



Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

SISTEMA ESTEREOSCÓPICO PARA CARACTERIZAR VARIABLES FÍSICAS EN TRES DIMENSIONES.

*COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA*

Presenta:

Ing. Juan Carlos Israel Zamarripa Ramírez

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

LEÓN, GUANAJUATO,

MÉXICO

JULIO 2016

Centro de Investigaciones en Óptica A.C.

**SISTEMA ESTEREOSCÓPICO PARA
CARACTERIZAR VARIABLES FÍSICAS EN TRES
DIMENSIONES.**

*COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA*

Presenta:

Ing. Juan Carlos Israel Zamarripa Ramírez

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

LEÓN, GUANAJUATO,

MÉXICO

JULIO 2016

Dedicado a la memoria:
De mi padre
Juan Carlos Zamarripa Martínez

Agradecimientos

A mi padre Carlos Zamarripa que a pesar de que ya no se encuentra entre nosotros, sus enseñanzas aún perduran. A mi madre Carolina Ramírez por la educación y el apoyo constante que siempre me ha brindado, además de ser un gran pilar en todo lo que he logrado en mi vida. A mi tía Carmen Ramírez y mi primo Víctor Chávez que siempre me han demostrado su cariño y me han tratado como un hijo y un hermano. A la familia Ortega Martínez en los cuales tengo prácticamente un segundo hogar y que siempre estuvieron conmigo aún en las situaciones más complicadas, en especial a Omar Ortega que es como un hermano para mí, el cual a pesar de no tener la misma sangre se ha comportado como tal. A Paula Cutipa porque a pesar de estar poco tiempo juntos, ha logrado convertirse en otra motivación para superar esta etapa final del posgrado. De esta institución, a mis compañeros Jason Jamaica y Oscar Muñiz con los cuales he llegado a tener una buena relación de compañerismo y amistad. A mis compañeros de generación Francisco, Leidy y Mario, en los cuales he encontrado una bonita amistad, además de que me apoyaron en la maestría en distintos momentos.

En cuanto a lo referente a investigadores, a mi asesor de tesis el Dr. David Moreno Hernández por su gran apoyo y esfuerzo en ser mi guía de este trabajo de investigación y no sólo eso, sino un gran apoyo en situaciones personales, además de siempre haber confiado en mi capacidad para lograr este objetivo. Se agradece también al Dr. Carlos Pérez y al Dr. Moises Cywiak Gabarcewicz por su amabilidad y sus comentarios. Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de maestría otorgada para éste trabajo de investigación. Gracias a la Dra. Reyna Araceli Quiroga, Adrián Coronel, Dr. Bernardino Barrientos, Dr. Abundio Dávila y Dr. Manuel de la Torre. En general a todos los maestros y el personal que aquí labora.

Resumen

Las herramientas de visualización y diagnóstico óptico en dos dimensiones se usan frecuentemente en estudios experimentales. Sin embargo, los procesos físicos que se presentan en la vida diaria son en tres dimensiones (3D) y su dinámica varía constantemente. Por ejemplo: un flujo turbulento, los modos de vibración en una placa, los esfuerzos presentes en una probeta sometida a tensión, por mencionar algunos casos.

Las técnicas convencionales de adquisición de imágenes son una herramienta eficaz en el entendimiento de fenómenos físicos puesto que permiten registrar un instante o una secuencia de algún evento para un análisis detallado. No obstante, la gran mayoría de estas técnicas involucra la integración de la luz a lo largo del camino óptico. Este efecto provoca pérdida de información en la profundidad del fenómeno que se estudia. Por lo que, hay una necesidad en el desarrollo de técnicas ópticas que nos permitan resolver el fenómeno físico en 3D. Estas mejoras nos permitirán un mejor entendimiento del evento, y se pueden usar para efectos de validación de simulaciones computacionales.

La alternativa que proponemos en este trabajo es la implementación de un sistema para el registro de imágenes estereoscópicas. Este sistema óptico nos permitirá tener información en 3D del fenómeno físico que estudiaremos. El método óptico se basa en mapeo de deflexión por moteado. Con esta técnica óptica podemos medir deformación de probetas, amplitud de vibración y temperatura de flamas por mencionar algunos casos. En este trabajo nos concentraremos únicamente en la medición de la temperatura en tres dimensiones provocada por la combustión de una vela y un soplete.

Contenido

Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Contenido	vi
Lista de Tablas.....	ix
Nomenclatura.....	ix
Abreviaciones	x
Capítulo 1 Introducción a la medición de Temperatura	1
1.2 Técnicas Puntuales para medir temperatura	2
1.3 Técnicas ópticas de Campo Completo.....	4
1.3.1 Mapeo de deflexión por fotografía de moteado.....	4
1.3.2 Método de rejilla fuera de foco.....	5
1.3.3 La Técnica Schlieren	7
1.3.4 Interferometría	8
1.3.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder	9
1.3.4.2 Interferómetro de desplazamiento lateral (Shearing)	10
1.4 Patrones de motas y la metrología.....	11
1.4.1 Fotografía de Moteado.....	11
Capítulo 2 Desarrollo teórico para la medición de temperatura.....	14
2.1 Descripción del método.....	14
2.1.1 Tamaño de la mota.	15
2.2 Ecuación de Gladstone-Dale	17
2.3 Principio de Desplazamiento de las motas.	18
2.4 Procesamiento de imágenes de moteado	21
2.5 Profundidad de foco	22

2.6	Correlación	23
2.6.1	Transformada de Fourier Digital	23
2.6.2	Correlación cruzada para el análisis de desplazamiento de las motas.....	24
2.6.3	Sistemas Estereoscópicos	25
2.6.3.1	Reconstrucción de componentes con una sola cámara.....	26
2.6.3.2	Configuraciones Estereoscópicas	30
2.6.3.3	Sistemas Traslacionales.....	30
2.6.3.4	Relaciones Geométricas del sistema Estereo Translacional.	31
2.6.4	Máxima región común de observación para las dos cámaras.....	34
Capítulo 3 Procedimiento Experimental		37
3.1	Arreglo experimental del sistema de Mapeo de deflexión por moteado.	37
3.2	Sistema para la obtención de datos.....	39
3.3	Cálculo de los parámetros de máxima región de interés y profundidad de foco..	39
3.4	Obtención de datos experimentales	41
Capítulo 4 Resultados experimentales.....		43
4.1	Resultados Experimentales.....	43
4.1.1	Resultados experimentales para la vela	44
4.1.2	Análisis de error en la temperatura de la vela	48
4.2	Resultados experimentales para el soplete de oxiacetileno	49
Capítulo 5 Conclusiones.....		54
Bibliografía.....		55

Lista de Figuras

FIGURA 1-1 ESQUEMA DE UN PIRÓMETRO ÓPTICO.	4
FIGURA 1-2 ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE ÁNGULOS DE DEFLEXIÓN UTILIZANDO FOTOGRAFÍA CON MOTEADO. .	5
FIGURA 1-3A ARREGLO DEL MÉTODO DE REJILLA.....	6
FIGURA 1-4 FOTO SCHLIEREN DE UN SOPLETE PARA SOLDADURA DE ACETILENO (CIO LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS)...	8

FIGURA 1-5 UNA DISPOSICIÓN SCHLIEREN	8
FIGURA 1-6 INTERFEROMETRO MACH-ZENDER	9
FIGURA 1-7 ELEMENTO ÓPTICO PARA INTERFERÓMETRO DE DESPLAZAMIENTO LATERAL	10
FIGURA 1-8 INTERFERÓMETRO DE DESPLAZAMIENTO LATERAL (SHEARING)	11
FIGURA 1-9 REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE UN PATRÓN DE MOTEADO POR DOBLE EXPOSICIÓN. A) GRABACIÓN DEL PATRÓN, B) TRANSFORMADA ÓPTICA DE FOURIER PARA ENCONTRAR FRANJAS, C) TRANSFORMADA DE FOURIER DIGITAL PARA ENCONTRAR LAS FRANJAS.....	12
FIGURA 2-1 ARREGLO EXPERIMENTAL LSD.....	14
FIGURA 2-2 FORMACIÓN DE MOTEADO OBJETIVO	15
FIGURA 2-3 FORMACIÓN DE SPECKLE SUBJETIVO.....	17
FIGURA 2-4 PRINCIPIO DE LSD	19
FIGURA 2-5 A) SUPERFICIE DE VIDRIO ESMERILADO (REFERENCIA) B) PATRÓN DE SPECKLE DESPLAZADO (DEFORMADA)	21
FIGURA 2-6 ANÁLISIS DE DOS FOTOGRAMAS/ UNA EXPOSICIÓN, MÉTODO DE CORRELACIÓN CRUZADA.....	24
FIGURA 2-7 RECONSTRUCCIÓN DE TRES COMPONENTES CON UNA SOLA CÁMARA	26
FIGURA 2-8 SISTEMA ESTEREO TRASLACIONAL.....	30
FIGURA 2-9 CAMPO DE VISIÓN COMÚN (T'), PARA LAS DOS CÁMARAS DE UN SISTEMA TRASLACIONAL. DÓNDE $2D$ ES EL TAMAÑO DE LOS SENSORES Y S ES LA SEPARACIÓN ENTRE LOS SENSORES DE LAS CÁMARAS.....	34
FIGURA 2-10 DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL CCD.....	35
FIGURA 3-1 ARREGLO LSD.	37
FIGURA 3-2 SOPLATE BENZOMATIC CON SUS RESPECTIVOS REGULADORES PARA COMBUSTIBLE Y OXIGENO	38
FIGURA 3-3 A) VISTA DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL OBJETO DE FASE (SOPLATE) B) FUENTE DE LUZ Y CÁMARA DEL ARREGLO ÓPTICO DE MAPEO POR DEFLEXIÓN.	39
FIGURA 3-4 A) VISTA ESTEREO LADO IZQUIERDO B) VISTA ESTEREO LADO DERECHO	40
FIGURA 3-5 DIAGRAMA DE FLUJO QUE EXPLICA EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE MOTEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA FLAMA.....	42
FIGURA 4-1 A) CORRELACIÓN CRUZADA IZQUIERDA B) CORRELACIÓN CRUZADA DERECHA.....	44
FIGURA 4-2 A) VECTORES EN TRES DIMENSIONES PLANO XY B) VECTORES DE DESPLAZAMIENTO.	45
FIGURA 4-3 TEMPERATURA DE LA VELA A) PLANO $z=0.77\text{MM}$ B) PLANO $z=1.54\text{MM}$ C) PLANO $z=2.21\text{MM}$	47
FIGURA 4-4 CORRELACIÓN CRUZADA DE LAS VISTAS ESTEREOSCÓPICAS A) IZQUIERDA B) DERECHA.	50
FIGURA 4-5 SOPLATE A) VECTORES EN TRES DIMENSIONES PLANO XY B) VECTORES DE DESPLAZAMIENTO.	51
FIGURA 4-6 TEMPERATURA DE SOPLATE A) PLANO $z=0.77\text{MM}$ B) PLANO $z=1.54\text{MM}$ C) PLANO $z=2.21\text{MM}$, EL RECUADRO NARANJA INDICA LA POSICIÓN DE LA TOBERA DE SALIDA.	52

Lista de Tablas

TABLA 1 ALGUNOS TERMOPARES COMERCIALES USADOS EN FLAMAS	3
TABLA 2 CONSTANTE DE GLADSTONE-DALE PARA EL AIRE A 288 KELVIN	18
TABLA 3 VALORES TEÓRICOS DE PROFUNDIDAD DE FOCO PARA DISTINTOS NÚMEROS F.	23
TABLA 4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS ESTEREOSCÓPICOS	25
TABLA 5 VALORES DE σT PARA DIFERENTES DISTANCIAS	49

Nomenclatura

K	Kelvin
W	Watt
m	Metro
°C	Grado Centigrado
mm	Milímetro
I_f	Imagen deformada
I_{ref}	Imagen de referencia
E	ángulo del rayo
$\varepsilon_x(x, y)$	ángulo del rayo componente en x
$\varepsilon_y(x, y)$	ángulo del rayo componente en y
$n(x, y, z)$	Índice de refracción de un objeto transparente
$\Delta(x, y)$	Desplazamiento de la mota en el plano
σ_o	Tamaño de la mota objetivo
σ_s	tamaño de la mota subjetivo
M	magnificación de la mota
$F, f_{\#}$	Número f
λ	Longitud de onda del láser
K	Constante de Gladstone-Dale
ρ	Densidad
\vec{r}	Vector de posición de un punto en el haz de luz
S	Dirección de propagación
∇n	Gradiente del índice de refracción
$\frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial respecto a x
$\frac{\partial}{\partial y}$	Derivada parcial respecto a y
$\frac{\partial}{\partial z}$	Derivada parcial respecto a z

\int_{z1}^{z2}	Integral de trayectoria entre dos puntos
$\langle \rangle$	Promedio
δz	Profundidad de foco
M	Magnificación del sistema
Δx	Desplazamiento en la dirección x
Δy	Desplazamiento en la dirección y
Δz	Desplazamiento en la dirección z
(k, l, m)	subíndices sistema estereoscópico k= Número de componentes l= Número de cámaras m=Sistema continuo o instantáneo
X_i	Posición Inicial Plano imagen
X_f	Posición final Plano imagen
x_i	Posición Inicial Plano objeto
x_f	Posición final Plano objeto
ΔX	Desplazamiento resultante Plano Imagen
D_i	distancia de plano imagen
D_o	distancia plano objeto
ξ	Error de perspectiva
S	Distancia entre lentes
D	Distancia entre Sensores
Mm	Micrómetros

Abreviaciones

LSD	Desplazamiento Láser de motas
TF	Transformada de Fourier
ITF	Inversa de la Transformada de Fourier
CCD	Dispositivo de carga acoplada
BOS	Schlieren de Fondo Orientado

Capítulo 1 Introducción a la medición de Temperatura

Los objetos transparentes, u objetos de fase aparecen en varias aplicaciones de ingeniería. Algunos de estos objetos pueden ser flamas, fluidos y vidrios. También puede ser un tejido humano, u otro objeto semitransparente que permite que la luz pase a través de éste. El estudio de tales objetos ocurre en diferentes escenarios. En este trabajo daremos mucho énfasis a los gases calientes tal como aire caliente u gases despedidos por la combustión en una flama. En ciertos objetos transparentes como un fluido, es de interés medir campos de densidad y temperatura. Estas variables físicas se encuentran en el área de la combustión y el conocimiento de estas nos ayuda a entender más el comportamiento de los flujos que intervienen en el proceso de la combustión además nos brinda a hacer mejoras para que la combustión sea más eficiente, disminuya el consumo excesivo de combustible y lo más importante, que se disminuya la emisión de gases de efecto invernadero. En el contexto del estudio de la dinámica de fluidos y combustión la técnicas ópticas usadas para medición de temperatura han probado ser factibles para su estudio por ser técnicas de campo completo y no perturban al flujo de prueba. Algunas de las técnicas utilizadas para éste fin, podemos mencionar las siguientes: mapeo de deflexión por fotografía de moteado, método de rejilla fuera de foco, interferometría de la cual se derivan el interferómetro de Mach-Zehnder y el interferómetro de desplazamiento lateral, y las técnicas de schlieren. De las cuales se pueden mencionar: Arreglo Toepler modificado, schlieren de fondo orientado (BOS), schelieren de color, por mencionar algunas. [1, 2].

Las técnicas mencionadas anteriormente miden el cambio de fase de un frente de onda que atraviesa objetos de prueba o de fase. Los objetos de fase usualmente tienen una distribución de índice de refracción no uniforme. Algunos fenómenos físicos afectan al índice de refracción, y el índice de refracción está relacionado con la temperatura, densidad y presión. Los métodos ópticos sirven para medir cambios de índice de refracción y por consiguiente relacionarlo con la densidad o temperatura. La temperatura es uno de los parámetros que frecuentemente se miden en una gran variedad de aplicaciones. Impacta de varias formas al mundo de la física, química y la biología. Por tal motivo han surgido varias técnicas ópticas y no ópticas para poder medir dicha variable.

Existen varias formas para medir temperatura, utilizando técnicas de contacto y de no contacto, además algunas son puntuales y otras de campo completo. A continuación se explicarán las técnicas que miden la temperatura de forma puntual y después las técnicas de campo completo aplicadas a la medición de temperatura en gases calientes o en flamas.

1.2 Técnicas Puntuales para medir temperatura

La temperatura de un alambre inmerso en una flama de gases puede medirse en tres formas [3]:

- a) Por su resistencia eléctrica
 - b) Por termo-electricidad en una unión bi-metálica o termopar
 - c) Por su brillantez o emisividad, con pirómetro óptico.
-
- a) La termometría por resistencia es comúnmente utilizada para la determinación del máximo valor de temperatura en flamas producidas en sopletes de oxígeno-acetileno a baja presión. Esta técnica funciona con la variación de la resistencia al aumentar la temperatura. Para hacer este tipo de mediciones es necesario contar con alambres muy finos de algún metal noble usado como resistencia. Alambres de $10\mu\text{m}$ de diámetro han sido utilizados para instrumentos de medición como el (Hot Wire Anemometry) en sus siglas en Inglés o sonda de hilo caliente. Para la calibración de estos aparatos se puede hacer a través del diámetro del alambre y su longitud o la utilización de valores estándar en un baño de temperatura. Estos dispositivos tienen problemas en la zona de reacción causados por la catálisis de los elementos que intervienen en la combustión, estos problemas se pueden eliminar al cubrir el alambre con una capa de sílica o de alguna tierra rara. El aparato es simple ya que consta de una resistencia pero es menos conveniente de utilizar que un termopar [4].
 - b) El termopar es un instrumento barato, de fácil implementación y muy eficaz para censar la temperatura en flujos de gases calientes, aunque este sea una técnica puntual [5]. Este consta de una unión bi-metálica haciendo uso de la propiedad termoeléctrica de este tipo de unión llamada efecto Seebeck. Se genera un potencial eléctrico cuando existe una diferencia de temperaturas entre las uniones, este potencial se puede sensar con un

medidor de voltaje y se puede ver la correspondencia entre temperatura y voltaje [3, 6]. Existen varios tipos de termopares, teniendo diferentes aplicaciones según lo que se requiera medir. Por ejemplo, en la tabla siguiente se mencionan algunos de ellos [3, 7],

Tipo de Termopar	Temperatura vs. Voltaje EMF (V/K)x10e6	Límite de la temperatura de operación (K)	Utilizado en:
Crhomel-Alumel	12	1275	Uso general
Cu-Constantan	14	400	Baja temperatura
Fe-Constantan	17	900	Uso general
Ir-Ir/0.4Rh	1.2	1800	Flama de mezcla pobre
Pt/Pt/0.1Rh	3.2	1550	Flama de mezcla pobre
Pt/0.13Rh-Pt	3.6	1600	Flama de mezcla pobre
Pt/0.3Rh-Pt/0.06Rh	2.4	1800	Flama de mezcla pobre
W-Rh (Tungsten-Rhenium)	4.1	2200	Flama de mezcla rica (Gases de salida de los cohetes)
W-W/0.26Rh	4.8	2800	Flama de mezcla rica
W/0.05Rh-W/0.26Rh	3	2800	Flama de mezcla rica
W-Mo/0.5Rh		2500	Flama de mezcla rica

Tabla 1 Algunos termopares comerciales usados en flamas

Los métodos de alambre caliente, generalmente, no son convenientes para mediciones en la zona de reacción de una flama porque aparecen efectos de catálisis debido a que el alambre es grande o por lo menos comparable en tamaño con el espesor de la zona de reacción y provoca disturbios en la flama misma. En este trabajo se utilizó un termopar para verificar la temperatura del flujo caliente que produce una flama.

c) El método de pirómetro óptico es un método que no invade, que funciona con la radiación de los cuerpos. La temperatura de la emisión de una flama es medida con la comparación de la luz de una temperatura conocida. En pirómetros comerciales, el filamento de una lámpara incandescente es superpuesto en forma óptica con la imagen de la flama, la temperatura del filamento se ajusta cambiando el voltaje hasta que las temperaturas del filamento y de la flama se igualan. La calibración de este aparato se hace con la ayuda de un cuerpo negro. Las emisiones de las flamas pueden ser muy débiles en el visible, por lo que se requiere sembrar en las flamas cierto tipo de materiales en polvo tales como (sales de sodio, litio, hierro, yodo, etc.) dependiendo del valor de la temperatura de la flama en que se está trabajando. Los materiales utilizados para la coloración de la flama

tienen el inconveniente de que solo soportan alrededor de 1700 °K y la resolución espacial es de aproximadamente de 1mm. En la figura 1.1 se puede observar el esquema de este aparato [3, 5].



Figura 1-1 Esquema de un pirómetro óptico.

1.3 Técnicas ópticas de Campo Completo

Como se sabe, cualquier cuerpo caliente en contacto con aire, transferirá calor a éste, al haber diferencia de temperaturas también habrá diferencia de densidades y por lo tanto habrá diferencia de índices de refracción. Estas diferencias de índices de refracción desviarán la dirección de un rayo de luz que pasa a través del aire, actuando como una lente. Estas deflexiones no las podemos ver a simple vista por lo cual necesitamos una variedad de instrumentos ópticos para visualizarlas y después cuantificarlas [8]. Algunas de las técnicas utilizadas para este fin, son las siguientes: mapeo de deflexión por fotografía de moteado, método de rejilla fuera de foco, interferometría de la cual se derivan el interferómetro de Mach- Zehnder y el interferómetro de desplazamiento lateral, la prueba de la navaja o schlieren, ésta última con sus respectivas variantes, entre las más conocidas: Arreglo Toepler modificado, schlieren de fondo orientado (BOS), schlierenn de color, por mencionar algunas [2, 9]. A continuación se dará una breve reseña del funcionamiento y descripción de algunas de ellas.

1.3.1 Mapeo de deflexión por fotografía de moteado

Esta técnica es un método que sirve para medir desplazamientos y deformaciones en el plano [9]. Los primeros que aplicaron esta técnica fueron Köpf [11] y Debrus et al.[12], ellos mostraron que esta técnica puede ser modificada para que la deflexión de la luz en un

campo de índice de refracción pueda ser determinada cuantitativamente. En la Figura 1-2, se pueden observar los detalles de este sistema.



Figura 1-2 Arreglo experimental para la medición de ángulos de deflexión utilizando fotografía con moteado.

En este sistema óptico, la fuente de luz es por lo regular un láser de He-Ne, que se expande con un filtro espacial y este a su vez se colima con la lente 1, el haz de luz colimada pasa a través del vidrio esmerilado el cual tiene gránulos distribuidos en forma aleatoria, la lente 2 formará una imagen del vidrio esmerilado en la pantalla de igual forma que el mismo vidrio, en forma granular o en forma de patrón de moteado. A la imagen capturada sin objeto de prueba se le llama imagen de referencia. Al colocar un objeto de prueba con índice de refracción entre el vidrio y la lente 2 se visualizará en la pantalla desplazamientos de los gránulos causados por los cambios de índice de refracción del objeto de prueba que para este caso es un flujo de fluido transparente. La imagen de referencia y objeto se restan obteniéndose la siguiente expresión: $\Delta I = I_f - I_{ref}$, la resta forma una imagen del flujo causada por las múltiples interferencias de las motas de las imágenes. El ángulo causado por los cambios de índice de refracción del objeto se puede medir de la forma $\varepsilon = \Delta I / l$ donde l es la distancia entre el vidrio esmerilado y el campo donde se encuentra colocado el objeto de prueba en el plano (x,y) . En la misma doble exposición son capturados al mismo tiempo las dos componentes de los ángulos $\varepsilon_x(x, y)$ y $\varepsilon_y(x, y)$ para mayores detalles ver [13].

1.3.2 Método de rejilla fuera de foco

El método de rejilla fuera de foco se deriva del método cualitativo de V. Ronchi utilizado para el estudio de aberraciones de componentes ópticas [14]. Este método mide los

ángulos de deflexión de los rayos a través de los desplazamientos que sufre la rejilla al haber flujo de prueba. Este método se caracteriza por la simplicidad en la implementación y el procesamiento de los resultados se hizo cómodo para el estudio cuantitativo de frentes de onda. Este método fue desarrollado después por otros científicos tales como Ostroumov [1,15]. Las rejillas pueden ser de diferente forma como líneas paralelas, círculos concéntricos, o con aberturas arbitrarias o pantallas.

Para asegurar que la luz no cause efectos borrosos en los bordes de las sombras de la rejilla se requiere una fuente de luz puntual o lo más cercana a puntual. En mediciones cuantitativas se requiere identificar correctamente los puntos de la rejilla en el plano cuando no hay presencia de flujo y en presencia del mismo. En la figura 1.3a. [1] se puede observar un arreglo experimental de este sistema.

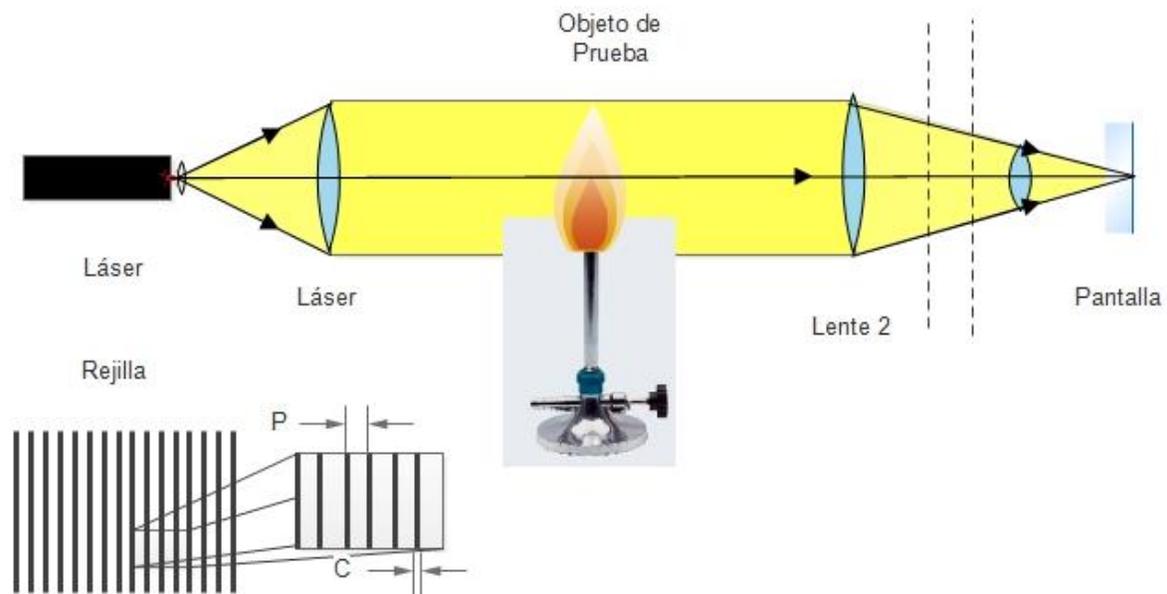
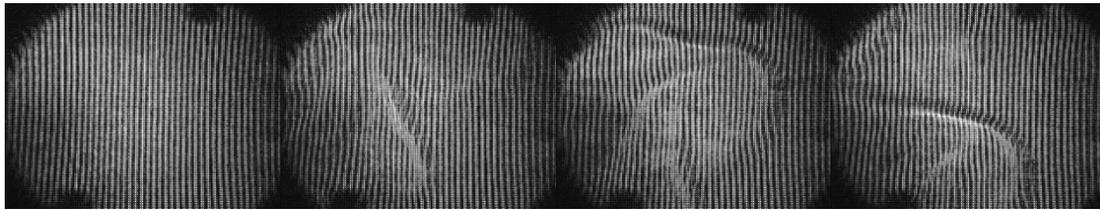


Figura 1-3a Arreglo del método de rejilla.

Al desplazar la rejilla fuera de foco las bandas oscuras se tornarán en forma de sombras oscuras, y al colocar alguna in-homogeneidad en el sistema, entre las lentes las

sombras se desplazarán, deformando su forma. En la figura 1.3b. se puede observar las imágenes de un campo de aire caliente utilizando deflectometría con una rejilla.



a)

b)

c)

d)

Figura 1.3b a) Imagen de referencia, b), c) y d) corresponden a imágenes de campo de aire caliente a diferentes tiempos de captura [16].

Otro método parecido, conocido como efecto moire, ocurre cuando dos rejillas se superponen una sobre la otra, y rotadas un cierto ángulo. Se forman franjas de intensidad formadas por la interferencia de estas rejillas, éste método puede funcionar con cualquier tipo de luz, siendo de muy fácil implementar [14].

1.3.3 La Técnica Schlieren

La palabra Schlieren proviene de la palabra en alemán “schliere” que significa no homogéneo, que para este caso viene siendo partículas de polvo en algún líquido transparente o cambios de densidad en algún flujo de fluido transparente. Los primeros trabajos que empezaron a hablar sobre este tema fueron los realizados por Robert Hooke [17, 18], L. Foucault [19] y A. Toepler[20], entre otros. Esta técnica fue desarrollada para el control de calidad de las lentes utilizadas en microscopios y telescopios de la época. El concepto de la técnica de schlieren fue utilizado por primera vez por Huygens y publicado en La Dioptrique[21]. Robert Hooke, quien desarrolló un método para mostrar los lados de una flama y la visualización de los gases de la combustión de una flama de una vela

Este sistema óptico ha tenido un uso bastante aceptado en análisis dinámico de fluidos. Estos sistemas son de gran aplicación en lugares donde es deseable examinar variaciones en la presión provocadas por cambios en el índice de refracción.

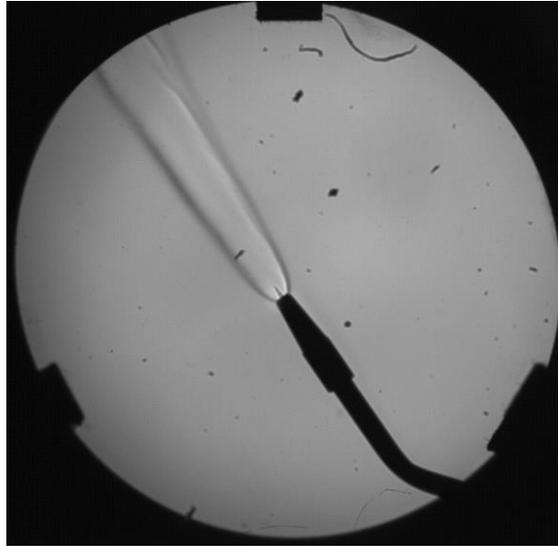


Figura 1-4 Foto schlieren de un soplete para soldadura de acetileno (CIO laboratorio de Mecánica de Fluidos).

August Toepler reinventó algo similar a la técnica de schlieren en 1859 y la nombró en base a lo observado, en la figura 1-5. Se muestra el arreglo de Toepler. [2, 13, 14, 19, 22]

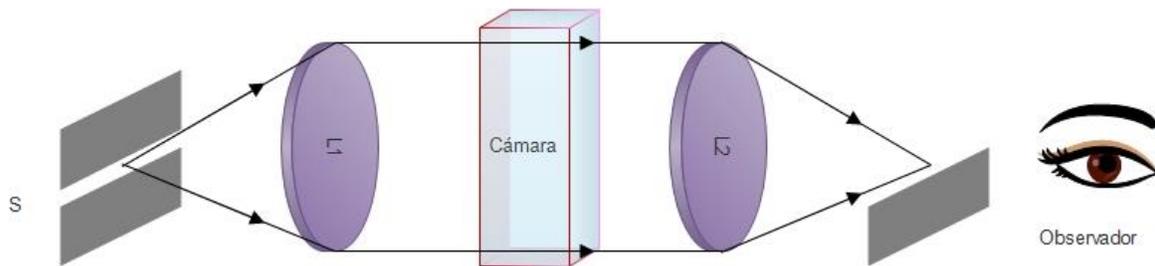


Figura 1-5 Una Disposición Schlieren

Quien reconoció a la técnica schlieren como una herramienta invaluable, fue Ernst Mach[23]. Él contribuyó mucho en el desarrollo de la dinámica de gases; Mach combinó la fotografía con schlieren, estos desarrollos permitieron la medida precisa de la velocidad de las ondas. En Alemania a la técnica de schlieren la utilizaba L. Prandtl [24] como herramienta clave para liderar la dinámica de fluidos. Carl Cranz y sus estudiantes como H. Schardin [25]. En la tesis de Schardin, se provee por primera vez un desarrollo teórico sólido de la teoría de schlieren por imágenes.

1.3.4 Interferometría

La interferometría es una técnica óptica que utiliza la interferencia de la luz de dos frentes de onda, esta ocurre al pasar un haz de luz a través de un objeto transparente y al combinarse en una pantalla con otro haz de referencia. La luz utilizada en este tipo de sistema

debe de tener alta coherencia espacial y temporal. Los interferómetros más comunes para este propósito son el interferómetro de Mach-Zehnder, y el interferómetro de desplazamiento lateral.

1.3.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder es comúnmente utilizado en túneles de viento para visualización y cuantificación de flujos de fluido, este método es sensible a los cambios de fase causados por el objeto de prueba. Este método fue diseñado por Jamin en 1856 [13] y utilizado en 1878 por Mach y Weltrubski [23] para el estudio del fenómeno de la dinámica de gases. Ernest Mach reconoció que para el mejor estudio de este fenómeno se debería de usar un método con un haz de referencia separado del otro. En la Figura 1.6, se puede observar el arreglo experimental de este método.

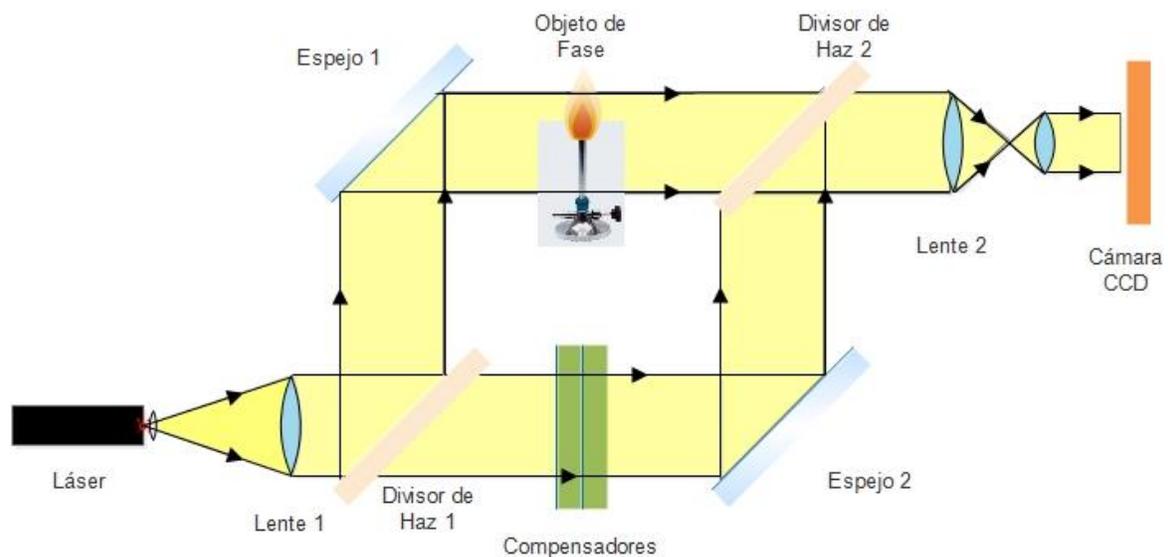


Figura 1-6 Interferómetro Mach-Zehnder

Una de las razones por la cual se utiliza el interferómetro de Mach-Zehnder es que los brazos forman un rectángulo, y se pueden hacer tan grandes y o tan separados como el objeto de prueba lo requiera. Este instrumento es sensible al cambio de índice de refracción debido a la presencia de un flujo de fluido que cambia alguna de sus propiedades físicas como temperatura, presión o composición química.

1.3.4.2 Interferómetro de desplazamiento lateral (Shearing)

Este método utiliza el principio de interferometría de dos haces y se requiere un elemento óptico que provea de dos haces al mismo tiempo y que los dos haces atraviesen al objeto de prueba como se puede ver en la figura 1.7.

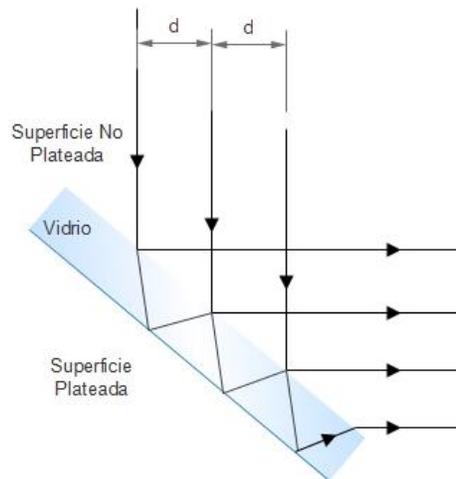


Figura 1-7 Elemento óptico para Interferómetro de desplazamiento lateral

Estos interferómetros tienen la característica de que los dos haces pasan por el objeto de prueba, teniendo un rango de la forma $d/D < 1$, donde D es el diámetro del campo de prueba, esto quiere decir que no necesitan imagen de referencia para su funcionamiento. Los instrumentos que proveen un corte (shear) constante en una sola dirección normal al eje óptico son llamados interferómetros de desplazamiento lateral (shearing lateral). Es posible generar interferómetros de desplazamiento en dirección radial con respecto al eje óptico y son llamados interferómetros de desplazamiento radial, estos instrumentos son sensibles al cambio de gradientes del índice de refracción.

El interferómetro de desplazamiento más utilizado es el que utiliza una placa de vidrio plano el cual se muestra en la Figura 1.8. Este sistema óptico consta de una fuente de luz, una lente colimadora, una placa de vidrio plana plateada en una de sus caras, y un sistema formador de imágenes [2, 22 y 26].

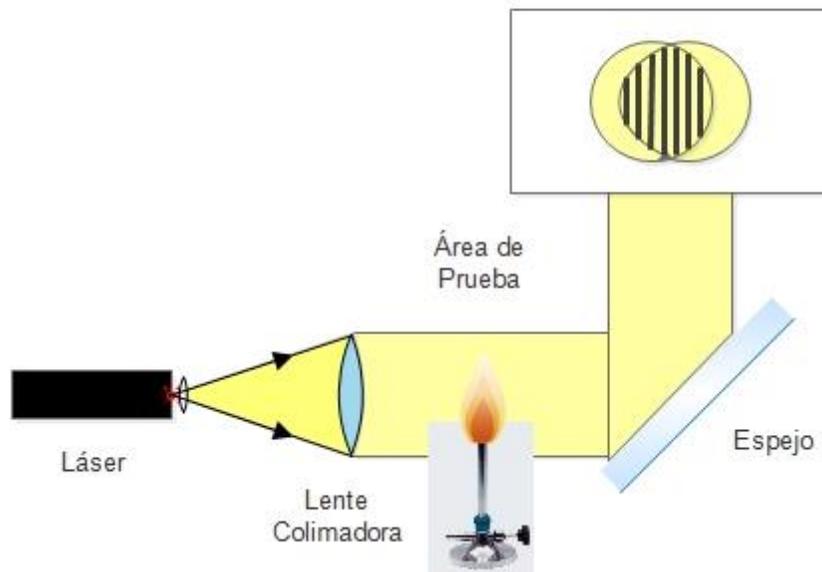


Figura 1-8 Interferómetro de desplazamiento lateral (shearing)

Lo escrito previamente en este capítulo, corresponde de forma breve a las técnicas de medición utilizadas para la medición de temperatura principalmente en flamas, o en flujos de fluido. A continuación se describirá con mayor profundidad la técnica de mapeo de deflexión por fotografía con moteado la cual es la técnica utilizada para el trabajo elaborado en esta tesis.

1.4 Patrones de motas y la metrología

Se puede argumentar que el análisis de moteado puede realizarse por medio de sistemas que generen patrones de moteado o por aquellos que carecen de la presencia de las mismas, y que estos deben de ser generados por medios de programación. Estos registros contienen información de características del objeto de estudio, los cuales por medio de procesamiento de imágenes proporcionarán información del objeto sometido a análisis, por ejemplo: Desplazamientos, Vibraciones, Rugosidad, entre otros.

1.4.1 Fotografía de Moteado

El término fotografía de moteado se refiere a la variedad de técnicas que utilizan la superposición de patrones de intensidad de éste, los cuales consisten en dos capturas, la

primera de ella contiene un estado inicial del objeto de estudio, generalmente llamada “referencia”, y una segunda del objeto sometido a las condiciones bajo las cuáles se quiere realizar el estudio llamada “deformado”. Particularmente parte importante en el avance de la fotografía de moteado podemos mencionar a Burch y Tokarski [27], Archibold, Burch y Ennos [9] y Groh [28]. La Figura 1-9 muestra los pasos del registro y análisis de un patrón de moteado por doble exposición.

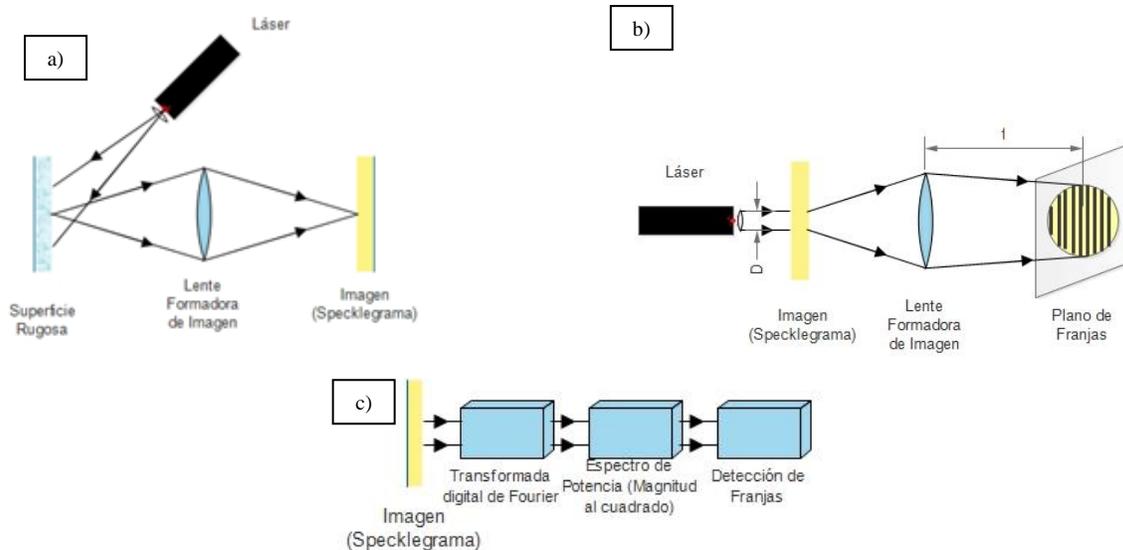


Figura 1-9 Registro y procesamiento de un patrón de moteado por doble exposición. a) Grabación del patrón, b) Transformada Óptica de Fourier para encontrar franjas, c) Transformada de Fourier Digital para encontrar las franjas.

De la figura anterior, la parte a) muestra la configuración geométrica del registro. Una superficie rugosa difusa es iluminada por medio de luz coherente. Después una lente se encarga de formar la imagen de la superficie, en algunos casos ésta se encuentra enfocada, aunque también puede estar desenfocada, de aquí se obtendrá el patrón de moteado capturado como una imagen. Entonces la superficie rugosa es trasladada o deformada, con lo cual se obtiene un según patrón de moteado, el cual se registra de manera típica por el mismo detector o cámara. Este registro es nombrado “patrón de moteado”. Para la parte b) la figura muestra un método óptico para la formación de franjas, en el cual el patrón de moteado por doble exposición es procesado ópticamente para obtener su transformada de Fourier, éste es iluminado con luz coherente, para así poder examinar la distribución de intensidades en el plano focal formado por la lente positiva, donde un patrón de franjas puede ser observado. El periodo del patrón de

frangas es determinado por la distancia del objeto desplazado entre los fotogramas de moteado, el movimiento aparente de éstas será en la dirección del movimiento del objeto examinado. La parte c) es un diagrama de bloques de la transformada de Fourier digital de un patrón de moteado digitalizado, y el módulo al cuadrado del resultado es tomado para encontrar el plano de intensidades de la Transformada de Fourier. Finalmente este patrón es analizado para encontrar el periodo y dirección de las frangas.

Capítulo 2 Desarrollo teórico para la medición de temperatura

A continuación, en este capítulo se presentará la información relacionada a la medición de temperatura por medio de la técnica involucrada en este trabajo de tesis, la cual consiste en el método de mapeo de deflexión por moteado (sus siglas en inglés LSD), el cual fue seleccionado debido a su amplio campo de visión instantáneo, además de su carácter no destructivo y fácil montaje. En contraste con la técnica schlieren de fondo orientado (BOS) en la cual el objeto de fase es colocado delante del patrón de motas, en esta última una de las desventajas es que este patrón debe ser generado por programación (proyector) o una fuente externa, mientras que en LSD este se genera por medio de la iluminación de luz coherente sobre el vidrio esmerilado. En la figura 2-1 se puede observar el arreglo en su forma más simple.

2.1 Descripción del método.

El siguiente método de medición de densidad es similar al empleado por [10]. Éste se muestra en la Figura 2-1

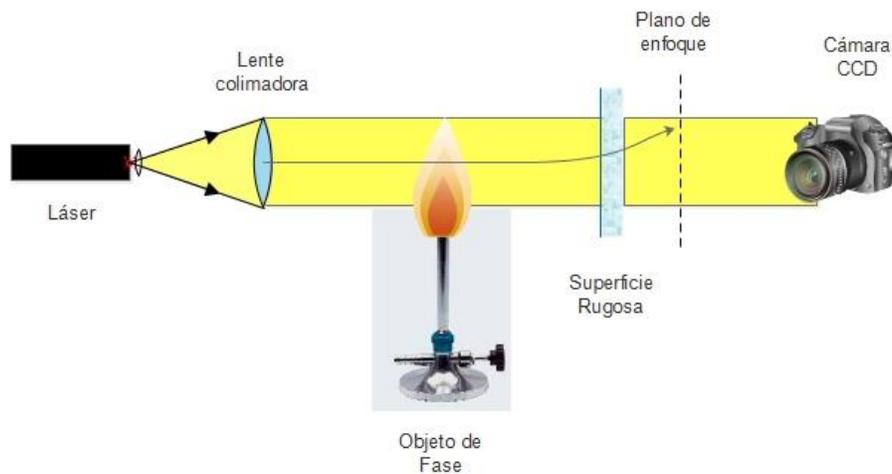


Figura 2-1 Arreglo experimental LSD

Como se muestra en la figura 2-1, la fuente láser se filtra con una apertura micrométrica, después se expande por medio de un objetivo de microscopio, el haz es colimado de acuerdo al tamaño del flujo bajo interés, esto genera interferencia en el plano del vidrio esmerilado (superficie rugosa), lo cual genera un patrón aleatorio de moteado (speckle). El tamaño de éste estará en función del tamaño de la lente de la cámara y también de la longitud de onda del láser, siendo el orden de 20 a 30 μm . Cuando un objeto con índice de refracción variable $n(x, y, z)$, es colocado entre el vidrio esmerilado y la cámara (objeto de fase), el patrón de moteado es desplazado en el plano imagen en una cantidad $\Delta(x, y)$, esto se debe de forma particular a la deflexión de los haces de luz que pasan a través del objeto de estudio. Esta deflexión en el haz generada por el medio es proporcional al cambio del índice de refracción. El plano de enfoque que se muestra en la figura 2-1 se encuentra en función de la lente de la cámara, esto debido a la profundidad de foco del sistema.

2.1.1 Tamaño de la mota.

Para encontrar un valor representativo del tamaño de la mota, considérese la Figura 2-2, en la cual una superficie rugosa es iluminada por un haz láser con diámetro D.

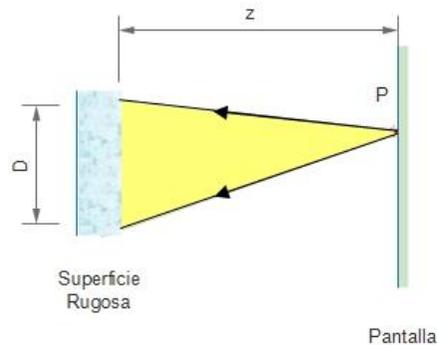


Figura 2-2 Formación de moteado objetivo

El resultado es denominado moteado de tipo objetivo cual es observado en una pantalla S a una distancia z de la superficie iluminada. Un punto arbitrario P en la pantalla de observación recibirá todas las contribuciones puntuales de la superficie iluminada. Se debe

asumir entonces que el patrón de moteado en P es la superposición de la interferencia generada por cada una de las contribuciones. Dos puntos cualesquiera, separados una distancia l proporcionarán franjas de frecuencia $f = l/(\lambda z)$, las franjas de mayor frecuencia espacial $f_{m\acute{a}x}$ serán formadas por dos puntos consecuentemente cercanos, para los cuales

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{d}{\lambda z} \quad (1)$$

El periodo de este patrón es una medida del mínimo tamaño de la mota objetivo σ_o el cual entonces será

$$\sigma_o = \frac{\lambda z}{d} \quad (2)$$

Donde d es el diámetro del haz láser.

Ahora asúmase el mismo caso que en la Figura 2-2, con el único particular que la superficie iluminada ahora su imagen es “creada” en una pantalla por medio de una lente L (vea la figura 2.3). El cálculo de la mota denominado subjetivo es bastante similar al hecho para el tipo objetivo. Aquí el diámetro del haz láser ahora es cambiado por el de la lente. El tamaño de la mota subjetivo estará dado entonces por

$$\sigma_s = \frac{\lambda b}{D} \quad (3)$$

Donde b es la distancia al plano imagen. Al introducir la apertura numérica

$$F = \frac{f}{D} \quad (4)$$

Donde f es la distancia focal se obtiene

$$\sigma_s = (1 + m)\lambda F \quad (5)$$

Donde $m = (b - f)/f$, la cual es la magnificación del sistema. Con esta ecuación es fácil observar que el tamaño de la mota aumenta conforme la apertura numérica disminuye.

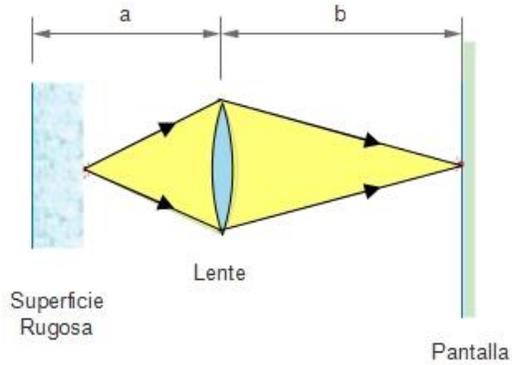


Figura 2-3 Formación de Speckle Subjetivo

2.2 Ecuación de Gladstone-Dale

Debido a que el método de LSD mide la deflexión de los haces de luz, este cambio es proporcional a el cambio del índice de refracción en presencia de flujo, el índice de refracción está relacionado intrínsecamente con el cambio de densidad, por medio de la ecuación de Gladstone-Dale. Ésta relación estará dada por la ecuación (6).

$$n - 1 = K\rho \quad (6)$$

Dónde K depende de la naturaleza del gas y de la longitud de onda de la luz en el medio de propagación. En la tabla 2, se muestran algunos valores para diferentes gases con sus respectivas longitudes de onda utilizadas en la medición.

Tabla 2 Constante de Gladstone-Dale para el aire a 288 Kelvin

$K(\text{cm}^3/\text{g})$	Longitud de Onda(μm)
0.2239	0.9125
0.2250	0.7034
0.2259	0.6074
0.2250	0.5320
0.2274	0.5097
0.23	0.4079
0.2330	0.3562

Como se muestran en los datos anteriores, para un láser verde(532nm) la constante es de $K = 0.000225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. A continuación en la siguiente sección se describirá el procedimiento para el cálculo de la deflexión del haz de luz en función de la densidad.

2.3 Principio de Desplazamiento de las motas.

La deflexión del haz de luz puede ser determinada por la obtención de los desplazamientos entre dos fotogramas de moteado, que como se ha explicado con anterioridad uno contiene la información del plano de análisis sin deformación (sin objeto de fase, referencia), por su parte el segundo consiste en la captura dinámica del flujo que se quiere analizar (objeto deformado). En la figura 2-4 se muestra un diagrama del principio de LSD. Donde R está definida como la longitud del plano de enfoque y L como la distancia entre el objeto de fase y el plano de enfoque de la lente de la cámara. A continuación se muestran las relaciones matemáticas de este sistema.

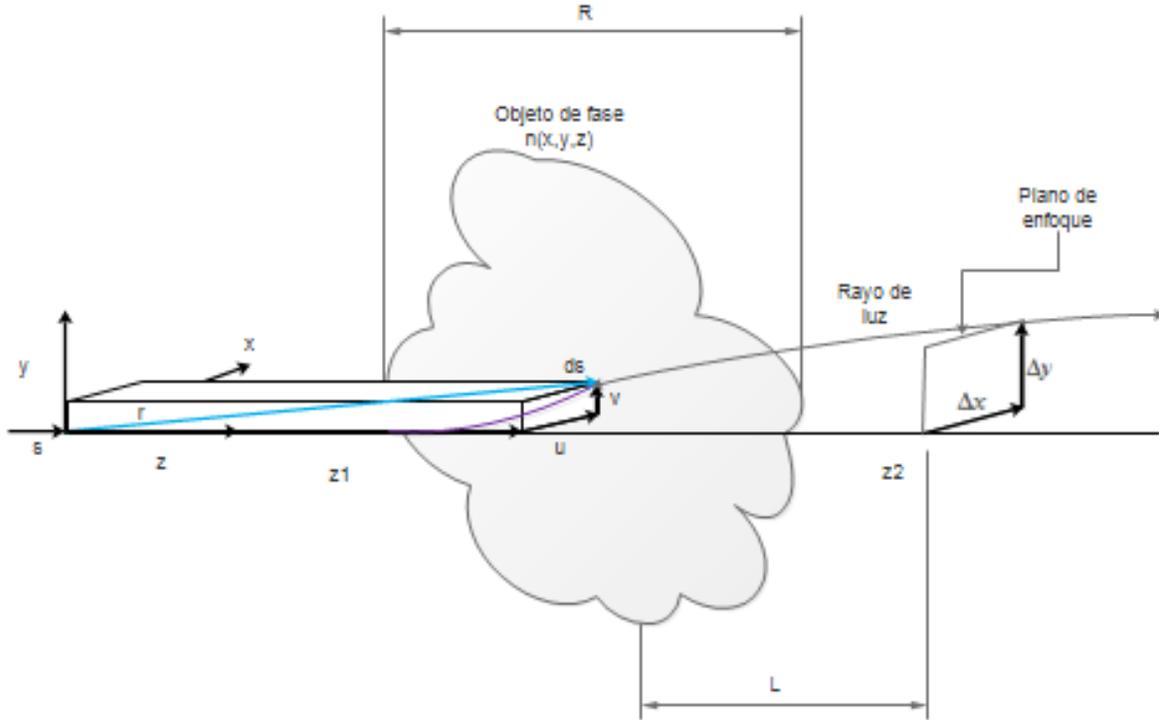


Figura 2-4 Principio de LSD

La deflexión del haz de luz puede ser expresada por la ecuación (7) donde n es el índice de refracción, s la dirección de propagación del haz y $\vec{r} = u\vec{i} + v\vec{j} + z\vec{k}$, son las coordenadas del vector de posición de un punto genérico que se encuentra dentro del haz de luz [8].

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (7)$$

Considerando que los ángulos de deflexión son pequeños, la aproximación paraxial puede considerarse como válida y la ecuación (7) puede expresarse como

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(n \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(n \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial y} \quad (8)$$

La ecuación (8) puede ser integrada, resultando

$$\left(n \frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z_2} - \left(n \frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z_1} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad \left(n \frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z_2} - \left(n \frac{\partial v}{\partial z}\right)_{z_1} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (9)$$

Realizando las siguientes consideraciones

$$\left.\frac{\partial u}{\partial z}\right|_{z_1} = \left.\frac{\partial v}{\partial z}\right|_{z_1} = 0 \quad \left.\frac{\partial u}{\partial z}\right|_{z_2} = \frac{\Delta x}{L} \quad \left.\frac{\partial v}{\partial z}\right|_{z_2} = \frac{\Delta y}{L} \quad (10)$$

La ecuación (9) se simplifica a:

$$n_2 \frac{\Delta x}{L} = D \frac{\partial \langle n \rangle}{\partial x} \quad n_2 \frac{\Delta y}{L} = D \frac{\partial \langle n \rangle}{\partial y} \quad (11)$$

Donde Δx y Δy son los desplazamientos obtenidos en el moteado y L es la distancia entre el flujo y el plano de enfoque de la lente de la cámara. El índice de refracción promedio a través del campo de visión se introduce como (En esta sección $\langle \rangle$ es usado para promediar a lo largo de la trayectoria).

$$\langle n \rangle = \frac{1}{D} \int_{z_1}^{z_2} n dz \quad (12)$$

Finalmente la ecuación (12) relaciona los desplazamientos obtenidos con sus gradientes de densidad, esta relación se obtiene al aplicar la ecuación de Gladstone-Dale en (9), resultando

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x} = \frac{\rho_2 + \frac{1}{K} \Delta x}{D \frac{L}{L}} \quad \frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial y} = \frac{\rho_2 + \frac{1}{K} \Delta y}{D \frac{L}{L}} \quad (13)$$

La ecuación (13) indica que la sensibilidad del sistema esta expresada como la magnitud $\frac{\Delta x}{L}, \frac{\Delta y}{L}$ y puede ser ajustada cambiando la posición del plano de enfoque. Este plano puede estar localizado entre el vidrio esmerilado y el flujo, o entre la cámara y el flujo.

2.4 Procesamiento de imágenes de moteado

Como se mencionó en la introducción de este trabajo de tesis, cuando una superficie difusa es iluminada por un láser, aparentemente una estructura granular aparece cubriéndolo. Todos los puntos del objeto iluminado son coherentes, es decir todos los frentes de onda generados son capaces de interferir y generar el patrón de motas, el cual se observa en el plano del vidrio esmerilado, y las ondas que se transmiten se encuentran interfiriendo. Esta interferencia produce un patrón de moteado en el espacio iluminado del objeto difuso. Los objetos difusos pueden ser de dos tipos: Objetos difusos reflejantes (como papel, madera y metal) y transparentes (vidrio esmerilado y papel delgado).

Una imagen típica del vidrio esmerilado e muestra en la Figura 2-5 la cual fue tomada justo antes de comenzar el experimento (referencia).

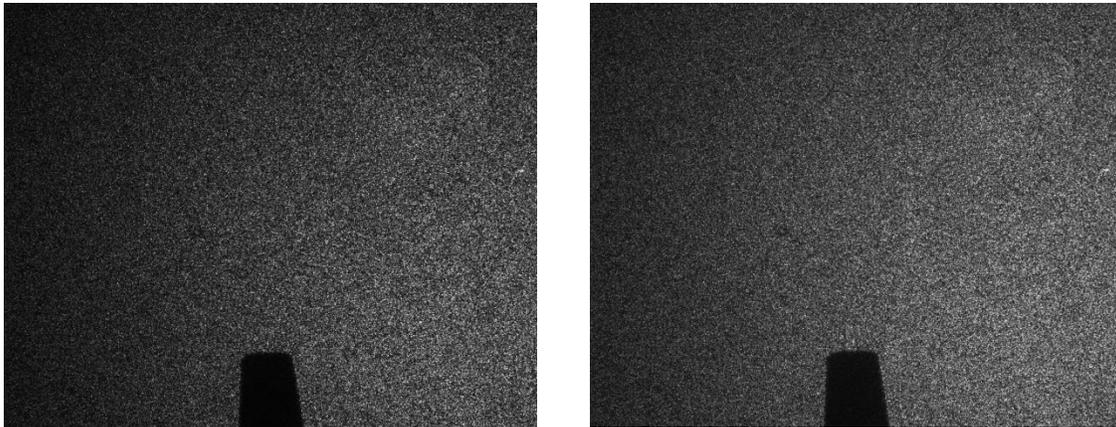


Figura 2-5 a) Superficie de vidrio esmerilado (referencia) b) Patrón de speckle desplazado (deformada)

La imagen a) es la referencia la cual es utilizada para determinar el desplazamiento de una posición inicial de los granos. La segunda imagen fue tomada con el flujo en la posición final. Considerando que el moteado puede considerarse como partículas semejantes a las que aparecen en la técnica de Velocimetría de Partículas por Imagen (en inglés PIV), es posible medir el desplazamiento de las motas utilizando los mismos algoritmos de procesamiento para PIV. Para este trabajo de tesis la técnica utilizada fue correlación por doble exposición (o

correlación cruzada). Pero antes se abordarán algunas consideraciones importantes para la captura de los patrones de moteado.

2.5 Profundidad de foco

La profundidad de foco es el margen de error en el enfoque del que podemos disponer sin que se note desenfocado el objeto bajo análisis.

La profundidad de foco depende de tres factores:

1. La profundidad de foco es tanto mayor cuanto más pequeña es la abertura del diafragma (al igual que la profundidad de campo).
2. La profundidad de foco es mayor cuanto mayor es la distancia focal del objetivo. Esto se explica porque un objetivo de distancia focal corta da lugar a un cono de ángulo más abierto que uno de focal larga.
3. La profundidad de foco es tanto mayor cuanto menor sea la distancia de enfoque (otra vez lo contrario de lo que ocurre con la profundidad de campo. Esto se explica porque el enfoque exige una separación entre lente y película, lo que produce un estrechamiento del foco.

Este parámetro puede ser calculado por medio de la siguiente relación (ecuación (14)) [29].

$$\delta z = \frac{4.88 * f_{\#}^2 (M + 1)^2 \lambda}{M^2} \quad (14)$$

Dónde

$$f_{\#} = \text{Número } f$$

$$M = \text{Magnificación}$$

A continuación se muestran algunos valores teóricos para distintos números $f_{\#}$

Tabla 3 Valores Teóricos de profundidad de foco para distintos números f .

lambda (m)	M
0.0000005320	0.14
f#	delta z (m)
2.80	0.001439
4	0.002936
5.6	0.005755
8	0.011745
11	0.022205
16	0.046978
22	0.088818

2.6 Correlación

El principal objetivo de la evaluación estadística para imágenes de moteado es determinar el desplazamiento entre dos patrones de motas (Imágenes), los cuales se encuentran almacenados como una distribución bidimensional en escala de grises. Analizando un poco, en áreas de metrología es una práctica bastante común que para encontrar el corrimiento entre dos señales (semejantes) se utilicen métodos de correlación.

La teoría de análisis por correlación puede ser extendida del caso unidimensional (señal respecto al tiempo en 1D), al caso bidimensional (distribución de escalas de grises en 2D).

Los detalles matemáticos acerca de la técnica de correlación, las relaciones básicas para señales correlacionadas y no correlacionadas, así como algunas aplicaciones, no serán abarcados en este trabajo, pero se pueden ser consultados en algunos libros de texto [30,31].

2.6.1 Transformada de Fourier Digital

La transformada de Fourier es una herramienta básica del procesamiento digital de señales e imágenes. Existen una gran cantidad de libros que describen estos detalles [30, 31,

32]. El impacto de este método de análisis es debido al crecimiento en cuanto a las mejoras de hardware en los equipos de cómputo actuales, además de la mejora de algoritmos más eficientes para su procesamiento (Transformada de Fourier Rápida o FFT siglas en inglés) [32, 33, 34, 35]. Estos aspectos son de amplia importancia para el estudio de patrones de motas por correlación.

2.6.2 Correlación cruzada para el análisis de desplazamiento de las motas.

En este método de análisis se realiza la captura de dos imágenes, una de ellas proporciona la información del objeto sin deformar y la otra del objeto deformado, este procesamiento de las señales se realiza por medio de correlación cruzada. En este caso, la correlación cruzada se realiza entre dos ventanas de interrogación. Cabe mencionar que suele generar un mejor procesamiento de las señales el obtener una gran cantidad de imágenes y después promediarlas. Esto reduce la pérdida de correlación en el plano, e incrementa la intensidad del pico de correlación.

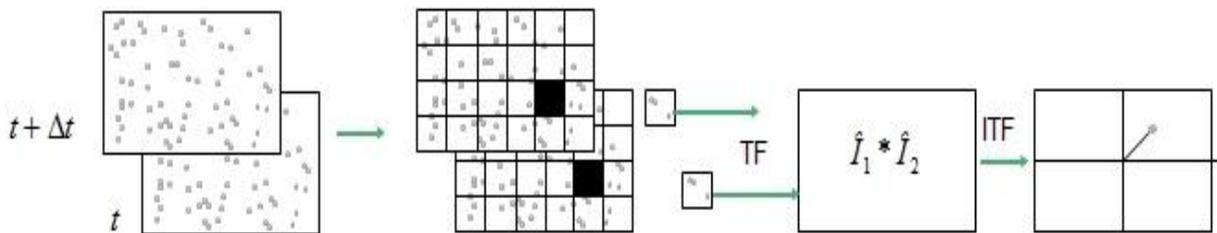


Figura 2-6 Análisis de dos fotografías/ una exposición, Método de correlación cruzada

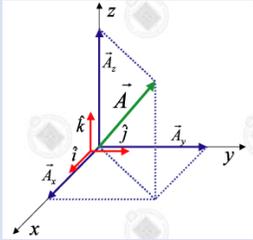
Estas técnicas son las más utilizadas para el análisis de correlación de las motas, ya que su uso inicial fue en Velocimetría de Partículas (PIV siglas en inglés), pero se pueden extender al análisis de moteado, debido a que las motas se pueden considerar como partículas en desplazamiento.

2.6.3 Sistemas Estereoscópicos

Una de las principales desventajas de la toma de datos con una sola cámara es que únicamente se pueden realizar mediciones dentro del plano de observación (vidrio esmerilado), lo cual imposibilita la medición de una tercera componente, es decir las mediciones fuera de este plano son despreciadas.

En algunas aplicaciones de mayor impacto es importante el conocimiento de este valor (componente en z). Existe la posibilidad de reconstruirla, algunos métodos utilizados ya han sido descritos por la literatura [35, 36, 37, 38]. Actualmente se ha realizado una descripción de los sistemas que involucran esta reconstrucción por medio de dos cámaras, en principio se puede obtener los desplazamientos de cualquier punto o mota en el espacio cuando se utiliza una sola cámara, pero esto provee únicamente dos ecuaciones para realizar este análisis, lo cual no genera un sistema con solución única. Pero al agregar una vista adicional (otra cámara), el número de ecuaciones se convierte en cuatro, lo cual ayuda a solventar el problema de la reconstrucción de una tercera componente. Estos sistemas de medición pueden ser clasificados, por medio de tres subíndices (k, l, m), los cuales se explican en la tabla 4.

Tabla 4 Clasificación de los sistemas Estereoscópicos

Primer Subíndice (k)	Segundo Subíndice (l)	Tercer Subíndice (m)
<p>Indica el número de componente del vector resultante.</p> 	<p>Asocia el número de cámaras o dispositivos de captura con los que cuenta el sistema.</p>  <p style="text-align: center;">Stereo camera</p>	<p>Este dígito, describe si el sistema realiza capturas discontinuas o en tiempo real.</p>

Existen infinitud de configuraciones para la captura de imágenes de sistemas estéreo, pero la necesidad básica que se debe satisfacer es la obtención de dos tomas simultáneas, esto en diferentes perspectivas pero con el mismo campo de común de visión del objeto.

Las dos vistas son combinadas utilizando una serie de algoritmos para poder realizar la reconstrucción de la tercera componente a analizar. A continuación se hace una descripción de las relaciones existentes para la reconstrucción de componentes por medio de una sola cámara, para después en el apartado siguiente describir los sistemas estéreo con dos vistas, los cuales se dividen en dos grupos traslacionales y rotacionales; siendo de interés para este trabajo el primer tipo.

2.6.3.1 Reconstrucción de componentes con una sola cámara.

La figura 2-8 muestra el arreglo convencional de reconstrucción de tres componentes para una sola vista, donde el eje de la cámara es perpendicular al plano de observación, esto con la finalidad de poder obtener las dos componentes dentro de plano.

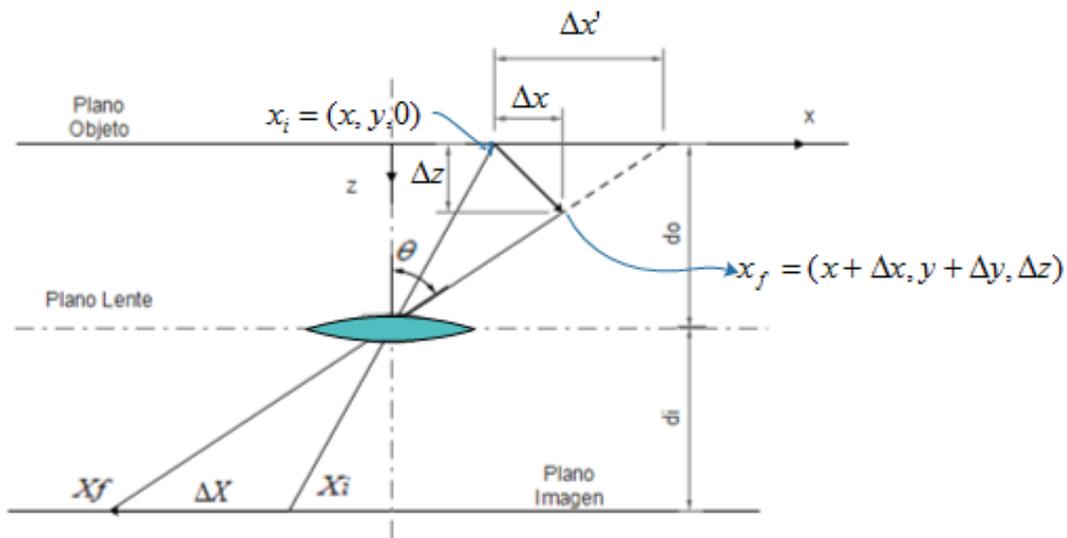


Figura 2-7 Reconstrucción de Tres componentes con una sola cámara

En este arreglo un punto con una posición inicial $x_i = (x, y, 0)$ forma una imagen con coordenadas

$$X_i = (-M_n x, -M_n y, 0) \quad (15)$$

Se debe observar que la imagen formada estará invertida con respecto al objeto. La relación existente entre la distancia de la imagen y la distancia del objeto, es denominada magnificación y se expresa en la ecuación (16).

$$M_n = (di/do) \quad (16)$$

Donde do es la distancia existente entre la imagen y el plano de la lente, mientras que di es la distancia entre la lente y el vidrio esmerilado. La figura 2-8, también describe el movimiento de una mota que parte desde $z=0$, es decir desde el plano de análisis.

Tomando como referencia la misma figura, podemos observar que:

$$x_f = (x + \Delta x, y + \Delta y, \Delta z), \quad (17)$$

Las cuales son las coordenadas de la mota desplazada, ésta forma una imagen en:

$$X_f = (-M_f(x + \Delta x), -M_f(y + \Delta y), 0) \quad (18)$$

Y por consiguiente la magnificación en este punto es igual a

$$M_f = di/(do - \Delta z). \quad (19)$$

El desplazamiento resultante de la mota, se obtiene por medio de la resta de las respectivas distancias recorridas en cada uno de los instantes.

$$\Delta X = X_f - X_i \quad (20)$$

Realizando las respectivas manipulaciones algebraicas, se obtiene lo desarrollado en la ecuación (21).

$$\begin{aligned}\Delta X &= (-M_f(x + \Delta x), -M_f(y + \Delta y), 0) - (-M_n(x), -M_n(y), 0) \\ \Delta X &= (-M_f(x + \Delta x) + M_n(x), -M_f(y + \Delta y) + M_n(y), 0)\end{aligned}\quad (21)$$

Sustituyendo los respectivos valores de la magnificación

$$\Delta X = \left(-\frac{di}{do - \Delta z}(x + \Delta x) + \frac{di}{do}(x), -\frac{di}{do - \Delta z}(y + \Delta y) + \frac{di}{do}(y), \Delta z \right) \quad (22)$$

Realizando reducción de términos semejantes, se concluye lo expresado en la ecuación (23).

$$\Delta X = \left(-\frac{di(do\Delta x + \Delta zx)}{do - \Delta z}, -\frac{di(do\Delta y + \Delta zy)}{do}, \Delta z \right) \quad (23)$$

Dividiendo la ecuación (23) por $\frac{\frac{1}{do}}{\frac{1}{do}}$ se obtiene:

$$\Delta X = \left(-\frac{M_n \left(\Delta x + \frac{x\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}}, -\frac{M_n \left(\Delta y + \frac{y\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}}, 0 \right) \quad (24)$$

Se debe notar que debido a que los desplazamientos del patrón de moteado no están localizados directamente en el eje de la cámara, esto generará, una sensación de movimiento fuera de plano, entonces en realidad el desplazamiento real $\Delta x' = -\Delta X/M_n$ en el plano del objeto. Entonces la ecuación (24), queda reescrita como:

$$\Delta x' = \frac{\Delta X}{-Mn} = \left(\frac{\left(\Delta x + \frac{x\Delta z}{do} \right)}{\left(1 - \frac{\Delta z}{do} \right)}, \frac{\left(\Delta y + \frac{y\Delta z}{do} \right)}{\left(1 - \frac{\Delta z}{do} \right)}, 0 \right) \quad (25)$$

Para el error relativo del desplazamiento de la mota consideremos lo siguiente:

$$\xi = (\xi_x, \xi_y) = \left(\frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta x}, \frac{\Delta y' - \Delta y}{\Delta y} \right) \quad (26)$$

El valor de $\Delta x'$ se determinó en la ecuación (25), al sustituir en (26), el resultado es la siguiente expresión.

$$\xi = \left(\frac{\left(\Delta x + \frac{x\Delta z}{do} \right)}{\Delta x \left(1 - \frac{\Delta z}{do} \right)} - 1, \frac{\left(\Delta y + \frac{y\Delta z}{do} \right)}{\Delta y \left(1 - \frac{\Delta z}{do} \right)} - 1, 0 \right) \quad (27)$$

Considerando que el factor $1 - \frac{\Delta z}{do} \approx 1$, esta ecuación (27) puede reescribirse como:

$$\xi = \left(\frac{x\Delta z}{do\Delta x}, \frac{y\Delta z}{do\Delta y} \right) = \left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \tan \theta_x, \frac{\Delta z}{\Delta y} \tan \theta_y \right) \quad (28)$$

Debido a esta configuración, aquellos puntos con ángulos grandes respecto al eje de la cámara generarán un error elevado por perspectiva, por ejemplo: Para un ángulo de 5° el error de perspectiva es de aproximadamente 10%, en todas las mediciones dentro del plano. También cabe mencionar que aquellos desplazamientos relativamente grandes, no están exentos de este error de perspectiva.

La visión estereoscópica elimina este problema, ya que se adquieren dos vistas simultáneas fuera del eje. Estos desplazamientos son registrados por cada cámara ΔX_1 y ΔX_2 ,

los cuales después son combinados para obtener el desplazamiento correcto ($\Delta x, \Delta y$), y más importante, la componente fuera de plano, Δz ,

2.6.3.2 Configuraciones Estereoscópicas

Como se mencionó anteriormente, los sistemas estereo pueden ser clasificados de dos maneras distintas: traslacionales y rotacionales, los primeros son conocidos porque los desplazamientos son laterales mientras que en los segundos el desplazamiento es angular. En este trabajo se hará mención únicamente de los primeros.

2.6.3.3 Sistemas Traslacionales

En este sistema, ambos ejes de las cámaras son paralelos el uno del otro respectivamente, pero a su vez son ortogonales al vidrio esmerilado. Este sistema se puede observar en la figura 2-8.

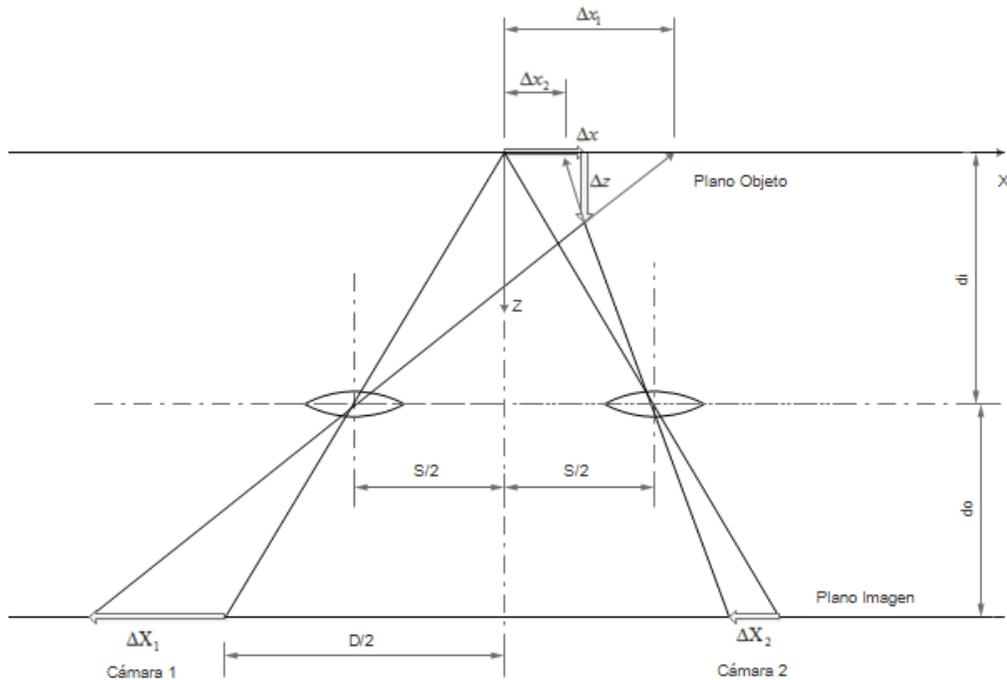


Figura 2-8 Sistema Estereo Traslacional

Es destacable que los ejes de las cámaras se encuentran simétricos, lo cual no siempre es del todo necesario. Si se diera este caso la magnificación de cada una de las cámaras sería

independiente. Como sea, este tipo de sistemas ya han sido descritos con anterioridad por otros autores. [38, 39].

La primera ventaja de este tipo de sistemas es su simplicidad. Esto debido a que el plano del objeto, el plano imagen y el plano de la lente son paralelos entre ellos. Lo cual permite que el campo de magnificación sea uniforme. Una imagen con buen foco puede ser adquirida sin necesidad de reducir el tamaño de la apertura que se use en cualquiera de las cámaras. Otra gran ventaja es que las dos vistas pueden ser superpuestas sin necesidad de manipulaciones adicionales. Además, la resolución espacial de la imagen resultante es idéntica a la de las vistas individuales.

Se debe hacer énfasis en que estas distancias no pueden ser muy grandes, ya que se pueden generar efectos de viñeta debidos a los cuerpos de las mismas cámaras.

2.6.3.4 Relaciones Geométricas del sistema Estereo Translacional.

Para obtener las relaciones que describen el desplazamiento de la mota en el sistema estéreo, supongamos que la mota parte de una posición inicial con coordenadas (para mayor referencia véase la figura 2-9):

$$x_i = (x, y, 0) \quad (29)$$

Y se desplaza a las coordenadas

$$x_f = (x + \Delta x, y + \Delta y, \Delta z) \quad (30)$$

En el sistema traslacional el eje coordenado de cada una de las lentes ahora esta desplazado en una cantidad de $\frac{s}{2}$, siendo para la lente izquierda el valor de $x_l = x + \frac{s}{2}$ y para

el lado derecho de $x_r = x - \frac{s}{2}$, entonces retomando la ecuación (25) para una sola vista se obtienen los desplazamientos para cada una de las cámaras.

$$\begin{aligned}
 a) \quad \Delta x_l &= - \frac{M_n \left(\Delta x + \frac{(x+\frac{s}{2})\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}} \\
 b) \quad \Delta x_r &= - \frac{M_n \left(\Delta x + \frac{(x-\frac{s}{2})\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Debido a que las componentes de desplazamiento a lo largo del eje “y” son iguales para las dos cámaras, puesto que estas se encuentran en el mismo plano del eje, se procede únicamente a tomar el promedio de ambas.

Entonces para conocer el desplazamiento resultante de la mota, se toman las ecuaciones (31):

$$\Delta x_l - \Delta x_r = - \frac{M_n \left(\Delta x + \frac{(x+\frac{s}{2})\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}} + \frac{M_n \left(\Delta x + \frac{(x-\frac{s}{2})\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}} \tag{32}$$

De la ecuación (32), reduciendo términos y despejando Δz , se puede conocer la componente fuera de plano.

Englobando $\Delta X = \Delta x_l - \Delta x_r$, se obtiene que:

$$\Delta X = - \frac{\frac{M_n \Delta z}{do}}{1 - \frac{\Delta z}{do}} \tag{33}$$

Despejando y sacando factor común se obtiene:

$$\Delta X \left(1 - \frac{\Delta Z}{do}\right) = -\frac{M_n \Delta Z}{do}$$

$$\Delta X = \frac{\Delta Z}{do} (-M_n s + \Delta X)$$
(34)

Ahora despejando la componente fuera de plano:

$$\Delta Z = -\frac{do \Delta X}{M_n s - \Delta X}$$
(35)

Multiplicando la ecuación (31a) por $\left(x + \frac{s}{2}\right)$, y restándola de (31b) Multiplicada por $\left(x - \frac{s}{2}\right)$, se tiene:

$$\Delta x_l \left(x - \frac{s}{2}\right) - \Delta x_r \left(x + \frac{s}{2}\right) = -\frac{M_n \left(\Delta x + \frac{\left(x + \frac{s}{2}\right) \Delta Z}{do}\right)}{1 - \frac{\Delta Z}{do}} \left(x_0 + \frac{s}{2}\right) +$$

$$\frac{M_n \left(\Delta x + \frac{\left(x - \frac{s}{2}\right) \Delta Z}{do}\right)}{1 - \frac{\Delta Z}{do}} \left(x_0 - \frac{s}{2}\right)$$
(36)

Resolviendo para Δx

$$\Delta x = \frac{\Delta x_l \left(x - \frac{s}{2}\right) - \Delta x_r \left(x + \frac{s}{2}\right)}{M_n s - (\Delta x_l - \Delta x_r)}$$
(37)

Promediando las compontes en y de cada una de las cámaras:

$$\frac{(\Delta y_l + \Delta y_r)}{2} = -\frac{M_n \left(\Delta y + \frac{y\Delta z}{do} \right)}{1 - \frac{\Delta z}{do}} \quad (38)$$

Resolviendo para Δy

$$\Delta y = -\frac{y\Delta z}{do} + \frac{(\Delta y_l + \Delta y_r)}{2M_n} \left(\frac{\Delta z}{do} - 1 \right) \quad (39)$$

2.6.4 Máxima región común de observación para las dos cámaras.

Para obtener la región común, obsérvese la figura 2-9.

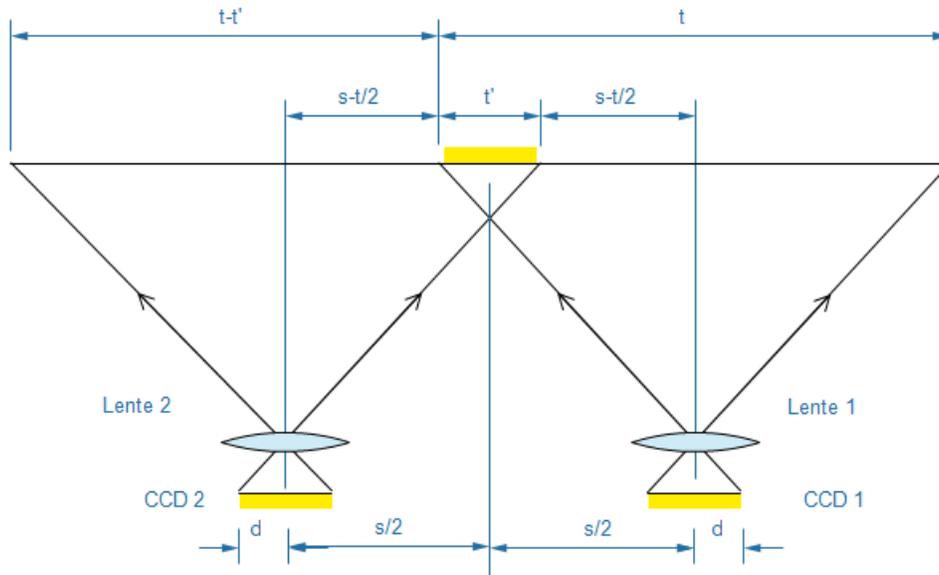


Figura 2-9 Campo de visión común (t'), para las dos cámaras de un sistema traslacional. Dónde $2d$ es el tamaño de los sensores y s es la separación entre los sensores de las cámaras.

De la figura anterior se observa que el área de traslape del campo de visión de las dos cámaras es

$$t' = s - 2 \left(s - \frac{t}{2} \right) = t - s \quad (40)$$

Ahora, un desplazamiento lateral de los sensores de los CCDs puede ser visto como un cambio de tamaño de los mismos. Si $2d'$ es el cambio de tamaño de los sensores, entonces el nuevo tamaño de los mismos será $2d + 2d'$. Véase la figura 2-10.

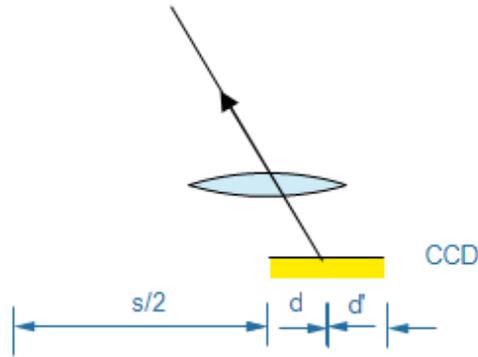


Figura 2-10 Desplazamiento lateral del CCD

También las amplificaciones, original y final (después del cambio de tamaño) son

$$M = \frac{2d}{t} \quad (41)$$

$$M' = \frac{2d + 2d'}{t} \quad (42)$$

Definiendo un factor que relacione el tamaño original y el cambio de tamaño, $r = \frac{d'}{d}$, de la ecuación (42) se obtiene

$$t' = \frac{2d + 2d'}{M} - s = \frac{2d}{M} + \frac{2rd}{M} - s \quad (43)$$

Derivando esta ecuación con respecto a d se encuentra el valor de r para el máximo valor de t' , el cual resulta ser $r = 1$. Por lo tanto, el valor de desplazamiento para los sensores donde se obtiene el máximo valor de traslape es d . Para $t = s$, la distancia entre los sensores será

$$D = s + 2d \quad (44)$$

Y utilizando la expresión de la amplificación (41), podemos escribir que

$$D = s(1 + M) \quad (45)$$

Capítulo 3 Procedimiento Experimental

3.1 Arreglo experimental del sistema de Mapeo de deflexión por moteado.

El arreglo óptico propuesto en esta investigación se utilizará para medir campos de temperatura del aire calentado por una vela y un soplete de oxi-acetileno. Se optó por el arreglo de mapeo de deflexión debido a su simplicidad y a que es una técnica de campo completo para el estudio de objetos de fase (fluidos). En la figura 3.1 se muestra el arreglo utilizado. El arreglo de mapeo de deflexión utilizado en esta investigación consiste de un espejo esférico de diámetro de 0.15m y una distancia focal de 0.8m, un vidrio esmerilado con gránulos de 20 micras de diámetro, una apertura micrométrica de 25 micras junto con un objetivo de microscopio de 40X, además de un filtro espacial con 3 grados de libertad, como fuente de iluminación se utilizó un láser con una longitud de onda de 532 nm.

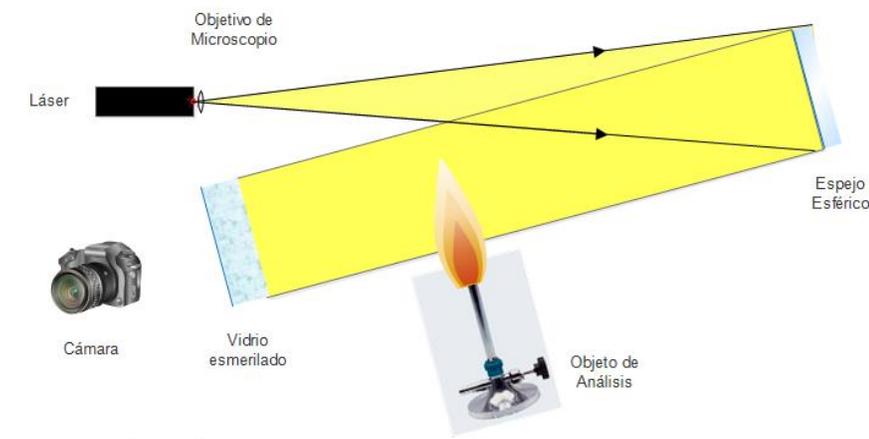


Figura 3-1 Arreglo LSD.

El primer objeto de fase utilizado fue una vela de parafina de aproximadamente 20cm de altura y diámetro de 1.5cm.

El soplete utilizado, es un kit de soldadura de la marca benzomatic, éste cuenta con sus respectivos tanques de oxígeno y acetileno, además de un par de reguladores para manipular las presiones del combustible y oxígeno. Esto se puede apreciar en la figura 3-2.

En la figura 3-3 se puede observar el arreglo óptico, y la posición ocupada por el soplete. El flujo de convección es generado por la diferencia de temperatura entre la combustión generada en el soplete y el medio circundante (aire) en la dirección vertical.

La mezcla generada de aire-combustible influye en la calidad de la flama, esta relación puede ser manipulada por medio de los reguladores con los que cuenta el sistema. Este sistema fue el más adecuado para este trabajo, debido a que como se sabe la calidad de la combustión influye no solo en el color de la flama, sino también en la temperatura de la misma.



Figura 3-2 Soplete benzomatic con sus respectivos reguladores para combustible y oxígeno

La vela y la tobera se posicionaron en forma vertical a la mesa óptica, entre el espejo y el vidrio esmerilado.

La dirección de los gases generados por la combustión y el aire calentado alrededor de la flama es vertical con respecto a la mesa y se mueven de forma ascendente. El objeto de fase (vela o tobera), se posicionó a una distancia de 0.02 m respecto al vidrio esmerilado, siendo este parámetro de amplia importancia como se mencionó en (13), puesto que este factor determina la sensibilidad del sistema.

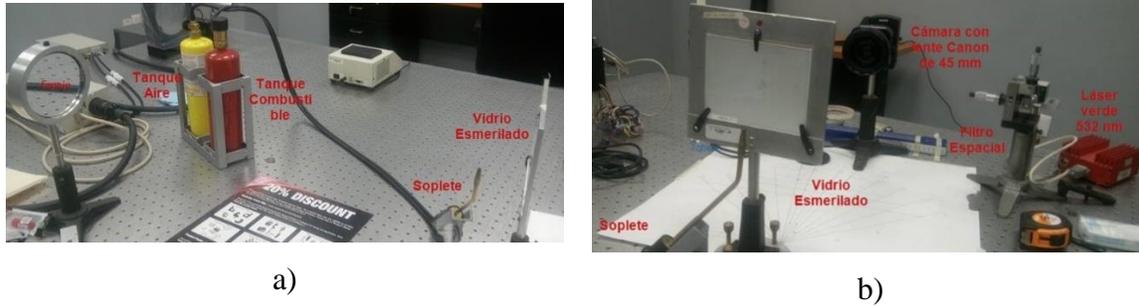


Figura 3-3 a) Vista de los elementos que componen el objeto de fase (soplete) b) Fuente de luz y cámara del arreglo óptico de mapeo por deflexión.

3.2 Sistema para la obtención de datos

La obtención de las imágenes del sistema óptico schlieren se realizó mediante una cámara digital marca *Lumenera* (LU175). La cámara permite registrar una cantidad promedio de 30 cuadros por segundo (fps), a una resolución espacial de 1280x1024 píxeles. Las imágenes son guardada en formato BMP y digitalizadas a 8-bits en niveles de gris. El control de la cámara se realiza mediante software (propio de la marca) utilizando una computadora personal de escritorio. La resolución espacial y temporal de la cámara permite obtener las características dinámicas de los flujos de fluido de estudio. Para formar la imagen sobre el CCD de la cámara se utilizó una lente CANON TS-E con distancia focal de 0.045m la cual posee movimiento de traslación como de rotación para generación de vistas estereo. Debido a que los objetos de fase analizados son prácticamente simétricos, no es necesario utilizar dos cámaras al mismo tiempo.

3.3 Cálculo de los parámetros de máxima región de interés y profundidad de foco

Debido a que se utiliza visión estereoscópica el primer paso es determinar el tamaño de la región de estudio, que para este trabajo se ajustó a 0.042m. Entonces el valor de magnificación será igual a

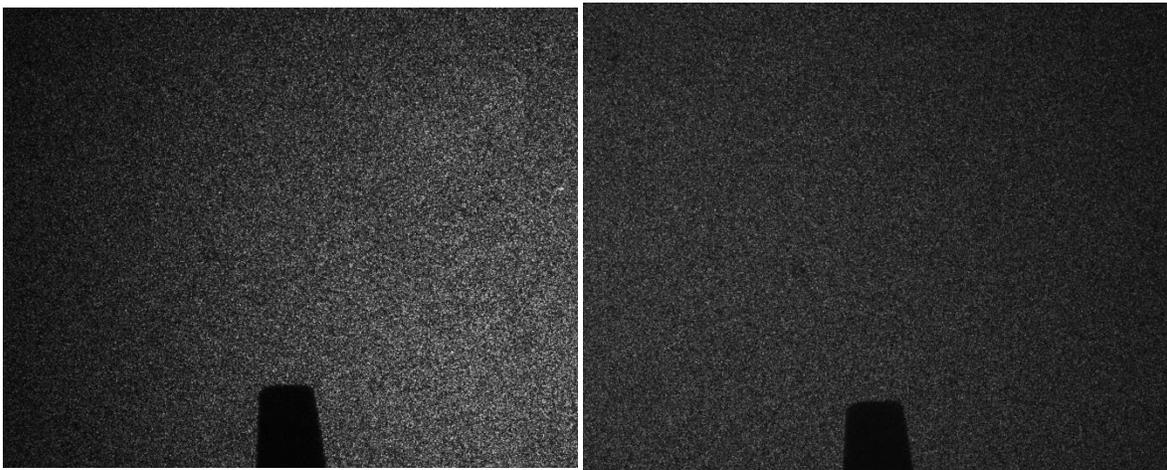
$$m = \frac{\text{Ancho del sensor}}{\text{Ancho del objeto}} = \frac{0.006656m}{0.042m} = 0.158 \quad (46)$$

Por tanto de acuerdo a la ecuación (43) y a una distancia entre sensores $s = 0.1m$, La distancia D que se deben trasladar las lentes de las cámaras es igual a:

$$D = s(1 + m) = 0.1(1 + 0.158) = 0.1158m \quad (47)$$

Lo cual indicaría que al ser simétrico el sistema traslacional estereoscópico, el desplazamiento que debe existir por cada cámara para la máxima región de interés común, será de aproximadamente 6mm.

Como se puede ver en la figura 3-4, se cumple la condición de máxima región de interés.



a)

b)

Figura 3-4 a) Vista Estereo lado izquierdo b) Vista Estereo lado derecho

En cuanto a la profundidad de foco de la lente de la cámara se tiene por la ecuación (14) que

$$\delta z = \frac{4.88(8)^2(0.158 + 1) * 532 * 10^{-9}}{0.158^2} = 0.0077m$$

De acuerdo a esto, para un número $f/\# = 8$, la profundidad de foco del sistema será de 7.7 mm, en base a esto se concluye que la lente debe de ser enfocada prácticamente en el plano del vidrio esmerilado. Si se desea incrementar este valor, únicamente se debe aumentar el número f de la lente.

3.4 Obtención de datos experimentales

Una vez calculada la región de interés común entre la dos cámaras, además de realizar los ajustes pertinentes de traslación en la lente de la cámara, se procede a obtener una serie 30 imágenes del lado izquierdo y derecho con su respectiva imagen de referencia. Posteriormente, para cada imagen se calcula los desplazamientos de motas entre la imagen con flujo y de referencia usando correlación cruzada. Los mapas de desplazamiento obtenidos se aplican a las ecuaciones (35, 37 y 38). A continuación se procede a calcular las componentes en tres dimensiones de los respectivos desplazamientos de moteado en cada una de las coordenadas.

Lo siguiente es aplicar la ecuación (13) para obtener las densidades en cada una de las direcciones del flujo y poder visualizar un campo en tres dimensiones. En la figura 3.5, se muestra un diagrama de flujo de la metodología empleada.

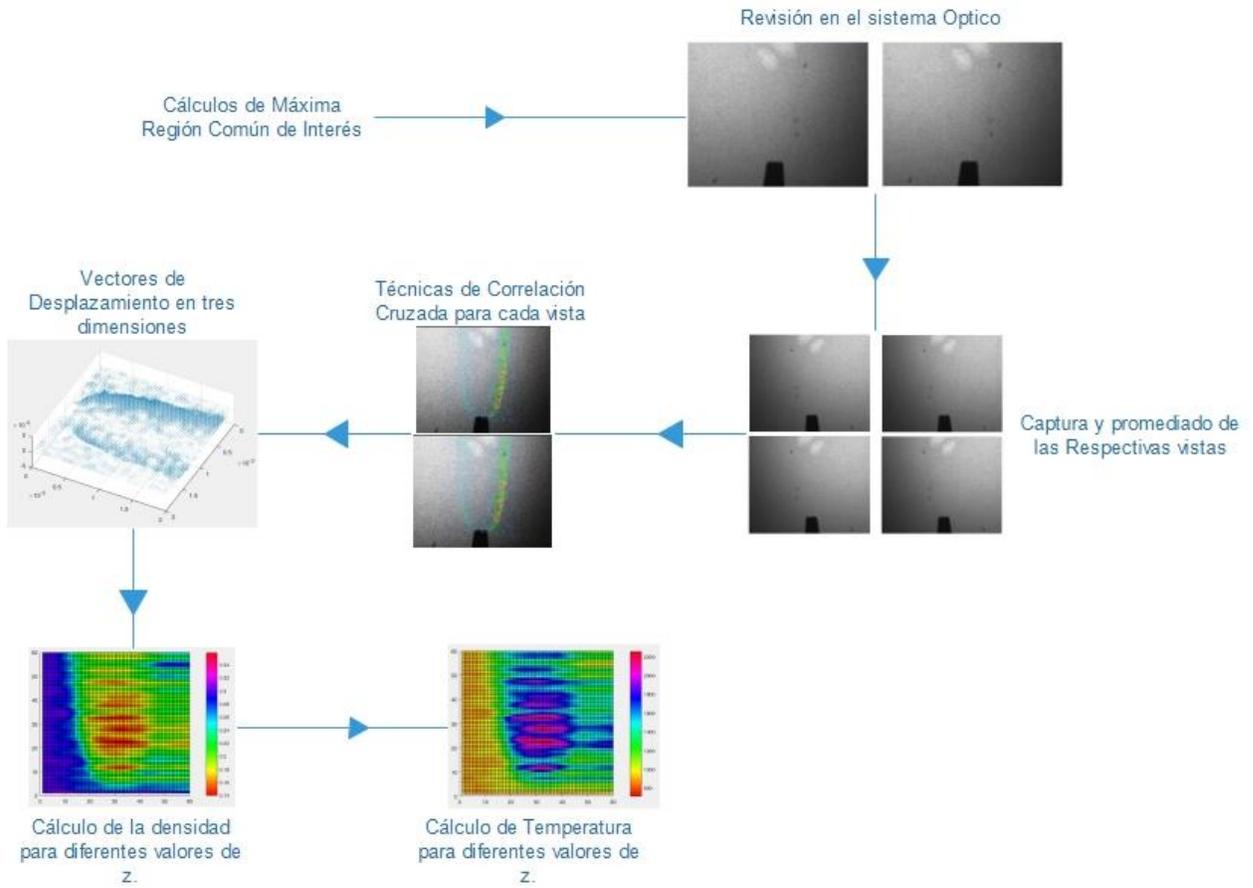


Figura 3-5 Diagrama de Flujo que explica el procesamiento de las imágenes de moteado para la obtención de la temperatura de la flama.

Capítulo 4 Resultados experimentales

En el capítulo anterior se expuso la metodología experimental para la medición de temperatura en campos de flujo transparente, aplicando la visión estereoscópica y las ecuaciones que relacionan el gradiente de densidad respecto al desplazamiento del moteado (vease ecuación (13)), esto con la finalidad de poder obtener los resultados deseados.

A continuación se mostrarán los resultados experimentales obtenidos con la metodología anterior, y se presentará el procesamiento de los datos adquiridos por la captura de las imágenes de moteado.

4.1 Resultados Experimentales

De acuerdo al procedimiento dado en el esquema del capítulo 3, se procedió a medir la temperatura del flujo de convección de la flama de una tobera de soplete de oxiacetileno y una vela.

Para cada una de las vistas se obtuvieron 2 videos uno de referencia y otro con el objeto de fase para cada vista, a una velocidad de adquisición de 30 imágenes por segundo, ambos análisis a una resolución de 1280x1024 pixeles y un tiempo de exposición de 10 milisegundos.

Estos videos fueron separados en imágenes para después realizar la correlación cruzada de cada toma, de esta manera se obtuvieron los desplazamientos para cada una de las vistas, al aplicar las ecuaciones (35, 37 y 38) se calcula el desplazamiento en 3 dimensiones de las motas y por ende el campo de flujo. Estos valores se sustituyen en la ecuación (13) para determinar los respectivos gradientes de temperatura en cada una de las direcciones. Estos gradientes se integran y se les suma la densidad ambiente para poder realizar el cálculo de la temperatura en cada una de las flamas.

4.1.1 Resultados experimentales para la vela

Para el caso de la vela se hicieron mediciones para una temperatura en la superficie de la vela las cuales tuvieron un valor de entre 200°C y 300°C, se utilizó un termopar tipo J para verificar las mismas, esto debido a las altas temperaturas en el interior de la flama.

El campo de observación es de aproximadamente 4.2 cm de ancho, por 3.6 cm de alto. En la imagen 4-1, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las vistas por medio de la correlación cruzada. Se utilizó el software pro-VISION XS, del cual se posee la licencia en el laboratorio de pruebas ópticas no destructivas. Los parámetros seleccionados en el software fueron un mallado de 60 por 60, una ventana de correlación de 24*24 pixeles, Además de aplicar un filtro Gaussiana para la eliminación de vectores erróneos, estos parámetros fueron los mismo para los dos objetos en estudio.

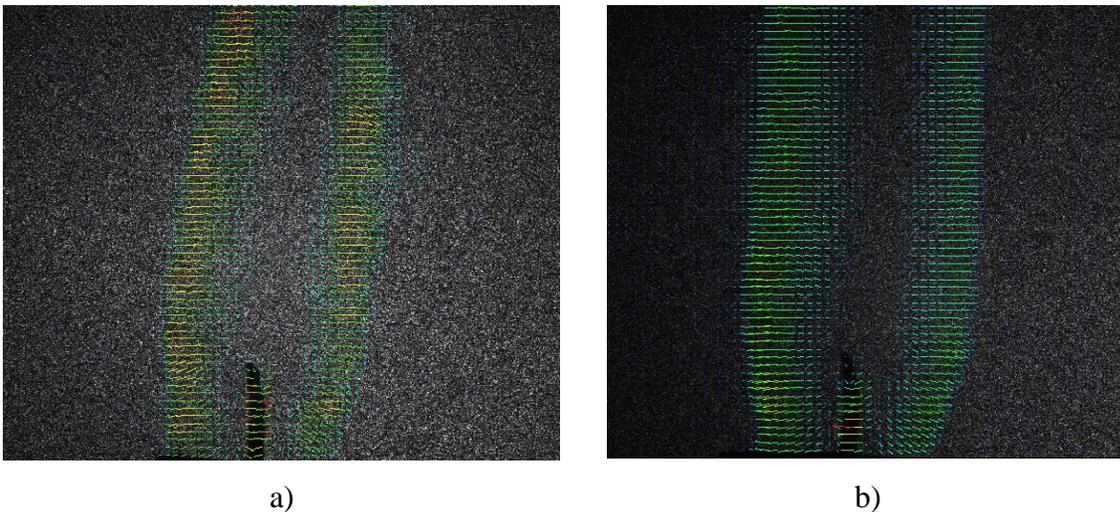


Figura 4-1 a) Correlación Cruzada izquierda b) Correlación Cruzada derecha

Se puede observar claramente un flujo simétrico respecto al centro de la llama, además del flujo de convección generado por el mechero de la vela en la parte inferior de la imagen anterior. El campo de flujo fue el esperado de acuerdo a las predicciones que se tenían del experimento. A continuación al combinar las ecuaciones de reconstrucción en tres dimensiones a cada una de las vistas (ecuaciones 35, 37 y 38), se obtuvo el campo de desplazamiento en tres dimensiones que se muestran en la figura 4-2.

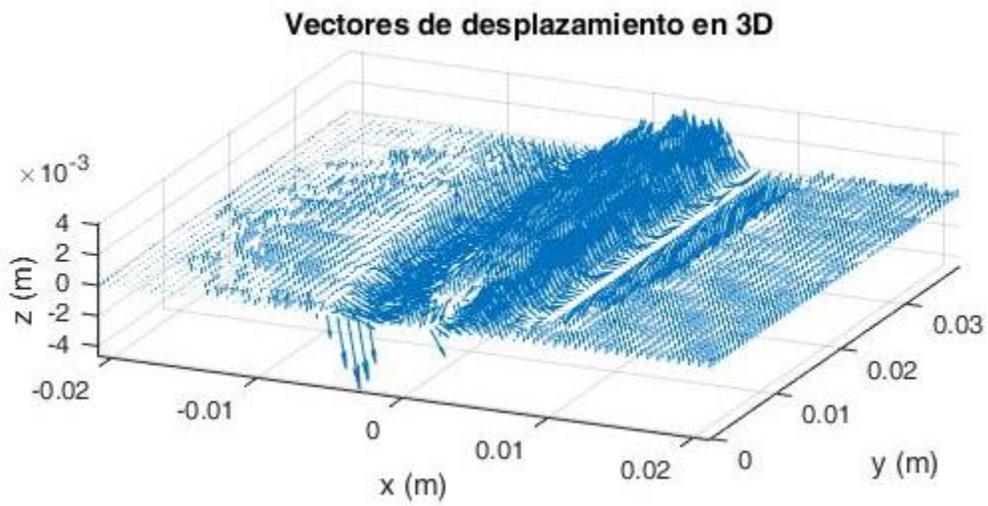
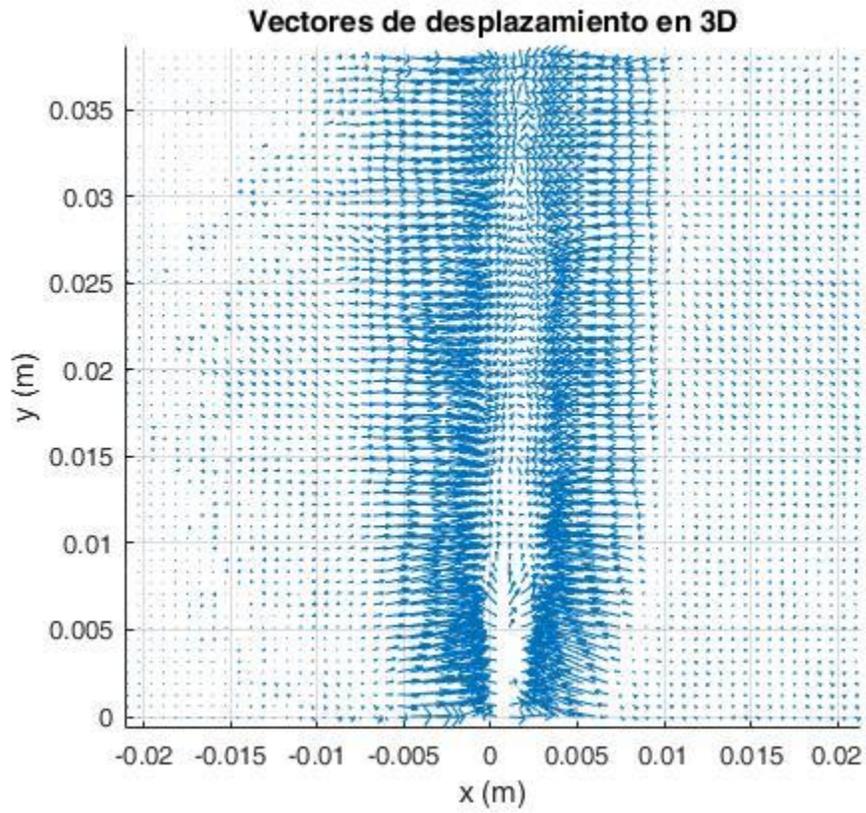


Figura 4-2 a) Vectores en tres dimensiones plano xy b) Vectores de desplazamiento.

A los resultados obtenidos de la figura 4-2, se le aplican la ecuación (13), la cual relaciona el desplazamiento en cada una de las coordenadas con sus respectivos gradientes de densidad. Nótese que estos resultados son gradientes en la dirección x y y . Por lo que, para obtener el valor de la densidad es necesario integrar en ambas direcciones. En la integración se utilizó la función `cumtrapz` de matlab en cada una de las respectivas direcciones. Cabe mencionar que como condición de frontera, al valor de densidad calculado se le suma la densidad existente en el contorno de la flama. Una vez realizado esto, el cálculo de temperatura se realiza de acuerdo a la ecuación siguiente, conocida como la ley de los gases ideales.

$$P = \rho RT \quad (48)$$

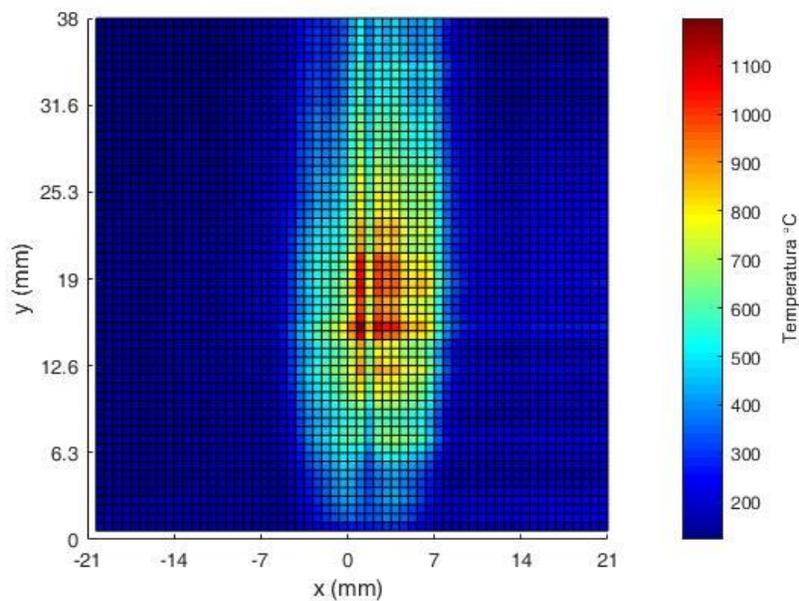
Dónde:

$P =$ Presión del Flujo. (atm)

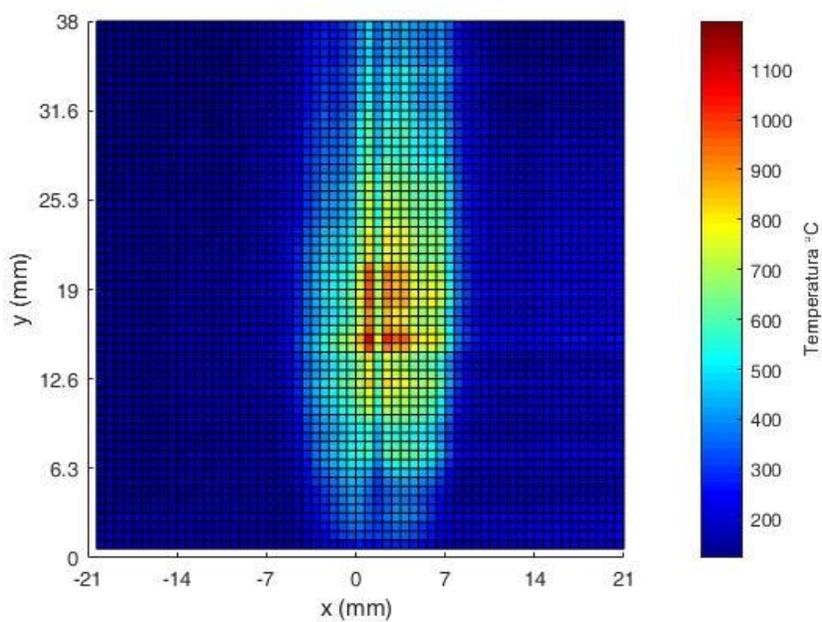
$\rho =$ Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$R =$ Constante del gas $\left(\frac{kJ}{kg * K}\right)$

$T =$ Temperatura ($^{\circ}K$)



a)



b)

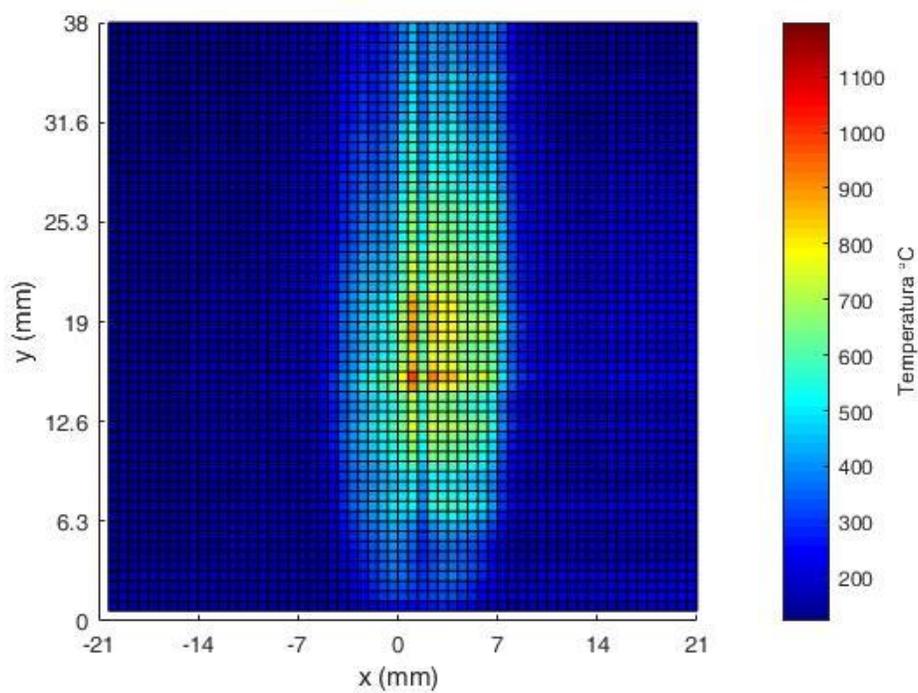


Figura 4-3 Temperatura de la Vela a) Plano $z=0.77\text{mm}$ b) Plano $z=1.54\text{mm}$ c) Plano $z=2.21\text{mm}$.

En la figura 4-3 se muestran tres mapas de temperatura de la vela para diferentes posiciones a lo largo del eje z . El resultado claramente muestra la simetría del objeto bajo estudio. La barra de colores muestra que los valores máximos de temperatura se encuentran en la parte central del objeto.

4.1.2 Análisis de error en la temperatura de la vela

La incertidumbre de las mediciones de temperatura de la veladora será caracterizada en esta sección. Como la medición principal es la temperatura, la relación que manifiesta el cálculo del error está dada por:

$$T = T(\rho, \rho_0, T_0) \quad (49)$$

Donde σ_T y σ_ρ son las desviaciones estándar de temperatura y densidad, por tanto la relación existente entre las desviaciones estándar será

$$\left(\frac{\sigma_T}{T}\right) = \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right) \quad (50)$$

La ecuación 50 se usó para el estudio de errores causados por la medición de temperatura. La desviación estándar de la densidad, σ_ρ la calculamos usando las 30 imágenes capturadas por vista.

La tabla 5 muestra los valores de incertidumbre para cada temperatura en cuestión. La primera columna corresponde al desplazamiento longitudinal, en la dirección en x . La segunda columna equivale a los valores de incertidumbre para la fila central de la flama. Obteniéndose entonces un valor mínimo de incertidumbre de 6.5°C y un valor máximo de 26°C Cerca de la parte central los valores de incertidumbre son cercanos al límite superior, mientras que en el contorno al límite inferior. Cabe aclarar que como se mencionó en la ecuación (13) la sensibilidad del sistema está dada por los respectivos desplazamientos del moteado divididos sobre la distancia entre el plano de enfoque y el objeto de fase $\left(\frac{\Delta x}{L}, \frac{\Delta y}{L}\right)$

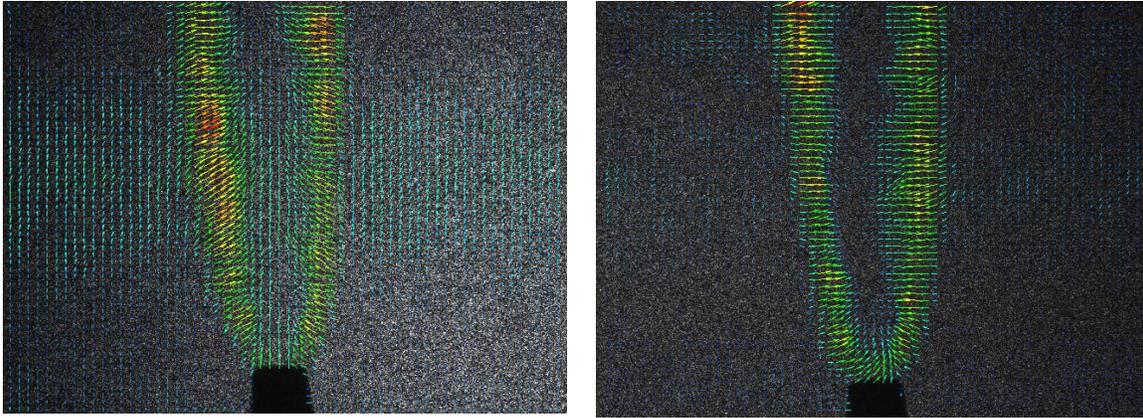
Para este experimento la resolución mínima fue de 0.5°C .Esto puede ser debido a las diferencias en el nivel de fluctuaciones que se presenta en la flama.

Tabla 5 Valores de σ_T para diferentes distancias

Distacia en eje x (m)	σ_T
-0.21	8
-0.189	8
-0.168	8
-0.147	8
-0.126	8
-0.091	8.5
-0.07	9
-0.049	15
-0.028	22
-0.007	26
0.014	24
0.035	20.5
0.056	11
0.077	7
0.098	6.5
0.119	6.5
0.14	7
0.161	7
0.182	7
0.203	7
0.21	7

4.2 Resultados experimentales para el soplete de oxiacetileno

Para este caso se obtuvieron resultados experimentales de la mezcla aire/combustible. En la figura 4-4 se muestran las imágenes de correlación cruzada para la mezcla del soplete. En el lado izquierdo de la figura 4-4a se puede observar la vista estereoscópica izquierda de la flama, mientras que la figura 4-4b muestra la vista derecha.

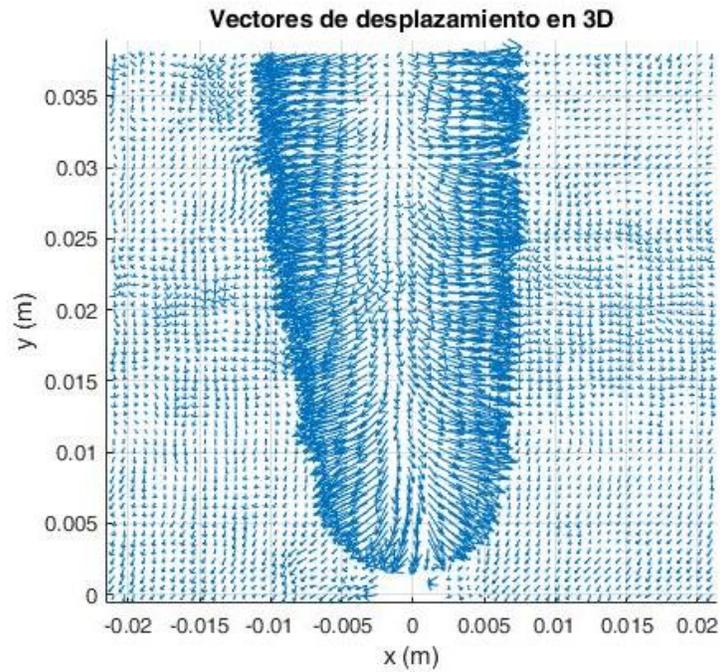


a)

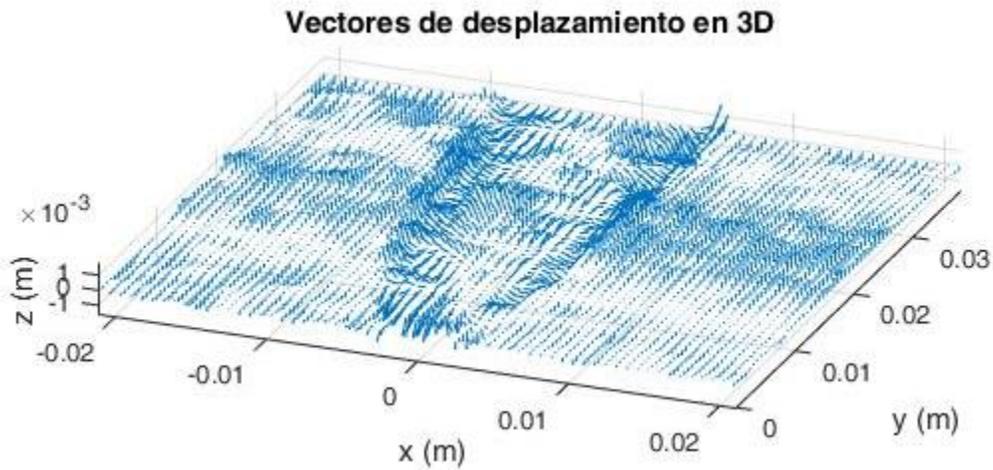
b)

Figura 4-4 Correlación cruzada de las vistas estereoscópicas a) Izquierda b) Derecha.

Se puede observar un flujo prácticamente simétrico tomando como eje la boquilla del soplete, éste flujo de convección se traslada en la dirección x en mayor proporción. En este caso en la boquilla no se observan vectores de campo como en el caso anterior de la vela y el objeto de fase es de mayor tamaño en comparación con la misma (1.5 cm vs 1 cm). A continuación en la figura 4-5 se presentan los vectores de desplazamiento en tres dimensiones del soplete.



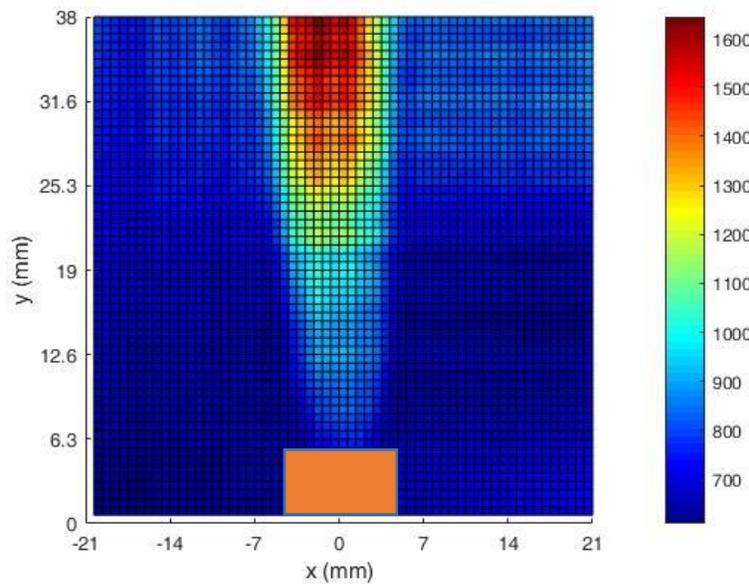
a)



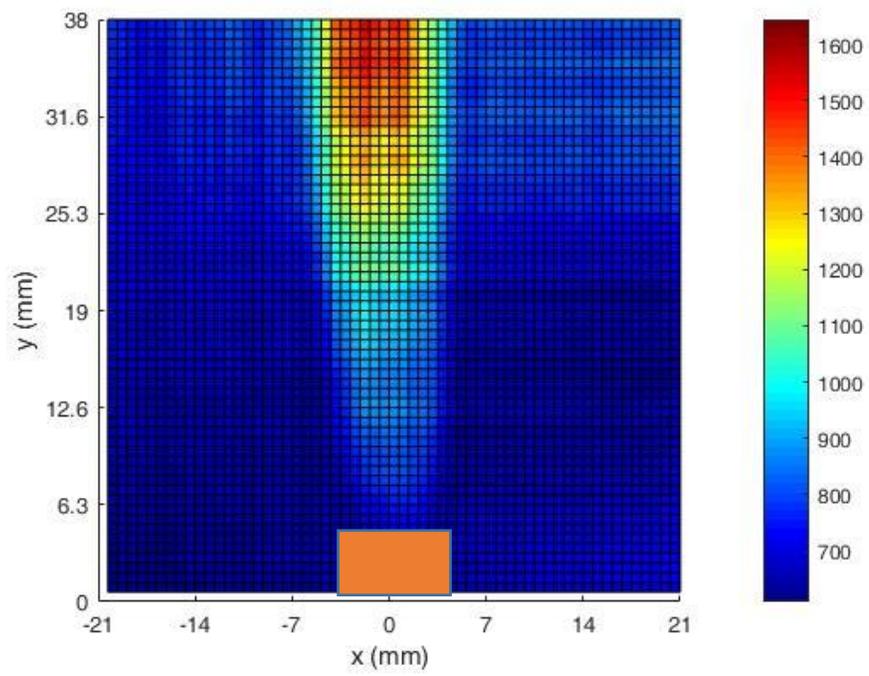
b)

Figura 4-5 Soplete a) Vectores en tres dimensiones plano xy b) Vectores de desplazamiento.

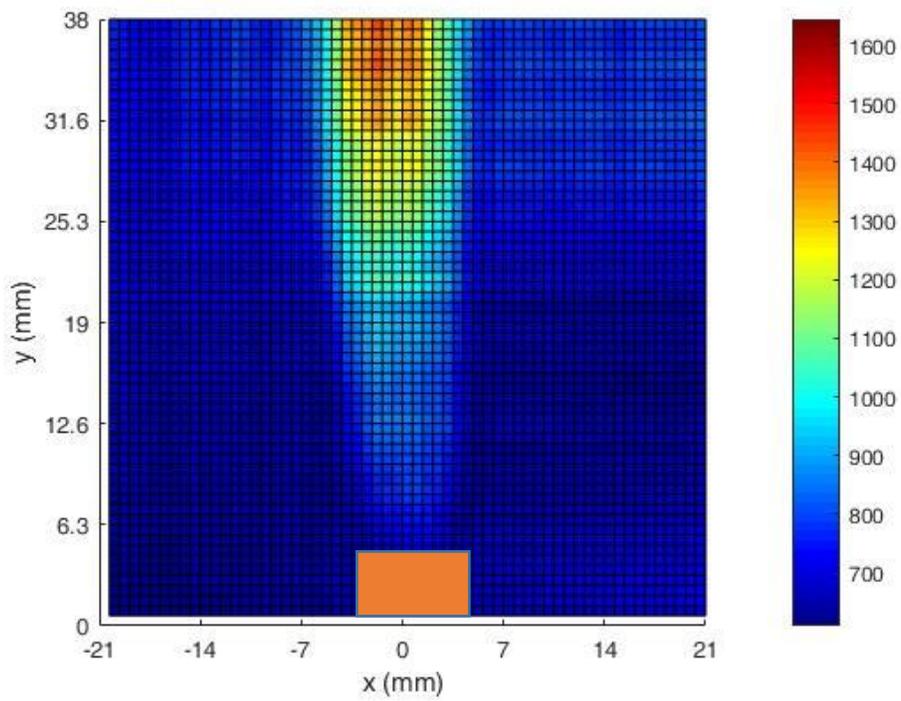
Basándose en los resultados obtenidos en la figura 4-5, y de nuevo aplicando la ecuación (13) se obtendrán los gradientes de densidad del flujo. Realizando la integración de las matrices de datos en las respectivas direcciones, se obtiene el campo de densidades del soplete, al aplicar la ecuación (54), se pueden calcular los valores de temperatura en campo completo. Los resultados finales se muestran en la figura 4-6. Los valores correspondientes de temperatura oscilan entre 700 y 1600°.



a)



b)



c)

Figura 4-6 Temperatura de Soplete a) Plano $z=0.77\text{ mm}$ b) Plano $z=1.54\text{ mm}$ c) Plano $z=2.21\text{ mm}$, el recuadro naranja indica la posición de la tobera de salida.

Como se puede observar en las imágenes el flujo al salir de la tobera es prácticamente simétrico, además de mantener un aspecto similar al de un cilindro de diámetro constante, se puede observar la tendencia de aumento de temperatura en la parte central, que como se sabe es la parte más caliente. También en comparativa con la veladora, se observa un flujo mucho más estable y por ende una mejor calidad de combustión, además de un incremento considerable en la temperatura del objeto de fase.

Un factor importante es la intensidad en los registros de los patrones de motas. Estos pueden verse afectados debido al mismo objeto de fase y al láser, teniendo un efecto negativo sobre el procesamiento de las imágenes, tanto si existe una saturación de blancos como de grises. Esto se debe en mayor parte al CCD de la cámara, ya que al encontrarse saturado se tiene una pérdida de la información generada por el desplazamiento de las motas. Estas al no ser detectables en los registros, introducen vectores erróneos al momento de utilizar correlación cruzada.

Capítulo 5 Conclusiones

En este trabajo se presenta un sistema estereoscópico para medir variables físicas en tres dimensiones. Éste es capaz de medir deformaciones en probetas, amplitud de vibración en objetos sólidos y temperatura en flujos de fluidos. El sistema óptico utilizado corresponde al conocido como mapeo de deflexión por moteado. En esta investigación se presentan únicamente mediciones de temperatura en tres dimensiones de la combustión provocada por una vela y un soplete usado para cortar metal. El sistema propuesto muestra resultados satisfactorios para los objetos analizados y los valores obtenidos de temperatura, siendo estos congruentes de acuerdo a los reportados en la literatura. De la misma manera, los resultados se verificaron utilizando un termopar tipo J, con el que se midió la temperatura exterior de la flama.

La técnica propuesta es factible para la obtención de temperatura de campo completo, esto por su naturaleza no invasiva y fácil montaje del arreglo óptico, además de la ventaja de no tener que generar un patrón por proyección como en la técnica de BOS. Cabe mencionar que los objetos de fase estudiados son simétricos y esto facilita el uso de una sola cámara.

Se puede decir que el objetivo de esta de tesis era obtener los campos de temperatura del flujo de dos objetos de fase; Una vela y un soplete de oxiacetileno, por medio de la técnica de mapeo de deflexión por fotografía de moteado. La principal contribución de este trabajo, no se remite únicamente al análisis de flamas, sino a la reconstrucción tridimensional. Este enfoque fue para en un futuro cercano poder aumentar el análisis de los fenómenos que se analizan. Desde objetos vibrantes, hasta la reconstrucción de forma.

Cabe mencionar, que se tiene ha contemplado la realización de un sistema automático para la captura de las vistas estereoscópicas, con la finalidad de minimizar tiempos, además de reducir errores acumulativos por el procesamiento de las vistas. En cuanto al estudio de los flujos de fluido, otra rama en la que se pueden realizar contribuciones es la eficiencia de combustión, esto en base a la relación existente entre la mezcla oxígeno/acetileno para el soplete, en este caso, además de poder realizar estudios sobre las zonas de combustión del fenómeno. Un factor importante a concientizar es la caracterización del sistema, así como la posible implementación de una segunda cámara, para realizar procesamientos en tiempo real.

Bibliografía

1. L.A., V. (1987). Schlieren Methods. *Israel Program for Scientific Translations*, pp 69.
2. Wolfgang, M. (1987). *Flow Visualization* (second edition ed.). Academic Press, Inc.
3. Gaydon, A.G./Wolfhard,H.G. Flames. (1960). *Flames. Their Structure Radiation and Temperature*. New York: The Macmillan Company.
4. Fristrom, R. (1995). Flame Structure and Processes. *Oxford University Press*, pp.115.
5. Kenneth Kar, Stephen Roberts, Richard Stone, Martin Oldfield and Ferench. (2003). *Instantaneous Exhaust Temperature Measurements Using Thermocouple Compensation Techniques*. SAE International.
6. Egli, P. (1960). *Thermoelectricity*. John Wiley and Sons.
7. Warren, R. (1994). *Design of Thermocouple Probes for Measurement of Rocket Exhaust Plume Temperatures*. Australia: Commonwealth of Australia.
8. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 7edition, *Cambridge University Press*, 1999.
9. E. Archibold, J.M. Burch, and A.E. Ennos. Recording of in-plane displacements by double-exposure speckle photography. *Optica Acta*, 17:883-898,1970.
10. Köpf, U., (1972): Application of Speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects, Siemens AG, Zentrale Fertigungsaufgaben, Munich, Germany, pp 347-350.
11. U., K. (1972). Application of Speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects. *Optics Comm.* 5, p. 347.

12. Debrus, S. (1972). Groundglass Differential Interferometer. *Appl. Opt. Vol. 11*, pp 853-857.
13. J. Jamin. *Pogg. Ann. .* (1856). 98. S.345.
14. Oded Kafri, Ilana Glatt. (1990). *The Physics of Moiré Metrology*. A wiley-Interscience Publication.
15. Ostroumov, G. (1950). *Doklady AN SSSR. 81, No, 5* 887.
16. Cornelio A. H. (2009) *Medición de temperatura y análisis en flujos de fluido transparentes utilizando la técnica de Schlieren*, Centro de investigaciones en Óptica, León, Guanajuato.
17. *Selected Schlieren Optics*, Editor, Jurgen R. Meyer-Arendt, General Editor Milestone Series, Brian J. Thomson, *Spie Milestone Series Volume Ms 61.1992*.
18. Robert Hook, “Of a new property in the air,” *Micrographia observation LVIII*, 217-219, London (1665).
19. L. Foucault, “Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté,” *Annales de l’Observatoire Imperial de Paris* 5, 197-237 (1859).
20. A Toepler, “Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode,” *Maximilian Cohen und Sohn, Bonn* (1864).
21. Huygens, Ch., *Ouvres Complètes*, 13, 172-173 (Nijhoff, La Haye, 1901).

22. Harald Philipp, Heribert Fuchs, Ernst Winklhofer and Georg Pretzler Flame diagnostics by light sheet imaging and by shearing interferometry, *Optical Engineering*, 1993, 32(5), pp.1025-1032.
23. Mach, E. & Weltrubsky, J. von. (1878). Über die Formen der Funckerwellen. *Sitzungsber. kaiserl. Akad. Wiss Wien, Math-Naturwiss. Kl. Abt. I* 78, 551-560.
24. Prandtl, L. Neue Untersuchung über die strömende Bewegung der Gase und Dämpfe. *Physicalische Zeitschrift*, 8(1): 23-30, 1907.
25. Schardin, H. C. Cranz. Chapter 1 of *Beiträge zur Ballistik and technischen Physic*, ed. H. Schardin. J. A. Barth, Leipzig, pp. 1-8, 1938.
26. Priti Singh, Chandra Shakher, Measurement of the temperature of a gaseous flame using a shearing plate, *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1) pp.80–85
27. J.M. Burch and J.M.J Tokarski. Production of multiple beam fringes from photographic scatterers. *Optica Acta*, 15:101-111,198
28. G. Groh. Engineering Uses of laser produced speckle patterns. In *Proc. Symposium on the engineering uses of Holography*, pages 483-497, London, 1970. University of Strathclyde, Cambridge University Press.
29. Solf K.D. (1986): *Fotografie: Grundlagen, Technik, Praxis*, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main.
30. Bracewell R.N (1978): *The Fourier Transform*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
31. Yaroslavsky L.P. (1985): *Digital Picture Processing*, Springer Verlag, Berlin.

32. Bendat J.S., Piersol A.G. (1971): *Random data: Analysis and measurement procedures*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York.
33. Brigham E.O. (1974): *The Fast Fourier Transform*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
34. Papoulis A. (1977): *Signal Analysis*, Mc Graw Hill, New York.
35. Prasad A.K., Adrian R.J. (1993): Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Exp. Fluids*, **15**, pp 49-60.
36. Prasad A.K., Jensen K. (1995): Scheimplug stereocamera for particle image velocimetry to liquid flows, *Appl. Optics*, **34**, pp. 7092-7099.
37. Prasad A.K. (2000), Stereoscopic particle image velocimetry, *Experiments in Fluids* **29**, pp 103-116.
38. Alkisar M.B. (2001). Flow Field Measurements in a screeching rectangular jet, Florida State University, Famu-Fsu College of Engineering.
39. K.S. Shannon and B.W. Butler. (s.f.). A review Associated With Thermocouple Temperature in Fire Environments. Missoula, Montana: USDA Forest Services Laboratory.
40. Malacara, E. b. (1992). *Optical Shop Testing* (Second Edition ed.). A wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Ink.
41. G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer Berlin, 2001
42. Marat, J. P. *Recherches physiques sur le feu*. CI. Ant. Jombert, Paris, 1780

43. Mach E. and J. Sommer. Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von explosionsschallwellen. Sitzungsber. D. k. Acad. D. Wiss. Math. Naturw. Cl. Wien, 75:101-130, 1877.
44. North R. J. A brief review of some recent schlieren, schlieren-interferometer, and interferometer methods. *Wehrtechnische Monatshefte*, **63**(7-supplement): 174-187, 1966.
45. Pearcey, H. H., A method for the prediction of the onset of buffeting and other separation effects from wind tunnel test on rigid models. Report 20, 631, British Aeronautical Research Council, 1958.
46. Weinberg, F. J. Optics of flames: including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics. Butterworths, London, 1963.
47. Maksutov, D. D. Tenevye metody issledovaniya opticheskikh system (*Schlieren methods in the study of optical systems*), Problems in advance physics, Vol. 23, GTTI Izdatel'stvo, Leningrad, 1934.
48. Brown G. L. and A. Rshko., On density effects and large structure in a turbulent mixing layer. *J. Fluid Mech.* **64**(4): 775-816, 1974.
49. Burton, R. A. The application of schlieren photography in fluid flow and heat transfer analysis, M. S. M. E. Thesis, University of Texas, 1951.
50. Weinstein, L. M. Large-field High-brightness focusing schlieren system. *AIAA J.*, **31**(7): 1250-1255, 1993.
51. G. S. Settles, Elizabeth B. Hackett, James D. Miller and Leonard M. Weinstein, Full-Scale Schlieren Flow Visualization. In *Flow visualization VII*, ed J. P. Crowder. Begell House, NY, 1995 pp 2-13.

52. H Richard, M. Raffel, M Rein, J. Kompenhans, G. E. A. Meier Demonstration of the applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) method
53. Gaurav Vasudeva, Damon R. Honnery and Julio Soria, Non-Intrusive measurement of a density field using the Background Oriented Schlieren(BOS) method, Fourth Australian Conference on Laser Diagnostic in Fluid Mechanics and Combustion, 2005.
54. G. E. Elsinga, B.W. van Oudheusden 1, F. Scarano1 and D.W. Watt, Assessment and application of quantitative schlieren methods with bi-directional sensitivity: CCS and BOS, Proceedings of PSFVIP-4 June 3-5, 2003, Chamonix, France.
55. S. Loose, H. Richard, T. Dewhirst, M. Raffel, Background oriented schlieren (BOS) and particle image velocimetry (PIV) applied for transonic turbine blade investigations, Institut für Strömungsmechanik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Germany
56. Rajani P. Satti, Pankaj S. Kolhe, Semih Olcmen, and Ajay K. Agrawal, Miniature rainbow schlieren deflectometry system for quantitative measurements in microjets and flames, Applied Optics, 2007, Vol. 46, No. 15.
57. <http://www.omega.com/>.
58. Kompenhans J., Raffel M., Willert C. (1996): PIV applied to aerodynamic investigations in wind tunnels, *von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1996-03, Particle Image Velocimetry.*
59. Heckmann W., Hilgers S., Merzkirch., Wagner T., (1994): PIV-Messungen in einer Zweiphasenströmung unter Verwendung von zwei CCD-Kameras, Proc. 4. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 12-14 September, Aachen, Germany.