CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.

Sistema Para Medir Velocidad en Flujo de Fluidos en 3 Dimensiones

Presenta:

Ing. Adrián Wulfrano Coronel Arredondo

Como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Optomecatrónica

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

CONTENIDO **Pág.**

Agradecimientos III
Resumen IV
Lista de figuras V
Lista de tablas VI
Nomenclatura VII
Abreviaturas VIII

Capítulo 1 Introducción

1.1 Conceptos Generales 1

Capítulo 2 Principios Fundamentales de Holografía

2.1 Introducción 3
2.2 Interferencia 4
2.3 Difracción 7
2.4 Holografía 9

Capítulo 3 Holografía Digital

3.1 Principios 12
3.2 Reconstrucción numérica 15
3.2.1 Reconstrucción por aproximación de Fresnel 15
3.2.2 Reconstrucción por aproximación de convolución 19
3.3 Grabado de hologramas digitales 20
3.3.1 Dispositivo de Carga Acoplada (CCD) 20
3.3.2 Requerimientos de Frecuencia Espacial 22
3.3.3 CCD's y Grabado de Hologramas Digitales 23
3.3.4 Requerimientos de estabilidad 26

Capítulo 4 Velocimetría por Imágenes de Partículas con Holografía Digital en Línea

4.1 Introducción 27
4.2 Principios de DHPIV 27
4.2.1 Registro y reconstrucción de una partícula con un sistema DH en línea 29
4.3 Partículas trazadoras 32
4.4 Principios de los sistemas DHPIV y DHPTV 33
4.4.1 Sistema DHPIV 35

4.4.1.1 Problemas con el Sistema DHPIV 37
4.4.1.2 Procesamiento del Sistema DHPIV 37
4.4.1.2.1 Correlación cruzada en imágenes de partículas empleando la Transformada de Fourier 38
4.4.2 Sistema DHPTV 41
4.4.2.1 Procesamiento del Sistema DHPTV 42

Capítulo 5 Resultados, Conclusiones y Bibliografía

5.1 Introducción 44
5.2 Arreglo experimental 44
5.2.1 Experimento sin lente para dos densidades de partículas 45
5.2.1.1 DHPIV 45
5.2.1.2 DHPTV 48
5.2.2 Experimento con lente para una densidad de partículas 52
5.2.2.1 DHPIV 52
5.3 Conclusiones 56
5.4 Bibliografía 57

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor:

Por apoyarme todo el tiempo como maestro y asesor en mí trabajo de tesis y ofrecerme su amistad desde un principio.

A mis demás maestros del CIO:

Por brindarme los conocimientos tan necesarios en mi formación de maestría.

A mis compañeros de maestría:

Por su completa amistad y brindarme ese sentimiento de compañerismo que le dio sentido a mi estancia en la institución.

A mi novia:

Por ser mi compañera sentimental y de trabajo en todo momento y ser quien me dio los ánimos para seguir adelante.

A mi familia:

Por que sin ella no me hubiera formado como una persona íntegra y no hubiera podido llegar hasta aquí.

A la institución CIO en general:

Por abrirme las puertas y permitirme tener este logro mas en la vida.

Al CONACYT:

Por su apoyo económico que me permitió dedicarme de tiempo completo a la maestría.

RESUMEN

El estudio de flujos de fluidos es de interés en la industria aerodinámica, en la industria automotriz, el estudio de contaminantes que se transportan en el aire (o agua), en el desarrollo de métodos eficientes de mezclado en la industria química, etc. Algunas de las variables importantes a medir pude ser la velocidad, presión y temperatura.Actualmente existen varias técnicas invasivas y no-invasivas para la medición de la velocidad en flujo de fluidos. Cada una de estas técnicas ofrece ventajas y desventajas mutuamente, sin embargo, algunas de estas técnicas, o son en tres dimensiones pero puntuales, o de campo completo pero en dos dimensiones. Además, la mayoría de los flujos de interés tecnológico son turbulentos y en tres dimensiones, por lo que se han desarrollado técnicas para extracción de la información en tres dimensiones como son: técnicas de barrido, imágenes estereoscópicas, métodos holográficos y métodos que cuantifican el desenfocamiento de las partículas. Varias de estas técnicas son difíciles de desarrollar experimentalmente. Por lo que, en esta tesis se propone un arreglo experimental simple: la holografía digital en línea para la determinación de la velocidad en tres dimensiones en flujo de fluidos. La técnica la aplicamos a la medición de velocidad del flujo de convección de agua. La contribución principal de la tesis es el desarrollo experimental y teórico de la técnica en nuestro laboratorio para posteriormente usarla en alguna aplicación industrial.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Fig. 1.1 Arreglo PIV

Capítulo 2

Fig. 2.1. Interferencia de dos ondas planas.
Fig. 2.2 Principio de Huygens
Fig. 2.3 Sistema de coordenadas
Fig. 2.4 Grabado de Holograma.
Fig. 2.5 Reconstrucción del holograma.

Capítulo 3

Fig. 3.1 Holografía Digital, a) Grabado, b) Reconstrucción con la onda de referencia E_R, c) Reconstrucción con el conjugado de la onda de referencia E_R^*.
Fig. 3.2 Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma.
Fig. 3.3 Holograma digital de: (a) Una moneda y (b) Un pequeño ángel metálico.
Fig. 3.4 Reconstrucción numérica de los hologramas de moneda y de ángel metálico. (a) Moneda, sin sustraer el orden cero o el término DC, (b) Moneda, sustrayendo el orden cero, (c) Ángel, sin sustraer el orden cero o el término DC, (b) Ángel, sustrayendo el orden cero.
Fig. 3.5. Arquitectura de transferencia por interlinea.
Fig. 3.6. Arquitectura de transferencia por cuadro
Fig. 3.7. Arquitectura de transferencia por cuadro completo.
Fig. 3.8. Obtención de imágenes mediante CCD. (a) Imagen con el objeto desplazado. (b) Imagen con el objeto sin desplazar.
Fig. 3.9. Tiempos de trabajo de una cámara con la función straddling transfer.

Capítulo 4

Fig. 4.1. Arreglo HPIV. **(a)** Etapa de grabado **(b)** Etapa de reconstrucción
Fig. 4.2. Arreglo en línea DHPIV.
Fig. 4.3 Holograma de una partícula con un arreglo holográfico en línea.
Fig. 4.4. Perfil de intensidad vs. Distancia de reconstrucción para la partícula en estudio.
Fig. 4.5 Reconstrucción por convolución de una partícula de 50 micras a su distancia focal. (a) Con el término DC. (b) Sin el término DC. (c) Partícula amplificada.
Fig. 4.6. Tres tipos de densidad de partículas en las imágenes holográficas: **(a)** Baja (DHPTV), **(b)** Media (DHPIV), y **(c)** Alta (LSV)
Fig. 4.7 Principios de DHPIV y DHPTV
Fig. 4.8 Procedimiento de la técnica DHPIV

Fig. 4.9. Dos hologramas de DHPIV reconstruidos en un plano *Z* y divididos en zonas de interrogación.
Fig. 4.10 Función de correlación cruzada de dos imágenes. (a) y (b) Hologramas de partículas enfocadas en distintas posiciones, (c) Espectro de intensidad de la correlación cruzada de los dos hologramas.
Fig. 4.11 Prueba horizontal de correlación.
Fig. 4.12 Prueba vertical de correlación.
Fig. 4.13 Prueba giro de correlación.
Fig. 4.14. Imagen holográfica con baja densidad de partículas para DHPTV.
Fig. 4.15 (a) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_0, **(b)** Imagen de partículas tomada en el tiempo t_1, **(c)** Desplazamiento de las partículas en el intervalo $t_0 - t_1$.

Capítulo 5

Fig. 5.1 Dos hologramas consecutivos de un recipiente con agua, con partículas de 50 micras, con una densidad media-alta.
Fig. 5.2 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 3000 micras, mostrando los vectores de velocidad.
Fig. 5.3 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 8500 micras, mostrando los vectores de velocidad.
Fig. 5.4 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 15000 micras, mostrando los vectores de velocidad.
Fig. 5.5 Dos hologramas consecutivos de un recipiente con agua, con partículas de 50 micras en baja densidad.
Fig. 5.6 Partículas ubicadas en el Holograma 1 del fluido.
Fig. 5.7 Mapa tridimensional de las partículas encontradas en el primer holograma.
Fig. 5.8 Partículas ubicadas en el Holograma 2 del fluido.
Fig. 5.9 Mapa tridimensional de las partículas encontradas en el segundo holograma.
Fig. 5.10 Mapa bidimensional de vectores de velocidad.
Fig. 5.11 Mapa tridimensional de vectores de velocidad.

LISTA DE TABLAS

Capítulo 4

Tabla 4.1. Partículas que pueden usarse en la visualización de flujos líquidos

NOMENCLATURA

$\vec{E}(\vec{r},t)$	Frente de onda
∇	Operador Nabla
∂	Derivada parcial
c	Velocidad de la luz en el vacío
$\sum$	Sumatoria de N términos
$A(x,y,z)$	Amplitud compleja de una onda plana
a	Amplitud de una onda plana
I	Intensidad de una onda plana
ε_0	Permisividad en el vacío
*	Complejo conjugado
φ	Término de fase
$\Delta\varphi$	Incremento de fase
Δl	Diferencia en camino entre frentes de onda $W1$ y $W2$
λ	Longitud de onda de la luz
d	Espacio entre franjas de interferencia
f	Frecuencia espacial
$\Gamma(\xi',\eta')$	Difracción en el plano de observación
ρ	Distancia entre puntos de distintos planos
Q	Factor de inclinación
E_o	Frente de onda de objeto
a_o	Amplitud de la onda objeto
φ_o	Fase de la onda objeto
E_R	Frente de onda de referencia
a_R	Amplitud de la onda de referencia
φ_R	Fase de la onda de referencia
h	Amplitud de transmisión de un holograma revelado
h_0	Amplitud de transmisión de un holograma sin exponer a la luz
β	Pendiente de la amplitud de transmitancia contra las características de exposición del material sensible a la luz.
τ	Tiempo de exposición del holograma
$\Im$	Transformada de Fourier
$\Im^{-1}$	Transformada inversa de Fourier
exp	Función exponencial
Δx	Espacio entre píxeles en la coordenada x
Δy	Espacio entre píxeles en la coordenada y
g	Función de respuesta al impulso
$\otimes$	Función de convolución
max	Máximo permitido

K	Factor de escala
PC	Personal Computer

ABREVIATURAS

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
CCD	Charged Coupled Device
DC	Factor de orden cero
FPS	Frames per second
3D	Tridimensional
PIV	Particle Image Velocimetry
DHPIV	Digital Holography Particle Image Velocimetry
DHPTV	Digital Holography Particle Tracking Velocimetry
LSV	Láser Speckle Velocimetry

1. Introducción

1.1 Conceptos Generales

El desarrollo de técnicas experimentales eficientes para la extracción de los parámetros que describen las características físicas del flujo en fluidos es de extrema importancia, ya que los fluidos se encuentran en diversas disciplinas tales como en la mecánica de fluidos, ingeniería aerodinámica, la microbiología, la ciencia de coloides, en el estudio de contaminantes que se transportan en agua o aire, en el desarrollo de mezclado en la industria química y en el estudio de propiedades térmicas de los fluidos.

Dentro de las técnicas ópticas bidimensionales de campo completo y no destructivas que actualmente existen para hacer mediciones de campos de velocidad en flujos de fluidos, podemos citar las siguientes: Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) [30], Velocimetría Global Doppler (DGV) [31] y la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) [26]. Describiremos brevemente la técnica PIV puesto que es el arquetipo de los métodos para medir velocidad en flujo de fluidos.

Básicamente, PIV es una técnica para el diagnóstico óptico, no invasiva, instantánea y de campo completo que provee mediciones de campos de velocidad en flujo de fluidos. Esta técnica consiste en iluminar en dos instantes de tiempo micro partículas previamente depositadas en el fluido utilizando una fuente de luz pulsada expandida mediante una lente cilíndrica, como se muestra en la figura 1.1. La luz esparcida por las partículas es registrada en un medio sensible a la luz, tal como el negativo de una cámara fotográfica o el sensor de una cámara digital. La información de la velocidad del fluido está en la posición de las partículas en los dos instantes de tiempo en que se iluminaron. Existen algoritmos eficientes para la determinación de la distancia entre la posición inicial y final de las partículas. Esta distancia relacionada con el tiempo de la fuente de luz pulsada nos permite determinar la velocidad de las partículas en toda el área en que se analiza el flujo de fluido.

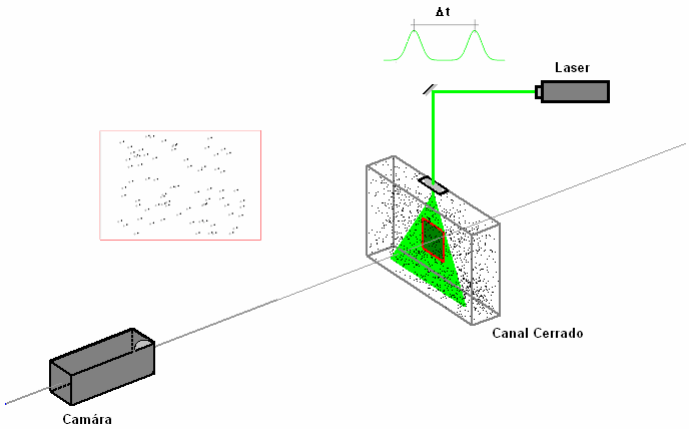


Fig. 1.1 Arreglo PIV

Aunque, PIV se ha aplicado con éxito en condiciones industriales y a velocidades de flujos subsónicas, transónicas y supersónicas, la información que se obtiene está limitada a dos dimensiones. Sin embargo, la mayoría de los flujos de interés tecnológico son turbulentos y en tres dimensiones, por lo que se han desarrollado

técnicas para extracción de la información en tres dimensiones como son: técnicas de barrido [28], imágenes estereoscópicas [32], métodos holográficos [33] y métodos que cuantifican el desenfocamiento de las partículas [31]. Estos métodos pueden ser aplicados en microfluidos o macrofluidos dependiendo del arreglo experimental que se utilice para cumplir tal propósito.

Con los avances desarrollados recientemente en cámaras digitales de alta resolución espacial y velocidad en adquisición de datos ha permitido el entendimiento, modelado y control de flujos turbulentos presentes en aplicaciones industriales. Técnicas como Velocimetría Volumétrica (TV) [34-35] y Holografía Digital PIV (DHPIV) [36] se han podido efectuar gracias a esta tecnología. En esta tesis se aprovecha esta tecnología para desarrollar un sistema de holografía que mida la velocidad en flujo de fluidos.

Actualmente hay varios métodos para registrar hologramas, pero se pueden clasificar en hologramas fuera de eje y hologramas en línea. En este trabajo nos enfocaremos en hologramas en línea, por su simplicidad y estabilidad. En la holografía en línea el rayo objeto y de referencia son paralelos.

La tesis esta enfocada a medir velocidad en tres dimensiones en flujo de fluidos. Básicamente, lo que se hace en esta tesis es usar un arreglo óptico de holografía en línea para obtener imágenes de partículas depositadas dentro de un fluido en movimiento. La posición de las partículas se realiza a través de la reconstrucción digital de los hologramas. La velocidad de las partículas se calcula utilizando algoritmos de correlación y seguimiento de partículas.

La holografía es una técnica óptica en la que se ha trabajado durante mucho tiempo y los aportes teóricos a esta área pueden ser pocos. Este trabajo se concentra en el desarrollo experimental de la técnica en el laboratorio y la elaboración de algoritmos para el análisis de hologramas. Dejando para un futuro el desarrollo de esta tecnología para la aplicación en la industria.

La tesis esta dividida en cuatro partes, primero se da una explicación teórica de los principios de holografía, en la segunda parte se desarrolla el proceso para el grabado y reconstrucción de hologramas, así como su reconstrucción numérica. En la tercera parte se habla sobre las imágenes de partículas y los detalles experimentales de la tesis. Finalmente, se analizan y discuten resultados, dando las conclusiones y trabajo futuro.

2 Principios Fundamentales de Holografía

2.1 Introducción

El inventor de la holografía fue D. Gabor (1900 – 1981) [1, 2, 3], nació en Budapest, Hungría. En 1947, más de una década antes que se construyera el primer láser de helio-neón, Gabor buscaba un método para mejorar la resolución y definición del microscopio electrónico, compensando por medios ópticos las deficiencias de su imagen. Gabor se propuso realizar esto mediante un proceso de registro fotográfico de imágenes al que llamó *holografía*, que viene del griego *holos*, que significa completo, pues el registro que se obtiene de la imagen es completo, incluyendo la información tridimensional. El método ideado por Gabor consistía en dos pasos, el primero de los cuales era el registro en una placa fotográfica del patrón de difracción o bien la interferencia producido por una onda luminosa (o un haz de electrones en el caso del microscopio electrónico) cuando se interpone un objeto cuya imagen se desea formar. El segundo paso era incidir la misma onda luminosa a través del registro fotográfico, una vez revelado. La luz, al pasar por esta placa, se difractaba de tal manera que en una pantalla colocada adelante se formaba una imagen del objeto.

Gabor no tuvo éxito con su propósito fundamental, que era mejorar las imágenes del microscopio electrónico, pero si obtuvo un método nuevo e interesante para formar imágenes. Había formado el primer holograma, aunque rudimentario comparado con los actuales. Para comenzar, la imagen era muy confusa debido a que las diferentes imágenes que se producían no se separaban unas de otras, ya que su montaje óptico se encontraba en línea. Por otro lado las fuentes de luz coherente de la época no permitían una iluminación razonable intensa del holograma, lo que dificultaba su observación.

Desconociendo totalmente los trabajos sobre holografía, Emmett N. Leith, un investigador en ingeniería eléctrica de la Universidad de Michigan, buscaba en 1956 un método para registrar y mostrar gráficamente la forma de onda de las señales de radar, usando técnicas ópticas. En 1960 se enteró de los trabajos de Gabor y vio que había redescubierto la holografía. A partir de entonces, el objetivo de esos trabajos fue perfeccionar el método. La solución que encontró Leith, con la colaboración de su colega Juris Upatnieks [4, 5], eliminaba el principal problema de la holografía de Gabor, de que no solamente se producía una imagen del objeto deseado sino dos, una real y una virtual, que mezcladas entre sí y con la luz incidente producían una imagen muy difusa. La técnica inventada por Leith y Upatnieks resuelve el problema, pues encuentra la forma de separar estas imágenes llevando a cabo un arreglo óptico fuera de eje para hacer hologramas, mostrando resultados impresionantes en sus publicaciones en los años de 1961 y 1962. Su método consistía en hacer incidir el haz del objeto y el de referencia (el que viene directo del láser) de manera separada sobre la placa holográfica, esto lo lograba mediante arreglos ópticos como espejos y lentes. Estos dos haces luminosos, hacen interferencia al coincidir sobre la placa holográfica. La imagen que se obtiene después de revelar la placa es un patrón de franjas de interferencia.

Ya revelado el holograma, para reconstruir la imagen se coloca éste frente al haz directo del láser, en la posición original donde se colocó para exponerlo. La luz que llega al holograma, es entonces difractada por las franjas impresas en el holograma, generando tres haces luminosos. El primero, pasa directamente sin difractarse y no forma ninguna imagen; el segundo haz es difractado y forma una imagen virtual del

objeto en la misma posición donde estaba al obtener el holograma; el tercero también es difractado pero en dirección opuesta al haz anterior con respecto al haz directo y que forma una imagen real del objeto. Éstos tres haces son los que se mezclaban en los hologramas de Gabor.

En las siguientes secciones de este capitulo describiremos los fenómenos físicos que intervienen en la formación de un holograma.

2.2 Interferencia

La superposición de dos o más ondas en el espacio es nombrado *interferencia*. Si cada onda en particular descrita por $\vec{E}(\vec{r},t)$ es una solución de la ecuación de onda:

$$\nabla^2\vec{E} - \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{2.1}$$

entonces la superposición

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r},t) \qquad i = 1,2,..... \tag{2.2}$$

es una solución también. Esto es debido a que la ecuación de onda es una ecuación lineal diferencial.

Enseguida se considerará la interferencia de dos ondas monocromáticas con igual frecuencia y longitud de onda. Las ondas deben tener las mismas direcciones de polarización. La amplitud compleja de las ondas es:

$$A_1(x,y,z) = a_1 \exp(i\varphi_1) \tag{2.3}$$

$$A_2(x,y,z) = a_2 \exp(i\varphi_2) \tag{2.4}$$

La amplitud compleja resultante es entonces calculada por la suma de las amplitudes individuales:

$$A = A_1 + A_2 \tag{2.5}$$

Para obtener la intensidad de una onda plana tenemos:

$$I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c|A|^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c A^* A = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c a^2 \tag{2.6}$$

Donde * denota el complejo conjugado. En muchos cálculos prácticos, donde el valor absoluto de I no es de interés, el factor $\frac{1}{2}\varepsilon_0 c$ puede omitirse, entonces la intensidad simplemente se calcula por $I = |A|^2$.

De acuerdo a la ecuación (2.6) la intensidad resultante es

$$\begin{aligned} I &= |A_1 + A_2|^2 = (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi \end{aligned} \tag{2.7}$$

I_1, I_2 son las intensidades individuales y

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \tag{2.8}$$

La intensidad resultante es la suma de las intensidades individuales mas el término de interferencia $2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$, que depende de la diferencia de fase entre ondas. La condición para que la intensidad alcance su máximo es

$$\Delta\varphi = 2n\pi \qquad \text{Para} \quad n = 0,1,2,... \tag{2.9}$$

Ésta es llamada *interferencia constructiva*. La condición para que la intensidad alcance su mínimo es

$$\Delta\varphi = (2n+1)\pi \qquad n = 0,1,2,... \tag{2.10}$$

Ésta es llamada *interferencia destructiva*. El entero n es el orden de interferencia. Un patrón de interferencia consiste en franjas oscuras y brillantes como resultado de la interferencia destructiva y constructiva. La teoría escalar aplicada aquí puede también ser usada para ondas con diferentes direcciones de polarización, si los componentes del campo eléctrico se consideran.

La superposición de dos ondas planas las cuales intersecan a un ángulo θ entre sí, resultan en un patrón de interferencia con espaciamiento equidistante, ver figura 2.1 la distancia d de la franja es la distancia de un máximo de interferencia al otro máximo y puede ser calculado geométricamente. El la figura 2.1 se muestra que

$$\sin\theta_1 = \frac{\Delta l_1}{d}; \quad \sin\theta_2 = \frac{\Delta l_2}{d}; \tag{2.11}$$

Las cantidades θ_1 y θ_2 son los ángulos entre las direcciones de propagación de los frentes de onda y la vertical de la pantalla. La longitud Δl_2 es la diferencia de camino del frente de onda $W2$ con respecto al frente de onda $W1$ a la posición del máximo de interferencia $P1$ ($W2$ tiene que viajar un camino mas largo que $W1$ para llegar a $P1$). Para el máximo $P2$ las condiciones cambian, ahora $W1$ tiene que viajar

un camino mas largo; la diferencia de $W2$ con respecto a $W1$ es $-\Delta l_1$. La variación entre las diferencias de camino al vecino máximo es $\Delta l_1 + \Delta l_2$. Esta diferencia es equivalente a una longitud de onda. Por consiguiente, la condición de interferencia es:

$$\Delta l_1 + \Delta l_2 = \lambda \tag{2.12}$$

Combinando la ecuación (2.11) con (2.12) resulta que:

$$d = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2} = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta_1+\theta_2}{2}\theta_1\cos\frac{\theta_1+\theta_2}{2}} \tag{2.13}$$

La aproximación $\cos(\theta_1 - \theta_2)/2 \approx 1$ y $\theta = \theta_1 + \theta_2$ nos da:

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}} \tag{2.14}$$

En lugar del espaciamiento *d* entre franjas, el patrón de franjas puede describirse también por la frecuencia espacial *f*, la cuál es:

$$f = d^{-1} = \frac{2}{\lambda}\sin\frac{\theta}{2} \tag{2.15}$$

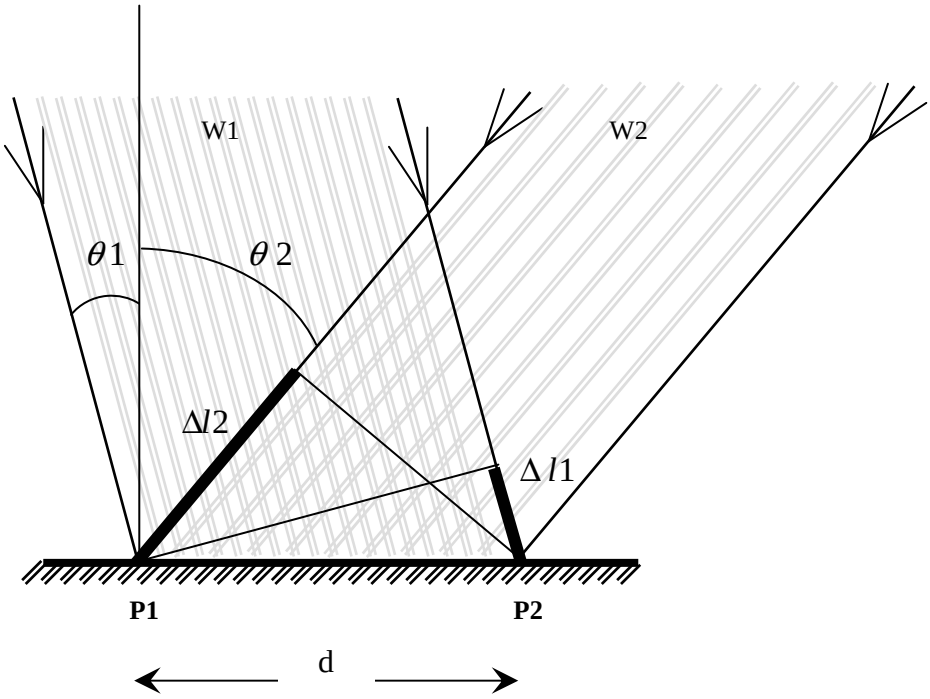


Fig. 2.1. Interferencia de dos ondas planas.

2.3 Difracción

Consideremos una onda de luz que choca con un obstáculo, éste puede ser una pantalla opaca con algunos hoyos transparentes o viceversa, un medio transparente con estructuras opacas. De óptica geométrica se podría decir que la sombra se hace visible en una pantalla detrás del obstáculo. Pero si examinamos detenidamente encontramos que lo anterior no es del todo correcto. Si las dimensiones del obstáculo (caso del agujero en una pantalla opaca o una partícula opaca dentro de un volumen transparente) están en el rango de la longitud de onda, la distribución de la luz no está bien definida y forma un patrón de regiones obscuras y brillantes. Éste fenómeno el llamado *difracción*.

La difracción puede explicarse cualitativamente con el principio de Huygens, el cual dice:

Cada punto de un frente de onda puede ser considerado como una fuente puntual para ondas esféricas secundarias. El frente de onda en cualquier otro lugar es la superposición coherente de esas ondas secundarias.

En la figura 2.2 se explica gráficamente el principio de Huygens.

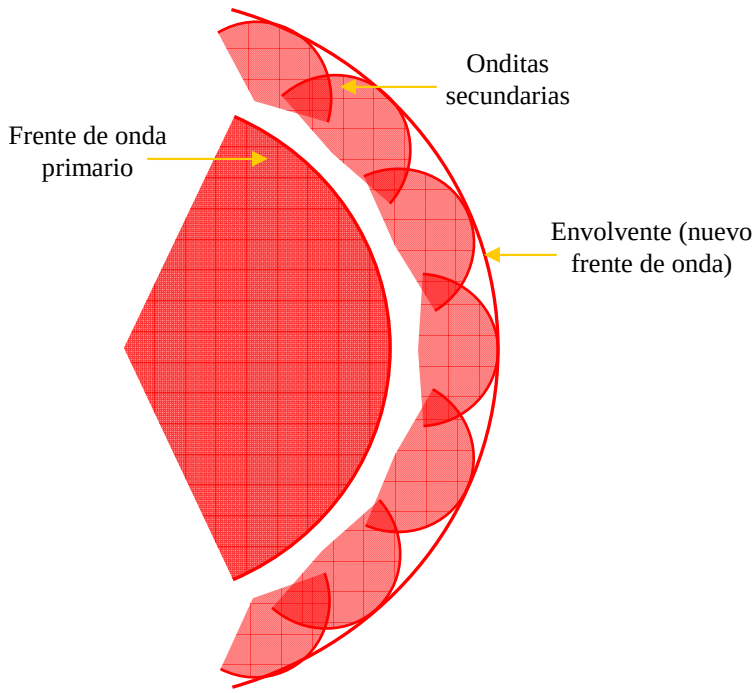


Fig. 2.2 Principio de Huygens

Con la integral de Frenel-Kirchhoff se puede describir la difracción cuantitativamente [6]:

$$\Gamma(\xi',\eta') = \frac{i}{\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} A(x,y)\frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right)}{\rho'}Q\,dx\,dy \tag{2.16}$$

con

$$\rho' = \sqrt{(x-\xi')^2 + (y-\eta')^2 + d^2} \tag{2.17}$$

y

$$Q = \frac{1}{2}\left(\cos\theta + \cos\theta'\right) \tag{2.18}$$

$A(x,y)$ es la amplitud compleja en el plano de la apertura, ver sistema de coordenadas en la figura 2.3, $\Gamma(\xi',\eta')$ es el campo en el plano de observación, ρ' es la distancia entre un punto en el plano de la apertura y un punto en el plano de observación. La ecuación (2.16) puede entenderse como la formulación matemática del principio de Huygens: la fuente de luz S colocada en el plano de la fuente con coordenadas (ξ,η) irradia ondas esféricas, $A(x,y)$ es la amplitud compleja de una onda en el plano de la apertura. Al principio considérese solo una apertura opaca como un agujero en la posición (x,y); dicho hoyo es ahora la fuente de ondas secundarias. El campo en la posición (ξ',η') del plano de difracción es proporcional al campo en la parte de la entrada de la apertura $A(x,y)$ y al campo de las ondas esféricas secundarias emergiendo de (x,y), descrito por $\exp(-i2\pi\rho'/\lambda)/\rho'$. Se considera ahora la apertura entera como un plano que consiste en muchas fuentes de ondas secundarias. El campo entero resultante en el plano de difracción es por tanto la integral sobre todas las ondas esféricas secundarias que emergen del plano de la apertura.

El principio de Huygens podría permitir que todas las ondas secundarias no solo se propaguen en una dirección hacia el frente, si no también hacia atrás con respecto a la dirección de la fuente. Sin embargo, el experimento demuestra que los frentes de onda siempre se propagan en una dirección. Para considerar esta situación entonces se introduce el factor de inclinación Q definido en la ecuación (2.18) dentro la integral de Fresnel Kirchhoff. Q depende del ángulo θ entre el rayo incidente de la fuente y el vector unitario $\vec{n}$ perpendicular al plano de la apertura, y al ángulo θ' entre el rayo difractado y $\vec{n}$. Q es aproximadamente cero para $\theta \approx 0$ y $\theta' \approx \pi$, esto previene las ondas que viajan hacia atrás. En situaciones prácticas, θ y θ' son muy pequeños y $Q \approx 1$ [6, 7].

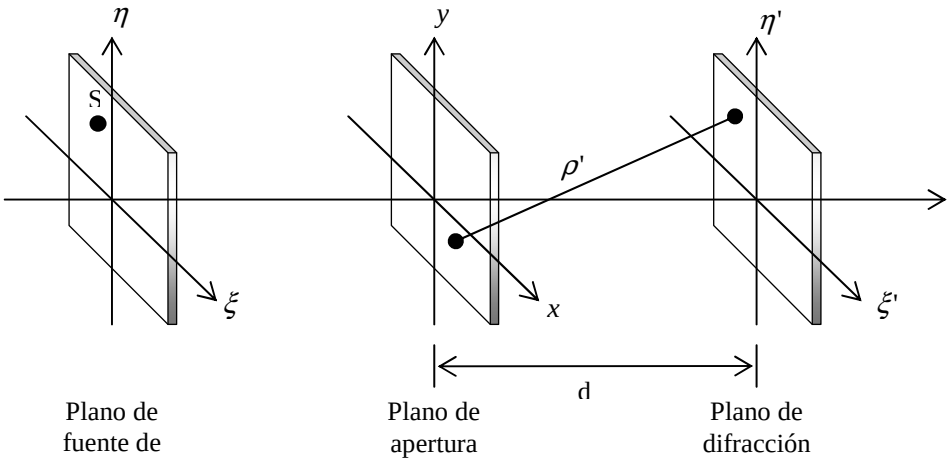


Fig. 2.3 Sistema de coordenadas

2.4 Holografía

Los hologramas generalmente se graban mediante una configuración óptica que consiste en una fuente de luz (láser), espejos y lentes para guiar el haz y un medio de registro, por ejemplo una placa fotográfica. Una configuración típica de este arreglo se muestra en la figura 2.4 [8, 9]. En este arreglo experimental, la luz láser con suficiente longitud de coherencia se divide en dos ondas parciales mediante un divisor de haz (BS) por sus siglas en inglés. La primera onda ilumina el objeto, la luz se dispersa sobre su superficie y se refleja a un medio de registro. La segunda onda, denominada "onda de referencia" ilumina directamente el medio de registro, entonces ambas ondas interfieren. El patrón de interferencia es registrado ya sea en proceso químico sobre una placa fotográfica o usando otro medio, como por ejemplo sensor electrónico. De esta manera queda registrado dicho patrón de interferencia mejor conocido como holograma.

La onda original del objeto es reconstruida iluminando el holograma con la onda de referencia, figura 2.5. Un observador vería una imagen virtual, casi indistinguible del objeto original, ya que la imagen reconstruida exhibiría todos los efectos de perspectiva y profundidad de foco.

El proceso holográfico es descrito matemáticamente usando el formalismo del capítulo 2.2. La amplitud compleja de la onda del objeto se describe por:

$$E_o(x,y) = a_o(x,y)\exp(i\varphi_o(x,y)) \tag{2.19}$$

Con a_o como amplitud real y φ_o como la fase.

La onda de referencia la podemos representar como:

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(i\varphi_R(x,y)) \tag{2.20}$$

donde a_R es la amplitud real y φ_R la fase. Ambas ondas interfieren en la superficie del medio de registro, donde la intensidad se calcula por:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= \left|E_o(x,y)+E_R(x,y)\right|^2 \\ &= (E_o(x,y)+E_R(x,y))(E_o(x,y)+E_R(x,y))^* \\ &= E_R(x,y)E_R^*(x,y)+E_o(x,y)E_o^*(x,y)+E_o(x,y)E_R^*(x,y)+E_R(x,y)E_o^*(x,y) \end{aligned} \tag{2.21}$$

La amplitud de transmisión $h(x,y)$ de la placa fotográfica revelada (o del medio de grabación que se esté usando) es proporcional a $I(x,y)$:

$$h(x,y) = h_0 + \beta\tau I(x,y) \tag{2.22}$$

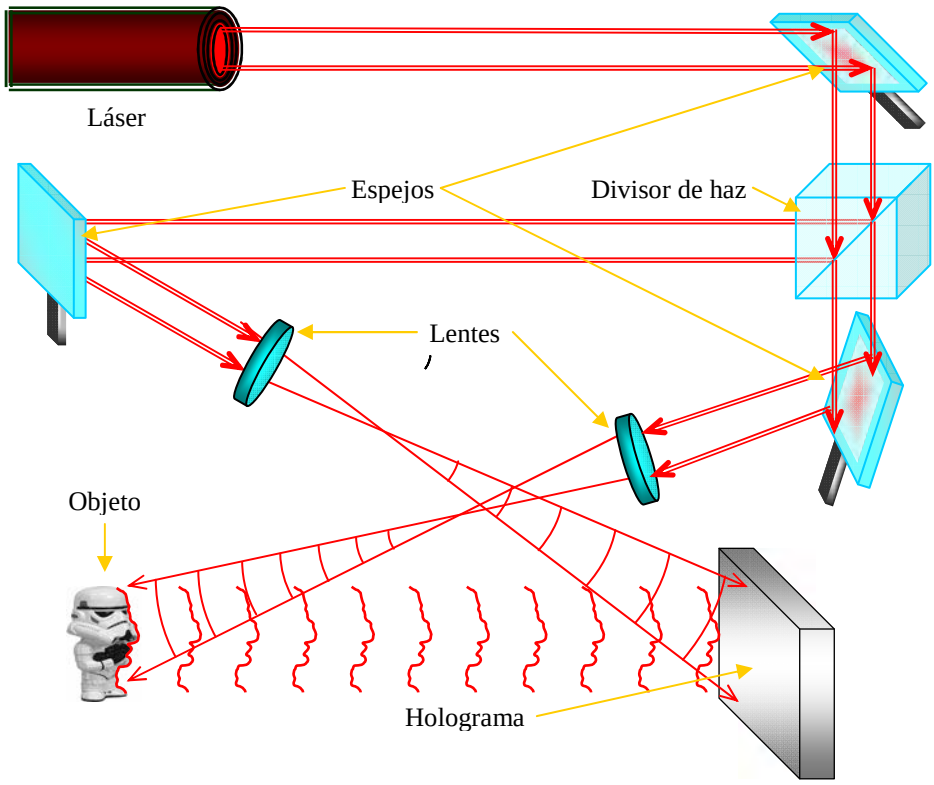


Fig. 2.4 Grabado de Holograma.

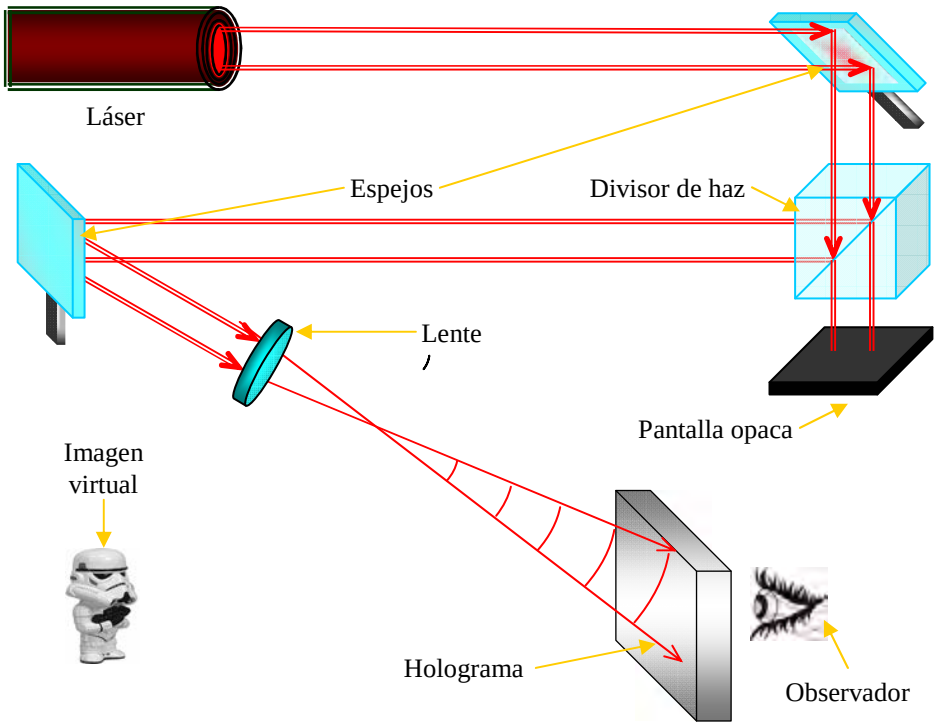


Fig. 2.5 Reconstrucción del holograma.

La constante β es la pendiente de la amplitud de transmitancia contra las características de exposición del material sensible a la luz. Para emulsiones fotográficas, β es negativa, τ es el tiempo de exposición y h_0 es la amplitud de transmisión de la

placa sin exponer. A $h(x,y)$ se le llama función del holograma. Si se usa un CCD (Charged Coupled Device) como medio de grabación en Holografía Digital, entonces h_0 puede omitirse.

Para la reconstrucción del holograma la amplitud de transmisión se multiplica con la amplitud compleja de la onda de reconstrucción (onda de referencia), dando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & E_R(x,y)h(x,y) \\ & = \left[h_0 + \beta\tau\left(a_R{}^2 + a_0{}^2\right)\right]E_R(x,y) + \beta\tau a_R{}^2 E_0(x,y) + \beta\tau E_R{}^2(x,y)E_0{}^*(x,y) \end{aligned} \tag{2.23}$$

Donde, el primer término a la derecha de la ecuación es la onda de referencia multiplicada por un factor. Esto representa la onda no difractada que atraviesa al holograma (orden de difracción cero). El segundo término es la onda del objeto reconstruido, formando la imagen virtual. El factor real $\beta\tau a_R{}^2$ solo influye en el brillo de la imagen. El tercer término genera una imagen real distorsionada del objeto. Para holografía fuera de eje, la imagen virtual, la imagen real y la onda no difractada son espacialmente separadas.

La razón de la distorsión de la imagen real es el factor complejo $E_R{}^2$ espacialmente diferente, el cual modula la imagen formando el conjugado de la onda del objeto $E_0{}^*$. Una imagen real no distorsionada se puede generar usando el conjugado del haz de referencia E_R^* en la reconstrucción:

$$\begin{aligned} & E_R{}^*(x,y)h(x,y) \\ & = \left[h_0 + \beta\tau\left(a_R{}^2 + a_0{}^2\right)\right]E_R{}^*(x,y) + \beta\tau a_R{}^2 E_0{}^*(x,y) + \beta\tau E_R{}^{*2}(x,y)E_0(x,y) \end{aligned} \tag{2.24}$$

3. Holografía Digital

En el capitulo anterior dimos una breve historia de la invención del holograma y los fundamentos físicos involucrados en la formación de dichos hologramas. En este capitulo se enfocará en establecer las expresiones matemáticas para la formación de hologramas en cámaras digitales.

3.1 Principios

El concepto de registro de hologramas digitales se ilustra en la figura 3.1(a) [10]. Una onda plana de referencia y la onda reflejada del objeto interfieren en la superficie de un CCD (Charged Coupled Device). El holograma resultante es electrónicamente grabado y almacenado. El objeto es generalmente de tres dimensiones con superficie de reflexión difusa localizado a una distancia d del CCD.

En la reconstrucción óptica, la imagen virtual aparece en la posición del objeto original y la imagen real se forma igualmente a una distancia d pero en dirección opuesta del CCD, ver figura 3.1 (b).

La difracción de una onda de luz provocada por una abertura (en este caso el holograma), el cuál se localiza perpendicular al haz incidente, es descrito por la integral de Fresnel-Kirchoff.

$$\Gamma(\xi',\eta') = \frac{i}{\lambda}\int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha} h(x,y)E_R(x,y)\frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right)}{\rho'}dxdy \tag{3.1}$$

con

$$\rho' = \sqrt{(x-\xi')^2 + (y-\eta')^2 + d^2} \tag{3.2}$$

donde, $h(x,y)$ es la función del holograma y ρ' es la distancia entre un punto en el plano del holograma y un punto en el plano de reconstrucción. Las cantidades geométricas se explican en la figura 3.2. El factor de inclinación es 1 debido a que los ángulos θ y θ' son aproximadamente 0. Para una onda plana de referencia, $E_R(x,y)$ es simplemente dado por la amplitud real:

$$E_R = a_R + i0 = a_R \tag{3.3}$$

El patrón de difracción es calculado a una distancia d detrás del plano del CCD, lo cual significa que la amplitud compleja se reconstruye en el plano de la imagen real.

La ecuación (3.1) es la base para la reconstrucción numérica del holograma. Debido a que el campo de onda la reconstruida $\Gamma(\xi',\eta')$ es una función compleja, tanto la intensidad como la fase pueden ser calculadas [11]. Esto entra en contraste con el caso de la reconstrucción del holograma óptico, en el cuál solo la intensidad es visible.

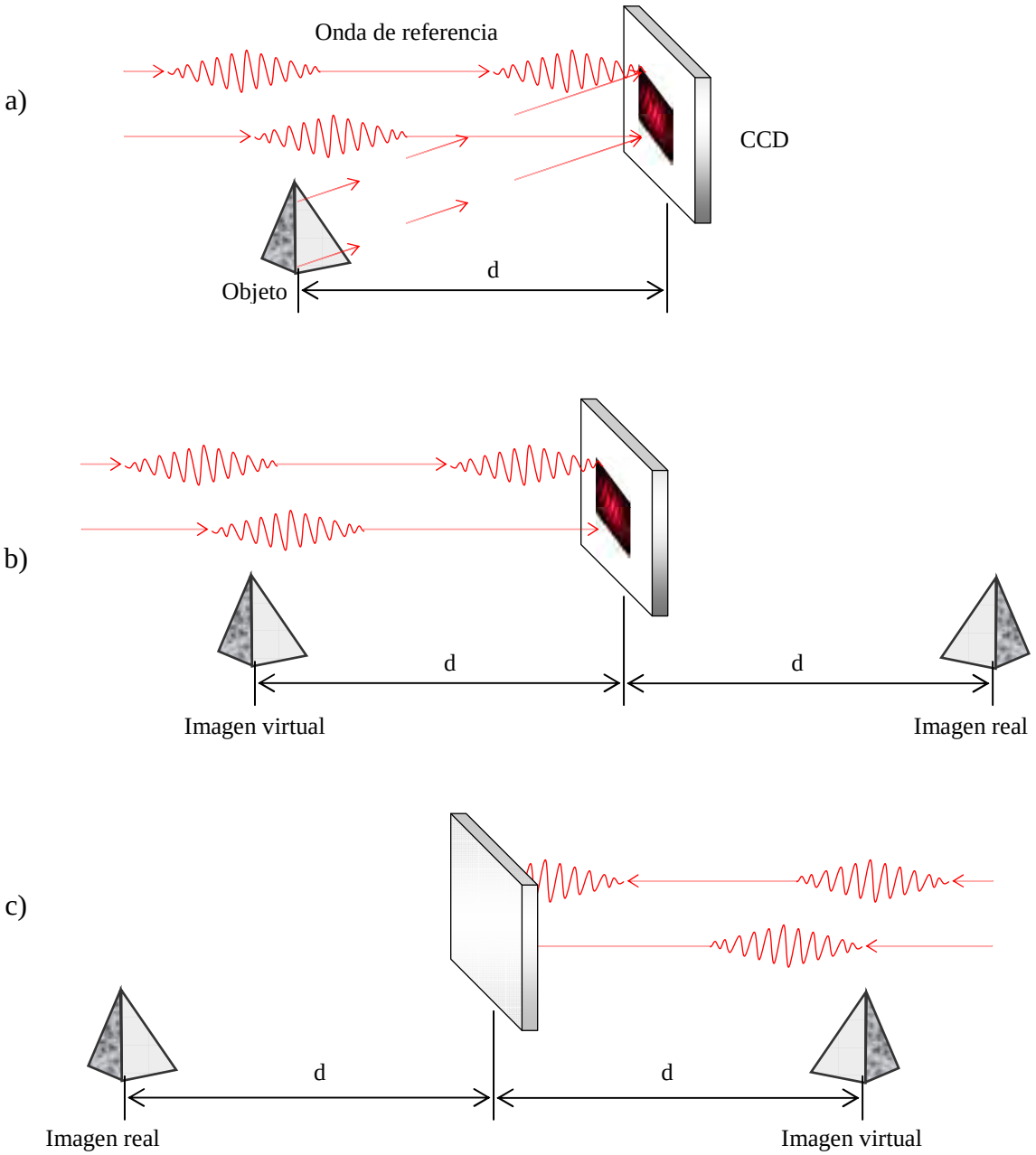


Fig. 3.1 Holografía Digital, a) Grabado, b) Reconstrucción con la onda de referencia E_R, c) Reconstrucción con el conjugado de la onda de referencia E_R^*.

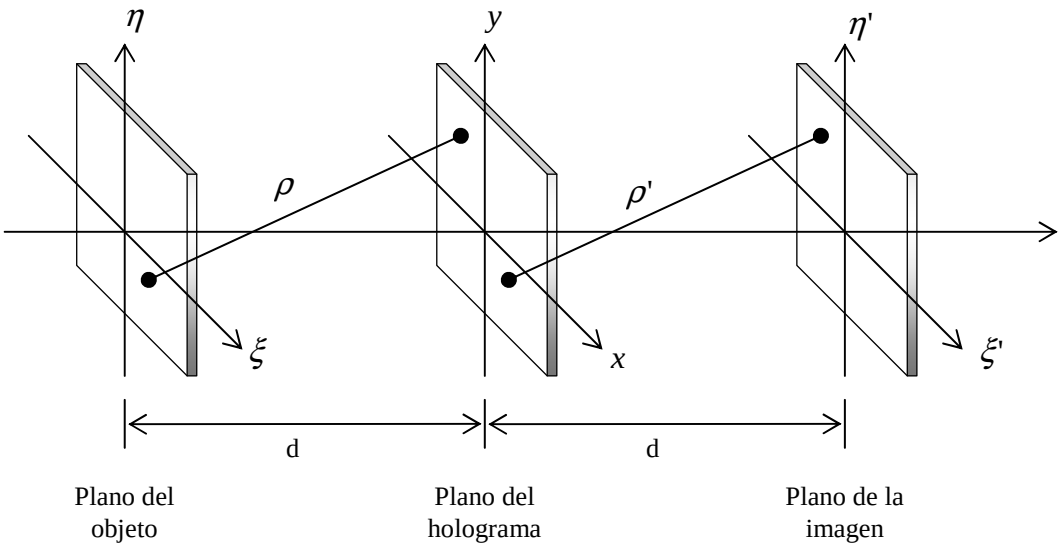


Fig. 3.2 Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma.

Como se mencionó en la sección 2.4 la imagen real puede ser deformada o distorsionada. De acuerdo a la ecuación (2.24) una imagen real no distorsionada puede producirse usando el haz de referencia conjugado para la reconstrucción. Para reconstruir una imagen real no distorsionada en Holografía Digital es por tanto necesario insertar E_R^* en lugar de E_R en la ecuación (3.1):

$$\Gamma(\xi,\eta) = \frac{i}{\lambda}\int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha} h(x,y)E_R^*(x,y)\frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho\right)}{\rho}dxdy \tag{3.4}$$

con

$$\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2} \tag{3.5}$$

Este plano o diagrama de reconstrucción se muestra en la figura 3.1(c). La imagen real se forma en esa posición, donde el objeto fue puesto durante el grabado. Cabe mencionar que para la onda plana de referencia definida en la ecuación (3.3), ambas fórmulas, ecuación (3.1) y (3.4), son equivalentes por que $E_R = E_R^* \equiv a_R$. La configuración de la figura 3.1 con una onda plana de referencia incidiendo perpendicularmente en el CCD es a menudo usada en la holografía digital.

3.2 Reconstrucción numérica

3.2.1 Reconstrucción por aproximación de Fresnel

Considerando que tanto para valores de x y y como para valores de ξ y η, que son pequeños comparados con la distancia d entre el plano de reconstrucción y el CCD, la expresión dada por la ecuación (3.5) puede expandirse en series de Taylor:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - x)^2}{2d} - \frac{1}{8}\frac{\left[(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2\right]^2}{d^3} + \ldots \tag{3.6}$$

El cuarto término puede omitirse ya que es muy pequeño comparado con la longitud de onda [6]:

$$\frac{1}{8}\frac{\left[(\xi - x)^2 + (\eta - x)^2\right]^2}{d^3} << \lambda \tag{3.7}$$

Entonces, la distancia ρ solo consta de términos lineales y cuadráticos:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - x)^2}{2d} \tag{3.8}$$

Sustituyendo la nueva expresión de ρ en la ecuación (3.4), la nueva expresión para la reconstrucción de la imagen real resulta en:

$$\Gamma(\xi,\eta) = \frac{i}{\lambda d}\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \times \int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha} h(x,y)E_R^{\ *}(x,y)\exp\left(-i\frac{\pi}{\lambda d}\left((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\right)\right)dxdy \tag{3.9}$$

Si realizamos la multiplicación en el argumento de la exponencial dentro de la integral obtenemos:

$$\Gamma(\xi,\eta) = \frac{i}{\lambda d}\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}d\right)\exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}\left(\xi^2 + \eta^2\right)\right]$$
$$\times \int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha} h(x,y)E_R^{\ *}(x,y)\exp\left(-i\frac{\pi}{\lambda d}\left(x^2 + y^2\right)\right)\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right)dxdy \tag{3.10}$$

Esta ecuación es llamada *aproximación de Fresnel* o *transformación de Fresnel* debido a la similitud matemática con la transformada de Fourier. Esto permite la reconstrucción del campo de onda en un plano detrás del holograma, en este caso en el plano de la imagen real.

La intensidad se calcula elevando al cuadrado:

$$I(\xi,\eta)=\left|\Gamma(\xi,\eta)\right|^2 \tag{3.11}$$

La fase es calculada por

$$\varphi(\xi,\eta)=\arctan\frac{\mathrm{Im}\left|\Gamma(\xi,\eta)\right|}{\mathrm{Re}\left|\Gamma(\xi,\eta)\right|} \tag{3.12}$$

donde, Re denota la parte real e Im la parte imaginaria.

Para la digitalización de la transformada de Fresnel en la ecuación (3.10), se introducen las siguientes expresiones [12]:

$$\nu=\frac{\xi}{\lambda d}; \qquad \mu=\frac{\eta}{\lambda d}; \tag{3.13}$$

Sustituyendo la ecuación (3.13) en la ecuación (3.10) resulta en

$$\Gamma(\nu,\mu)=\frac{i}{\lambda d}\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}d\right)\exp\left[-i\pi\lambda d\left(\nu^2+\mu^2\right)\right] \tag{3.14}$$
$$\times\int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha}h(x,y)E_R^{\,*}(x,y)\,\mathbf{exp}\left(-i\frac{\pi}{\lambda d}\left(x^2+y^2\right)\right)\mathbf{exp}\left(i2\pi\left(x\nu+y\mu\right)\right)dxdy$$

Comparando la Ec. (3.14) con la definición de la transformada inversa de Fourier en dos dimensiones, dada por:

$$\Im^{-1}\{F(u,v)\}=f(x,y)=\int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha}F(u,v)\,\mathbf{exp}\left(i2\pi\left(ux+vy\right)\right)dudv$$

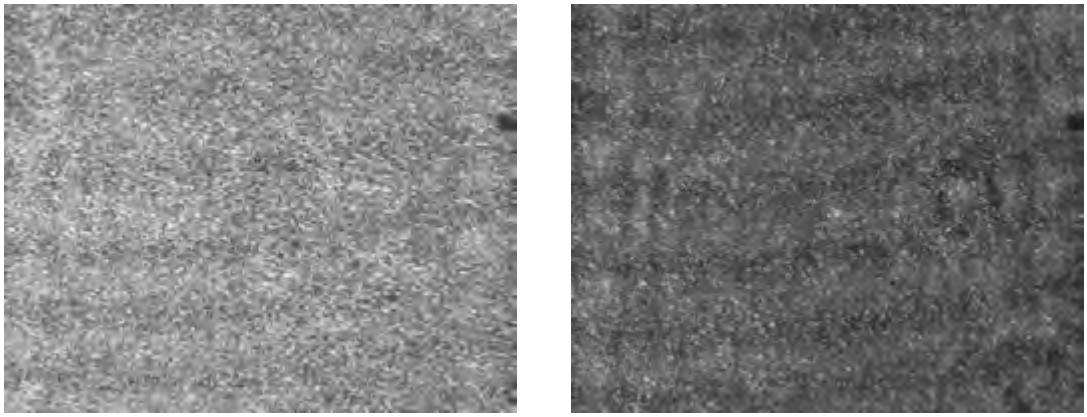
Se concluye que la aproximación de Fresnel, es la transformada inversa de Fourier de la función $h(x,y)E_R^{\,*}(x,y)\exp\left(-i\frac{\pi}{\lambda d}\left(x^2+y^2\right)\right)$, es decir;

$$\Gamma(\nu,\mu)=\frac{i}{\lambda d}\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}d\right)\exp\left[-i\pi\lambda d\left(\nu^2+\mu^2\right)\right] \tag{3.15}$$
$$\times\Im^{-1}\left\{h(x,y)E_R^{\,*}(x,y)\exp\left(-i\frac{\pi}{\lambda d}\left(x^2+y^2\right)\right)\right\}$$

En la figura 3.3 se muestran dos hologramas típicos. Éstos fueron grabados en el laboratorio de velocimetría en el Centro de Investigaciones en Óptica. Se basan en la geometría de la figura 3.1. Ambos objetos, una moneda y un ángel metálico se colocaron a una distancia $\boldsymbol{d}=34\boldsymbol{cm}$ del arreglo de grabación que consistía en un sensor CCD de 1280×1024 píxeles y con distancias entre píxeles de $\boldsymbol{\Delta x}=\boldsymbol{\Delta y}=5.0\boldsymbol{\mu m}$.

La longitud de onda del láser con el que se grabaron los hologramas fué de 632nm. La reconstrucción numérica de acuerdo a la Ec. (3.15) demuestra en la figura 3.4 y se hacen notorias las imágenes reales de los objetos utilizados. Las figuras 3.4 (a) y (c) muestran la reconstrucción de los objetos, donde el brillo cuadrado de los centros son la onda que no se difracta (orden cero). Las figuras 3.4 (b) y (d) muestran la reconstrucción de los objetos después de sustraer de manera computacional el orden cero, lo que permite una mejor apreciación del objeto reconstruido.

Debido a la geometría fuera de eje, la imagen es espacialmente separada del término de orden cero. La otra imagen (virtual) está fuera de foco en esta reconstrucción.



(a) (b)

Fig. 3.3 Holograma digital de: (a) Una moneda y (b) Un pequeño ángel metálico

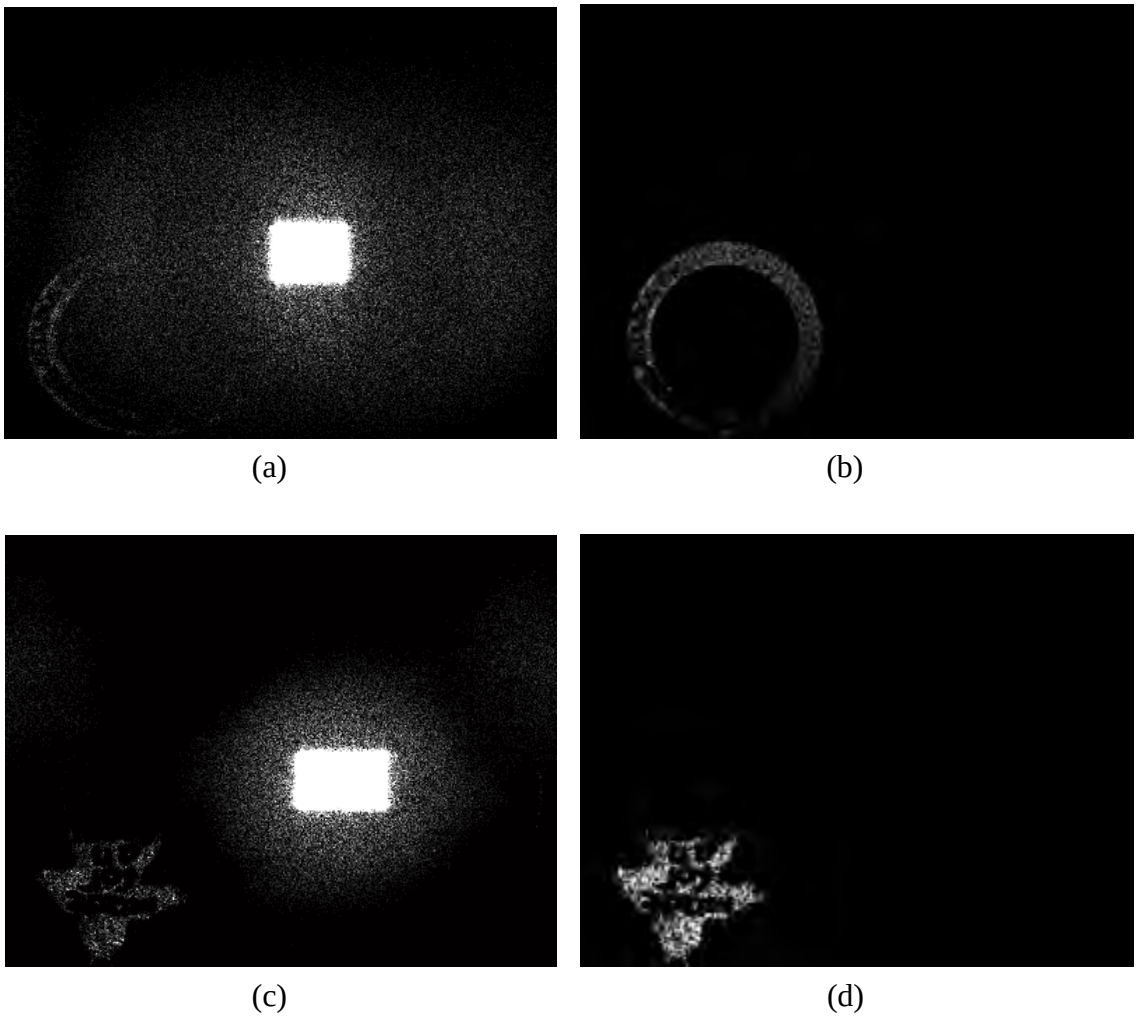


Fig. 3.4 Reconstrucción numérica de los hologramas de moneda y de ángel metálico. (a) Moneda, sin sustraer el orden cero o el término DC, (b) Moneda, sustrayendo el orden cero, (c) Ángel, sin sustraer el orden cero o el término DC, (b) Ángel, sustrayendo el orden cero.

Una propiedad interesante de la holografía es que todas las partes del holograma contienen información acerca del objeto entero. Esto se puede observar si a los hologramas se colocan máscaras negras que cubran gran parte del área del holograma con el propósito de que se pierda gran parte de información. No obstante, la figura entera es visible nuevamente cuando se hace la reconstrucción. Las máscaras se ven como sombras en los términos de orden cero. La reducción del número efectivo de píxeles conduce a una reducción de la resolución en las imágenes reconstruidas. Esto se debe al incremento del tamaño del speckle que da lugar cuando la apertura en la reconstrucción óptica del holograma es reducida.

Un holograma puede ser mejorado extrayendo el orden cero; aumentando la potencia del láser para que llegue mas información acerca del objeto al medio de grabación; igualando las intensidades del haz del objeto y el de referencia para optimizar la visibilidad de las franjas de interferencia; o bien, mejorando la calidad del medio de grabación.

3.2.2 Reconstrucción por aproximación de convolución

El procesamiento numérico de la integral de Fresnel-Kirchhoff sin su aproximación consume demasiado tiempo, por eso se establece una formulación diferente pero equivalente y más conveniente. Esta formulación hace uso del teorema de convolución y es nombrada "aproximación por convolución" [13, 14]. La fórmula de reconstrucción (Ec 3.4) puede interpretarse de la siguiente manera:

$$\Gamma(\xi,\eta)=\int_{-\alpha}^{\alpha}\int_{-\alpha}^{\alpha} h(x,y)E_R^*(x,y)g(\xi,\eta,x,y)dxdy \tag{3.15}$$

donde la respuesta al impulso $g(\xi,\eta,x,y)$ esta dada por

$$g(\xi,\eta,x,y)=\frac{i}{\lambda}\frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{d^2+(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}\right]}{\sqrt{d^2+(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}} \tag{3.16}$$

De acuerdo a la ecuación 3.15, el sistema lineal caracterizado por $g(\xi,\eta,x,y)=g(\xi-x,\eta-y)$ es invariante en el espacio y la integral puede ser considerada como una convolución, entonces se puede aplicar el teorema de convolución que dice que la transformada de Fourier de la convolución de dos funciones es igual al producto de las transformadas de Fourier de las funciones individuales: $\Im\{(f\otimes g)(x,y)\}=F(u,v)G(u,v)$

Según el teorema, la transformada de Fourier de la convolución de $h\cdot E_R^*$ con g es el producto de las transformadas individuales $\Im\{h\cdot E_R^*\}$ y $\Im\{g\}$. Entonces $\Gamma(\xi,\eta)$ puede ser calculada obteniendo primero $\Im\{h\cdot E_R^*\}$, después multiplicando el resultado por $\Im\{g\}$ y al final, realizando la transformada inversa de esa multiplicación.

La respuesta numérica al impulso es:

$$g(k,l)=\frac{i}{\lambda}\frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{d^2+\left(k-\frac{N}{2}\right)^2\Delta x^2+\left(l-\frac{N}{2}\right)^2\Delta y^2}\right]}{\sqrt{d^2+\left(k-\frac{N}{2}\right)^2\Delta x^2+\left(l-\frac{N}{2}\right)^2\Delta y^2}} \tag{3.17}$$

El movimiento de las coordenadas en N/2 se da por razones de simetría.

Finalmente, la notación para la reconstrucción de la imagen real es:

$$\Gamma(\xi,\eta)=\Im^{-1}\left\{\Im\left(h\cdot E_R^*\right)\cdot\Im(g)\right\} \tag{3.18}$$

3.3 Grabado de hologramas digitales

3.3.1 Dispositivo de Carga Acoplada (CCD)

El CCD (Charged-Coupled Devices pos sus siglas en inglés) es una unidad eléctrica usada para crear imágenes de objetos, almacenar información y transferir carga eléctrica. Su aplicación mas popular es el grabado de imágenes, entonces los CCD's son usados como unidades de imágenes en cámaras electrónicas (de video y fotografías) y escáneres.

Las imágenes de CCD se presentan en un proceso de tres pasos [15]:

1. Exposición a la luz
   La luz que incide en el CCD se separa en cargas conformadas por electrones y estas se reparten entre cada uno de los detectores individuales del CCD que son pozos de potencial y que comúnmente para dicha aplicación los conocemos como píxeles.

2. Transferencia de carga
   La función de transferencia de carga mueve los paquetes de carga mediante un sustrato semiconductor de silicón a las celdas de memoria.

3. Carga a conversión de voltaje y amplificación de salida
   La matriz de capacitores de las celdas de memoria convierte la carga transferida a voltaje, luego un amplificador adapta el voltaje a los requerimientos de salida.

Las tres arquitecturas básicas de CCD's según la forma de transferencia de información de los píxeles son: dispositivos de transferencia de cuadro completo, dispositivos de transferencia por cuadro y dispositivos de transferencia por interlinea.

Los dispositivos de transferencia por interlinea son los más comunes, consisten en un patrón de líneas de detectores sensibles a la luz (fotodiodos) y separadas entre sí por líneas de unidades de almacenamiento que no son sensibles a la luz, ver figura 3.5. Los paquetes de carga que se generan dentro de los píxeles sensibles a la luz son transferidos de manera paralela a las unidades de almacenamiento adyacentes. Después de que las cargas son puestas en las unidades de almacenamiento, éstas se mueven línea por línea a un registro serial. Éste registro serial transfiere los paquetes de carga a un convertidor de carga-voltaje con amplificador el cuál forma la señal de salida. La mayor desventaja de los CCD's de transferencia por interlinea es su complejidad que resulta al separar las funciones de foto-detección y de almacenamiento (lectura); también poseen un bajo rango dinámico (razón entre el máximo nivel de luminosidad que el sensor puede medir antes de saturarse y el mínimo nivel descontando el ruido de lectura) y un bajo factor de relleno (porcentaje del área del píxel que es sensible a la luz). La principal ventaja de este tipo de CCD es la alta velocidad de obturación.

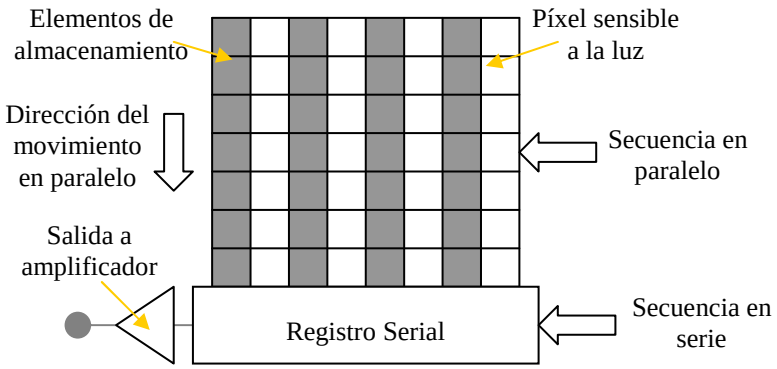


Fig. 3.5. Arquitectura de transferencia por interlinea.

Los CCD's de transferencia por cuadro tienen también diferentes áreas para la conversión de la luz y para el almacenamiento. Sin embargo, estos elementos no están acomodados en líneas pero se dividen en dos diferentes bloques, ver figura 3.6. La idea es mover toda una escena capturada por el arreglo fotosensible al arreglo de almacenamiento de manera muy rápida. El proceso para el registro de los datos almacenados se presenta de manera similar al proceso de lectura de los dispositivos de transferencia por interlinea. Este tipo de transferencia permite un mayor factor de relleno aunque el inconveniente es que la velocidad de obturación no es tan rápida y el costo de los sensores es más alto al ser más grande su tamaño.

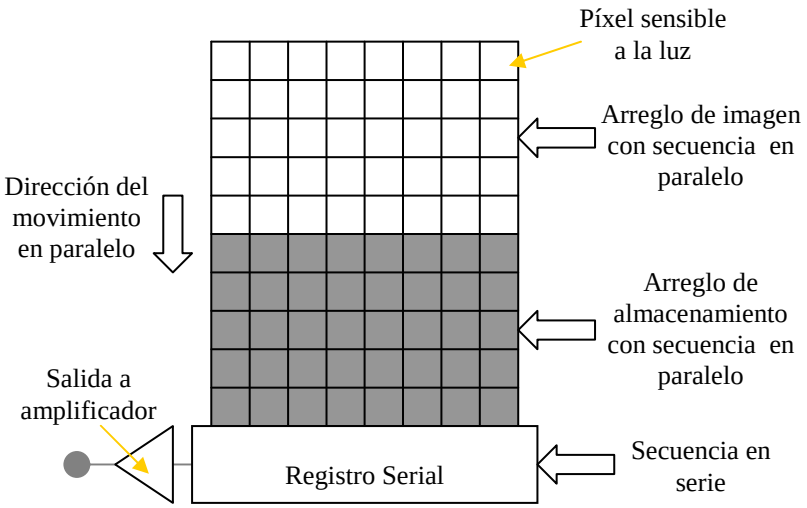


Fig. 3.6. Arquitectura de transferencia por cuadro.

Los CCD's de transferencia de cuadro completo tienen la arquitectura mas simple, ver figura 3.7. En contraste a los dos anteriores, no tiene un área de almacenamiento separada, por lo tanto el área del sensor entero es sensible a la luz (factor de relleno de 100%). Los fotones de la luz que iluminan el sensor se convierten en paquetes de carga. Los renglones resultantes con información de la imagen son transferidos de forma paralela al registro serial que inmediatamente transfiere el renglón de información a la salida como una cadena en serie de datos. El proceso se repite hasta que todos los renglones son transferidos fuera del chip. Ya que el registro paralelo es usado tanto para captar la imagen como para su lectura de salida, se necesita un obturador mecánico con el fin de preservar la integridad de la escena captada. Los CCD's de cuadro completo tienen la mayor resolución y sus costos de producción son relativamente baratos.

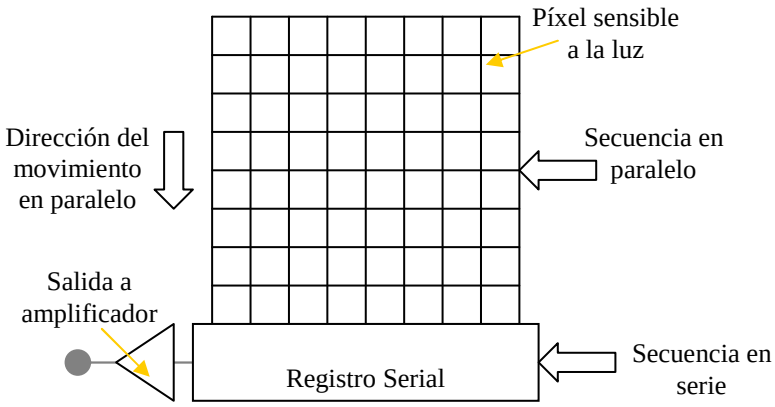


Fig. 3.7. Arquitectura de transferencia por cuadro completo.

En principio, los tres tipos de CCD's son apropiados para Holografía Digital. El tipo de CCD's de cuadro completo tiene la ventaja que el tiempo de exposición puede ser ajustado de acuerdo a las demandas de una aplicación en especifico. Como siempre, el obturador mecánico limita el número de hologramas por segundo que pueden ser grabados (cuadros por segundo). En adición, el obturador puede causar vibraciones mecánicas a la configuración que deterioran la calidad del holograma.

3.3.2 Requerimientos de Frecuencia Espacial

Un CCD que se emplea para grabar hologramas debe resolver el patrón de interferencia resultante de la superposición de la onda de referencia con las ondas dispersadas de los diferentes puntos del objeto o para el caso de partículas, el tamaño de éstas. La máxima frecuencia espacial a resolver se determina por el ángulo máximo $\theta_{\max}$ entre esas ondas de acuerdo a la ecuación (2.15)

$$f_{\max} = \frac{2}{\lambda}\sin\left(\frac{\theta_{\max}}{2}\right) \tag{3.19}$$

Las emulsiones fotográficas usadas en Holografía Óptica tienen resoluciones arriba de 5000 líneas por milímetro. Usando esos materiales, se pueden grabar hologramas con ángulos muy grandes entre el haz de referencia y el haz del objeto. Sin embargo, para Holografía Digital la distancia entre píxeles vecinos para un CCD de alta resolución es solo del orden de $\Delta x \approx 5m\mu$. La correspondiente máxima frecuencia espacial que se puede resolver es dada por:

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \tag{3.20}$$

Este resultado queda en el rango de 100 líneas por milímetro.

Combinando la ecuación (3.49) y (3.50) obtenemos:

$$\theta_{\max} = 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{2\Delta x}\right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x} \tag{3.21}$$

donde la aproximación es válida para ángulos pequeños. La distancia entre píxeles vecinos es por tanto la cantidad que limita el ángulo máximo entre la onda de referencia y la onda de objeto.

Para el caso de hologramas digitales de partículas que se encuentran en línea con la onda de referencia y el CCD, se considera que la onda de objeto (partículas) incide en el CCD de manera paralela con respecto a la onda de referencia y por tanto no hay que preocuparse por un valor de $\theta_{\max}$.

3.3.3 CCD's y Grabado de Hologramas Digitales [25]

La sensibilidad de las cámaras CCD es mucho mejor que la sensibilidad de las emulsiones fotográficas usadas en la holografía clásica. El rango espectral que alcanzan a detectar las cámaras va de *400nm* a *1000nm* aproximadamente, siendo el silicón el material base con que se fabrica el chip.

En la holografía, para que se alcance el máximo contraste en un patrón de interferencia, la relación de intensidades debe ser 1:1. Los CCD's tienen una muy buena linealidad en su curva de exposición que la relación de intensidad entre la onda de referencia y de objeto podría ajustarse a la relación óptima de 1:1.

A diferencia de lo que sucede en la holografía clásica que usa material fotográfico, en la holografía digital, la energía luminosa total que incide en el CCD se puede controlar variando el tiempo de exposición mediante un obturador o bien, limitando la fuente de luz.

En holografía digital con objetos en movimiento, el tiempo de exposición y el tipo de sensor son factores muy importantes a considerar si se quiere capturar una buena imagen, esto es, que tenga una iluminación adecuada y que los objetos no salgan desplazados. Se pueden presentar dos casos:

Primero. *Los sensores pequeños reciben menos cantidad de luz, entonces para poder capturar imágenes claras se requiere de un mayor tiempo de exposición. Sin embargo, si el tiempo de exposición es muy grande, los objetos en movimiento que se capturen, aunque la velocidad no sea alta, pueden salir borrosos, como si el objeto hubiera adoptado varias posiciones en una misma imagen (desplazado).*

Segundo. *Por otro lado, para un sensor lo suficientemente grande, éste recibe una mayor cantidad de luz y por tanto no requiere un tiempo de exposición elevado. Pero si la velocidad del objeto es muy alta, entonces se presenta el mismo problema que en el primer caso. Ver figura 3.8 (a).*

Las condiciones mas apropiadas para tener imágenes de buena calidad como la de la figura 3.8 (b), es cuidando que el objeto no salga desplazado mas de 5 píxeles en una imagen y esto se puede controlar si se sigue la siguiente fórmula.

$$\boldsymbol{t}_{\mathbf{exp}} * \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{objeto}} \leq 5\,\boldsymbol{pixeles} \tag{3.22}$$

donde t_{exp} es el tiempo de exposición (tiempo que transcurre entrando información del objeto a los píxeles) y v_{objeto} es la velocidad del objeto.

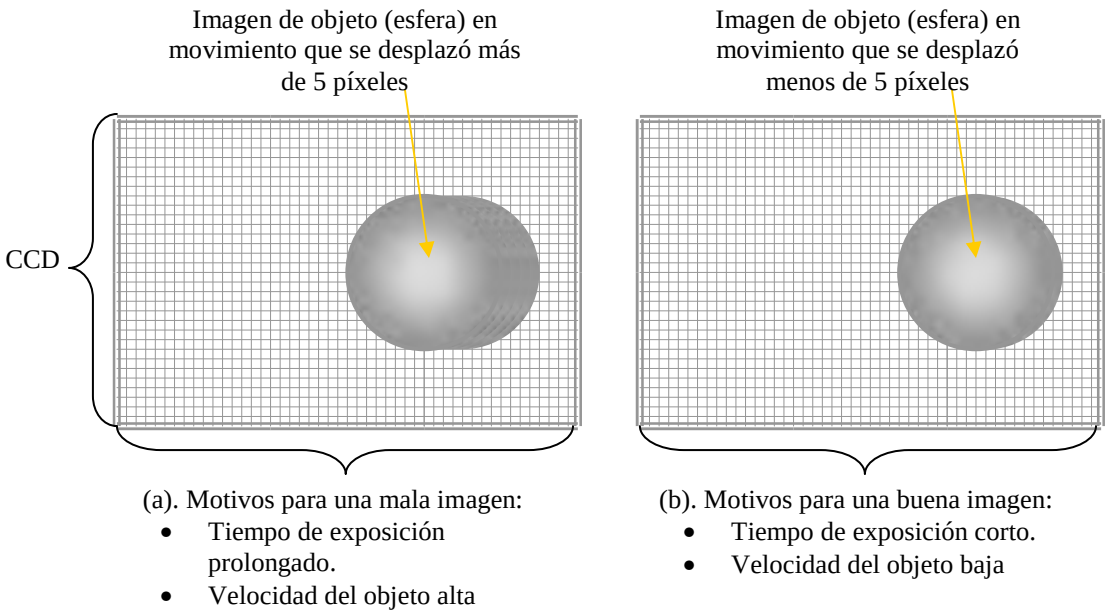


Fig. 3.8. Obtención de imágenes mediante CCD. (a) Imagen con el objeto desplazado. (b) Imagen con el objeto sin desplazar.

A partir de la ecuación anterior, se puede buscar una cámara que de acuerdo a la velocidad del objeto, tenga el tiempo de exposición adecuado.

Otra técnica que se usa para el caso de escenas oscuras es mediante un flash. Aquí el tiempo que dure el flash iluminando el objeto en movimiento es el que define cuán desplazado saldrá el objeto en la toma. El tiempo de duración del flash está en el orden de 5ns comparado con el tiempo de exposición que se encuentra en el orden de 30ms, entonces ajustando 5ns (como el t_{exp}) a las condiciones de la ecuación 3.22, se hace notar que permite tomas para una velocidad mucho mayor del objeto.

Todas las cámaras CCD no solo requieren de un tiempo de exposición, si no también requieren de otro tiempo para almacenar la información que captura cada píxel sensible a la luz, este tiempo es llamado *tiempo de almacenamiento* Entonces, la velocidad de cuadros por segundo que puede tener una cámara (fps) está limitada no solo por el tiempo de exposición entre cada toma si no también por el tiempo de almacenamiento que le lleva para procesar y guardar los datos (Ver figura 3.9).

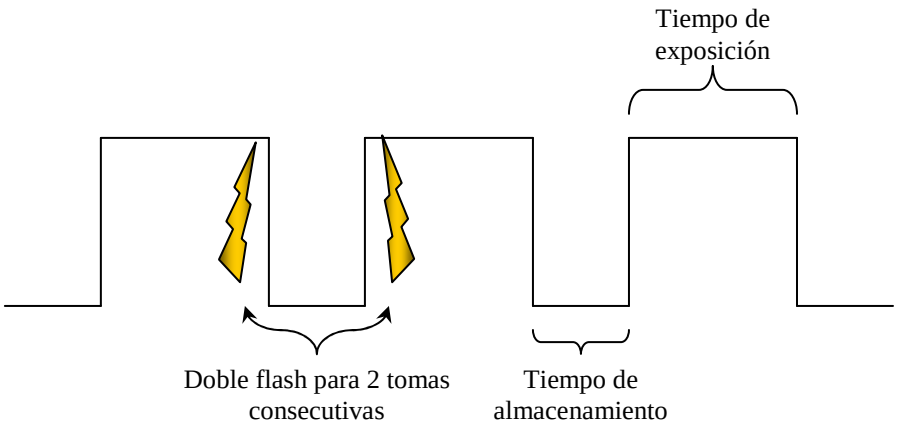


Fig. 3.9. Tiempos de trabajo de una cámara con la función straddling transfer.

Existen cámaras empleadas en velocimetría de partículas que usan una técnica llamada *straddling transfer* que ajusta dos tomas con flash, cada uno en diferente tiempo de exposición de manera que el primer flash se presenta en la etapa final de un tiempo de exposición, mientras que el segundo se presenta el la etapa inicial, tal como lo muestra la figura 3.9. Este método solo permite realizar series de dos tomas y tiene como propósito reducir el tiempo entre una imagen y otra, y como usa flash, también requiere de ambientes obscuros.

Las cámaras CCD tienen típicamente un rango dinámico de 8 bits (256 valores en escala de grises) o mayor. Éste rango dinámico es suficiente para el grabado de hologramas, incluso objetos con variaciones de brillo que excedan el rango dinámico del medio de grabación bien pueden ser grabados y reconstruidos debido a que la información del objeto es codificada como un patrón de interferencia (holograma).

La reconstrucción numérica de hologramas digitales requiere que el número de píxeles esté en potencias de 2 (por ejemplo 1024 x 1024), esto por que al implementar el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) permite que el proceso sea mas rápido, ya que FFT esta diseñada para trabajar en base a potencias de 2. El número de píxeles de algunas cámaras comerciales difieren de esa regla y tiene que haber adaptaciones a la potencia de 2 más cercana. Por ejemplo, si el número de píxeles de alguna cámara es de 1317 x 1035, entonces solo 1024 x 1024 píxeles son usados para reconstrucción. En caso de que la cámara tenga ligeramente menos píxeles que la potencia de 2 más cercana (por ejemplo 1008 x 1018), entonces es aconsejable añadir píxeles artificiales con un valor en la escala de grises de cero (negro) al holograma grabado hasta alcanzar un número total de píxeles de 2^n x 2^n. El rellenado con píxeles de ceros no distorsiona los resultados deseados, sólo provoca un suavizado o interpolado en la imagen reconstruida.

3.3.4 Requerimientos de estabilidad

Tanto en holografía digital como en la holografía convencional es necesario un sistema óptico estable. Cualquier cambio en la diferencia de caminos ópticos de los haces que interfieren será causa de un movimiento de las franjas y por lo tanto el contraste se verá afectado reduciéndose o desapareciendo. Ya en la práctica, las variaciones de camino no deben exceder más de un cuarto de la longitud de onda durante la exposición del holograma. Es por tanto recomendable montar el sistema óptico en una mesa aislada de vibraciones (como una mesa holográfica), o bien usar un láser pulsado como fuente de luz que sería como tener tiempos cortos de exposición que dan menos lugar a que se graben los movimientos causados por la vibración. A diferencia de la holografía convencional, en la holografía digital se puede apreciar en un monitor los disturbios debido a las vibraciones.

4 Velocimetría por Imágenes de Partículas con Holografía Digital en Línea

4.1 Introducción

La Holografía es un proceso 3D de imágenes que instantáneamente captura la información volumétrica del objeto de prueba. El uso de la holografía para el diagnóstico de pequeñas partículas proviene desde los años 60 (Thompson 1963 [16] y Trolinger 1969 [17]).

DHPIV consiste en grabar una serie de hologramas en un sensor CCD y reconstruir el campo del fluido 3D numéricamente. La idea de la holografía digital fue primeramente propuesta por Goodman y Lawrence en 1967 [18] y la teoría fundamental fue establecida en los años ochentas por Yaroslavskii y Merzlyakov [12] aunque su implementación práctica vino a darse en los noventas por Schnars y Juptner (1994) [10]. DHPIV permite la simplicidad del hardware y la facilidad de operación además de la información en espacio y tiempo que arrojan dos hologramas consecutivos.

La aplicación de holografía digital en línea para mediciones de partículas fue primeramente reportado por Adams y Nishihara (1997) [21, 22], Kreis (1999) [23] y seguido por Murata y Yasuda (2000) [24]. En sus aplicaciones grabaron mediante cámaras CCD el esparcimiento en línea de los campos de partículas en 3D, entonces reconstruyeron numéricamente el campo calculando la integral de difracción mediante la aproximación de Fresnel. De esa manera se extrae la posición 3D y el tamaño de las partículas a partir de la intensidad de las imágenes de la onda reconstruida.

4.2 Principios de DHPIV

Los avances mencionados en la introducción permitieron el desarrollo de la Holografía Digital PIV (DHPIV), el cual ha permitido el entendimiento, modelado y control de flujos turbulentos y complejos. Además, se hace posible su implementación en condiciones industriales adversas. Básicamente, la holografía digital toma la simplicidad de la técnica PIV combinada con las características volumétricas de la Holografía.

Para entender la operación de la holografía digital se introduce el principio de operación de Holografía PIV (HPIV) basada en placas fotográficas, el cual como se notará es muy similar al de PIV. HPIV mide velocidades instantáneas en 3D de flujos de fluidos a través de la imagen de pequeñas partículas dispersas en el flujo. La Figura 4.1 muestra el principio básico de la HPIV. La figura 4.1 (a) muestra la etapa de grabado del holograma, donde un grupo de partículas que se mueven con el fluido es iluminado con un láser pulsado que tiene una duración de pulso láser del orden de ns. En el plano del holograma, la luz esparcida por las partículas (la iluminación que proviene del objeto) interfiere con el haz de referencia. La intensidad de los patrones de interferencia generados por la interferencia de la iluminación objeto y referencia son grabados en el holograma. En la figura 4.1 (b) se muestra la etapa de reconstrucción del holograma, en donde este es iluminado con el haz de referencia original, la onda

transmitida a través del holograma es el producto de la onda incidente y la transmitancia espacial del holograma, el cual tiene la información de la iluminación original del objeto. Como esta iluminación transmitida se propaga en el espacio en 3D, la iluminación original del objeto se reconstruye y produce una imagen en 3D de las partículas.

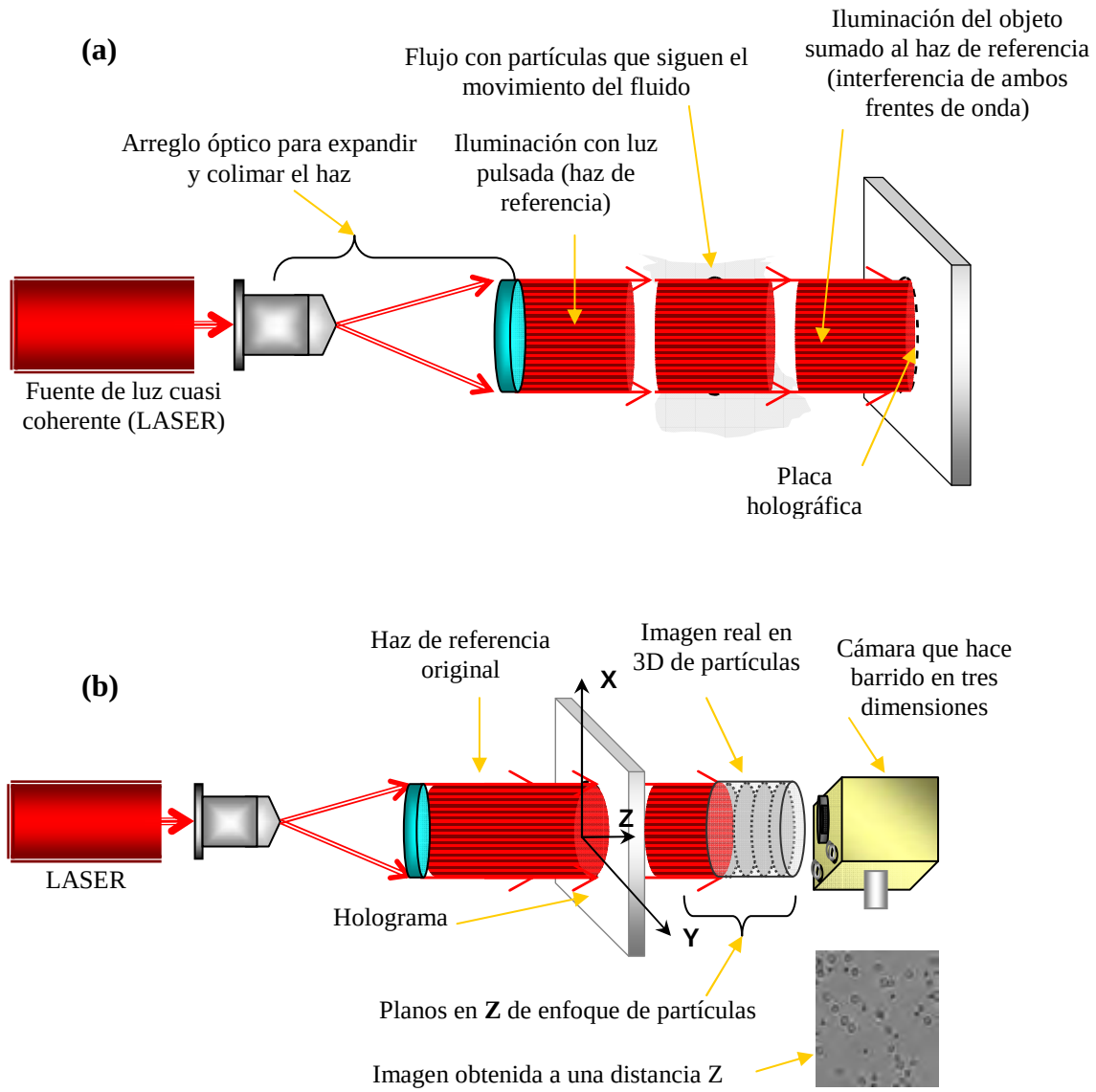


Fig. 4.1. Arreglo HPIV. **(a)** Etapa de grabado **(b)** Etapa de reconstrucción

HPIV digital o DHPIV (grabado digital y reconstrucción numérica); las películas holográficas se reemplazan por un sensor de imágenes digitales, lo que elimina completamente el proceso químico de revelado ya que el hardware y los circuitos de la cámara se encargan de obtener los hologramas por decir de alguna manera, ya revelados (ver figura 4.2). DHPIV también tiene la ventaja de la reconstrucción numérica por lo que no se necesita un láser como onda de referencia para la reconstrucción, lo que evita el tedioso y poco viable arreglo óptico de reconstrucción mencionado en el punto anterior. Cuando el arte de DHPIV sea perfeccionado, éste será muy fácil de usar y ampliamente demandado.

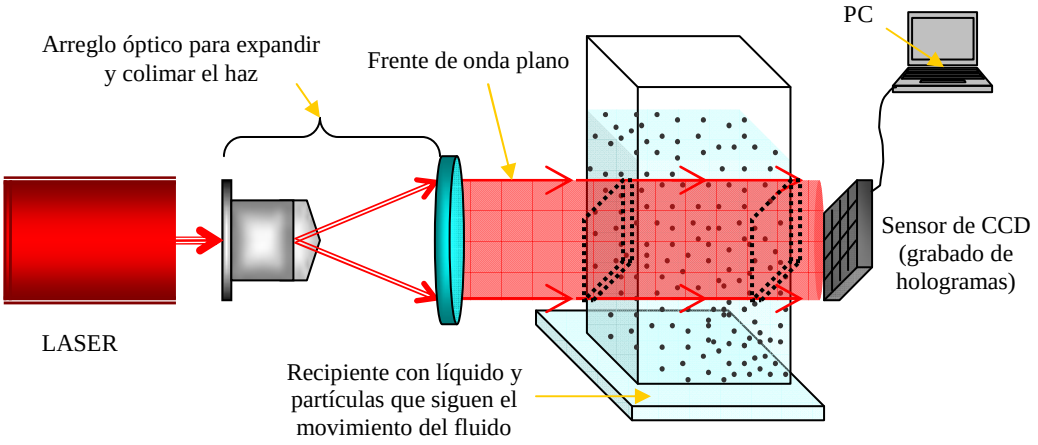


Fig. 4.2. Arreglo en línea DHPIV.

4.2.1 Registro y reconstrucción de una partícula con un sistema DH en línea

Esta sección se enfocará en el registro y reconstrucción de un holograma de una partícula micrometrica esférica. Este análisis servirá para entender el proceso de registro y reconstrucción de múltiples partículas tal y como aparecen en PIV.

La figura 4.2 muestra los componentes físicos del sistema de holografía digital en línea, los cuales constan de:

- Un láser Helio-Neón con longitud de onda de 633 nm y potencia de 20 mW como fuente de luz coherente.
- Un objetivo de microscopio 20X y su pin-hole para expandir y filtrar espacialmente el haz.
- Una lente de 7cm de diámetro y distancia focal f = 10cm para colimar el frente de onda.
- Una muestra del fluido a analizar dentro de un recipiente de vidrio de 2x2 cm^2 de base por 4cm de altura y un espesor de paredes de 1mm.
- Partículas altamente reflectivas de poliestireno de 50 μm de diámetro, para ser depositadas dentro del fluido.
- Una placa térmica para inducir calor al líquido y generar el movimiento de sus moléculas.
- Un dispositivo CCD de una cámara digital como medio de grabación a una velocidad de registro de 15 cuadros por segundo, del tipo de transferencia de cuadro completo y separación entre píxeles $\Delta X = \Delta Y = 5$ μm y resolución de 1024 x 768 píxeles, lo cuál define las dimensiones en X, Y que tendrá la región de interés.
- Una PC para procesar los hologramas mediante algoritmos y así obtener los vectores de velocidad.

Con este sistema, en la **etapa de registro** se obtiene el holograma para una partícula de 50 micras de diámetro puesta sobre una placa de vidrio. En la figura 4.3 se muestra el holograma de la partícula.

La luz incidente en el sensor CCD con tamaño de píxeles de 5μ por lado contiene dos componentes: La onda de referencia (E_R) que se transmite directamente, la cual es una onda plana cuya amplitud y fase no varían en todo el sensor y la onda de objeto (E_O) que es una onda dispersada cuya amplitud compleja en cualquier punto en el área del sensor depende de la forma del objeto. Por ser el arreglo óptico en línea, tanto el haz de referencia como de objeto provienen de la misma dirección.

El recuadro rojo en la figura resalta el patrón de difracción (interferencia) de la partícula. En esta etapa, se mide la distancia desde el sensor hasta donde se encuentra la partícula Con esta medida, se tiene un estimando de la distancia a la cuál se reconstruirá el holograma, la medida se tomó en el laboratorio, dando como resultado un aproximado de 34mm.

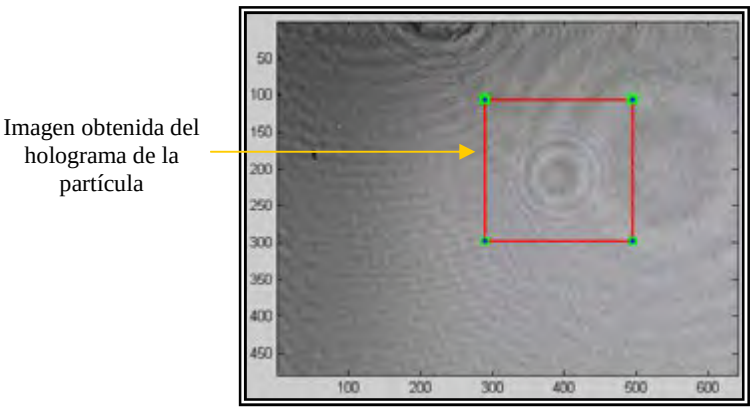


Fig. 4.3 Holograma de una partícula con un arreglo holográfico en línea.

En la **etapa de reconstrucción**, los tres términos que se forman al reconstruir el holograma (ver capítulo 2) son: la onda no difractada que atraviesa el holograma, la onda del objeto reconstruido formando la imagen no distorsionada (imagen real) y la onda del objeto reconstruido formando la imagen distorsionada (imagen gemela). Con un holograma en línea, un observador viendo el holograma reconstruido, apreciaría la imagen gemela alineada fuera de foco y detrás de la imagen real así como una fuerte iluminación coherente de fondo (onda no difractada).

En la reconstrucción del holograma se consideran las mismas características del haz láser monocromático colimado de referencia que se usó en la etapa de registro. Se usa la ecuación (3.15) para realizar la reconstrucción. La reconstrucción se hace para varios planos hasta encontrar el mejor foco de cada partícula. Se sabe que es el mejor foco por que el perfil de intensidad es mayor.

En la figura 4.4 se muestra el perfil de intensidad contra distancia de reconstrucción. Los planos de reconstrucción para esta partícula oscilan entre los 31 y 36mm que es donde se pretende encontrar el mejor foco.

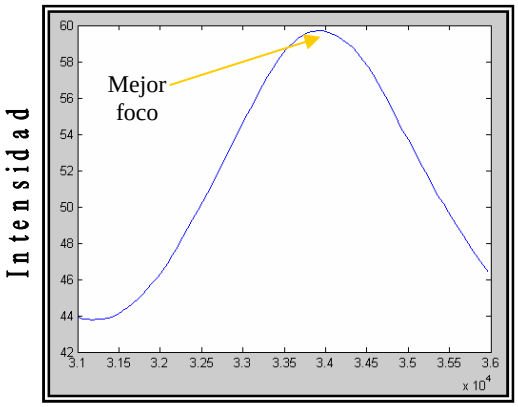


Fig. 4.4. Perfil de intensidad vs. Distancia de reconstrucción para la partícula en estudio.

La figura 4.5 muestra la partícula reconstruida a su distancia focal (33.9 mm), usando la ecuación de convolución. Se amplifica la partícula para corroborar su tamaño, se observa que son aproximadamente 10 píxeles el diámetro que muestra tener la partícula que multiplicado por 5µm que mide cada lado del píxel; resulta en un tamaño de partícula de 50µm que coinciden con el tamaño real que también es de 50µm.

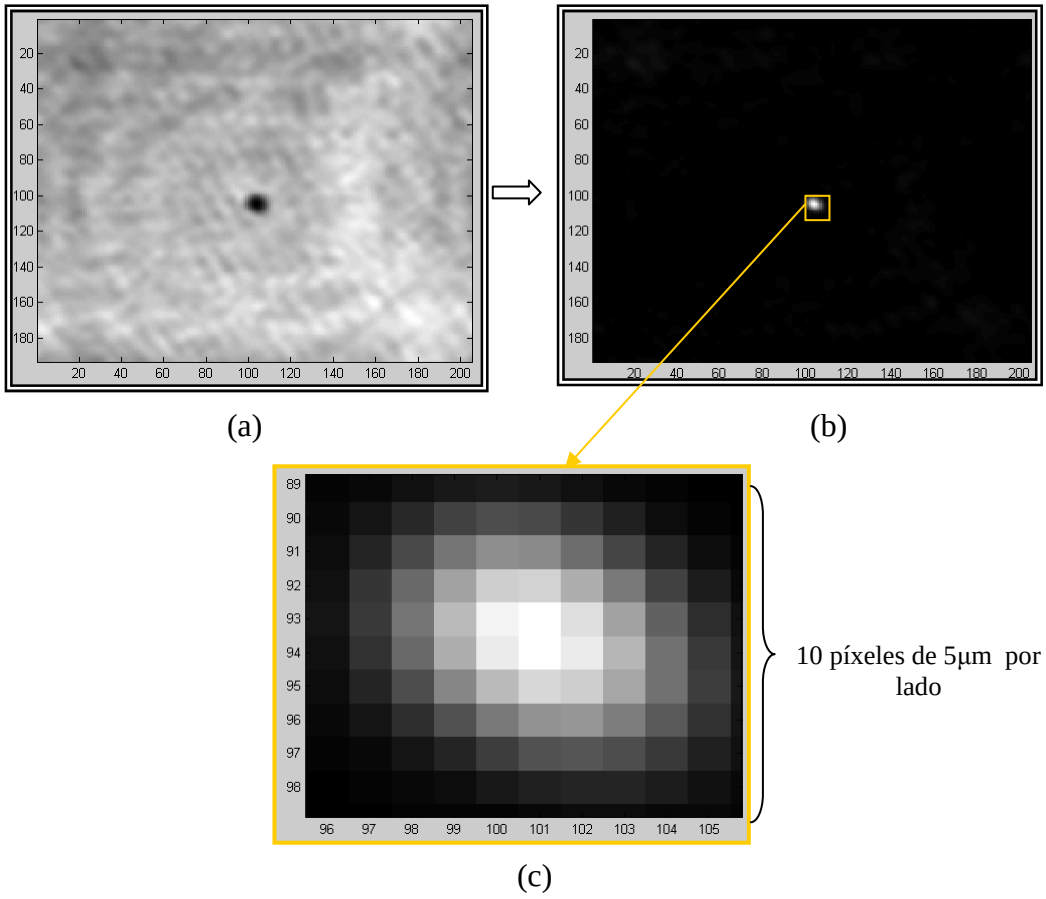


Fig. 4.5 Reconstrucción por convolución de una partícula de 50 micras a su distancia focal. (a) Con el término DC. (b) Sin el término DC. (c) Partícula amplificada.

En los experimentos, esas fueron las distancias a las cuales se reconstruyeron las partículas teniendo poca pérdida de información, para reconstrucciones mas lejanas,

gran parte de la información proveniente de los patrones de difracción de las partículas se perdía o bien, se salía del área del sensor; entonces se estableció una profundidad máxima de 3cm alejado del plano del holograma (sensor) para poder reconstruir las partículas.

4.3 Partículas trazadoras

En velocimetría de partículas, la velocidad de un fluido se calcula de forma indirecta mediante el procesamiento de imágenes de dicho fluido con partículas insertadas previamente. Las partículas son llamadas "partículas trazadoras" que por sus características, su movimiento será muy parecido al del fluido. Por lo tanto, la velocidad de una partícula será prácticamente la misma que la velocidad del fluido en cada punto.

Las partículas empleadas en velocimetría de partículas deben satisfacer dos condiciones: ser capaces de seguir el movimiento del fluido sin retraso excesivo, y reflejar la suficiente luz del láser para ser capturadas adecuadamente por la cámara. Lo ideal es encontrar partículas que al ser insertadas en el fluido, sigan el movimiento de éste en forma exacta, sin modificar el flujo, ni interactuar entre ellas. Sin embargo, es difícil satisfacer estas condiciones y en la práctica se utilizan aquellas que simplemente sigan el flujo sin perturbarlo demasiado. Las partículas y el flujo deben tener aproximadamente la misma densidad para que puedan permanecer suspendidas en el fluido, de lo contrario se hundirán o flotarán y no seguirán apropiadamente el movimiento.

Las partículas también deben dispersar la luz del láser para ser captadas por la cámara. La luz dispersada por las partículas está en función del índice de refracción y del índice del fluido que las rodea, así como del tamaño y forma de éstas. La cantidad de luz dispersada también depende del ángulo de observación el cual generalmente es a 90° por ser una de las posiciones con mayor dispersión de luz.

La cantidad de partículas utilizada también es muy importante. Tener muchas partículas o muy pocas afectará los resultados obtenidos. Si se utilizan muchas partículas se modifica el flujo, y si se utilizan pocas partículas no se obtiene suficiente información para calcular la velocidad en todos los puntos requeridos del área de estudio. La distribución de las partículas debe ser homogénea para poder obtener la velocidad en todas las regiones. La elección del tipo de partículas en cada experimento depende del fluido y del tipo de flujo que se desee estudiar. La tabla 4.1 muestra partículas que pueden ser utilizadas par visualizar líquidos.

Tipo	Material	Diámetro promedio (micras)
Sólido	Poliestireno*	5 – 100
	Aluminio	2 – 7
	Esferas de vidrio	10 – 100
	Gránulos con cubiertas sintéticas	10 – 500
Líquido	Diferentes aceites	50 – 500
Gaseoso	Burbujas de oxígeno	50 – 1000

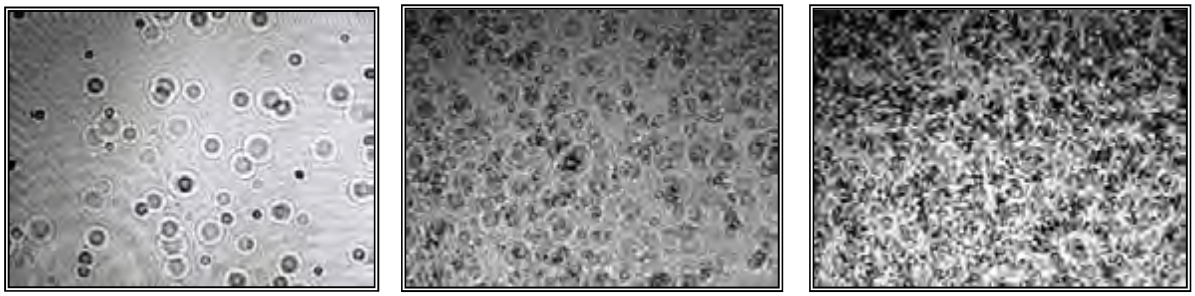
Tabla 4.1. Partículas que pueden usarse en la visualización de flujos líquidos

*Por su facilidad de adquisición y propiedades de alta reflectividad se han escogido partículas de poliestireno de 50 μm de diámetro.

4.4 Principios de los sistemas DHPIV y DHPTV

Como ya se vio, un sistema DHPIV básico utiliza un láser como fuente de luz, un arreglo óptico que proporcione un frente de onda plano, una muestra del fluido a analizar, partículas para visualizar el fluido y un medio para capturar los hologramas y poderlos transferir a una PC.

Básicamente existen 3 métodos de análisis para determinar la velocidad de las partículas y el método a elegir va de acuerdo a la densidad de éstas en el fluido. Se pueden distinguir tres tipos de densidad de partículas en imágenes: *baja*, *media* y *alta* densidad, como se muestra en la figura 4.6.



(a) (b) (c)

Fig. 4.6. Tres tipos de densidad de partículas en las imágenes holográficas: **(a)** Baja (DHPTV), **(b)** Media (DHPIV), y **(c)** Alta (LSV).

En el caso de la imagen con baja densidad de partículas, figura 4.6 (a), las partículas pueden ser detectadas de forma individual. Para la evaluación de este tipo de hologramas, se requieren métodos de seguimiento de partículas para poder determinar el desplazamiento individual de cada una. El desplazamiento de una partícula determina la velocidad del fluido en ese punto. El método para analizar un fluido en movimiento con esas características es DHPTV.

Los hologramas con densidad media, figura 4.6 (b), tienen partículas que también pueden ser distinguidas en forma individual, sin embargo, a simple vista ya no es posible distinguir una misma partícula en dos hologramas. Este tipo de hologramas son procesados con la técnica de DHPIV, la cuál hace una evaluación estadística y determina el desplazamiento promedio de pequeños grupos de partículas.

En el caso de hologramas de alta densidad, figura 4.6 (c), son tantas partículas que es imposible identificar partículas de forma individual por que éstas están encimadas en la mayoría de los casos y se forma un patrón de moteado también llamado “speckle”. El método utilizado para éste caso es llamado Láser Speckle Velocimetry (LSV). LSV hace una aproximación estadística, que revela el desplazamiento de las manchas formadas por partículas. La principal desventaja que tiene este método es que,

por la alta densidad de partículas, éstas tienden a afectar la dinámica original del fluido, aparte que los hologramas no pueden reconstruirse a diferentes distancias *Z* debido a que es casi imposible ver las partículas que se encuentran en planos mas alejados del CCD.

En el diagrama de flujo que se muestra en la figura 4.7 ilustra el principio de funcionamiento de DHPIV y DHPTV. Un sensor de una cámara digital registra directamente dos cuadros de holograma de un fluido transparente con partículas contenidas cuyas características ya fueron mencionadas en el apartado anterior. Los hologramas tal y como se obtienen en la grabación, son preprocesados para remover algunas características no deseadas provenientes de los frentes de onda que inciden en el sensor o bien, remover algunos defectos experimentales que surjan en la etapa de grabación.

Una vez adquiridas y mejoradas las imágenes holográficas, estas son numéricamente reconstruidas con el fin de obtener la onda de objeto original. Del campo de onda reconstruido se extraen las coordenadas 3D de las partículas.

Luego, a partir de las partículas enfocadas en ambos hologramas, se extraen los vectores de velocidad implementando la técnica DHPIV o DHPTV según se requiera.

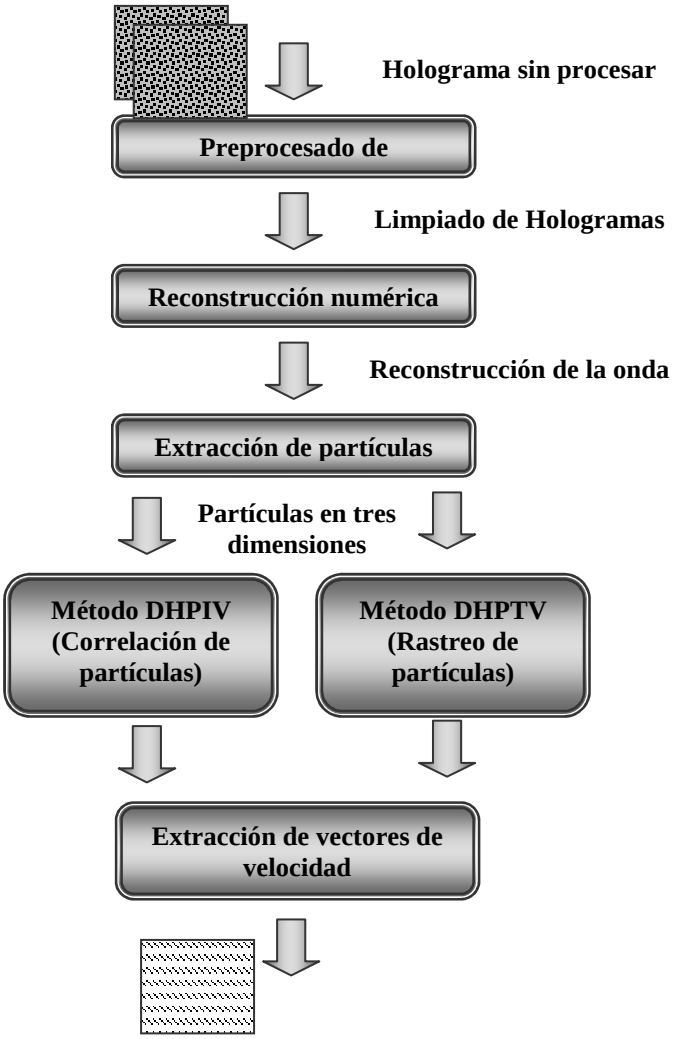


Fig. 4.7 Principios de DHPIV y DHPTV

El cálculo de la velocidad del fluido se determina usando la relación:

$$Velocidad = K \frac{Desplazamiento}{Tiempo}$$

Para calcular la velocidad es necesario determinar el desplazamiento que tuvo el fluido en un intervalo de tiempo y conocer el factor de escala K. El intervalo es un dato conocido, pues es parte de la configuración inicial del experimento y el factor de escala K es la constante escalar que da la relación entre píxeles de la imagen y unidades reales de longitud. Se determina el desplazamiento del fluido gracias al cambio en las posiciones de las partículas enfocadas en un par de hologramas consecutivos.

4.4.1 Sistema DHPIV

Una vez obtenido un par de hologramas consecutivos del fluido en estudio, cada uno de éstos son reconstruidos a diferentes distancias Z con el fin de obtener distintos planos de partículas enfocadas; entonces cada plano del holograma se divide en pequeñas áreas rectangulares llamadas "*zonas de interrogación*". Lo mismo se hace con el segundo holograma. Luego, se correlacionan las zonas de interrogación de ambos hologramas para obtener el vector de movimiento de las partículas de un holograma respecto a otro.

Típicamente, las zonas de interrogación son cuadradas y el tamaño de las zonas de interrogación determina el número de vectores que se calculan por imagen y por lo tanto la máxima resolución espacial del mapa de vectores de velocidad.

Se asume que todas las partículas se mueven homogéneamente, la velocidad de las partículas en cada par de planos no se obtiene de manera individual si no en promedio. Para éste propósito se emplean métodos estadísticos que determinan el desplazamiento promedio de las partículas de cada zona de interrogación de un holograma respecto a otro. Con el desplazamiento y el tiempo transcurrido entre un par de imágenes, se estima la magnitud y dirección de la velocidad local del fluido en cada zona. El proceso se repite para todas las zonas de interrogación de todos los pares de planos y se construyen mapas con los vectores de velocidad calculados.

La figura 4.8 muestra un diagrama de flujo del procedimiento de la técnica DHPIV

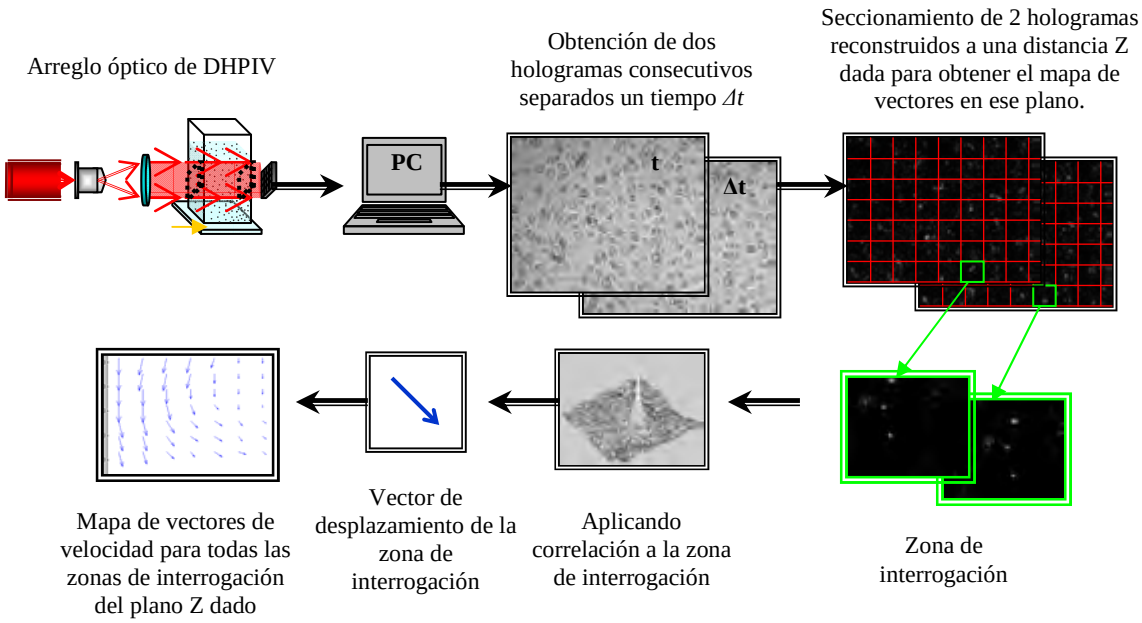


Fig. 4.8 Procedimiento de la técnica DHPIV

A continuación se describen las principales características de la técnica DHPIV [26].

- Se determinan componentes de velocidad bidimensionales para cada uno de los planos Z de los hologramas reconstruidos lo que permite tener un mapa tridimensional de vectores.

- Es una técnica no invasiva, esto es, que no se necesita introducir ningún dispositivo en el fluido.

- Para medir la velocidad se introducen pequeñas partículas esféricas del orden de micras que no perturban el flujo significativamente.

- La medición de velocidad del flujo del fluido se hace de forma indirecta, pues realmente se hace la medición de la velocidad de las partículas que se encuentran en el fluido.

- Es necesario que las partículas a utilizar en cada prueba tengan un tamaño uniforme, distribución homogénea, así como un peso adecuado, con el fin de que sigan el flujo sin perturbarlo de forma significativa.

- El número de vectores por cada plano, o mejor dicho, la resolución espacial del mapa de vectores de velocidad cada plano, depende principalmente de la densidad de partículas y del tamaño de la imagen.

- Ya que para su procesamiento las imágenes son divididas en zonas de interrogación, la resolución del mapa de vectores es inversamente proporcional al tamaño de las zonas de interrogación. Por lo tanto, para

maximizar la resolución espacial, es necesario minimizar el tamaño de interrogación. Sin embargo, si las zonas de interrogación son muy pequeñas, puede que se pierdan las partículas saliéndose de la zona y no se podrá determinar la velocidad en esa región.

4.4.1.1 Problemas con el Sistema DHPIV

La técnica DHPIV tiene varias áreas que deben ser mejoradas para aumentar la calidad de los resultados. Puede dar como resultado una cantidad de vectores incorrectos y con una baja resolución espacial. Aunque en muchas aplicaciones la resolución obtenida es aceptable, existen algunos experimentos donde se necesita mas detalle de los resultados. Esto no es posible ya que DHPIV determina el desplazamiento promedio de las partículas que se encuentran en un área, y si esta área es muy pequeña, la técnica falla ya que quizá no se encuentre ninguna partícula. Por otro lado, hay imágenes en las que por una iluminación deficiente durante el experimento, las partículas prácticamente no se vean y en este caso la técnica también falla y genera resultados erróneos.

4.4.1.2 Procesamiento del Sistema DHPIV

En los hologramas a procesar con DHPIV se utilizan métodos estadísticos para determinar el desplazamiento promedio de pequeños grupos de partículas. El método de evaluación más usado es la *correlación cruzada* de las imágenes de hologramas. La correlación cruzada se utiliza para encontrar la posición de mayor semejanza entre dos imágenes. Para evaluar con éste método, las imágenes reconstruidas de los hologramas se dividen en pequeñas cuadrangulares, las llamadas "*zonas de interrogación*". Una zona de interrogación es una región de una imagen *f*, es decir, una subimagen de *f*.

Se asume que todas las partículas que están dentro de una de estas zonas de interrogación, se mueven de manera uniforme. El algoritmo consiste en procesar dos zonas de interrogación del mismo tamaño y con las mismas coordenadas *X*, *Y*, y *Z* para cada holograma. Una zona es del primer holograma y la otra zona corresponde al segundo holograma como se muestra en la figura 4.9.

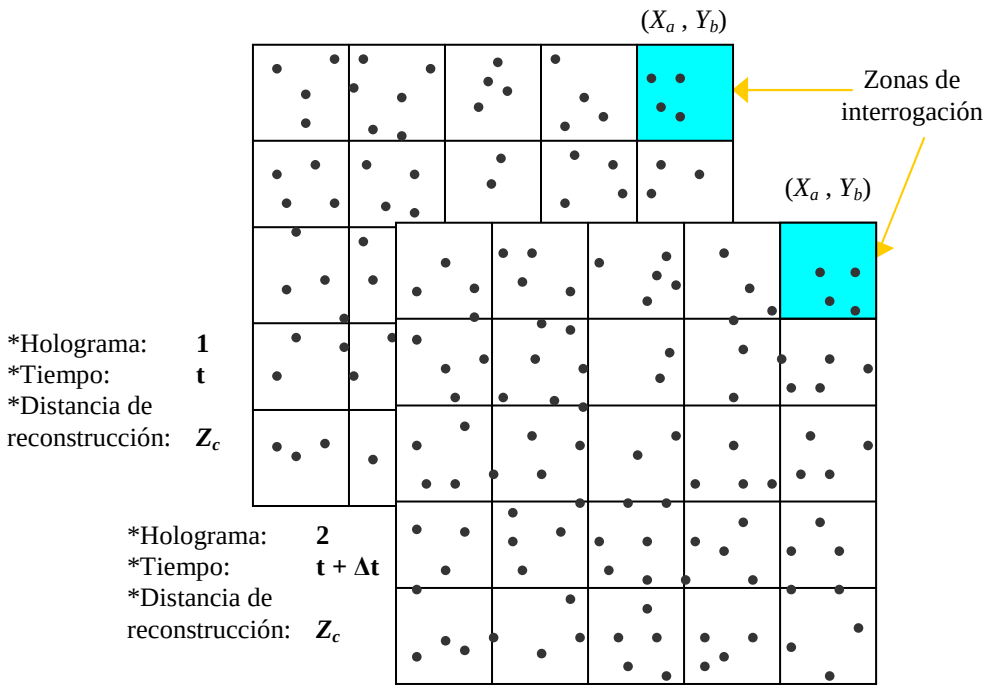


Fig. 4.9. Dos hologramas de DHPIV reconstruidos en un plano *Z* y divididos en zonas de interrogación.

4.4.1.2.1 Correlación cruzada en imágenes de partículas empleando la Transformada de Fourier

La correlación cruzada empleando transformada de Fourier es la técnica más utilizada para procesar estas zonas de interrogación [26].

La correlación que queda función del parámetro Δx para las funciones $f(x)$ y $g(x-\Delta x)$ se define por [29]:

$$\boldsymbol{h(\Delta x) = \int_{-\alpha}^{\alpha} f(x) g(x - \Delta x) dx} \tag{4.1}$$

Donde $f(x)$ correspondería a la zona de interrogación del holograma 1 y $g(x-\Delta x)$ a la zona de interrogación del holograma 2 en la figura 4.9.

La función de correlación antes expresada también puede resolverse utilizando la transformada de Fourier. Aplicando la transformada de Fourier a ambos miembros y resolviendo, entonces la transformada de Fourier de la función de correlación resulta ser

$$\boldsymbol{H(f_x) = F(f_x) G^*(f_x)} \tag{4.2}$$

Esta ecuación representa el **espectro de intensidad** de la función de correlación. Una vez que se tiene el producto representado por la ecuación anterior, solo resta calcular la transformada inversa del mismo para obtener la correlación:

$$\boldsymbol{h(\Delta x) = \Im^{-1}\{\Im\{h(\Delta x)\}\} = \Im^{-1}\{H(f_x)\}}$$

$$= \Im^{-1}\left\{ \boldsymbol{F}(\boldsymbol{f}_x)\boldsymbol{G}^*(\boldsymbol{f}_x) \right\} \tag{4.3}$$

El cálculo de la correlación de dos funciones diferentes se conoce como *correlación cruzada*. Cuando $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ se tiene lo que se denomina Autocorrelación.

En el plano de correlación cruzada se pueden observar las posiciones de los máximos en los espectros de intensidad en los cuales hubo mayor similitud al comparar una imagen con la otra, el máximo representa el desplazamiento promedio que tuvieron las partículas entre los dos hologramas. La figura 4.10 (c) muestra de forma gráfica el plano de correlación cruzada de dos hologramas de partículas reconstruidos a la distancia de enfoque, [figura 4.10 (a) y (b)], resultado que se obtiene al resolver numéricamente la función de correlación cruzada aplicando la transformada rápida de Fourier en la ecuación 4.3.

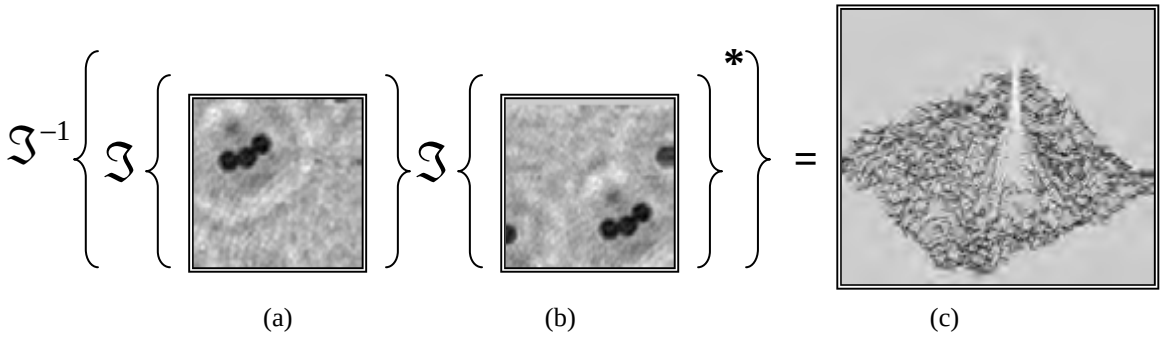


Fig. 4.10 Función de correlación cruzada de dos imágenes. (a) y (b) Hologramas de partículas enfocadas en distintas posiciones, (c) Espectro de intensidad de la correlación cruzada de los dos hologramas.

Una vez desarrollados los algoritmos de correlación, se hacen pruebas para rastrear los movimientos que tendrán las partículas en planos X, Y. Las figuras 4.11 a 4.13 muestran 3 pares de conjuntos de partículas de alta densidad, colocadas sobre una placa de vidrio a 2mm del plano del sensor y reconstruidas a esa misma distancia, donde cada conjunto de partículas representa una posición distinta, separadas un intervalo de tiempo conocido.

Con la distancia de reconstrucción se tendrá información de la posición en *Z*, no habrá variación en esta coordenada ya que todas las partículas se encuentran en el mismo plano axial. Solo se imprimirá un movimiento horizontal, vertical y de giro en el plano X, Y para los tres conjuntos de partículas, lo que permitirá verificar que los algoritmos de correlación estén arrojando resultados confiables.

La prueba horizontal se muestra en la figura 4.11, el movimiento se realizó manualmente, desplazando la placa de vidrio en un sentido derecha - izquierda.

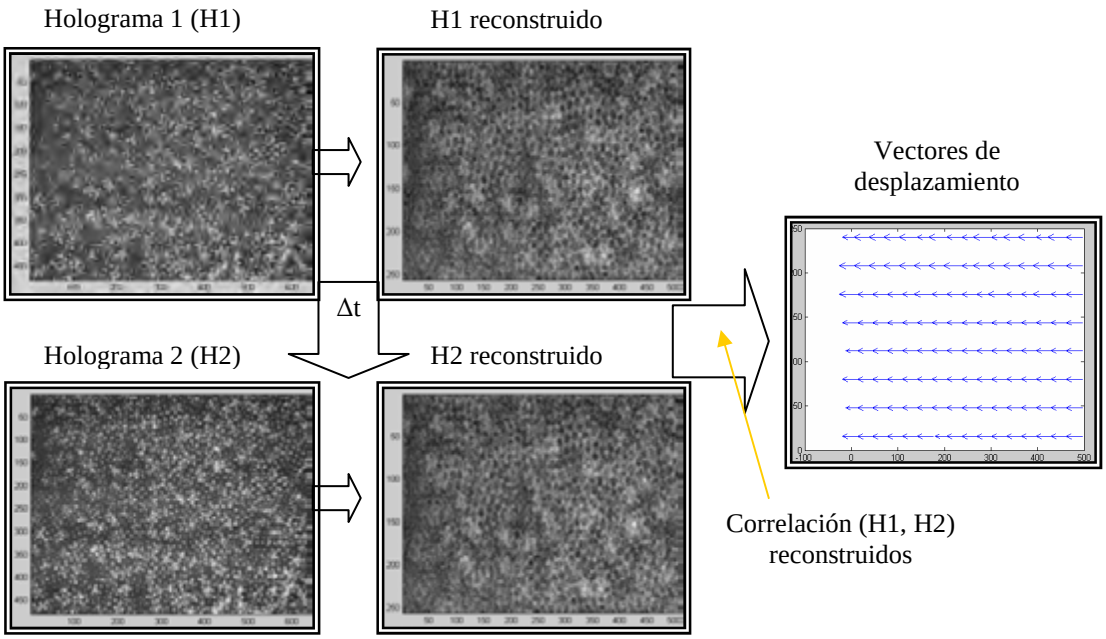


Fig. 4.11 Prueba horizontal de correlación.

La prueba vertical se muestra en la figura 4.12, el movimiento se realizó manualmente, desplazando la placa de vidrio en un sentido arriba - abajo.

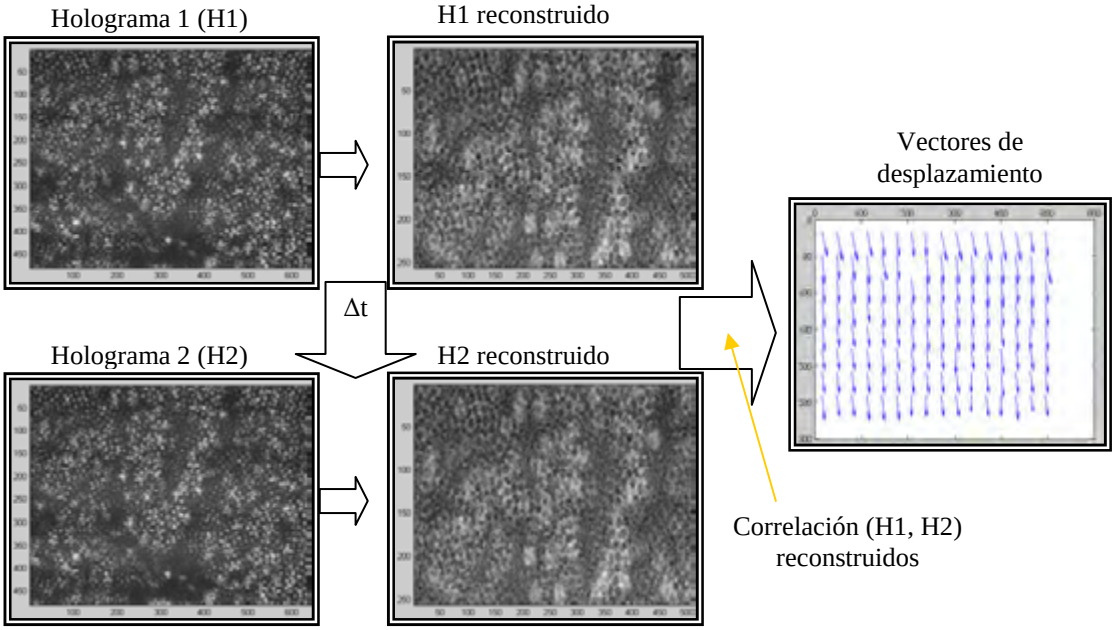


Fig. 4.12 Prueba vertical de correlación.

La prueba de giro se muestra en la figura 4.13, el movimiento se realizó manualmente, girando la placa de vidrio en sentido horario con pivote en la esquina inferior izquierda.

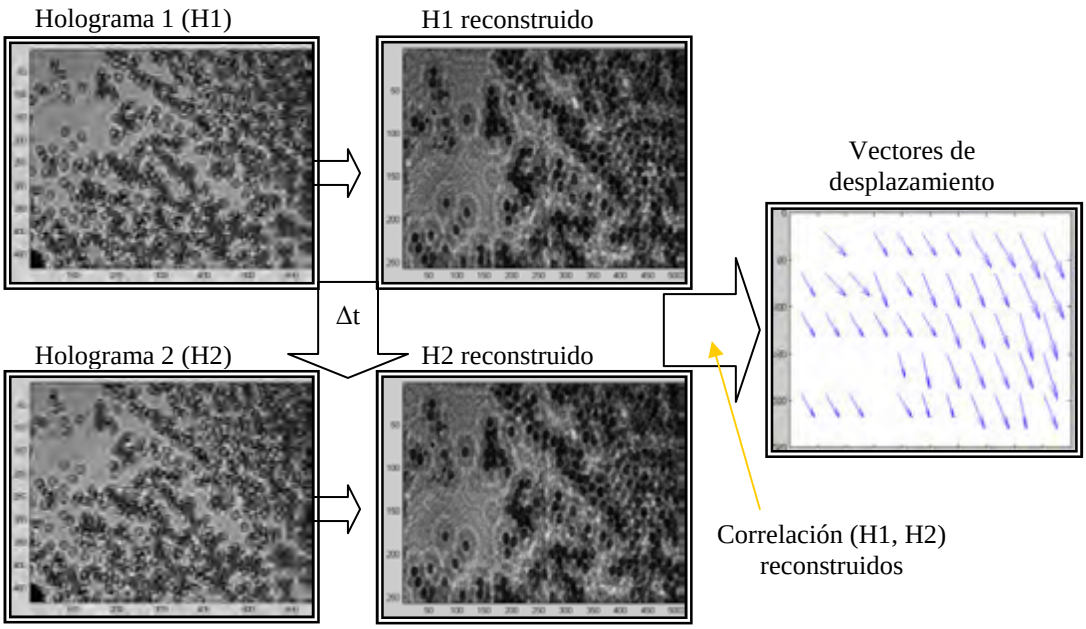


Fig. 4.13 Prueba giro de correlación.

Ya realizadas las pruebas anteriores en los planos (X, Y), el proceso para la obtención de vectores de velocidad en un recipiente tridimensional lleno de partículas será el mismo. En cada plano de reconstrucción se enfocarán distintas partículas de las cuales se obtendrán vectores de velocidad, teniendo como resultado una matriz tridimensional con los campos de velocidad en ese volumen del fluido

4.4.2 Sistema DHPTV

DHPTV basa su técnica principalmente en el rastreo de partículas, es una variante de la técnica DHPIV que aplica a hologramas con baja densidad de partículas. Algunas de las características de DHPTV [26] son:

- Para un holograma de una unidad de volumen, el número de planos a reconstruir es relativamente bajo.
- La densidad de partículas es muy baja que no perturba el movimiento del fluido.
- La probabilidad de que haya traslape de partículas al grabar hologramas del fluido en estudio es poca.
- La ubicación de las partículas y por tanto los puntos de medición de velocidad están distribuidas uniformemente.
- Se determinan componentes de velocidad tridimensionales por cada partícula ubicada en dos hologramas consecutivos.

DHPTV determina la velocidad de las partículas contenidas en un fluido mediante un par de hologramas consecutivos separados un periodo de tiempo Δt igual al tiempo que tarda el sensor en obtener dos imágenes. Se mide entonces el desplazamiento individual de las partículas y se divide entre ese tiempo para obtener la velocidad. Esta técnica es muy útil aunque no provee un campo de velocidades con alta resolución, ya que las partículas están esparcidas aleatoria mente y por tanto la información de velocidad también. La figura 4.14 muestra un holograma con pocas partículas propio para implementar la técnica DHPTV.

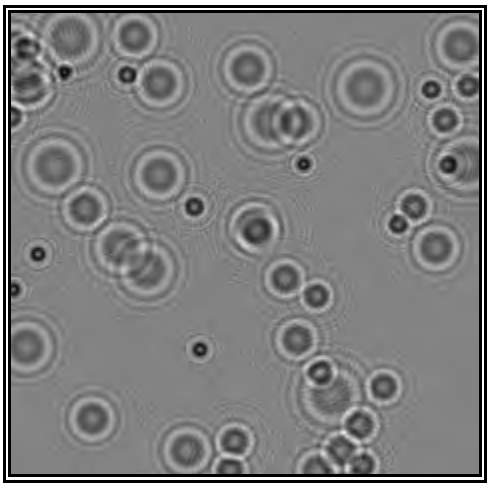


Fig. 4.14. Imagen holográfica con baja densidad de partículas para DHPTV.

4.4.2.1 Procesamiento del Sistema DHPTV

En la técnica de velocimetría por rastreo de partículas usando holografía digital, se identifica de manera individual la posición X, Y, Z de cada partícula. La manera de ubicar la posición Z de la partícula mediante su patrón de difracción, es obteniendo su perfil de máxima intensidad para cada plano Z de reconstrucción hasta encontrar su distancia de enfoque. La información de la posición X, Y de cada partícula se sabe por defecto al encontrar el punto máximo de intensidad de la partícula (distancia Z).

Después del proceso de reconstrucción y enfoque, se tienen las ubicaciones tridimensionales de cada partícula en ambos hologramas.

Una vez almacenados los datos, es necesario identificar qué posición tendrá en el segundo holograma cada partícula en movimiento del primer holograma, desgraciadamente todas son iguales y no hay manera de distinguirlas o etiquetarlas por lo que se recurre a un método estadístico para predecir cuál sería su posición mas probable.

En esta tesis desarrollamos el siguiente algoritmo para identificar pares de partículas. Siendo las partículas desde 1 hasta *l* correspondientes al holograma 1 y de 1 hasta *n* correspondientes al holograma 2. La técnica a usar es tomando una partícula *l* y buscando entre todas las partículas *n* aquella que mas se aproxime, entonces hay que basarse en el comportamiento general de las demás partículas. El proceso se repite para todas las partículas *l* del holograma 1 y así encontrar la mayor cantidad de pares.

Definiendo un promedio de la cantidad de desplazamiento (CDP), una dirección de movimiento general (DMP), considerando como ventaja la poca población de partículas en el fluido y viendo que se encuentran uniformemente distribuidas, es posible predecir las coordenadas que tendrá la partícula *l* en el segundo holograma después de un intervalo de tiempo Δt.

Luego, se añade un margen de error o de tolerancia (ME) a CDP y DMP que permita seleccionar un conjunto de partículas posibles a formar el par con la actual partícula del Holograma 1.

La siguiente ecuación describe el desplazamiento *D* absoluto que hay entre una partícula *l* con coordenadas $(X1_l, Y1_l, Z1_l)$ hasta la posición de una partícula *n* con coordenadas $(X2_n, Y2_n, Z2_n)$:

$$D(l,n) = \sqrt{(X1_l - X2_n)^2 + (Y1_l - Y2_n)^2 + (Z1_l - Z2_n)^2} \tag{4.4}$$

Aquella partícula en el holograma 2 que cumpla mejor las condiciones de cantidad de desplazamiento, dirección de movimiento y menor margen de error, será la partícula par.

Para obtener resultados mas confiables, se controla que entre un holograma y otro las partículas no se desplacen una distancia muy grande, éste desplazamiento tiene que ser menor a la separación promedio que hay entre partículas dentro del holograma. Una vez ubicadas las partículas por pares, se procede al trazo de vectores de velocidad.

La figura 4.15 (a) y (b) muestra dos imágenes consecutivas con baja densidad de partículas donde se determinó el desplazamiento que tuvieron las partículas en un holograma y otro. La figura 4.15 (c) muestra este desplazamiento y sus vectores de velocidad. Cada una de estas partículas puede ser vista como una pareja de partículas (una partícula del tiempo t_0 y otra del tiempo t_1).

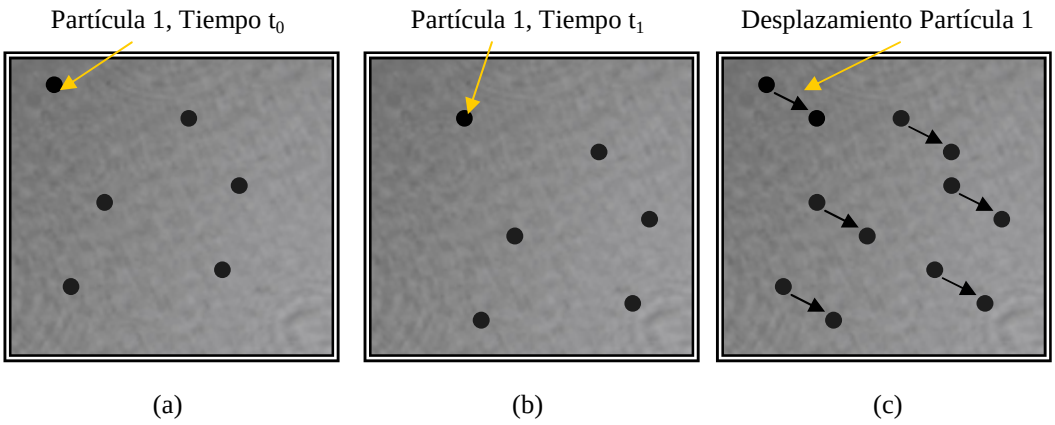


Fig. 4.15 (a) Imagen de partículas tomada en el tiempo t_0, **(b)** Imagen de partículas tomada en el tiempo t_1, **(c)** Desplazamiento de las partículas en el intervalo $t_0 - t_1$.

5 Resultados, Conclusiones y Bibliografía

5.1 Introducción

En los capítulos anteriores se dieron los fundamentos de la holografía digital aplicada a imágenes de partículas, también se dieron las bases teóricas para calcular la velocidad en flujo de fluidos usando dos tipos de imágenes de partículas: media y baja densidad de partículas. Usando estas herramientas determinaremos la velocidad para estas dos condiciones de partículas en un recipiente.

5.2 Arreglo experimental

En los experimentos se uso el arreglo experimental de holografía en línea (ver figura 4.2). Cuyos elementos ópticos permiten analizar una región de interés basada en el tamaño de la sección transversal del haz colimado.

El flujo de fluido estudiado es el contenido en un recipiente cúbico con base cuadrada de 20mm, hecho de paredes de vidrio de 1mm de espesor. El movimiento del fluido se provoca colocando el recipiente sobre una placa de metal la cual se calienta a una temperatura de 35°C. El fluido cercano a la placa se calienta variado su densidad y ocasionando el movimiento del fluido hacia la parte superior. Este movimiento de fluido se mantiene mientras haya diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior del recipiente. Para poder medir la velocidad del fluido, este se mezcló con partículas esféricas de poliestireno y con un diámetro de 50μm. El tamaño de las partículas esta limitado por el tamaño del píxel (5μm), es por eso que se usaron partículas mayores de 5 μm.

El tamaño del sensor usado en los experimentos nos permite analizar aproximadamente una región de 5mm por lado. Así, si queremos analizar una región de mayor tamaño tendríamos que usar un sensor mas grande o usar una lente que nos permita reducir el tamaño del área de interés a la del sensor utilizado en estos estudios. En este trabajo se realizan dos experimentos, el primero usando únicamente el sensor y en el segundo usando una lente con una distancia focal de 9cm que nos permitió analizar una área aproximadamente de 2cm por lado.

El proceso para la obtención de los hologramas consiste en lo siguiente: El recipiente se coloca en la región de interés, sobre la placa a una temperatura fija. El valor de la temperatura se selecciona de tal manera que la cámara digital nos permita registrar la dinámica del fluido. El movimiento del fluido es registrado en la cámara en forma de video. Para nuestro caso a una razón de 15 cuadros por segundo. Durante la reconstrucción, el video se separa en imágenes individuales para su análisis.

Así, tenemos una serie de hologramas separados por instantes de tiempo Δt igual a 1/15 de segundo, de los cuales se seleccionan sólo dos hologramas. La selección del par de hologramas depende de aquel intervalo de tiempo en el que se requiera analizar el comportamiento de las partículas en el fluido, y así obtener los vectores de velocidad de aquel instante. Se han desarrollado programas en matlab para la reconstrucción de

hologramas, así como algoritmos de correlación y rastreo de partículas en 3D para la obtención de vectores de velocidad, según los métodos DHPIV y DHPTV.

5.2.1 Experimento sin lente para dos densidades de partículas

Debido a las limitaciones físicas, el sensor se colocó a 2mm alejado de la cara más cercana del recipiente, lo que significa que las partículas más cercanas al plano del sensor estarían a 3mm de separación, considerando el grueso de la pared del recipiente.

La visibilidad de los patrones de difracción de aquellas partículas que se encuentran más alejadas del plano del holograma debe ser perceptible al ojo humano, esto para asegurarse de que el patrón de difracción aún pueda ser reconstruido; ya que mientras mas alejadas se encuentren las partículas, menos es la información que llega al sensor acerca de la éstas.

5.2.1.1 DHPIV

La cantidad de partículas depositadas dentro del recipiente debe ser de una densidad media para poder implementar la técnica de correlación. El tamaño de la zona de interrogación o bien, la máscara de correlación, determina el número de vectores que son calculados por imagen, esto es, que entre mas pequeña sea la zona de interrogación mas vectores de velocidad se obtendrán. También, dentro de cada zona de interrogación debe haber una cantidad considerable de partículas de tal manera que la mayoría de partículas permanezcan dentro de la misma zona de interrogación al obtener los dos hologramas consecutivos. Esto permite hacer la correlación con las mismas partículas y por tanto obtener resultados confiables.

La figura 5.1 muestra un par de hologramas para ser procesados usando correlación de imágenes de partículas. Las unidades se expresan en píxeles; para convertir a valores reales se considera que cada píxel debe multiplicarse por su dimensión real en el CCD que se usó y que es de 5μm por lado.

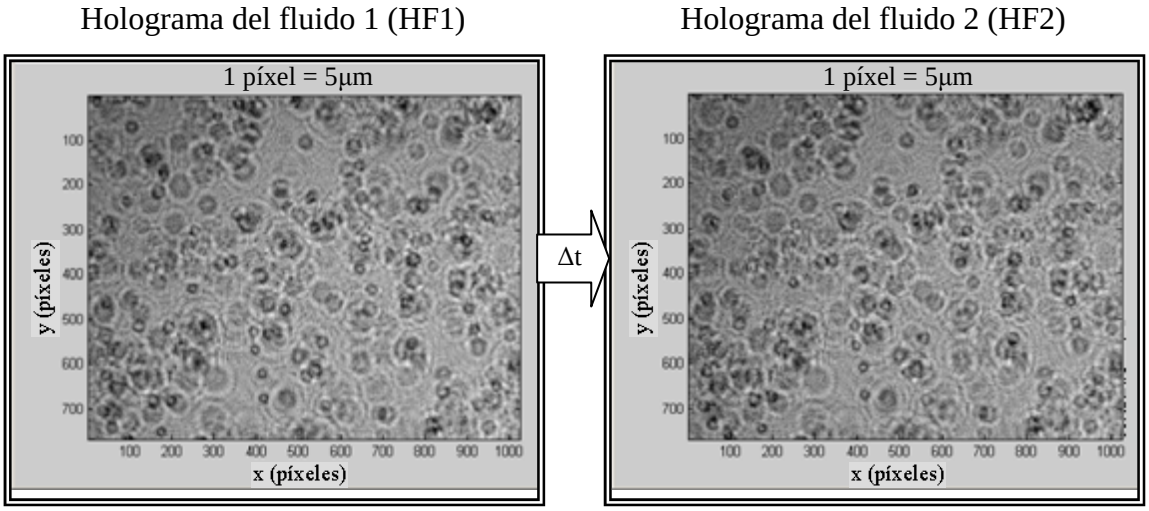


Fig. 5.1 Dos hologramas consecutivos de un recipiente con agua, con partículas de 50 micras, con una densidad media.

Ambos hologramas se reconstruyen en diferentes planos Z con el fin de enfocar todas las partículas que se encuentran en el volumen dentro de la región del CCD. La resolución en los planos de reconstrucción es la separación entre un plano (Z) y el subsecuente (Z + ΔZ), queda en el orden de 10 micras.

En seguida se seleccionan los hologramas reconstruidos de aquellos planos Z que muestren más información de partículas enfocadas para posteriormente implementar la técnica de correlación y así saber el comportamiento del fluido. Las figuras 5.2 a 5.4 muestran mediante los vectores, los cambios de dirección del fluido.

En la figura 5.2 se reconstruye el holograma a una distancia Z = 3000 micras, donde se muestra como los vectores en promedio apuntan hacia abajo. Esto indica que las partículas en esa región van bajando por acción del movimiento de las moléculas del líquido.

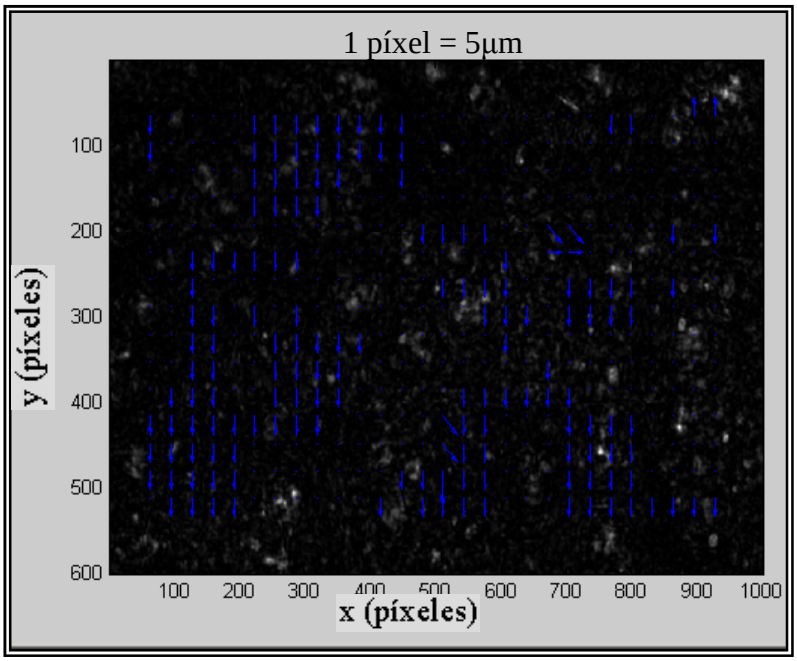


Fig. 5.2 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 3000 micras, mostrando los vectores de velocidad.

En la figura 5.3, a una distancia de reconstrucción Z = 8500 micras, los vectores están en transición, esto es, que casi no de define una dirección de movimiento y es debido a que las partículas dentro del fluido están cambiando de dirección.

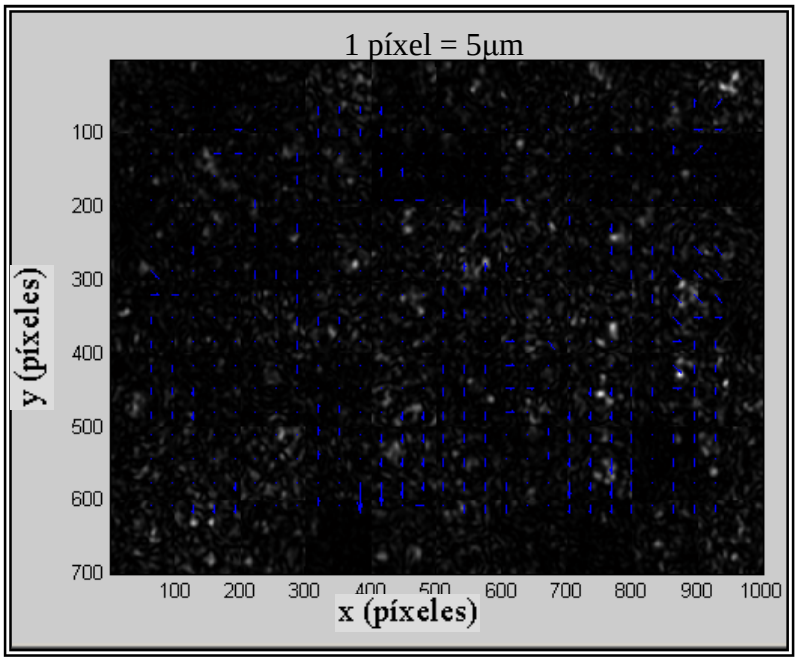


Fig. 5.3 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 8500 micras, mostrando los vectores de velocidad.

En la figura 5.4, a una distancia de reconstrucción Z = 15000 micras los vectores muestran un claro sentido hacia arriba, donde ya trayectoria del fluido ha cambiado a una dirección opuesta.

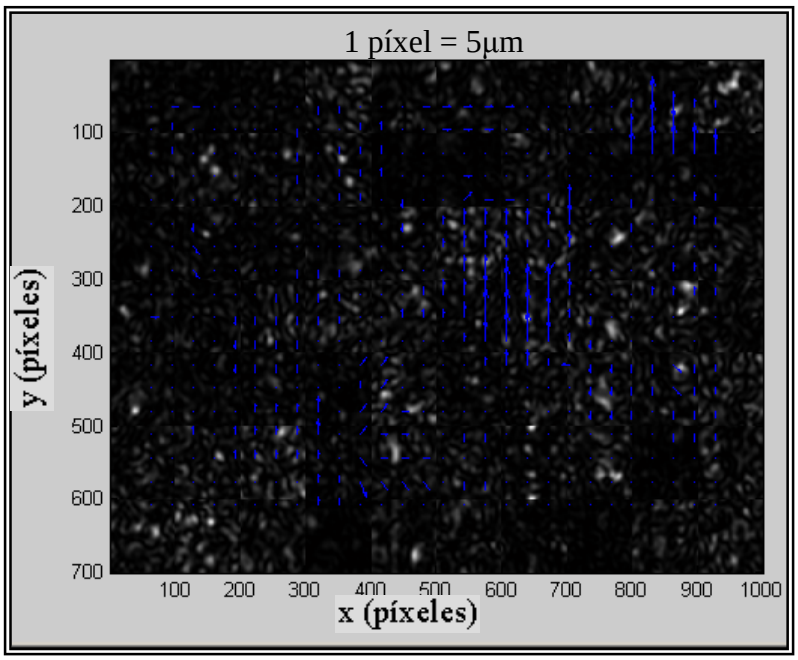


Fig. 5.4 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.1 en Z = 15000 micras, mostrando los vectores de velocidad.

Las tres figuras anteriores muestran el comportamiento del fluido al lo largo del eje axial. El cual consiste en un flujo que recircula en el recipiente. En la parte inferior del recipiente el flujo se calienta y disminuye su densidad provocando el movimiento hacia la parte superior de éste, es por eso que las partículas enfocadas en la figura 5.4 suben. Al llegar el fluido al la parte superior, éste se enfría y baja a la parte inferior del

recipiente, es lo que sucede en la figura 5.2. También hay una etapa de transición donde existe el cambio de dirección, aquí las moléculas se encuentran prácticamente en reposo, es por eso que las partículas de la figura 5.3 no muestran un movimiento notorio. Este comportamiento se mantiene mientras exista una diferencia de temperatura en el recipiente.

5.2.1.2 DHPTV

Si se tiene un conjunto de partículas de baja densidad suspendidas y distribuidas uniformemente dentro de un recipiente con agua. Entonces se tiene que encontrar de manera individual, la posición de cada partícula mediante la gráfica de *perfil de intensidad vs. distancia de reconstrucción* explicada en la seccion 4.2.1. El método se ha de repetir para encontrar la posición X, Y, Z de todas las partículas.

La figura 5.5 muestra un par de hologramas para ser procesados mediante rastreo de partículas.

Holograma 1 del fluido (HF1) Holograma 2 del fluido (HF2)

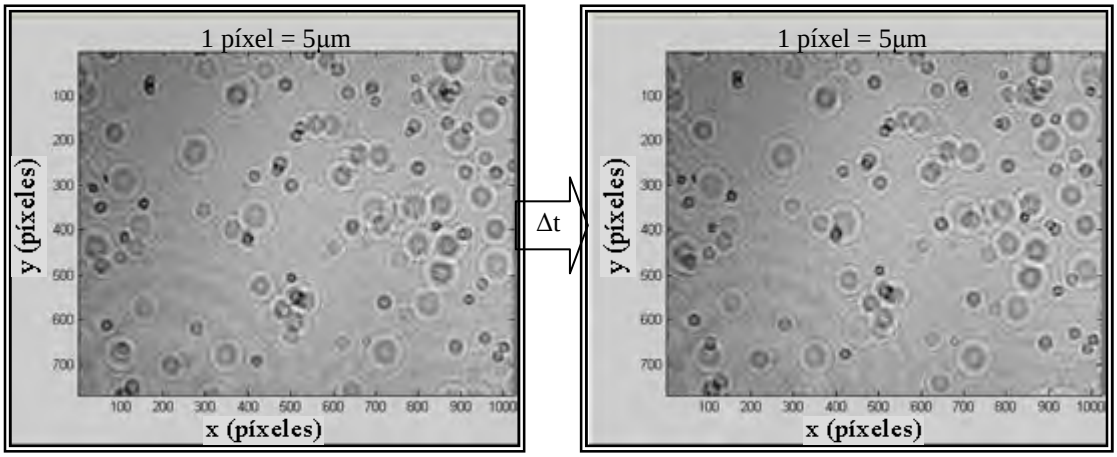


Fig. 5.5 Dos hologramas consecutivos de un recipiente con agua, con partículas de 50 micras en baja densidad.

Se procede a la reconstrucción de los hologramas de la figura anterior, donde se enfocarán las partículas y se almacenarán sus coordenadas. Para esto se implementa un programa de reconstrucción y enfoque que ubica todas las posiciones de las partículas y sus coordenadas se almacenan en una base de datos.

Cabe señalar que entre el 5 y 10 % de las partículas no se encontraron debido a que al ser reconstruidas, sus perfiles de intensidad se salían del rango de umbrales establecidos en el programa. Dichos rangos de umbrales ya no fueron aumentados para encontrar aquellas partículas restantes por que de hacerlo entraría información con ruido, trayendo como consecuencia posibles coordenadas erróneas donde no existen partículas.

La figura 5.6 muestra mediante puntos verdes, las posiciones de las partículas que se encontraron en el holograma 1. Tales puntos están superpuestos sobre la imagen del holograma 1 de la figura 5.5, esto con el fin de hacer la comparación con los

patrones de difracción y verificar que efectivamente coinciden las coordenadas de las partículas encontradas.

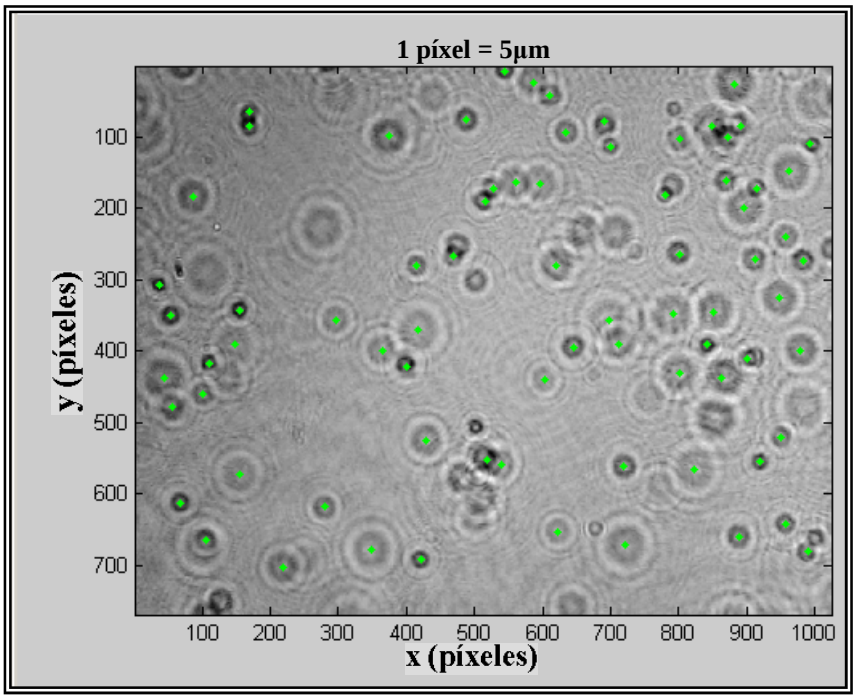


Fig. 5.6 Partículas ubicadas en el Holograma 1 del fluido.

La figura 5.7 muestra las partículas de la figura 5.6 en un mapa tridimensional, donde se expresa ya de manera gráfica cómo es que se encuentran distribuidas dentro del volumen en estudio. Cada punto donde se encuentre una partícula, será un punto con información acerca del fluido.

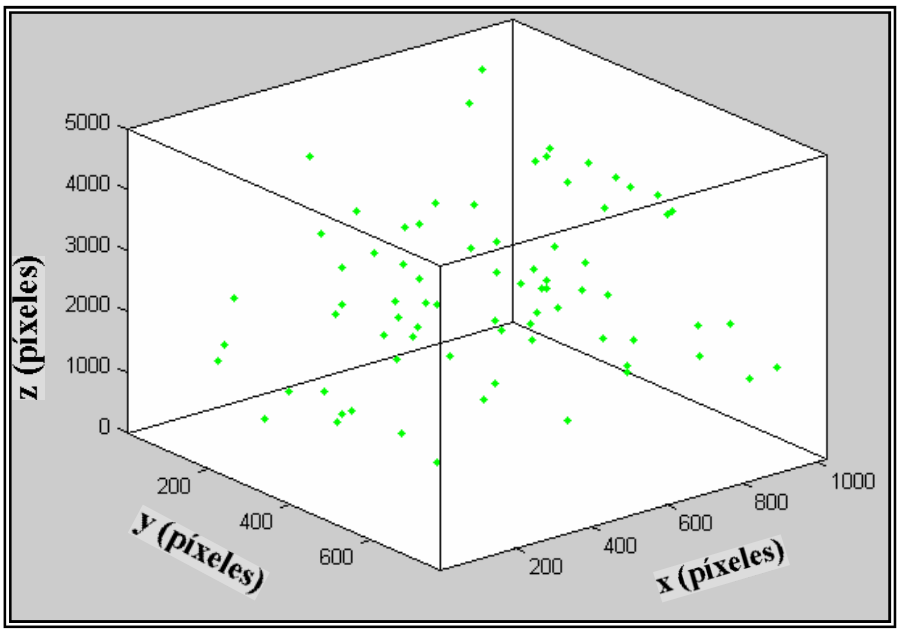


Fig. 5.7 Mapa tridimensional de las partículas encontradas en el primer holograma.

La figura 5.8 muestra mediante puntos rojos las posiciones de las partículas que se encontraron en el holograma 2. Los puntos rojos están montados sobre la imagen del holograma 2 de la figura 5.5.

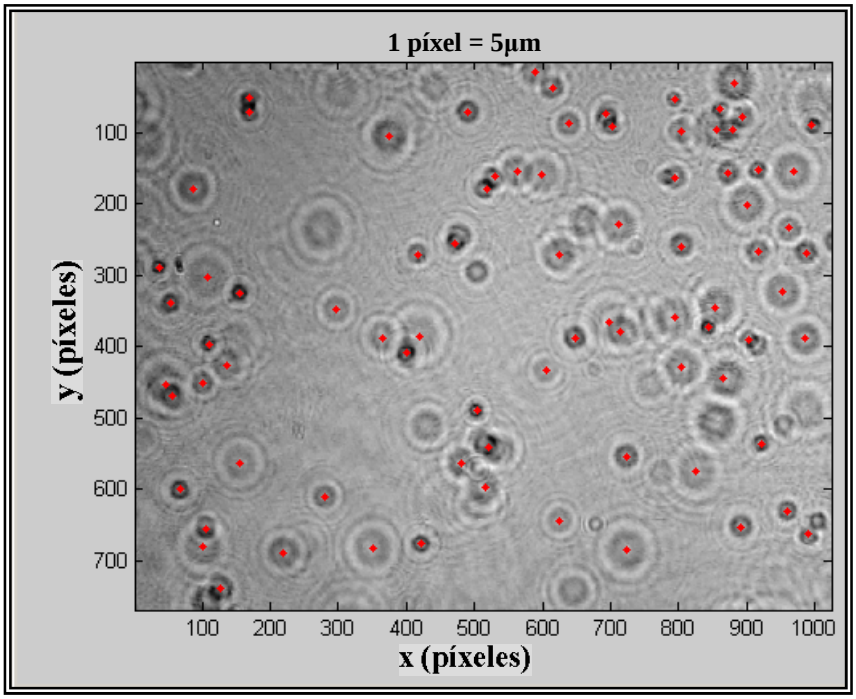


Fig. 5.8 Partículas ubicadas en el Holograma 2 del fluido.

De igual forma, la figura 5.9 muestra las partículas de la figura 5.8 en un mapa tridimensional.

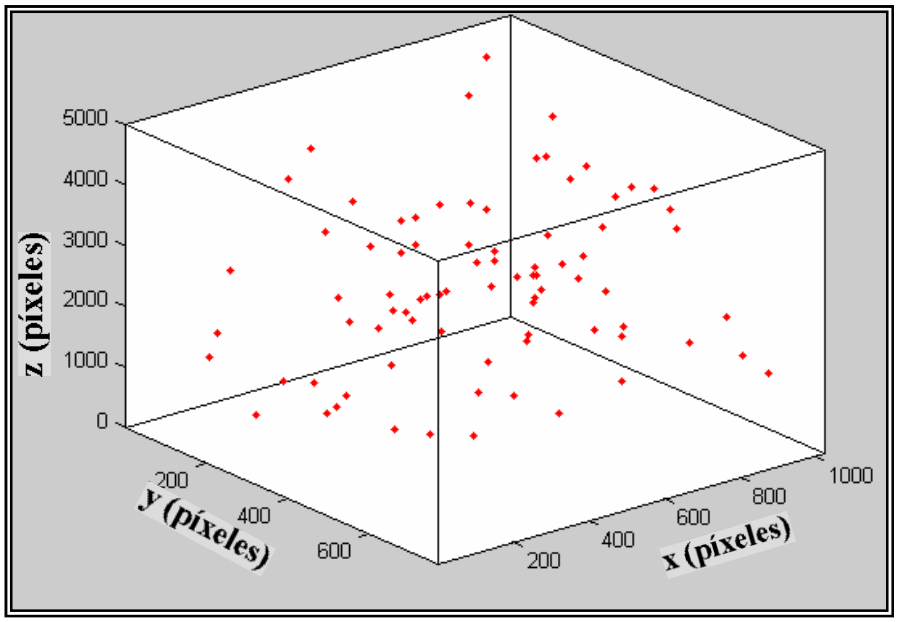


Fig. 5.9 Mapa tridimensional de las partículas encontradas en el segundo holograma.

Una vez ubicadas las partículas en ambos hologramas, con esos puntos de información se lleva a cabo el procedimiento para formar pares de partículas y realizar luego el trazo de vectores de velocidad.

En la figura 5.10 se muestran tanto las partículas encontradas en el primer holograma (color verde) como en el segundo (color rojo), todas montadas sobre la imagen del holograma 2. Sobre la misma figura, ya formados dichos pares, se trazan los vectores de velocidad en un mapa bidimensional.

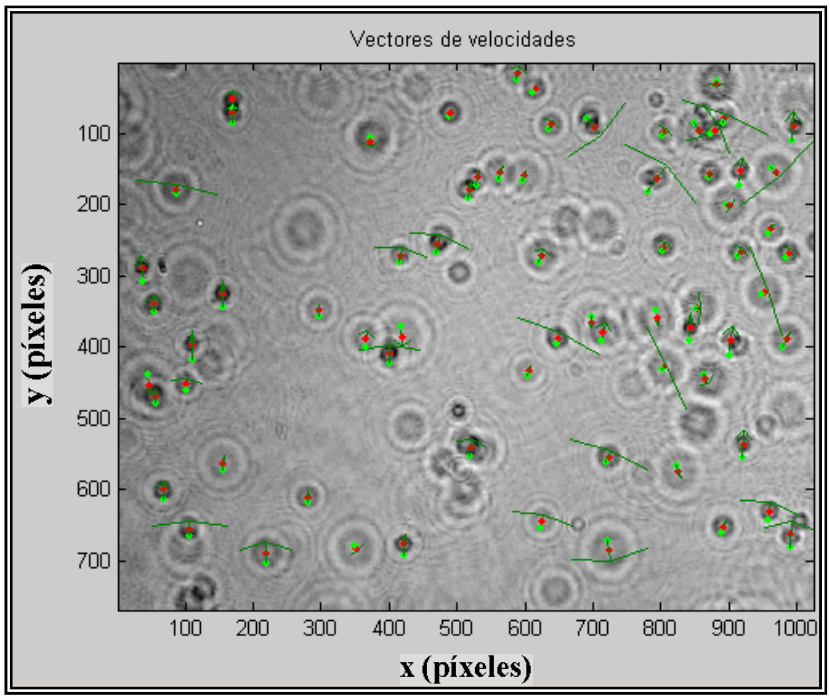


Fig. 5.10 Mapa bidimensional de vectores de velocidad.

Finalmente, a partir de los datos 3D obtenidos, en la figura 5.11 se muestran los vectores y las partículas de ambos hologramas en un mapa tridimensional.

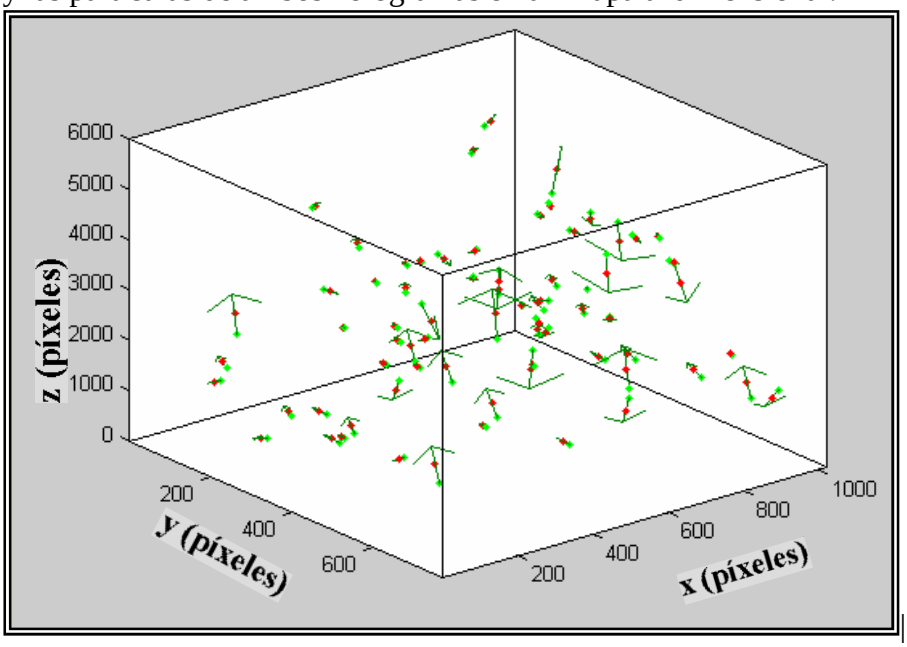


Fig. 5.11 Mapa tridimensional de vectores de velocidad.

Sobre dicho mapa, se da una idea de cómo se comporta el fluido en aquellas regiones donde existen partículas; información que es muy útil y suficiente ya que en casi todas las aplicaciones de mecánica de fluidos solo se necesita describir el

comportamiento general del fluido para ciertos volúmenes y este sistema arroja información con resoluciones del orden de micras, suficientes para describir vórtices, turbulencias o algún otro fenómeno de movimiento que se presente en la región de estudio.

5.2.2 Experimento con lente para una densidad de partículas

5.2.2.1 DHPIV

En este experimento se uso una lente de f = 90mm, el cual nos permitió tener una región de interés aproximada de 20mm x 15mm a una amplificación de m =1/4 Para este caso la región de interés se redujo 4^2 su área original de observación, donde las condiciones del arreglo óptico se muestran en la figura 5.12.

Las coordenadas reales de reconstrucción considerando la amplificación y el tamaño del píxel se representan como $(x', y', z') = (4x, 4y, 4z) * 5\mu m$ más la suma de la distancia objeto (d_o) y la distancia imagen (d_i), dando como resultado la siguiente expresión: $(x', y', z') = (4x, 4y, 4z) * 5\mu m + d_o + d_i$

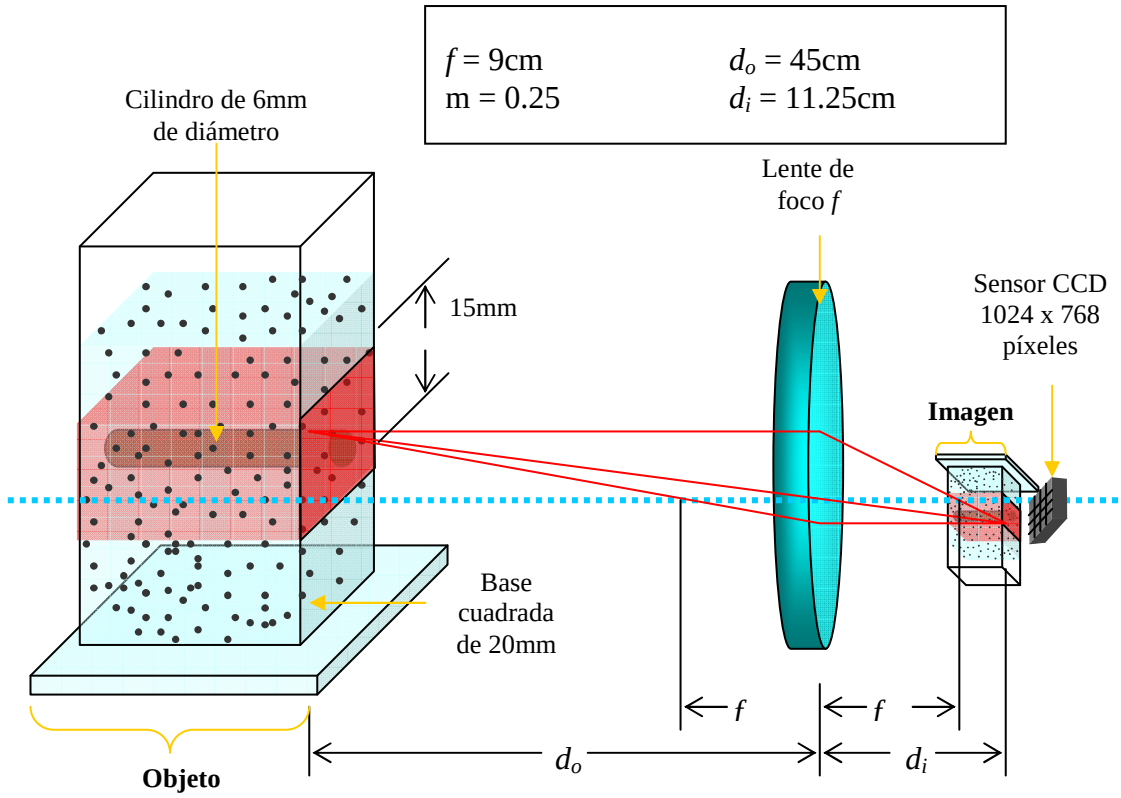


Fig. 5.12 Arreglo óptico para un holograma con amplificación.

En la figura 5.13 se muestra un par de hologramas consecutivos obtenidos a partir del arreglo de la figura anterior, se aprecia un flujo de convección que pasa a través de un cilindro de 6mm de diámetro el cual se colocó de manera centrada al lo largo del eje axial, abarcando todo el espacio del recipiente. Como resultado se observa

cómo el cilindro modifica la circulación del flujo, provocando que éste circule en torno al él.

Holograma 1 del fluido (HF1) Holograma 2 del fluido (HF2)

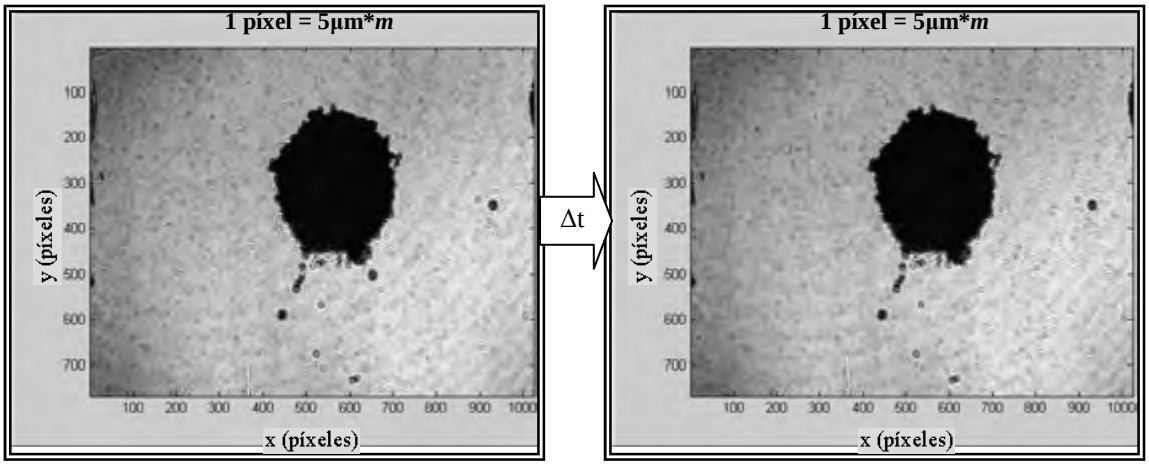


Fig. 5.13 Dos hologramas consecutivos con amplificación que muestran el flujo de convección en un recipiente con agua, con partículas de 50 micras, con una densidad media.

La primera reconstrucción que mostró resultados notables en el comportamiento del fluido fue a una distancia Z_{imagen} = 200 µm (ver figura 5.14). Esta distancia de reconstrucción se mide desde el CCD hasta las partículas que se encuentran a 200 µm en la parte de la *imagen* del arreglo óptico de la figura 5.12. Los vectores de velocidad definen el sentido del flujo. Esta distancia Z_{imagen} traducido a valores reales que es donde se encuentra el *objeto* del arreglo óptico equivale a Z_{objeto}= 200µm * 1/m + (d_o + di) = 0.200mm * 4 + (450mm + 112.5mm) = 563.3mm, medido a partir del CCD.

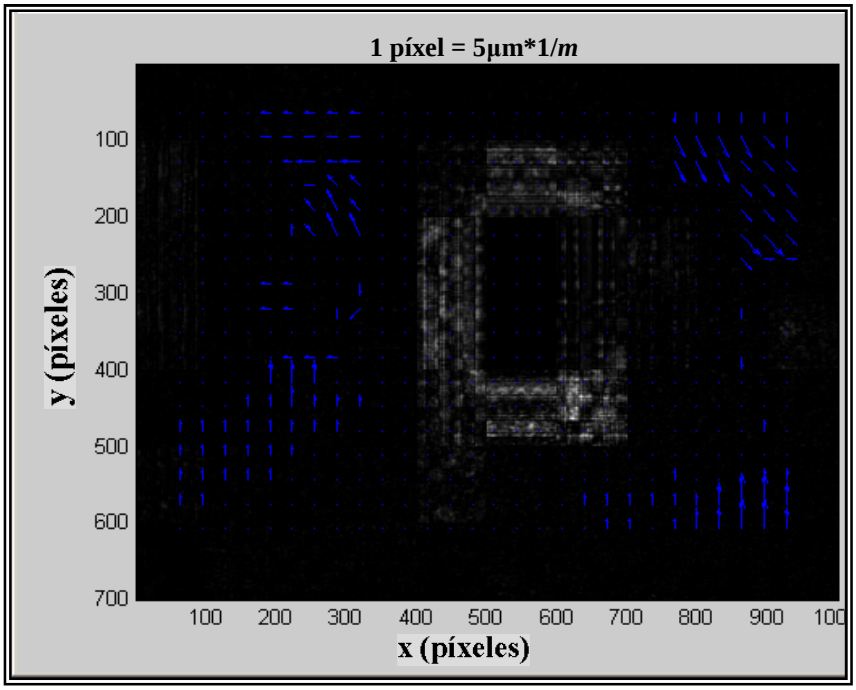


Fig. 5.14 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.13 en Z_{imagen} = 200µm o bien Z_{objeto} = 563.3mm, mostrando los vectores de velocidad.

En la figura 5.15, a Z_{imagen} = 1000 µm, los vectores tienen un comportamiento similar que en Z_{imagen} = 200 µm.

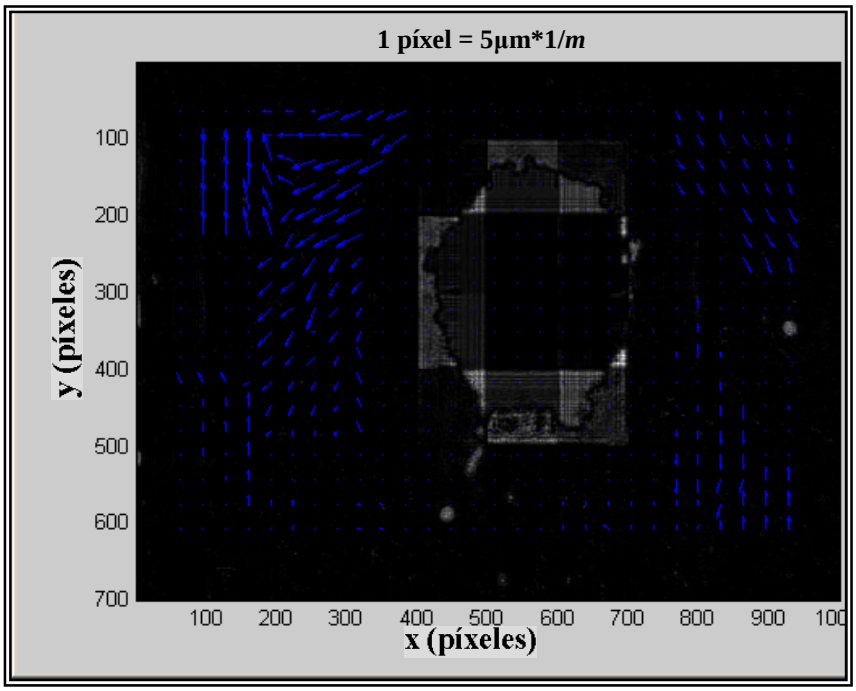


Fig. 5.15 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.13 en Z_{imagen} = 1000µm o bien Z_{objeto} = 566.5mm, mostrando los vectores de velocidad.

Por último, en la figura 5.16 Z_{imagen} = 1600 µm fue la distancia mas lejana de la que se pudo extraer información acerca del fluido y se observa que mantuvo el mismo comportamiento que de un inicio en Z_{imagen} = 200 µm. La razón está en que el cilindro que se colocó dentro del recipiente cambia el sentido del flujo provocando que el líquido circule en torno a cilindro en todo su largo.

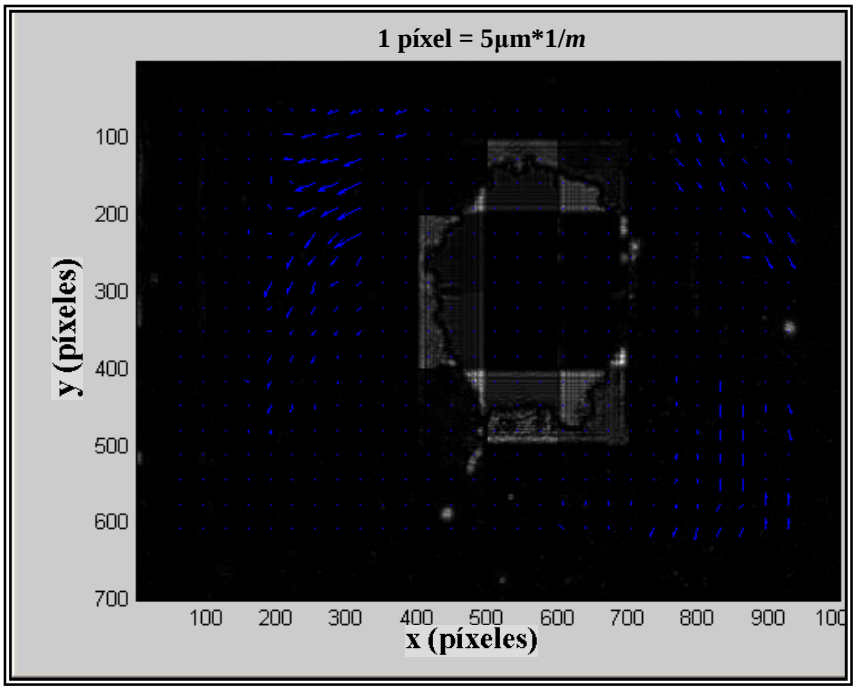


Fig. 5.16 Reconstrucción del holograma 1 de la figura 5.13 en Z_{imagen} = 1600µm o bien Z_{objeto} = 568.9mm, mostrando los vectores de velocidad.

Con el uso de la lente se pudo estudiar una profundidad aproximada de 1600 μm, equivalente en valores reales a (1.6mm * 4) = 6.4mm, desde una distancia de observación de (d_o + d_i)= 562.5mm y abarcando un área de estudio de 20mm * 15mm.

De estos datos se concluye que el uso de lentes permite estudiar áreas más grandes del fluido y desde una distancia de observación relativamente lejana, pero la profundidad de análisis obtenida usando lente (6.4mm) se ve reducida si se compara con la profundidad de análisis que se pudo tener cuando no se usó lente (15mm). La razón está en que al abarcar una región mayor mediante arreglos ópticos con la intención de poderla analizar con el mismo sistema digital, se pierde una mayor cantidad de información durante el proceso de digitalización, entonces para evitar ese inconveniente, si se requiere analizar regiones mas grandes se puede pensar en sensores de mayor área o bien una mayor resolución en los medios de de grabación.

5.3 Conclusiones

Gracias a la información de fase que provee la holografía y a los métodos de grabación y digitalización es posible obtener información tridimensional de los objetos y llevar a cabo múltiples aplicaciones computacionales que realicen tareas de interés científico o industrial. En esta tesis se implementaron técnicas holográficas para medir la velocidad en flujo de fluidos mediante partículas, las cuales sirvieron de base para que por medio de la holografía se conociera su posición exacta dentro del fluido. Posteriormente, a partir de la identificación de sus coordenadas, cada partícula sirvió como punto de información acerca del fluido. Lo que prosiguió, fue obtener pares de hologramas separados un instante de tiempo para conocer el comportamiento del líquido en ese intervalo.

Las técnicas empleadas fueron DHPIV y DHPTV. La primera técnica empleada llamada Velocimetría por Imágenes de Partículas mediante Holografía Digital (DHPIV) resultó ser rápida en procesamiento y confiable en resultados si se emplease en macro-fluidos ya que generalmente no se requiere de un análisis minucioso. También provee información de todo el volumen en estudio. Sin embargo para micro-fluidos puede existir una desventaja si se implementa DHPIV ya que basa su método en medir el promedio de la velocidad de un conjunto de partículas enfocadas usando correlación, es por esto que no permite analizar regiones muy pequeñas donde solo haya cabida para una sola partícula, por ejemplo.

A partir de que se pensó en la posibilidad de analizar de manera mas minuciosa regiones pequeñas de fluidos, se implementó la segunda técnica llamada Velocimetría por Rastreo de Partículas mediante Holografía Digital (DHPTV), la cuál consistió en identificar de manera individual cada partícula para poderla rastrear después de un intervalo de tiempo y así obtener el comportamiento del fluido en esa zona específica. Por tanto, los puntos de información acerca del fluido, son aquellos espacios que ocupan las partículas depositadas. Como todo, también se presentó una desventaja y es que el ubicar de manera individual cada partícula y luego rastrearla en un segundo holograma consume mucho tiempo de procesamiento, por lo que esta segunda técnica resulta ser muy efectiva pero lenta.

A la fecha no existe un método tan preciso que detalle el comportamiento de un fluido en todos los puntos de su región de análisis, sin embargo, día con día se llevan a cabo mejoras y se desarrollan nuevos métodos para tener datos más confiables, y aun así, en cada nueva técnica desarrollada, a la par de que se tendrán mejores resultados, también surgirán nuevas limitaciones o se descubrirán otras características y propiedades que amerite seguir investigando.

5.4 Bibliografía

[1] Gabor D (1948) A new microscopic principle. Nature 161:777-778
[2] Gabor D (1949) Microscopy by reconstructed wavefronts. Proc Roy Soc 197:454-487
[3] Gabor D (1951) Microscopy by reconstructed wavefronts: 2. Proc Phys Soc 64:449- 469
[4] Leith EN, Upatnieks J (1962) Reconstructed wavefronts and communication theory. Jour Opt Soc Amer 52:1123-1130
[5] Leith EN, Upatnieks J (1964) Wavefront reconstruction with diffused illumination and threedimensional objects. Journ Opt Soc Amer 54:1295-1301
[6] Klein MV, Fumrtak TE (1986) Optics. 2nd ed Wiley, New York
[7] Goodman JW (1996) Introduction to Fourier Optics 2nd ed. McGraw-Hill
[8] Harriharan P (1984) Optical Holography. Cambridge University Press, Cambridge
[9] Kreis T (1996) Holographic Interferometry. Akademie, Berlin
[10] Schnars U, Jüptner W (1994) Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction. Applied Optics 33(2):179-181
[11] Schnars U (1994) Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. Journ Opt Soc Am A 11(7):2011-2015, reprinted (1997) In: Hinsch K, Sirohi R (eds). SPIE Milestone Series MS 144, pp 661 - 665
[12] Yaroslavskii LP, Merzlyakov NS (1980) Methods of digital holography. Consultants Bureau, New York
[13] Demetrakopoulos TH, Mittra R (1974) Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns. Appl Opt 13(3):665-670
[14] Kreis T, Jüptner W (1997) Principles of digital holography. In: Jüptner W, Osten W (eds) Proc 3rd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Akademie, Berlin, pp 353-363
[15] CCD Primer (2002) product information. Kodak
[16] Thompson BJ (1963) Diffraction by opaque and transparent particles. J. SPIE, 2, 43-46
[17] Trolinger JD; Beltz RA; Farmer WM (1969) Holographic techniques for the study of dynamic particle fields. Appl. Opt., 8, 957-961
[18] Goodman JW; Lawrence RW (1967) Digital image formation from electronically detected holograms. Appl. Phys. Lett., 11, 77-79
[21] Adams M; Kreis T; Juptner W (1997) Particle size and position measurement with digital holography. Proc. SPIE, 3098, 234-240
[22] Nishihara K; Hatano S; Nagayama K (1997) New method of obtaining particle diameter by the fast Fourier transform pattern of the in-line hologram. Opt. Eng., 36, 2429-2439
[23] Kreis T; Adams M; Juptner W (1999) Digital in-line holography in particle measurement. Proc. SPIE, 3744, 54- 64
[24] Murata S; Yasuda N (2000) Potential of digital holography in particle measurement. Opt. & Laser Tech., 32, 567- 574
[25] R. González. *Digital Image Processing.* Prentice – may, 2nd edition, 2002.
[26] R. J. Adrian. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23:261-304, 1991.
[27] M. Raffel, C. Willert, and J. Kompehans. *PIV: A Practical Guide*. Springer, 1st edition, 2002
[28] R. J. Adrian. Twenty years of particle image velocimetry. *12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon*, 2004
[29] Tesis de Carlos Ismael Mares Castro. *Medición de velocidad de fluidos en 3D*. Secc. 1.7. Pag. 33.
[30] F. Lemoine, X. Lefevre and B. Leporq, "Pressure and Velocity Measurements in Compressible Flows Using Iodine Fluorescence Induced by a Single-Mode Laser", ASME FED, 218, pp. 81-87 (1995).
[31] J. F. Meyers and H. Komine, “Doppler Global Velocimetry A New Way to Look at Velocity”, ASME Fourth International Conference on Laser Anemometry, Cleveland, Ohio USA, (1991).
[32] J. Westerweel and F. T. M. Nieuwstadt, "Performance tests on 3-dimensional velocity measurements with a two-camera digital particle image velocimeter", ASME Laser Anemometry, 1, pp. 349-355, (1991)
[33] H. Meng and F. Hussain, "Holographic particle velocimetry: a 3D measurement technique for vortex interactions, coherent structures and turbulence", Fluid Dynamics Research, 8, pp. 33-52, (1991)
[34] *D. Moreno,* F. Mendoza-Santoyo, J. A. Guerrero and M. Funes-Gallanzi, “Particle positioning from a single CCD image for Application to Velocimetry: theory and comparison to experiment”, Applied Optics, 39 (28), pp. 5117-5124 (2000).

[35] J. A. Guerrero, F. Mendoza-Santoyo, *D. Moreno*, M. Funes-Gallanzi, and S. Fernandez, "Particle positioning from CCD images: experiments and comparison to the Generalized Lorenz-Mie Theory", Meas. Sci. Technol., 11(5), pp. 568-75 (2000).
[36] H. Meng, G. Pan, Y. Pu and S. H. Woodward, “Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording”, Measurements Science and Technology, 15, pp. 673–685 (2004).
[37] M. Funes-Gallanzi, “Tunnelling velocimetry: consilience comes to the study of fluid dynamics”, 10th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Instituto Superior Tecnico, Ladoan, 10–13 July (2000).