cruzada



**Figura 7.6.** Al fragmentar las 2 imágenes en tamaños de 32 x 32 píxeles realizamos la correlación cruzada para así formar una imagen completa del tamaño de las imágenes reales

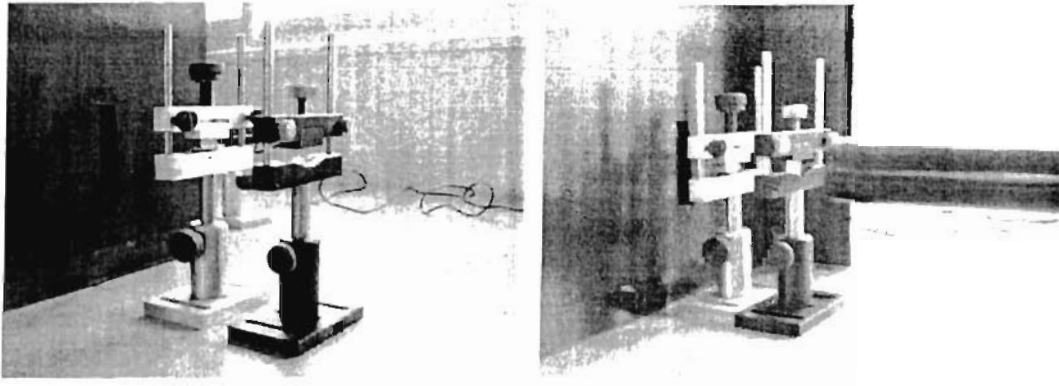
## 7.2. Pruebas finales

El esquema general de la correlación cruzada es de 2 imágenes fragmentarlas aplicarles la correlación cruzada obtener el pico de la correlación y formar vectores con estos picos obtenidos, para formar mapas de vectores a continuación una figura del esquema del proceso de un DPIV

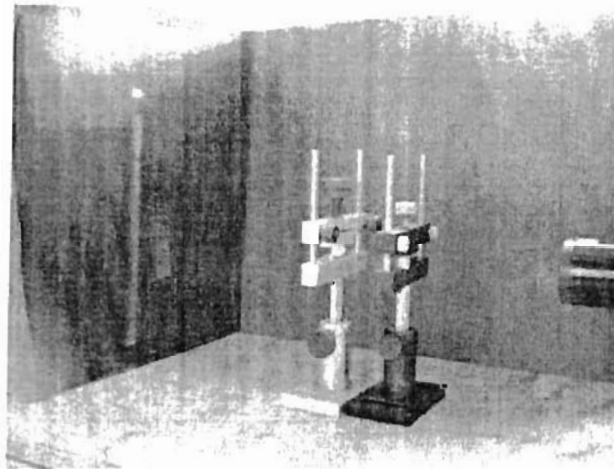


**Figura 7.7.** Esquemático general del proceso de correlación cruzada

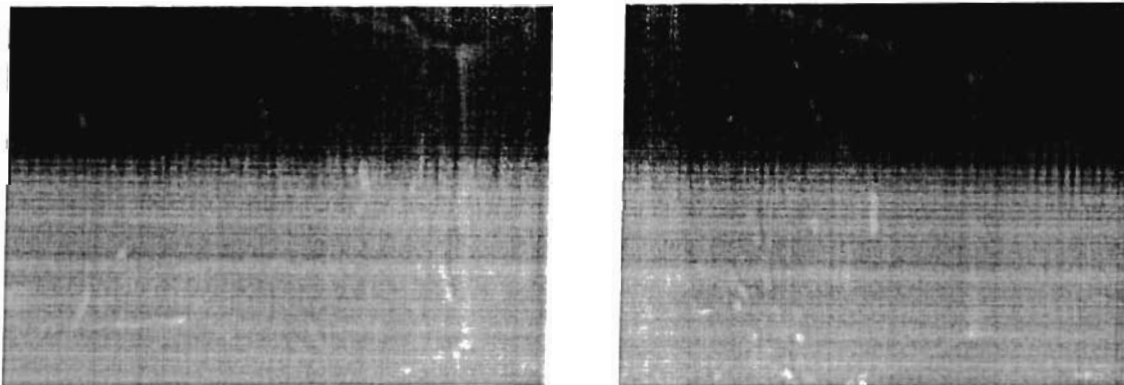




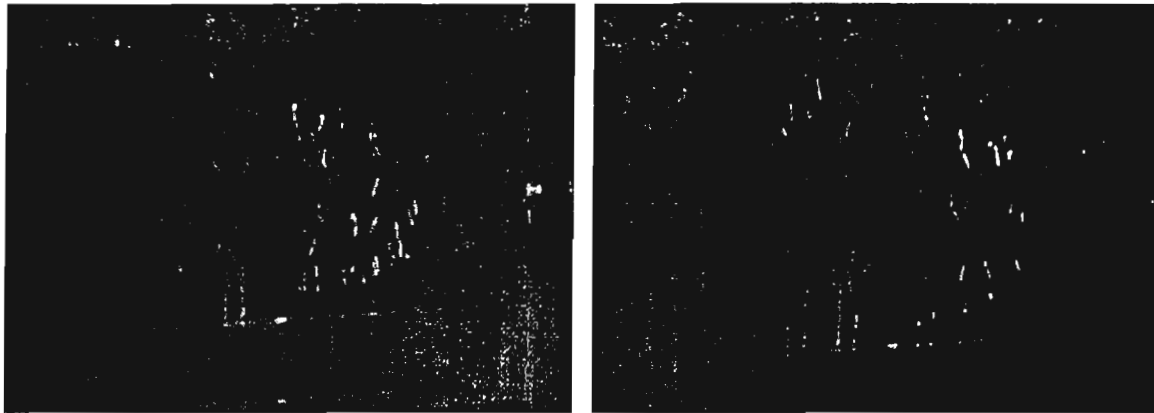
**Figura 7.8.** Colocación de las 2 lentes en los portales para formar así el abanico de luz láser en la imagen de la derecha se puede apreciar la lente cilíndrica de color rojo lo cual indica la incidencia del rayo láser a la lente



**Figura 7.9.** Formación del abanico de luz láser con un láser de longitud de onda de 632 nm y una potencia de 15mW



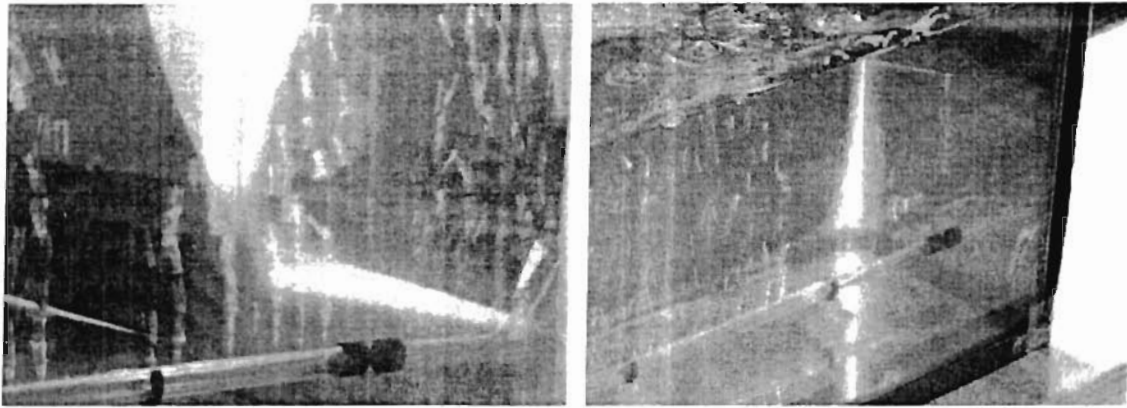
**Figura 7.10.** Incidencia de abanico de luz láser al tanque de agua



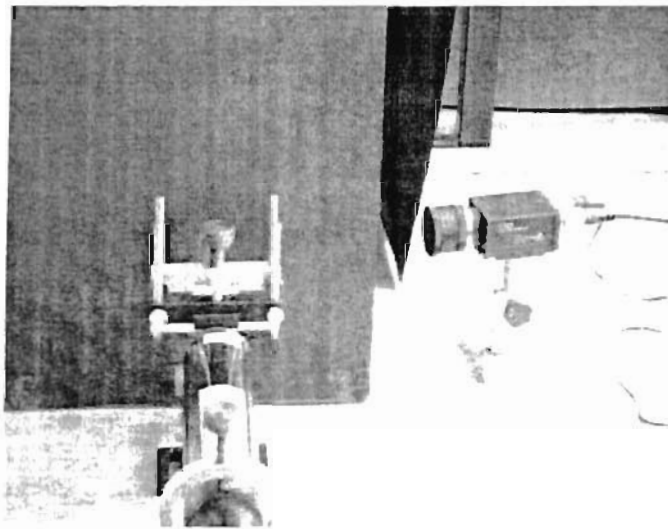
**Figura 7.11.** Sistema DPIV en funcionamiento como se puede apreciar en las imágenes a, b se puede ver un pequeño punto opuesto al abanico de luz láser que es la lente cilíndrica, además se puede apreciar el paso de las burbujas a través del abanico



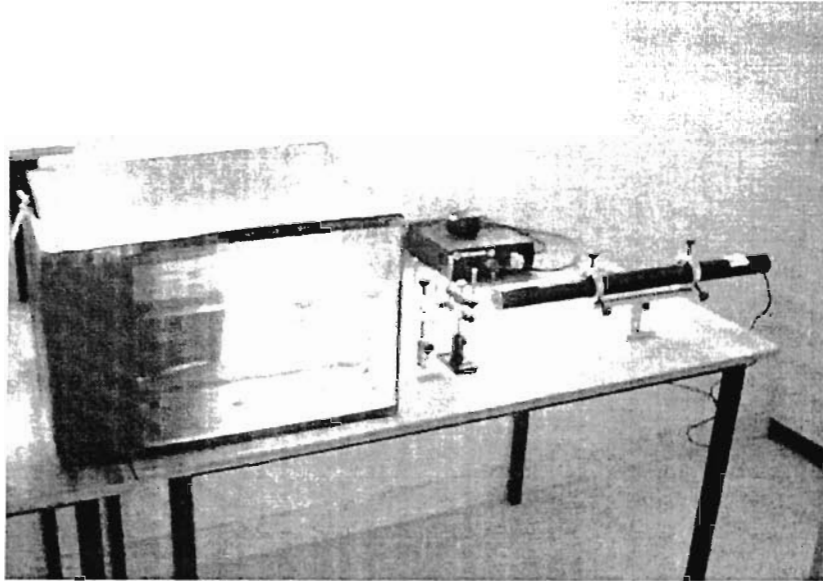
**Figura 7.12.** Se aprecian las burbujas de color rojo al pasar por el abanico de luz esta reflexión de luz nos servirá para tomar imágenes con la cámara CCD que aparece en el fondo de la imagen de la derecha. la cual captura la intensidad de la luz láser (los puntos rojos que aparecen en las imágenes) al momento de pasar las burbujas



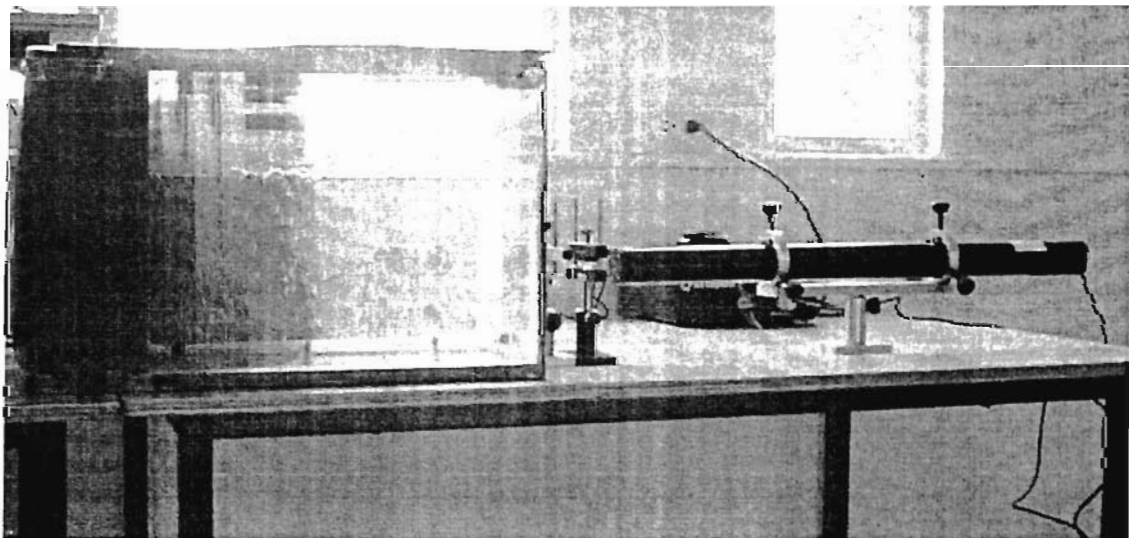
**Figura 7.13.** Se utilizo una bomba de aire regulable conectada a una tubo con pequeños orificios el cual aparece en el fondo del tanque con agua el cual nos proporciona la salida de burbujas, se tapo el tanque para evitar reflexiones del rayo láser y mejor apreciación del abanico de luz



**Figura 7.14.** La cámara es colocada de forma paralela al abanico de luz para la captura de imágenes, las 2 conexiones de la cámara son de la fuente de poder y el cable BNC por donde se envían las imágenes capturadas a la tarjeta NI-1407



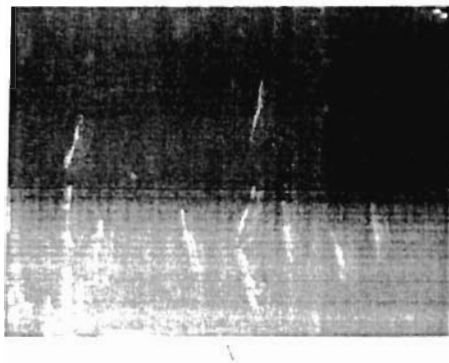
**Figura 7.15.** Sistema DPIV completa como se puede apreciar el sistema es compacto y de fácil manejo

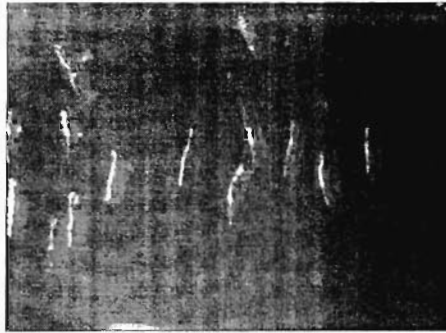


**Figura 7.16.** Sistema DPIV en funcionamiento



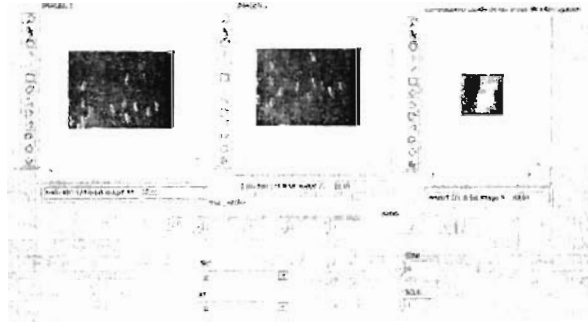
Figura 7.17. Programa de captura de imágenes en LABVIEW





B

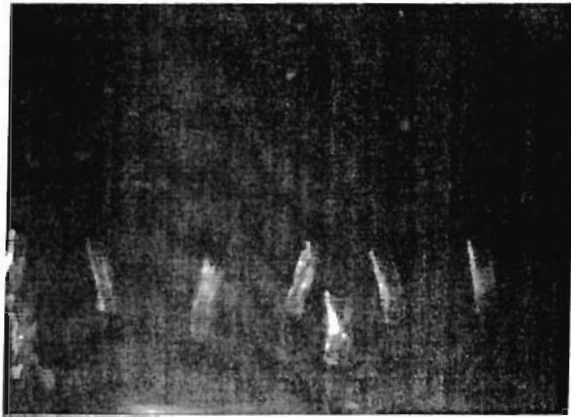
**Figura 7.18(A,B).** Fotos digitales del movimiento de las burbujas tomadas por la cámara CCD y manipuladas por el programa LabVIEW, las fotos tienen una diferencia de tiempo de 4 centésimas de segundo



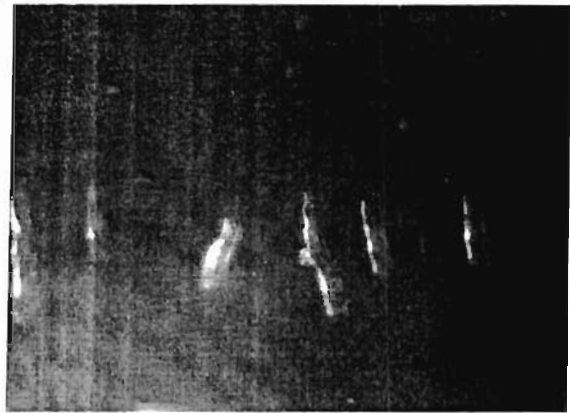
**Figura 7.19.** Aplicación de la correlación cruzada a las imágenes A y B con un respectivo tablero para indicar parámetros



**Figura 7.20.** Mapa del movimiento de los vectores obtenidos de la correlación cruzada de las imágenes A y B



A



B



C



D

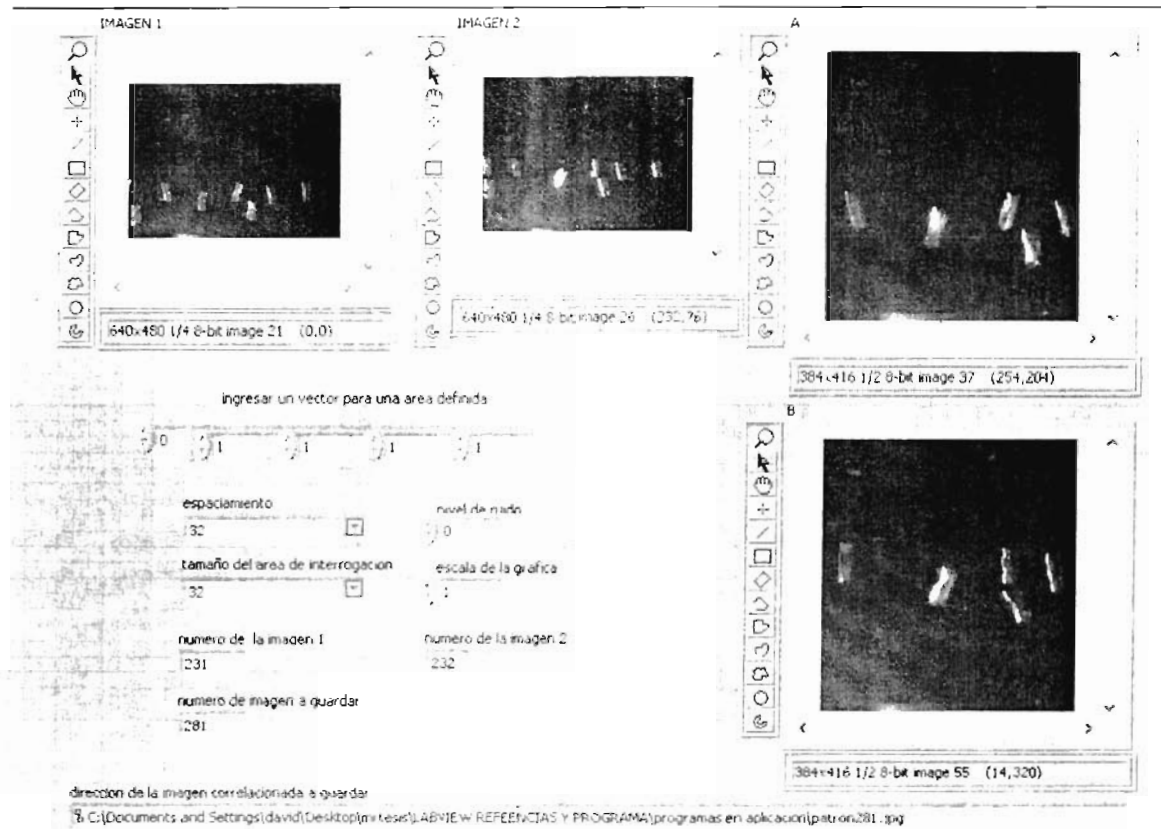


E



F

Figura 7.21(A,B,C,D,E,F). Secuencia de Fotos digitales del movimiento de las burbujas tomadas por la cámara CCD.



**Figura 7.22.** Aplicación de la correlación cruzada a una secuencia de imágenes de las figuras 7.21 con un respectivo tablero para indicar parámetros y lugar donde se guardara la imagen







D



E

Figura 7.23(A,B,C,D,E). Secuencia de imágenes correlacionadas del movimiento de las burbujas de la figura 7.21 con sus vectores de velocidad respectivamente



Figura 7.24. Programa de LabVIEW que muestra las imágenes correlacionadas donde nosotros solamente ingresamos el tiempo de exposición

## CAPITULO VIII CONCLUSIONES

### 8.1 Conclusiones sobre el DPIV

Las conclusiones a las que se han llegado después de la elaboración de un DPIV han sido las siguientes: Se lograron varias metas comenzamos con la investigación del tema DPIV auxiliados de las técnicas PIV, LDA, HPIV, etc. Las cuales nos ayudaron a entender el funcionamiento de este tipo de sistemas y la importancia en aplicaciones sociales las cuales han venido a mejorar la vida cotidiana aunque no tiene mucho tiempo varios investigadores están interesados ya que es un sistema novedoso y con un gran campo en crecimiento, los programas de simulación OSLO y CODE V, los cuales cuentan con una gama de lentes en sus librerías nos sirvieron para escoger una lente cilíndrica y otra plano cóncava ya que estos programas nos simulan el comportamiento de los haces a través de las lentes en planos de 2 dimensiones y tridimensionales facilitándonos así la colocación de las lentes para formar el abanico de luz.

Comenzamos captura de imágenes con un programa de LabVIEW el cual maneja la tarjeta NI-1407 y la cámara CCD además de ir haciendo pruebas con imágenes como parte del programa total para el velocímetro de partículas basado en imágenes digitales. Las cuales nos ayudaron a checar posibles errores a la hora de armar el sistema completa

Se armo el sistema y Tomamos el sistema DPIV como un sistema de lazo cerrado lo describimos en términos de la teoría lineal del sistema. La visión general que emerge de la descripción de los aspectos fundamentales se presentan las limitaciones de la técnica como consecuencias directas de las opciones particulares de la puesta en práctica. Por ejemplo, la representación del campo de la velocidad como el campo de la dislocación implica una elaboración de un pasabajos espacial y temporal de filtración.

Otro ejemplo es la ambigüedad direccional se presenta debido al hecho de la valoración del covariancia cruzada de la imagen se pone en ejecución como autocorrelación espacial. El análisis adicional de las señales demostró la resolución de la medida no es determinada por el tamaño del píxel, pero sí por el diámetro de la imagen de la partícula concerniente al tamaño de la área de interrogación. La cantidad de información con respecto a la dislocación de la imagen partícula no mejora cuando la imagen de la partícula tiene un diámetro de más de dos píxeles: otra reducción del tamaño del píxel corresponde a un sobre-muestreo de la señal. Evidentemente, esto se aplica que la información con respecto a la dislocación (es decir localización del pico de la correlación) solamente para otras características de la señal, tales como amplitud máxima (es decir movimiento fuera del plano) y el ancho del pico (es decir gradientes de la velocidad), los requisitos de la resolución pueden ser absolutamente diferentes

La teoría proporciona las pautas para la optimización de la técnica de la medida. Tan bien ha estado demostrado que la confiabilidad de la medida está determinada cerca la densidad de imagen, mientras que es la precisión de la medida determinado es por el diámetro de la imagen partícula.

Auxiliándonos de la teoría lineal obtuvimos mejores resultados en el funcionamiento del método. LabVIEW lo utilizamos para capturar, procesar y mostrar las imágenes obtenidas ya que cuenta con un lenguaje visual muy práctico y encontrar los vectores de velocidad en 2D y 3D. Este tipo de sistemas es muy práctico en la industria automotriz al momento de probar la aerodinámica de los automóviles, quizás esta sea la técnica base para que en un futuro se pueda encontrar la solución para que los objetos leviten sin necesidad de tener mucho espacio. A continuación algunos puntos importantes y recomendaciones sobre el DPIV

## 8.2. Puntos Importantes para hacer un DPIV más útil.

- a. Una teoría principal debe ser desarrollada que integra todos los aspectos siguientes de DPIV:
  - Dinámica de la partícula y la relación entre la velocidad medida de la partícula y la velocidad del líquido
  - Proyección de imagen, incluyendo la exactitud y la precisión
  - Grabación de la imagen y el efecto de la pixelización con los buenos modelos del ruido para las cámaras
  - Algoritmos óptimos para establecer partículas con exactitud máxima
  - Algoritmos óptimos para aparear imágenes de la partícula con confiabilidad máxima
  - Interpolando y reafirmar datos regularmente muestreados de la interrogación de la correlación o aleatoriamente datos muestreados de PTV o de la resolución PIV
- b. Los métodos sembradores de la nuevos, más versátiles partícula son necesarios
  - Permitir la optimización fácil de la concentración y de las altas concentraciones en volúmenes grandes
  - Producir las nuevas partículas para los flujos con las altas partículas severas de la fricción de la aceleración con grande dispersión de secciones representativas tales como esferas espinosas.
- c. La meta se debe fijar para alcanzar un rango dinámico de la velocidad de 1000:1. Esto enormemente aumentaría la utilidad de PIV y hace la optimización aburrida de parámetros experimentales menos importante
- d. Los medios se deben intentar para reducir costos totales del sistema reduciendo los costos de fuentes de luz y cámaras
- e. Los sistemas del bajo costo se deben desarrollar para los usos restrictos del propósito por ejemplo sondan -PIV. El lector tendrá indudablemente algunos progresos preferidos a agregar a esta lista.

## 8.3. Recomendaciones para una mayor exactitud

La exactitud de algunos esquemas de la evaluación de DPIV. Para llevar a cabo una mejor exactitud un DPIV se recomienda:

1. Utilizar los diámetros de la imagen de la partícula entre 2 y 4.5 píxeles. Para los gradientes de la dislocación mayores que 0.05 un diámetro mayor de 3 píxeles es preferible.
2. La densidad de imagen media de la partícula debe ser mayor de 10 por área de la interrogación. Esto asegurará a probabilidad válida del vector de casi 100 %. El aumento en la exactitud para la partícula a las densidades de imagen sobre 20 no son apreciables.
3. Intentar conseguir una intensidad del fondo de la imagen uniforme

4. La intensidad máxima de la imagen de la partícula debe ser alta, sin conseguir picos saturados (es decir igual a 4095).
5. La separación del tiempo entre las imágenes debe conformarse con la regla de  $1/4$  para el inicial tamaño de área de la interrogación
6. Utilizar un traslapo de áreas de interrogación del 50 %.

## CAPITULO IX TRABAJO A FUTURO

### 9.1 DPIV 3D

En algunos casos el campo de velocidades es de tres dimensiones. En trabajo a futuro se podría diseñar un sistema de medida no destructivo que permite medir el campo de velocidades de un fluido en tres dimensiones. DPIV captura los vectores de velocidad de dos dimensiones en un plano del campo del fluido. Tiene la desventaja que permite medir solo las componentes del campo de velocidades que se encuentran en el plano de medida, si tiene componentes de velocidades en la otra dimensión, la misma no es tomada en cuenta y provoca además el error de polarización en la medida de las componentes del campo. Para poder analizar campos de velocidades complejos puede crearse un sistema de medida de tres dimensiones. El método de medida se basaría en estereografía consiste en aplicar el método DPIV de correlación cruzada al campo de velocidades del fluido utilizando dos cámaras separadas una distancia determinada. Las diferencias presentes en los campos de velocidades en dos dimensiones obtenidos permitiría inferir el valor de la velocidad en la tercera dimensión. Existen dos configuraciones posibles. El método de traslaciones, consiste en colocar paralelos los planos de imagen de las cámaras y el plano de medida. El método de desplazamiento angular consiste en ubicar los planos imagen de las cámaras y el plano de medida con distintos ángulos de forma de obtener el mayor reflejo posible de las partículas iluminadas por el láser.

Tomar una imagen con una cámara, consiste en proyectar un objeto tridimensional en un plano de dos dimensiones. Suponiendo en primera aproximación que la cámara no presentara ningún defecto, se puede utilizar el modelo pinhole.

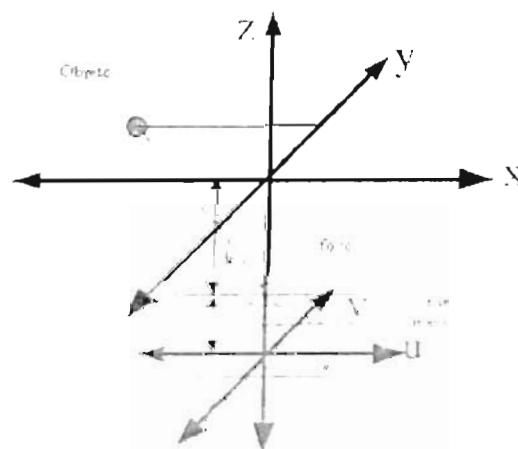


Figura 9.1. Esquema de una cámara modelo pinhole

En la figura 1 se puede observar un esquema de la cámara. De la misma se puede inferir que las coordenadas del objeto proyectado sobre el plano imagen de la cámara son las correspondientes a la Ec.(121).

$$\begin{aligned} u &= \left( \frac{-d_1}{z} \right) x \\ v &= \left( \frac{-d_1}{z} \right) y \end{aligned} \quad (121)$$

$$\begin{aligned} u &= a_{11}x - a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t \\ v &= a_{21}x - a_{22}y - a_{23}z + a_{24}t \\ w &= a_{31}x - a_{32}y + a_{33}z + a_{34}t \end{aligned} \quad (122)$$

$$\begin{aligned} U &= \frac{u}{w} \\ V &= \frac{v}{w} \end{aligned} \quad (123)$$

En donde  $d_1$  es la distancia del foco al plano imagen,  $z$  es la distancia del foco al objeto  $(u,v)$  coordenadas del plano imagen,  $(x,y,z,t)$  coordenadas del objeto. Para simplificar el análisis se utiliza la matriz de proyección perspectiva de la cámara, la que surge de utilizar un sistema proyectivo de coordenadas en lugar del cartesiano, esto permite linealizar el sistema. La expresión de las mismas es la mostrada en la Ec.(122) en donde  $(u,v,w)$  son coordenadas proyectivas y finalmente la Ec.(123) muestra el cambio a coordenadas cartesianas donde  $(U,V)$  son 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  $a_{ij}$ . Con este fin se utiliza una grilla de referencia que se coloca en la posición del plano iluminado, sobre esta grilla se determina la posición de distintos puntos conocidos, reemplazando en la Ec.(122) se puede construir la matriz de calibración de la cámara Ec.(124), resolviendo la misma se encuentran los coeficientes buscados

$$\begin{aligned} x_1 \cdot a_{11} + y_1 \cdot a_{12} + z_1 \cdot a_{13} + a_{14} &= u_1 \\ x_2 \cdot a_{11} + y_2 \cdot a_{12} + z_2 \cdot a_{13} + a_{14} &= u_2 \\ x_3 \cdot a_{11} + y_3 \cdot a_{12} + z_3 \cdot a_{13} + a_{14} &= u_3 \\ x_4 \cdot a_{11} + y_4 \cdot a_{12} + z_4 \cdot a_{13} + a_{14} &= u_4 \\ x_1 \cdot a_{21} + y_1 \cdot a_{22} + z_1 \cdot a_{23} + a_{24} &= v_1 \\ x_2 \cdot a_{21} + y_2 \cdot a_{22} + z_2 \cdot a_{23} + a_{24} &= v_2 \\ x_3 \cdot a_{21} + y_3 \cdot a_{22} + z_3 \cdot a_{23} + a_{24} &= v_3 \\ x_4 \cdot a_{21} + y_4 \cdot a_{22} + z_4 \cdot a_{23} + a_{24} &= v_4 \end{aligned} \quad (124)$$

$$\begin{aligned} X_1 \cdot a_{11} + Y_1 \cdot a_{12} + Z_1 \cdot a_{13} + a_{14} &= U_1 \\ X_2 \cdot a_{11} + Y_2 \cdot a_{12} + Z_2 \cdot a_{13} + a_{14} &= U_2 \\ X_3 \cdot a_{11} + Y_3 \cdot a_{12} + Z_3 \cdot a_{13} + a_{14} &= U_3 \\ X_4 \cdot a_{11} + Y_4 \cdot a_{12} + Z_4 \cdot a_{13} + a_{14} &= U_4 \\ X_1 \cdot a_{21} + Y_1 \cdot a_{22} + Z_1 \cdot a_{23} + a_{24} &= V_1 \\ X_2 \cdot a_{21} + Y_2 \cdot a_{22} + Z_2 \cdot a_{23} + a_{24} &= V_2 \\ X_3 \cdot a_{21} + Y_3 \cdot a_{22} + Z_3 \cdot a_{23} + a_{24} &= V_3 \\ X_4 \cdot a_{21} + Y_4 \cdot a_{22} + Z_4 \cdot a_{23} + a_{24} &= V_4 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que una cámara proyecta puntos del espacio tridimensional en un plano bidimensional, la misma no puede reconstruir el espacio tridimensional y para realizar esta reconstrucción se necesitan dos cámaras. El esquema de un ejemplo en la figura 9.2.

**Figura 9.2.** Ejemplo de un montaje de 2 cámaras para estereografía

Las cámaras se calibran según el punto anterior enfocadas sobre el plano donde se mide el campo de velocidades del fluido. cada una de las cámaras presenta su matriz de proyección perspectiva (en este caso  $a$  para la primera y  $b$  para la segunda) y para obtener la información tridimensional se deben combinar estas dos matrices y se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 (a_{11}-a_{31}\cdot u_1)\cdot x-(a_{12}-a_{32}\cdot u_1)\cdot y+(a_{13}-a_{33}\cdot u_1)\cdot z+(a_{14}-a_{34}\cdot u_1)\cdot t &= 0 \\
 (a_{21}-a_{31}\cdot v_1)\cdot x+(a_{22}-a_{32}\cdot v_1)\cdot y+(a_{23}-a_{33}\cdot v_1)\cdot z+(a_{24}-a_{34}\cdot v_1)\cdot t &= 0 \\
 (b_{11}-b_{31}\cdot u_1)\cdot x+(b_{12}-b_{32}\cdot u_1)\cdot y+(b_{13}-b_{33}\cdot u_1)\cdot z+(b_{14}-b_{34}\cdot u_1)\cdot t &= 0 \\
 (b_{21}-b_{31}\cdot v_1)\cdot x+(b_{22}-b_{32}\cdot v_1)\cdot y+(b_{23}-b_{33}\cdot v_1)\cdot z+(b_{24}-b_{34}\cdot v_1)\cdot t &= 0
 \end{aligned}
 \tag{125}$$

Resolviendo este sistema se obtiene la posición en 3D del punto analizado con este fin se realiza la descomposición SVD la cual convierte la matriz en un producto de tres matrices, donde la central es diagonal y son los autovalores del sistema. Se busca el autovalor cercano a cero y el autovector correspondiente es la solución buscada. Para poder cumplir con el objetivo de calibrar las imágenes.

Para aplicar la estereografía a las medidas realizadas con DPIV analicemos el método de correlación cruzada. El mismo consiste en tomar dos imágenes del campo en tiempos distintos, dividir la primera imagen tomada en pequeñas ventanas, y correlacionar esa imagen con pequeñas ventanas de la siguiente imagen. en la Ec.(126) se muestra el algoritmo de correlación cruzada, el máximo de esa correlación representa el desplazamiento del fluido medido en la Ec.(127). Por lo tanto este método nos entrega el vector desplazamiento  $(\Delta X, \Delta Y)$ .

$$\sum_{i,j} (I_1(x_i, y_j) - I_2(x_i + \Delta X, y_j + \Delta Y))^2 = \min \tag{126}$$

$$\Delta X, \Delta Y \text{ más mole } = \arg \min \tag{127}$$

El método propuesto consiste en tomar imágenes del plano de medida con dos cámaras colocadas separadas una cierta distancia. Se toman dos imágenes simultáneamente una en

cada cámara y luego de transcurrido un tiempo se repite el procedimiento. Para medir el campo de velocidades debemos medir el desplazamiento de las partículas en una zona del espacio.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t}, \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (128)$$

Se debe determinar los valores de  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  ya que  $\Delta t$  es conocido, el tiempo transcurrido entre una imagen y otra. Por esta razón se define como ventana un elemento de volumen. Cada una de las cámaras capturan una proyección de este elemento de volumen, que se visualiza como un rectángulo en cada una de las imágenes, estrictamente hablando es un hexágono pero por simplicidad se usa el rectángulo que circunscribe el hexágono. Para determinar estas ventanas se define una grilla tridimensional, con cada uno de los elementos de volúmenes y se proyectan los mismos sobre las imágenes tomadas por las cámaras. Sobre estas ventanas se mide el desplazamiento del fluido aplicando el método PIV convencional, obteniendo dos vectores de resultados. Solo queda determinar como componer estas imágenes para obtener el campo en tres dimensiones. Si analizamos la medida utilizando coordenadas proyectivas tendremos que  $U=F(x)$  donde  $U$  son las coordenadas proyectivas en el plano imagen,  $x$  son las coordenadas proyectivas del objeto y  $F()$  es la matriz de proyección perspectiva de la cámara entonces:

$$\begin{aligned} U &= F(x) \\ U + \Delta U &= F(x + \Delta x) \\ \Delta U &= F(x + \Delta x) - F(x) \end{aligned} \quad (129)$$

donde  $\Delta U$  son los vectores obtenidos en el párrafo anterior y debemos calcular  $\Delta x$ . Se proyecta el centro de masa del elemento de volumen sobre las imágenes tomadas por las cámaras utilizando la matriz de proyección perspectiva de la cámara Ec.(122). Se suma los desplazamientos encontrados y se obtiene cuanto se desplazo el fluido en cada imagen. Con los vectores obtenidos se calcula el desplazamiento del fluido y finalmente se resta contra el centro de masa para obtener los incrementos buscados.



## 10. REFERENCIAS

- [1] Adrián, R.J., 1984. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry. *Appl. Optics* 23, 1690-91.
- [2] Pickering, C.J.D. & Halliwell, N.A., 1984. Speckle photography in fluid flows: signal recovery with two-step processing. *Appl. Optics* 23, 1128-1129.
- [3] Adrian R J 1988 Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow Selected Papers 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics ed T Asanuma et al (Lisbon: Lagoon) pp 115-290
- [4] Adrian, R.J., 1991. Particle-imaging technique for experimental fluid mechanics. *Annual Reviews in Fluid Mechanics* 23, 261-304.
- [5] Keane, R.D., and Adrian, R.J., 1993. "Theory of cross-correlation analysis of PIV images". *Appl. Sci. Res.* 49, 191-215
- [6] Westerweel J 1993 Digital particle image velocimetry—theory and application PhD Thesis University of Delft
- [7] Westerweel, J., 1997. "Fundamentals of digital particle image velocimetry", *Meas. Sci. Technol.* 8, 1379-1392.
- [8] Westerweel, J., Dabiri, D., and Gharib, M., 1997, "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings", *Exp. in Fluids* 23, 20-28
- [9] M. Raffel, C. Willert and J. Kompenhans ,1998. Particle Image Velocimetry, a Practical Guide, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [10] W. Weng, G. Liao, W. Fan .1998. An improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry
- [11] Wereley S. Carl D. Meinhart .1998. Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms
- [12] S M Soloff, R J Adrian and Z-C Liu.1997 Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry *Meas. Sci. Technol.* 8 , 1441-1454.
- [13] J. D. Posner, M. L. Riethmuller .1998. Translation Stereoscopic Digital PIV Applied to a Turbulent Jet
- [14] Coudert S, J. Westerweel and I. Fournel .2001. "Comparison between asymmetric and symmetric stereoscopic DPIV"

- [15] [http://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=104263&org=NSF&from=news](http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=104263&org=NSF&from=news). Ultra-Fast Camera Captures How Hummingbirds Hover June 22, 2005
- [16] <http://www.invdes.com.mx/anteriores/Noviembre2000/htm/imp.html> .Periodismo de ciencia y tecnologia . noviembre 2000.aplicaciones del petróleo
- [17] Wendt V., Fürll M. .2001. "Flow field measurements around a car using particle image velocimetry". 4th Intl. Symp. on Particle Image Velocimetry, Goettingen, Germany, Sep. 17-19., 2001.
- [18] S. C. M. Yu, J. B. Zhao, W. K. Chan, L. P. Chua and F. Hui "Steady and pulsatile flow characteristics in cerebrovascular aneurysm models. Part 2: A Particle Image Velocimetry study", in the Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Biomedical Engineering, Singapore, 3-6 December 1997.
- [19] LAMBDA RESEARCH CORPORATION , 2001. " OSLO OPTICS REFERENCE "
- [20] OPTICAL RESEARCH ASSOCIATES. 2003. " CODE V INTRODUCTORY USER'S GUIDE "
- [21] SONY , " CCD B/W VIDEO CAMERA MODULE XC-ST50/50CE USER'S GUIDE " .1999.
- [22] National Instruments. "IMAQ Vision Concepts Manual", 2000.
- [23] National Instruments. "NI-IMAQ User Manual". 2000.
- [24] National Instruments. "NI-IMAQ Function Reference Manual", 2000.
- [25] National Instruments. "IMAQ PCI/PXI-1407 User Manual", 1999
- [26] National Instruments. " DIGITAL IMAGE PROCESSING ", 2003
- [27] <http://www.dantecdynamics.com/PIV/Princip/Index.html>
- [28] "Pixel". Enciclopedia Microsoft® Encarta® 99. © 1993-1998 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- [29] Elghobashi, S., 1994. "On predicting particle-laden turbulent flows". Appl. Sci. Res. 52, 309-329
- [30] Nordling, C., and Österman, J., 1982, Physics Handbook, Studentlitteratur Lund.
- [31] Westerweel, J., 1994, "Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data", Exp. in Fluids 16, 236-247

- [32] Cowen, E.A. and Monismith, S.G., 1997, "A hybrid digital particle tracking velocimetry technique". *Exp. in Fluids* **22**, 199-211.
- [33] Keane, R.D., and Adrian, R.J., 1990, "Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems". *Meas. Sci. Technol.* **1**, 1202-1215.
- [34] Yeh, Y. & Cummins, H., 1964. Localised fluid flows measurements with a He-Ne laser spectrometer. *Appl Phys. Lett.*, **4**, pp. 176-178.
- [35] Strunck V, Sodomann T, Müller H and Dopheide D., 2004 How to get spatial resolution inside probe volumes of commercial 3D LDA systems. *Experiments in Fluids* **36** 141-145
- [36] Albrecht H. E. , Borys M., Damaschke N., and Tropea C., 2003 *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- [37] <http://www.dantecdynamics.com/pda/Princip/Index.html>
- [38] Application description in cooperation with Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (<http://www.ipa.fhg.de>). Sprays (atomisation of liquids) Application Note Publication No.: PDA10
- [39] <http://www.dantecdynamics.com/piv/Princip2/Index.html>
- [40] Fujiwara A., Tokuhuro, A., and Hishida, K., Application of PIV/LIF and Shadow-Image to a Bubble Rising in a Linear Shear Flow Field
- [41] Lindken, R., Merzkirch, W., A novel PIV technique for measurements in multi-phase flows and its application to two-phase bubbly flows 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry Göttingen, Germany, September 17-19, 2001
- [42] [Http://www.holomap.com:hpiv.htm](http://www.holomap.com:hpiv.htm)
- [43] Barnhart, D.H., Adrian, R.J. & Papan, G.C., 1994. Phase conjugate holographic system for high resolution particle image velocimetry. *Appl. Optics* **33**, pp.7159-7170
- [44] Barnhart, D.H., Halliwell N. A. & Coupland, J. M., 2000. Holographic particle image velocimetry: analysis using a conjugate reconstruction geometry. *Optics and Laser Technology* Volume 32, Issues 7-8, pp. 527-533
- [45] Coupland, J.M. & Halliwell, N.A., 1997. Holographic displacement measurements in fluid and solid mechanics: immunity to aberrations by optical correlation processing. *Proc. R. Soc. Lond. A* **453**, pp.1053-1060
- [46] Royer, H., 1997. Holography and Particle Image Velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* **8**, pp. 1562-1572.

- [47] Hinsch K.D., 2002. Holographic particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 13 R61-72.
- [48] Keane R D and Adrian R J 1991. Optimization of particle image velocimeters. II. Multiple pulsed. systems. *Meas. Sci. Technol.* 2 963-974
- [49] Willert, C.E. & Gharib, M (1991) "Digital particle image velocimetry." *Exp. Fluids* 10, 181-193.
- [50] Westerweel J 1993 *Digital Particle Image Velocimetry Theory and Application* (Delft: Delft University Press) ,1993 *Optical diagnostics in fluid and thermal flow SPIE* 2005 624-35
- [51] Priestley M B 1992 *Spectral Analysis and Time Series 7th edn* (San Diego, CA: Academic)
- [52] Rosenfeld A and Kak A C 1982 *Digital Picture Processing 2nd edn* (Orlando, FL: Academic)
- [53] Westerweel, J. (2000) "Analysis of PIV interrogation for inhomogeneous image fields" Delft University of Technology pp1-8
- [54] <http://www.dantecdynamics.com/piv/Princip/Index.html>
- [55] Adrian R J 1995 Limiting resolution of particle image velocimetry for turbulent flow *Advances in Turbulence Research* pp 1-19
- [56] Keane, R.D., Adrian, R.J., and Zhang, Y., 1995. "Super-resolution particle imaging velocimetry", *Meas. Sci. Technol.* 6, 754-768.
- [57] 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
- [58] Oppenheim A V, Willsky A S and Young J T 1983 *Signals and Systems* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall)
- [59] Goodman J W 1968 *Introduction to Fourier Optics* (New York : McGraw-Hill)
- [60] Jain A K 1989 *Fundamentals of Digital Image Processing* (Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall)
- [61] Willert C E 1996 "The fully digital evaluation of photographic PIV recordings" *Opt. Sci. Res.* 56 79-102

- [62] Westerweel J. Draad A. A. van der Hoeven, J. G. Th and van Oord J ,1996, "Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry" *Exp. Fluids* 20 165-177
- [63] Alexander B F and Ng K C 1991, "Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation" *Opt. Eng.* 30 1320-1331
- [64] Kaufmann, G.H., 1982, "Digital analysis of speckle photography fringes: processing of experimental data", *Applied Optics*, 19, 3411-3413
- [65] Illingworth, J. and Kittler, J., 1988, "A survey of the Hough transform", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 44, 87-116
- [66] Mastin, G.A. and Ghiglia, D.C., 1985, "Digital extraction of interference fringe contours", *Applied Optics*, 24, 1727-1728
- [67] Ru, Q., 1994, "Digital analysis of Young's interference fringes", *Ultramicroscopy*, 55, 15-17
- [68] Pomarico, J. et al, 1992, "Algorithm to compute spacing of digital speckle correlation fringes", *Optik*, 95, 125-127
- [69] Li, D.W., Chen, J.B. and Chang, F.P., 1985, "Statistical analysis of one-beam subjective laser-speckle interferometry", *J. Opt. Soc. Am. A*, 2, 657-66
- [70] Reeves M; Lawson NJ; Halliwell NA; Coupland JM (1995) Particle image velocimetry: image labeling using encoding of the pointspread function by application of a polarization-sensitive pupil mask. *Appl Optics* 34: 194-200
- [71] Wereley S. Carl D. Meinhart (1998) Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms
- [72] Huang, H. T., Fielder, H. E. and Wang, J. J., (1993), "Limitation and improvement of PIV, Part I. Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns", *Exp. Fluids*, 15, pp168-74.
- [73] Scarano, F. and Riethmuller, M. L., (1999), "Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset", *Exp. Fluids*, 26, pp513-23
- [74] Westerweel, J. (1993), "Analysis of PIV interrogation with low pixel resolution", *Proc. SPIE*, 2005, *Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow*, pp624-35.
- [75] Huang, H. T., Fielder, H. E. and Wang, J. J., (1993), "Limitation and improvement of PIV, Part II: Particle image distortion, a novel technique", *Exp. Fluids*, 15, pp263-73.

- [76]Jambunathan, K., Ju. X. Y., Dobbins B. N. and Ashforth-Frost, S., (1995). "An improved cross correlation technique for particle image velocimetry", Meas. Sci. Technol., 6, pp507-14.
- [77]Adrian, R. J. (1997). " Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry", Meas. Sci. Technol., 8, pp1393-98.
- [78] [www.holomap.com](http://www.holomap.com)
- [79] [www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com)
- [80] Helium-neon laser series models 1100.1500 and 1600.user's manual ,july 2003
- [81] [www.jdsu.com](http://www.jdsu.com)
- [82] [www.acuariopeces.com](http://www.acuariopeces.com)
- [83] [bomba.boonic.com.mx](http://bomba.boonic.com.mx)
- [84] <http://www.2mcctv.com/index-Lenses-VarifocalManualIris.html>
- [85] [www.lambdares.com](http://www.lambdares.com)
- [86] [www.opticalres.com](http://www.opticalres.com)
- [87]National Instruments. "LABVIEW function and VI reference manual", 1998.
- [88]National Instruments. "IMAQ Vision user Manual", 1999.
- [89]National Instruments. "IMAQ Vision For LABVIEW user manual I". 2003.