



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

Centro de investigaciones en óptica.

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE VELOCIMETRÍA ÓPTICA PARA HACER MEDICIONES DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD.

Como requisito para obtener el grado de:
Doctor en Ciencias (Óptica)

Presenta:

M.C. Adrián Martínez González

Asesores:

Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes : _____

Dr. David Moreno Hernández : _____

LEÓN, GUANAJUATO,

MÉXICO

Enero 2014

DEDICATORIAS

Dedica este trabajo de tesis...

A mi padre:

Juventino Martínez Fuentes †

Por el amor y la formación que fomentó desde mis inicios.

A mi madre:

Rita González López †

Por el amor, comprensión, apoyo y creer siempre en mí. Gracias por todo lo que siempre me brindó, y por todos los sacrificios que realizó para que yo pudiera alcanzar cada uno de mis objetivos. Este triunfo es gracias a mi madre.

A mis hermanos:

Rosa, Alma, Elisa, Jesús y Juana.

Por el gran apoyo que siempre me entregaron en los momentos más difíciles de mi formación académica

A mi esposa:

Adela Bautista M.

Por la comprensión y gran cariño que incondicionalmente me ha ofrecido y por vigilar mis noches de desvelo cuando las cosas se ponían complicadas.

A mis amigos y compañeros de trabajo:

Por la amistad y por permitir aprender de ellos, y que han compartidos momentos alegres y difíciles en el transcurso de mi formación académica

Agradecimientos:

A mis asesores

Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes

Dr. David Moreno Hernández

Por su paciencia, enseñanza, consejos y apoyo en el desarrollo del trabajo de investigación y en la elaboración de la tesis.

A mis revisores

Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes

Dr. David Moreno Hernández

Dr. Bernardino Barrientos García

Dr. Jorge Mauricio Flores Moreno

Dr. Guillermo García Torales, CUCEI, UdG

Por sus acertadas observaciones en el desarrollo del trabajo de tesis.

A CONACYT

Un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el soporte económico proporcionado durante los estudios de doctorado.

Al Centro de Investigaciones en Óptica

Un agradecimiento especial a la institución que me dio la oportunidad de conocer excelentes amigos que laboraran en el centro y me abrió una puerta hacia el conocimiento y la ciencia

RESUMEN

La medición de la temperatura en flujo de fluidos tiene gran importancia en varias áreas de la ciencia. El fluido provocado por una placa caliente se ha estudiado extensivamente por un gran número de investigadores y tomado como un modelo de referencia para el estudio de algunas técnicas de fluidos o calibración de instrumentos. Este fenómeno es encontrado en muchas aplicaciones de ingeniería como ventiladores de enfriamiento para equipos electrónicos, calefacción, producción de energía, procesos de solidificación, colectores solares y dispositivos de almacenamiento de energía, así como en situaciones naturales en las áreas de la astrofísica, geofísica y las ciencias atmosféricas, entre otros. En los flujos de convección, además de la temperatura está involucrada la velocidad del fluido. Un flujo de convección se controla si se entiende profundamente el fenómeno físico involucrado. Por esta razón, las mediciones tanto de velocidad como de temperatura son necesarias para tener una caracterización apropiada del flujo de convección. En esta tesis mostramos que el sistema óptico de schlieren clásico, en configuración Z, nos permite medir simultáneamente velocidad y temperatura en flujos de convección. La técnica la aplicamos a flujos de convección en agua y en aire. El flujo de convección provocado con una placa de 7.3x12 cm la cual permite el control para diferentes temperaturas. Para el caso del líquido, el agua se deposita en un recipiente de 71x27x2 mm y este se coloca sobre la placa con control de temperatura. La medición de la temperatura se lleva a cabo relacionando el nivel de intensidad de cada pixel de las imágenes de schlieren a la posición de la navaja en la salida del plano focal del espejo secundario del sistema schlieren. La velocidad del flujo para el caso del agua es relativamente fácil de medir agregando partículas al fluido. En el caso del flujo de convección en aire se complica esta situación cuando las partículas no siguen el comportamiento natural del flujo, por lo que se utilizó el método de flujo óptico para calcular la velocidad del aire que fue el flujo de prueba empleado.

CONTENIDO

Dedicatorias.....	2
Agradecimientos:	3
Resumen.....	4
Contenido.....	5
Lista de Figuras.....	7
Lista de tablas.....	8
Publicaciones y congresos.....	8
Capítulo 1.	9
Introducción Temperatura y Velocidad.....	9
1.1 TÉCNICAS PUNTUALES	9
1.2 TÉCNICAS DE CAMPO COMPLETO	10
1.3 ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA DE SCHLIEREN.....	11
1.4 ARREGLOS DE SCHLIEREN PARA MEDIR CAMBIOS DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN.....	12
1.5 MEDICIÓN DE VELOCIDAD	14
1.6 SISTEMAS DE VELOCIMETRÍA DE FLUIDOS	14
1.7 FLUJO ÓPTICO (OPTICAL FLOW).....	16
Capítulo 2.	17
Técnicas para medir temperatura y velocidad.....	17
2.1 DESARROLLO TEÓRICO PARA MEDIR TEMPERATURA.....	17
2.1.1 Ecuación de un rayo que pasa a través de un medio in-homogéneo e isotrópico	17
2.1.2 La constante de Gladstone-Dale	19
2.1.3 Método para la medición de temperatura	20
2.2 MEDICIÓN DE VELOCIDAD.....	22
2.2.1 Velocimetría por imágenes de partículas	23
2.2.2 Marcadores de Flujo	24
2.2.3 Dispositivos para la captura de imágenes en sistemas piv	25
2.2.4 Fuente de Luz	26
2.3 PROPIEDADES DEL MÉTODO PIV.....	27
2.4 DESARROLLO TEÓRICO DE PIV	27
2.4.1 Densidad de Partículas en el fluido	27
2.4.2 Pulsos de Luz y técnicas de registro de imágenes.....	28
2.4.3 Análisis de las imágenes: técnicas de interrogación.....	29
2.4.4 Rastreo de partículas	29
2.4.5 Correlación Cruzada.....	30
2.4.6 Auto-Correlación.....	31
2.5 FLUJO ÓPTICO	31
2.5.1 Encontrar los bordes dentro de la imagen.....	32
2.5.2 Método flujo óptico	33
2.5.3 Método de lucas-kanade	34
Capítulo 3	40
Temperatura y velocidad en líquidos	40
3.1 INTRODUCCIÓN TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN LÍQUIDOS.....	40
3.2 MÉTODO PARA MEDIR TEMPERATURA EN LÍQUIDOS.....	40

3.3 CAMPOS DE VELOCIDAD EN LÍQUIDOS USANDO PIV.....	42
3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	43
3.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA.	44
3.6 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD	46
Capítulo 4. Temperatura y velocidad en el aire.....	50
4.1 INTRODUCCIÓN A TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL AIRE	50
4.2 MÉTODO PARA MEDIR TEMPERATURA EN EL AIRE.....	51
4.3 CAMPOS DE VELOCIDAD EN EL AIRE (FLUJO ÓPTICO).	52
4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	53
4.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA.	54
Conclusiones	59
Trabajo a futuro.....	61
Referencias	62

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ARREGLO EXPERIMENTAL DE TOEPLER.....	12
FIGURA 2. ARREGLO DE SCHLIEREN EN CONFIGURACIÓN-Z.....	14
FIGURA 3. FLUJO ÓPTICO, SE IDENTIFICAN PUNTOS DE INTERÉS Y SE REALIZA UN SEGUIMIENTO EN EL TIEMPO Y SU DESPLAZAMIENTO SE CONVIERTE EN VECTORES DE VELOCIDAD.	16
FIGURA 4. DESVIACIÓN DE UN RAYO DE LUZ EN UN OBJETO NO-HOMOGÉNEO.....	18
FIGURA 5. DESPLAZAMIENTO DE LA SECCIÓN DE LA IMAGEN DE LA FUENTE DE LUZ EN EL PLANO DEL BORDE DE LA NAVAJA EN EL SISTEMA DE SCHLIEREN.....	21
FIGURA 6. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL PÍXEL (N, M).	22
FIGURA 7. ARREGLO ÓPTICO DE UN SISTEMA PIV.....	24
FIGURA 8. DIFERENTES DENSIDADES Y TAMAÑOS DE PARTÍCULAS EN UN FLUIDO.....	28
FIGURA 9. LOS PUNTOS SELECCIONADOS DEBEN SER FÁCILES DE SEGUIR. SE RESALTAN LOS QUE SON DESEABLES COMO LAS ESQUINAS.....	33
FIGURA 10. LAS PREMISAS DETRÁS DEL MÉTODO LUCAS-KANADE PARA FLUJO ÓPTICO.	35
FIGURA 11. SEGUIMIENTO EN EL CASO DE UNA DIMENSIÓN.	36
FIGURA 12. ITERACIÓN PARA REFINAR LA SOLUCIÓN DE FLUJO ÓPTICO (MÉTODO DE NEWTON).	37
FIGURA 13. FLUJO ÓPTICO BIDIMENSIONAL EN UN SOLO PÍXEL.....	37
FIGURA 14. PROBLEMA DE LA APERTURA: CUANDO UN OBJETO ESTÁ DESCENDIENDO, A TRAVÉS DE LA VENTANA DE APERTURA (FILA SUPERIOR) SOLO VEMOS UN BORDE MOVIÉNDOSE HACIA LA DERECHA.....	38
FIGURA 15. ARREGLO SCHLIEREN EN CONFIGURACIÓN Z EN EL ÁREA DE PRUEBA SE COLOCÓ UN CONTENEDOR CON AGUA.	41
FIGURA 16. MONTURA DE TRASLACIÓN EN UN EJE CON PASO DE 1.25 μ M.	41
FIGURA 17. EFECTO DE MOVER LA NAVAJA DESDE UNA POSICIÓN MÁXIMA A UNA MÍNIMA. A UN 90% IMAGEN IZQUIERDA, Y A UN 20% IMAGEN DERECHA.....	42
FIGURA 18. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA DE IMÁGENES SCHLIEREN.	44
FIGURA 19. IMÁGENES UTILIZADAS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN SIN FLUJO.	45
FIGURA 20. IMÁGENES EXPERIMENTALES DEL FLUJO PARA MEDICIONES SIMULTANEAS DE SCHLIEREN Y PIV.	45
FIGURA 21. A-D, EJEMPLO DE PATRONES EN IMÁGENES SCHLIEREN A DIFERENTES TEMPERATURAS, E-H GRAFICA DE CONTORNOS DE LOS CAMPOS DE TEMPERATURA.	46
FIGURA 22. IMÁGENES TÍPICAS DE PARTÍCULAS DE LAS MEDICIONES DE PIV, LAS IMÁGENES A Y B ESTÁN TOMADAS CON UN TIEMPO DE SEPARACIÓN DE 1/15 S CON PARTÍCULAS DE 50 μ M.....	47
FIGURA 23. DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS ENCONTRADAS CON EL MÉTODO DE PIV APLICADO A LA CONVENCION NATURAL DEL AGUA AL CALENTARSE.....	48
FIGURA 24. A) IMAGEN DE SCHLIEREN ORIGINAL, B) ANÁLISIS DE TEMPERATURA, C) CAMPO DE VECTORES DE VELOCIDAD, D) TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE LA MISMA REGIÓN DE INTERÉS.	49
FIGURA 25. ESQUEMA DE SCHLIEREN EN CONFIGURACIÓN Z USADO PARA APLICAR LA TÉCNICA DE FLUJO ÓPTICO.	51
FIGURA 26. IMÁGENES UTILIZADAS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN CON EL RECIPIENTE PARA CONFINAR EL FLUJO DE FLUIDO DE AIRE.	52
FIGURA 27. FLUJO NATURAL DEL AIRE SIN CONFINAR AL SER CALENTADO.	53
FIGURA 28. PLACA CON TEMPERATURA CONFIGURABLE DE LA COMPAÑÍA TORREY PINES SCIENTIFIC.....	53
FIGURA 29. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE IMÁGENES SCHLIEREN APLICANDO LA TÉCNICA DE FLUJO ÓPTICO.	54
FIGURA 30. IMÁGENES SCHLIEREN INSTANTÁNEAS Y SUS GRADIENTES DE TEMPERATURA, A-B) FLUJO DE FLUIDO SIN CONFINAR; C-D) FLUJO DE FLUIDO CONFINADO.	55
FIGURA 31. PROMEDIO DE LOS CAMPOS DE TEMPERATURA USANDO 100 IMÁGENES SCHLIEREN PARA UN FLUJO CONFINADO (Izq.) Y NO CONFINADO (DER.).....	56
FIGURA 32. IMÁGENES DE SCHLIEREN A DIFERENTES INSTANTES DE TIEMPO CON SUS RESPECTIVOS CAMPOS DE VELOCIDAD, A-C FLUJO SIN CONFINAR, D-F FLUJO CONFINADO.	57
FIGURA 33. A Y E IMÁGENES OBTENIDAS CON EL ARREGLO SCHLIEREN, B Y F ANÁLISIS DE TEMPERATURA, C Y G CAMPOS DE VELOCIDAD, D Y H TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE LA MISMA REGIÓN DE INTERÉS PARA UN FLUJO CONFINADO (SUPERIOR) Y SIN CONFINAR (INFERIOR).	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes de Gladstone-Dale para el aire a 288 Kelvin.....	22
Tabla 2. Tipos de marcadores de flujo usualmente empleados en PIV.	26

PUBLICACIONES Y CONGRESOS

A. Martínez González, J. A. Guerrero Viramontes, D. Moreno Hernández. **“Temperature and velocity measurement fields of fluids using a schlieren system”**, Appl. Opt. Vol. 51, No.16, pp. 3519–3525 (2012).

A. Martínez González, D. Moreno Hernández, J. A. Guerrero Viramontes. **“Measurement of temperature and velocity fields in a convective fluid flow in air using schlieren images ”**, Appl. Opt. Vol. 52, No. 22, pp. 5562-5569, (2013).

Adrian Martínez González, J Ascención Guerrero Viramontes.

VI Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, 13-15 Mayo 2009

“Calculo de velocidad en fluidos utilizando velocimetría por imágenes de partículas (PIV) :Particle Tracking”. (2009).

A. Martínez González, J. A. Guerrero Viramontes, D. Moreno Hernández.

XXIII Reunión Anual de Óptica, 6-8 Septiembre 2010

“Caracterización de un arreglo experimental para medir posición de partículas en 3d con una alta resolución espacial”, (2010).

A. Martínez González, J. A. Guerrero Viramontes, D. Moreno Hernández

Curso Taller de Visualización de flujos, 29-30 Septiembre 2010

“Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)”, (2010)

A. Martínez González.

Escuela-taller, 8-12 Agosto 2011

“II Escuela de Óptica Biomédica”, (2011)

A. Martínez González, J. A. Guerrero Viramontes, D. Moreno Hernández

22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22), 15-19 Agosto 2011

“Characterization of an experimental arrangement to measure position of particles in 3D with a high accuracy”, (2011)

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN TEMPERATURA Y VELOCIDAD

Existen varios métodos o técnicas ingenieriles, cuyo objeto de estudio o análisis está centrado en objetos que son transparentes, conocidos como objetos de fase. Algunos de estos objetos pueden ser flamas, fluidos o vidrios. También puede ser un tejido humano o algún otro objeto semitransparente que permita el paso de la luz a través de éste. El estudio de estos objetos ocurre también en varios escenarios dedicados a la investigación y, en este trabajo de tesis, se estudió la convección natural del agua y el aire al calentarse, produciéndose el fenómeno de variación del índice de refracción de estos fluidos. El hecho de que los fluidos sean transparentes o semitransparentes, permite utilizar técnicas ópticas para determinar el comportamiento del fluido bajo ciertas condiciones, lo que ha sido de interés científico desde hace tiempo. De la aplicación de éstas técnicas se pueden deducir variables como la temperatura o los campos de velocidad.

En el contexto del estudio de la dinámica de la convección natural de fluidos, las técnicas ópticas usadas para medición de temperatura son factibles por ser de campo completo y no perturbar al flujo de prueba. Estas técnicas miden el cambio de fase de un frente de onda que atraviesa objetos de prueba o de fase, y estos objetos de fase usualmente tienen una distribución de índice de refracción no uniforme. Existen fenómenos físicos que afectan al índice de refracción y entonces esta afectación se relaciona con la temperatura, la densidad y presión. Los métodos ópticos sirven para medir cambios de índice de refracción y por consiguiente se relaciona con la temperatura que es uno de los parámetros que frecuentemente se miden en una gran variedad de aplicaciones. Ya que estas mediciones impactan de varias formas al mundo de la física, química y la biología, han surgido varias técnicas ópticas y no ópticas para poder medir temperatura, hay de contacto, no contacto, puntuales y de campo completo. A continuación se da una breve reseña de las técnicas que miden de forma puntual y después las técnicas de campo completo aplicadas a la medición de temperatura

1.1 TÉCNICAS PUNTUALES

A continuación algunas técnicas puntuales son descritas:

Los métodos de hilo-caliente (Hot-Wire methods), cuyo funcionamiento básico está en usar un alambre inmerso en un fluido y entonces se procede a medir la temperatura de este alambre, lo cual se puede hacer en tres formas [1]: midiendo su resistencia eléctrica, por termo electricidad o por su brillantez.

La termometría por resistencia, 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.

La termometría por termo electricidad, consiste de una unión bimetálica y a través de la propiedad termoeléctrica de este tipo de unión, llamada efecto *Seebeck*, se genera un

potencial eléctrico cuando existe una diferencia de temperaturas en las uniones. Este potencial puede ser monitoreado con un medidor de voltaje y así obtener la correspondencia entre la temperatura y el voltaje. Lo más común es usar un termopar ya que tiene aleaciones de Platino-Iridio los cuales tienen un elevado punto de fusión.

La termometría por pirómetro óptico, entre sus ventajas es que no invade el material a medir. Su funcionamiento se basa en la radiación de los cuerpos, su rango de temperatura se encuentra entre los -50 a 4000 grados Celsius. En pirómetros comerciales, el filamento de una lámpara incandescente es superpuesto ópticamente con la imagen del objeto a medir, la temperatura del filamento se ajusta cambiando el voltaje hasta que las temperaturas del filamento y del sistema analizado se igualan. La calibración de este aparato se hace con la ayuda de un cuerpo negro. Las emisiones de los sistemas pueden ser muy débiles en el visible, por lo que se requiere agregar a las flamas cierto tipo de materiales en polvo tales como sales de sodio, litio, hierro, yodo, etc. para aumentar su visibilidad.

1.2 TÉCNICAS DE CAMPO COMPLETO

Las técnicas de campo completo se basan en el principio físico de que cualquier cuerpo caliente en contacto con aire, transferirá calor a éste y, al haber diferencia de temperaturas, también habrá diferencia de densidades. Esto se traduce en cambios del índice de refracción. Estas diferencias de índices de refracción desviarán la dirección de un rayo de luz propagándose a través del aire actuando como una lente. Estas deflexiones no las podemos detectar a simple vista por lo cual necesitamos instrumentos ópticos para visualizarlas y después cuantificarlas [2]. Algunas de las técnicas utilizadas para este fin, son: Mapeo de deflexión por fotografía de moteado, método de rejilla fuera de foco, holografía digital, interferometría y prueba de la navaja o schlieren.

El mapeo de deflexión por fotografía de moteado, es una técnica que sirve para medir desplazamientos y deformaciones en el plano. En este sistema óptico la fuente de luz que se utiliza es por lo regular un láser de He-Ne. Esta luz se expande con un filtro espacial y después se colima con una lente, el cual pasa a través del vidrio esmerilado conteniendo gránulos distribuidos en forma aleatoria. Una segunda lente 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 diferente al medio 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 los casos estudiados, es un flujo de fluido transparente.

El método de rejilla fuera de foco, se deriva del método cualitativo de *V.Ronchi* utilizado para el estudio de aberraciones de componentes ópticas. Este método mide los ángulos de deflexión de los rayos que deforma la rejilla al haber un flujo de prueba. Las rejillas pueden ser de diferente forma como: líneas paralelas, círculos concéntricos, 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 por lo que en ocasiones se prefieren aplicar el efecto moiré, que ocurre cuando dos rejillas se superponen una sobre

la otra, y rotadas un cierto ángulo forman franjas de intensidad por la interferencia de estas rejillas, éste método puede funcionar con cualquier tipo de luz, siendo muy fácil su implementación.

La interferometría, es una técnica óptica que utiliza la interferencia de la luz de dos frentes de onda, esto se logra al pasar un haz de luz a través de un objeto transparente al combinarse en una pantalla con otro haz de referencia. la fuente de iluminación utilizada en este tipo de sistema debe de tener alta coherencia espacial y temporal. El interferómetro más utilizado es el de *Mach-Zehnder*, este método es sensible a los cambios de fase causados por el objeto de prueba. Una de las razones por la cual se utiliza el interferómetro de *Mach-Zehnder* es porque los brazos forman un rectángulo, y se pueden hacer tan grandes o tan separados como el objeto de prueba lo requiera. Este instrumento es sensible al cambio de índice de refracción, como puede ser la presencia de un flujo de fluido que cambia alguna de sus propiedades físicas como temperatura, presión o composición química.

La técnica de schlieren, se basa en el principio de que cuando un objeto de fase con índice de refracción variable se coloca entre los espejos del arreglo schlieren que coliman la luz proveniente de una fuente puntual, ocurre un desplazamiento en la dirección de los rayos incidentes en el plano de observación. Esta desviación en los rayos de luz es proporcional a las variaciones del índice de refracción del objeto bajo estudio, y para el caso de flujos de fluido, esta variación en el índice de refracción se puede relacionar con la densidad del fluido y entonces se puede obtener la medición de la temperatura utilizando la relación de Gladstone-Dale.

1.3 ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA DE SCHLIEREN

La palabra schlieren proviene de la palabra en alemán “schliere” que significa no homogéneo, que para este caso son 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, L. Foucault y A. Toepler [3], 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* [4]. Jean Paul Marat, publicó un volumen nombrado “*La Física del Fuego*”, que contenía aparentemente la primera imagen de la visualización óptica de un flujo óptico nunca impresa [5]. Leonard Foucault [6] realizó importantes contribuciones a la óptica de medios inhomogéneos. En sus experimentaciones desarrolló la prueba de la navaja para espejos utilizados en telescopios astronómicos y era la primera vez que se utilizaba (pupila, diafragma, filtro o borde de navaja) externa a la pupila del ojo humano para producir imágenes de schlieren. August Toepler reinventó algo similar a la técnica de schlieren en 1859 y la nombró conforme a lo que el observaba, en la Fig. 1 se muestra el arreglo de Toepler [7,8]. Quien reconoció a la técnica schlieren como una herramienta invaluable, fue Ernst Mach [9] quien contribuyó en el desarrollo de la dinámica de gases. Mach combinó la fotografía con schlieren y estos desarrollos permitieron la medida precisa de la velocidad de las ondas. En Alemania a la técnica de schlieren la utilizaba L. Prandtl [10] como herramienta clave para liderar la dinámica de fluidos. Carl Cranz y sus estudiantes como H. Schardin [11], proveen por primera vez un marco teórico sólido de la teoría de schlieren por

imágenes. Usando la técnica de schlieren de filtro graduado propuesto por North [12] y otras mediciones, H. Pearcey [13], estudió el flujo sobre alas transónicas en un túnel de viento. Otro pionero del método de schlieren fue F. J. Weinberg, en su libro clásico "*Optics of flames*" [14], contiene comentarios acerca de la teoría de schlieren y shadowgraph. Es él quien propone el nombre de *Shadowgramas*. Investigadores rusos intervinieron en el desarrollo de métodos de schlieren. El investigador ruso D. D. Maksutov [15] famoso por la fabricación de telescopios publicó un libro en 1934 titulado "*schlieren methods in the study of optical systems*". Él introdujo el alambre o filamento como elemento cortador en vez del borde de la navaja. El investigador Vasil'ev [16] empezó su carrera aplicando instrumentos de schlieren en interferometría a fenómenos de la dinámica de gases del programa espacial Soviético.

Así pues, las imágenes de schlieren y shadowgraph han impactado importantemente a la ciencia y la tecnología. Brown y Roshko [17], publicaron un trabajo donde con la utilización de shadowgraph observaron estructuras coherentes en la mezcla de dos flujos planos de gas. Ralph Ashby Burton [18] y varios contemporáneos desarrollaron independientemente la idea de óptica de schlieren con fuente extendida, sugerida anteriormente por Schardin. Más recientemente esta idea ha sido desarrollada en la NASA por M. Weinstein. En 1990 Weinstein [19] puso su atención a las técnicas de schlieren con lentes y rejillas. Weinstein y G. S. Settles, discutieron la idea de la aplicación de schlieren a larga escala fuera del laboratorio [20]. La lista de investigadores continúa creciendo día con día, ya que aún se sigue trabajando sobre este tema y continúan surgiendo nuevas y extraordinarias aplicaciones.

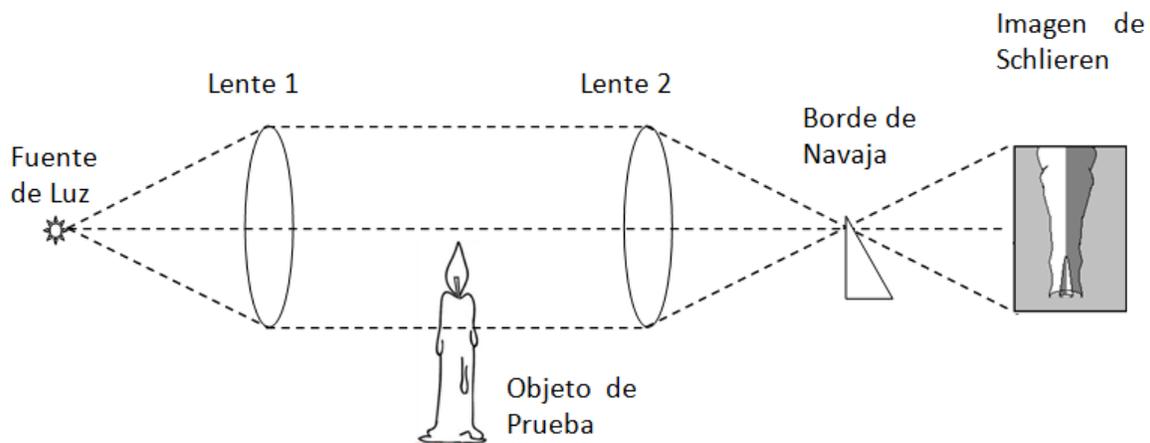


Figura 1. Arreglo Experimental de Toepler.

1.4 ARREGLOS DE SCHLIEREN PARA MEDIR CAMBIOS DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Existen una variedad de arreglos del sistema schlieren propuestos por varios autores que utilizan diferentes componentes como lentes, espejo, rejillas, vidrios esmerilados entre otros. También se han utilizado diferentes fuentes de luz como son de filamento, lámparas de mercurio, sodio, xenón, láser y últimamente diodos de luz blanca. Así también en lugar

de bordes de navaja se han utilizado filtros de color y máscaras de diferente forma. Cambiando las componentes anteriores dan lugar a diferentes tipos de arreglos de schlieren tales como el arreglo de Toepler y sus variantes, Background Oriented Schlieren (BOS) y Rainbow Schlieren.

El arreglo de Toepler, dependiendo del objeto que se quiera visualizar y de la aplicación que se quiera efectuar, el arreglo Toepler se puede modificar de muchas formas. Lo anterior se puede realizar ya sea utilizando lentes, espejos, prismas etc., como se puede observar en la Fig. 2 que muestra el arreglo de schlieren de configuración-Z. Este tipo de arreglo consta de una fuente de luz, filtro espacial, dos espejos esféricos, borde de navaja y un sistema formador de imágenes. La ventaja de este arreglo schlieren es que las lentes del sistema original de Toepler se cambian por los dos espejos, como estos pueden tener un diámetro muy grande, entonces da la posibilidad de aumentar el tamaño de la región de prueba ya que los espejos se pueden fabricar de mayor diámetro que las lentes. La desventaja es que los espejos pueden tener aberraciones de coma y astigmatismo. La sensibilidad de este sistema se puede incrementar con el aumento de la distancia focal de los espejos.

La técnica de Background Oriented Schlieren (BOS): que también se le conoce como schlieren con fondo orientado, es una técnica relativamente nueva, parecida a la interferometría y fotografía de moteado. Uno de los primeros que utilizó esta técnica fue Köpf (1972) [21]. Esta técnica ofrece las ventajas de que se puede obtener información de un flujo de fluido ya sea cualitativa o cuantitativamente [22]. Al introducir un objeto transparente entre el fondo granulado y el sistema formador de imágenes se obtendrá en la pantalla una imagen del objeto causado por el cambio de índice de refracción del mismo. Para obtener la información del fluido es necesaria una imagen de referencia sin flujo, y para obtener información de las imágenes de la prueba con flujo se utilizan métodos de correlación.

Rainbow Schlieren o schlieren de color: es un tipo de arreglo que puede cuantificar densidad de un flujo de fluido transparente como los gases. El arreglo experimental es básicamente el mismo que el utilizado por el método de Toepler, la única diferencia es que en lugar de borde de navaja se utiliza un filtro de color, colocado en el foco de la lente 2. Al cambiar el borde de la navaja por el filtro de color también cambiará la imagen en el sistema visualizador o de captura por lo tanto es imperativo utilizar una cámara de color y por consiguiente también una fuente de luz blanca. Si se observa un objeto con cambios de índice de refracción, se desviarán los rayos de luz un cierto ángulo y estos al pasar por el plano focal de la lente 2 se desviará cierta distancia del eje del sistema, tocando al filtro en un color correspondiente al grado de desviación, como hay rayos que se desvían más que otros se formará una imagen con sombras de diferentes colores. La mayoría de las técnicas ópticas empleadas para determinar el índice de refracción en fluidos en tres dimensiones emplea la integración a lo largo de un camino óptico, lo que produce un promedio de la medición de las variables temperatura y velocidad. Sin embargo las mediciones locales de dichas variables no pueden ser determinadas de una sola imagen. Pero para flujos de fluido en dos dimensiones es posible determinar la temperatura y velocidad promedio en la dirección de la iluminación por lo que se prefiere el arreglo schlieren entre las otras técnicas ópticas que existen.

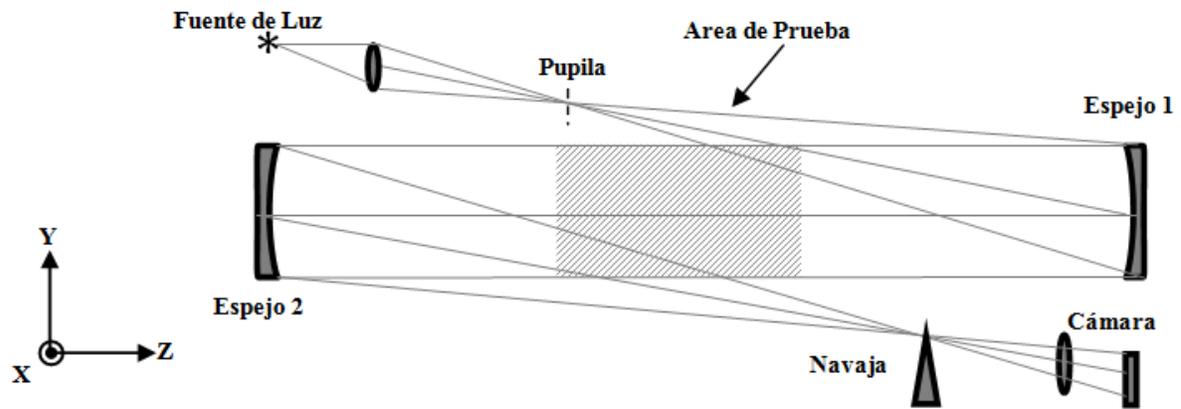


Figura 2. Arreglo de schlieren en configuración-Z.

1.5 MEDICIÓN DE VELOCIDAD

Entre los sistemas actuales de medición que permiten obtener la velocidad de los fluidos, la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés), tiene gran importancia en la comunidad industrial y científica, ya que posee características muy relevantes. Entre ellas están el registrar en una misma lectura el comportamiento de todo un plano o volumen del flujo medido, además de ser un sistema de medición no intrusivo al medio bajo análisis. Por otro lado, la gran versatilidad, potencialidad y robustez de la técnica hace posible su empleo en diferentes ambientes incluso aquellos considerados hostiles para otras técnicas de medición. Dentro de las aplicaciones de la técnica de PIV en líquidos se encuentran la convección térmica, estudio y movimiento de las olas del mar, interacción de líquidos con aspas, y corrientes incidentes entre otros [23]. La técnica de PIV es un método de medición indirecta de velocidad de flujos, ya sean líquidos o gaseosos, y su funcionamiento consiste en introducir partículas o “sembrar” partículas en el fluido bajo estudio. Dichas partículas se mueven junto con el fluido siguiendo su movimiento de la manera más fiel posible, este fluido sembrado con las partículas o marcadores se iluminan con destellos de una luz de muy alta intensidad en forma de hoja o lamina al mismo tiempo que se adquieren imágenes y que, posteriormente, se analizan para determinar la distancia recorrida por los marcadores. Midiendo el tiempo entre las tomas sucesivas que se hacen de las partículas se puede calcular su velocidad, la cual es, por consecuencia, la velocidad del fluido. De las características importantes de la técnica de PIV es que el equipo de medición no tiene contacto físico con el medio a analizar, de tal manera que se evitan las alteraciones externas indeseadas. Además, el registro de información se hace sobre toda una región, con lo cual se puede obtener un mapa de velocidades de campo completo a diferencia de los métodos puntuales existentes para medir velocidad en los fluidos.

1.6 SISTEMAS DE VELOCIMETRÍA DE FLUIDOS

En la actualidad, además de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas, se emplean diferentes métodos para la medición de velocidad en fluidos. Algunos de ellos necesitan de un sensor que se introduce en el fluido estudiado, y otros métodos son similares al PIV pero con características propias. A continuación se presenta una breve

reseña de los sistemas más representativos de velocimetría de fluidos entre las que están: Anemometría por alambre/película caliente, velocimetría láser-Doppler, velocimetría láser de patrones de moteado y flujo óptico.

Anemometría por Alambre/Película Caliente (*Hot Wire/Film Anemometry, HWA*): Esta técnica forma parte de los llamados sistemas de medición intrusivos, es decir aquellos que por la presencia de una punta de medición en el campo bajo estudio, afectan de manera indeseada sus propiedades. En estos casos la técnica consiste en introducir en el fluido un alambre o una delgada lamina que se calienta por el paso de una corriente eléctrica, entonces por conducción térmica con el fluido el elemento sensor se enfría de manera proporcional con la velocidad del flujo y se trata entonces de mantener una temperatura constante en el alambre o lamina variando el voltaje o corriente que se le aplica, esta es una medición indirecta del flujo o el número de Reynolds y que se puede obtener mediante tablas de calibración correspondientes [24]. Una desventaja sobre este tipo de medición es que, aunque estas técnicas proporcionan datos precisos, las mediciones son puntuales y por ello no se puede reconstruir la estructura del campo de velocidad del fluido completo. Si se colocan varias terminales de medición, o se realiza una exploración del área de estudio, es posible tener datos simultáneos de toda una zona, pero su efectividad está limitada al número de puntas que se pueden colocar y la implementación de tales configuraciones implica un incremento en la complejidad y costo de los sistemas.

La Velocimetría por Láser-Doppler (*Láser Doppler Velocimetry, LDV*): Esta técnica es de tipo no intrusivo, es decir no altera al medio de estudio con la presencia de sensores u otros dispositivos. En este arreglo, dos haces de luz láser provenientes generalmente de una misma fuente, son dirigidos hacia un punto en común de un fluido que contiene partículas. Estas partículas que se mueven dentro del fluido, dispersan la luz de ambos haces la cual es captada por un fotosensor, y la diferencia de fase detectada contiene una medición indirecta del fluido por medio del efecto Doppler. Si en el sistema se utilizan más pares de haces de luz láser con distintas longitudes de onda, entonces es posible distinguir la segunda o tercera componente de velocidad del fluido. La técnica LDV tiene más ventajas que los métodos HWA en el sentido de que no perturba el comportamiento natural del fluido analizado, sin embargo, sigue siendo un método de medición puntual. No obstante también se puede hacer un barrido en la zona de estudio para obtener valores de velocidad en toda un área.

Velocimetría Láser de Patrones de Moteado (*Láser Speckle Velocimetry, LSV*): Este arreglo óptico, se basa en el principio de interferencia en superficies no especulares. Sucede cuando un haz de luz coherente es dispersado por superficies sólidas. Parte de esa luz se interfiere, formando regiones con puntos oscuros debido a la interferencia destructiva conocidos como patrones de moteado. En el estudio de un fluido mediante este método, se introducen en el fluido partículas de tal modo que se superpongan en la imagen del área de estudio, la cual es iluminada con una hoja de luz láser pulsada, una hoja de luz es un frente de onda elíptico, con propiedades adquiridas de la lente cilíndrica que la forma. Las diferencias aleatorias de fase entre partículas individuales forman patrones de interferencia conocidas como moteado láser (láser speckle) el cual se captura mediante un CCD y esta imagen capturada con la técnica LSV se analiza mediante el método de franjas de Young [25]. El método LSV es de tipo no intrusivo tiene la ventaja de adquirir la información de toda un área, como desventaja en el análisis de datos es lento al no contar

con un sistema automatizado. Y cuando se procesan grandes volúmenes de información consume un periodo de tiempo demasiado grande.

1.7 FLUJO ÓPTICO (OPTICAL FLOW)

Flujo Óptico, es otra técnica para medir desplazamiento de un fluido. Frecuentemente se analizan fluidos en los que, por las propias características del mismo, no se les puede agregar partículas como a la técnica de PIV, donde a través del movimiento de las partículas se pueda deducir el comportamiento del mismo. Por consiguiente para medir la velocidad de un fluido con la técnica de Flujo Óptico se requieren dos imágenes consecutivas, donde su contenido cambia de manera gradual entre cuadros. Entonces se asocia el desplazamiento de cada pixel en las imágenes con la velocidad del fluido al comparar dos imágenes consecutivas. Este movimiento es equivalente al desplazamiento de un pixel con la imagen previa usualmente nos referimos a esto como densidad del flujo óptico. En el método propuesto por Horn-Schunk [26], calcula la velocidad del campo analizando una ventana alrededor de un pixel de una imagen con respecto a la otra. Esto nos lleva al caso de la técnica de flujo óptico y los algoritmos de este tipo especifican de antemano el subconjunto de puntos que han de ser rastreados. Estos puntos tienen propiedades interesantes como las esquinas o cambios bruscos de nivel de intensidad, lo cual facilita su análisis, tal como se muestra en la Fig. 3, donde se identifican puntos en la imagen, se calcula la velocidad individual de cada punto y se analiza el desplazamiento de todo el campo.

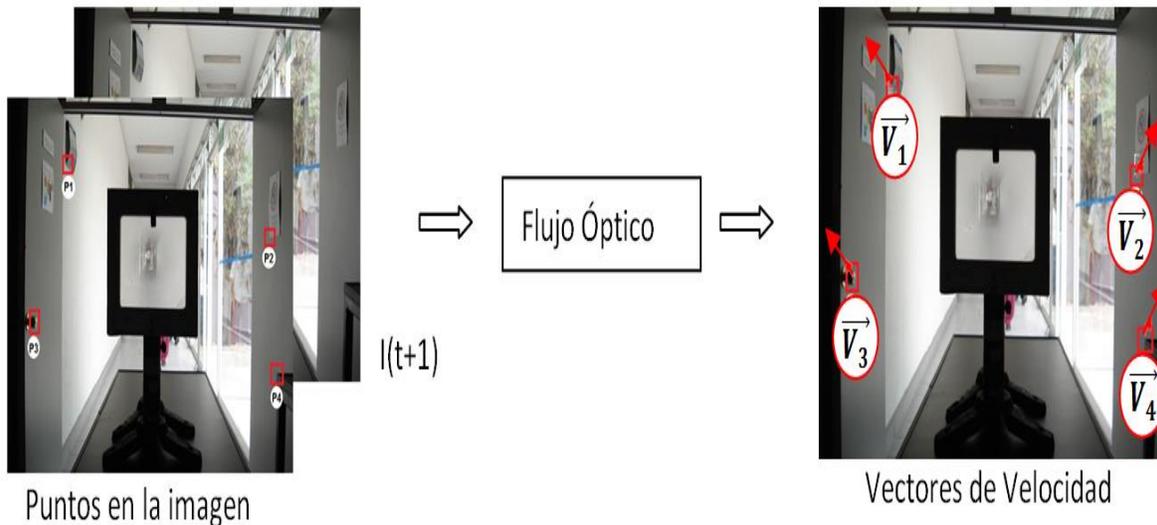


Figura 3. Flujo óptico, se identifican puntos de interés y se realiza un seguimiento en el tiempo y su desplazamiento se convierte en vectores de velocidad.

CAPÍTULO 2.

TÉCNICAS PARA MEDIR TEMPERATURA Y VELOCIDAD.

2.1 DESARROLLO TEÓRICO PARA MEDIR TEMPERATURA

En el transcurso de este capítulo se muestra el procedimiento para medir temperatura en un flujo de fluido usando la técnica schlieren. El arreglo óptico utilizado se muestra en la Fig. 2 y consta de una fuente de luz (Led Blanco), dos espejos esféricos (con distancia focal, $f=152\text{mm}$), una navaja colocada en el plano focal del segundo espejo y un plano de observación conformado por una cámara digital (Lumenera, Lum175). Cuando un objeto de fase con índice de refracción variable, $n(x, y, z)$, se coloca entre los espejos, ocurre un desplazamiento δx en la dirección de los rayos incidentes en el plano de observación. Esta desviación en los rayos de luz es proporcional a las variaciones del índice de refracción, y para el caso de un flujo en un fluido, ésta variación en el índice de refracción se puede relacionar con la densidad del fluido.

2.1.1 ECUACIÓN DE UN RAYO QUE PASA A TRAVÉS DE UN MEDIO INHOMOGÉNEO E ISOTRÓPICO

Cuando un rayo de luz pasa a través de un medio no-homogéneo e isotrópico sufre una desviación en su trayectoria un cierto ángulo [27]. Este ángulo depende del índice de refracción y del grosor del medio bajo prueba. La ecuación de la trayectoria de un rayo que pasa a través de un medio no-homogéneo viene dada por la Ec. 1 [28].

$$\frac{d(np')}{ds} = \nabla n \quad (1)$$

Donde, $n = n(x, y, z)$ es el índice de refracción, $p = p(x, y, z)$ es un vector de posición, p' es la derivada de p respecto a $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ que representa la longitud de arco. En la Fig. 4 se muestra la trayectoria de un rayo al entrar a un medio con índice de refracción variable. El rayo se propaga en la dirección z , dentro del medio, que va de ζ_1 a ζ_2 . Si consideramos que el rayo de luz que entra al medio inhomogéneo sufre desviaciones de ángulo muy pequeñas, podemos hacer la siguiente aproximación $ds = dz$. Así, la Ec.1 se transforma en la Ec. 2.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(n \frac{\partial x}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(n \frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial y}$$

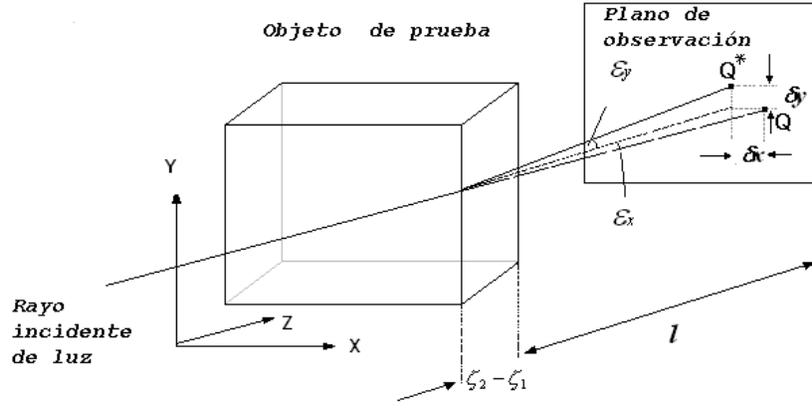


Figura 4. Desviación de un rayo de luz en un objeto no-homogéneo.

Integrando la Ec. 2 a lo largo de la dirección z , se obtiene la Ec. 3.

$$\begin{aligned} \left(n_2 \frac{\partial x}{\partial z}\right)_{\zeta_2} - \left(n_1 \frac{\partial x}{\partial z}\right)_{\zeta_1} &= \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial x} dz \\ \left(n_2 \frac{\partial y}{\partial z}\right)_{\zeta_2} - \left(n_1 \frac{\partial y}{\partial z}\right)_{\zeta_1} &= \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (3)$$

Donde, $n_1 \sim n_2 \sim 1$ es el índice de refracción en la interface entre aire y medio no-homogéneo, y a partir de la Fig. 4 se obtienen las siguientes relaciones donde l es la distancia medida desde el medio no homogéneo hasta el plano de observación.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial x}{\partial z} \right|_{\zeta_1} &= \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{\zeta_1} = 0, \\ \left. \frac{\partial x}{\partial z} \right|_{\zeta_2} &= \frac{\delta x}{l} = \tan \varepsilon_x, \\ \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{\zeta_2} &= \frac{\delta y}{l} = \tan \varepsilon_y \end{aligned} \quad (4)$$

Podemos escribir la Ec. 3 quedando como sigue.

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon_x &= \frac{\delta x}{l} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial x} dz, \\ \tan \varepsilon_y &= \frac{\delta y}{l} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (5)$$

La Ec. 5 muestra cuantitativamente los cambios de índice de refracción de un objeto con medio no-homogéneo. Para describir el mismo objeto de prueba utilizado en el campo de la óptica pero ahora en el campo de la dinámica de fluidos, se utiliza la terminología de

campos de densidad de flujos compresibles e incompresibles. El método de schlieren es sensible a los cambios de la primera derivada del índice de refracción, n [27]. Este sistema mide la desviación del ángulo ε descrito por la Ec. 5, el interés en este trabajo es medir estas desviaciones y relacionarlas con la densidad del fluido que se analiza. El siguiente paso en el desarrollo matemático es poner la ecuación en función de la densidad. Por lo que se asume que para ángulos pequeños la $\tan \varepsilon \approx \varepsilon$ entonces la Ec. 5 se reescribe como:

$$\varepsilon_{\xi} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial \xi} dz \quad (6)$$

Donde ξ puede ser la dirección x o y dependiendo de la dirección en la que el sistema schlieren se esté utilizando. En nuestro caso, se emplea la dirección x , como dirección en que recorrerá la navaja en el sistema schlieren. Combinando la Ec. 6, con la ecuación $\varepsilon_x = \frac{\delta x}{l}$, y la ecuación de Gladstone-Dale que es una relación entre el índice de refracción n de un fluido y la densidad del fluido ρ , $n - 1 = \rho k$ se obtiene.

$$\rho_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\delta x}{l h k} \quad (7)$$

Donde, $h = \zeta_1 - \zeta_2$, es el grosor del medio no-homogéneo en cuestión y k es la constante de Gladstone-Dale. Una vez obtenidos los gradientes de densidad ρ_x del flujo en cuestión, se procede a obtener la densidad integrando la Ec. 7.

$$\rho_{(x)} = \rho_0 + \frac{1}{l h k} \int_{x_1}^{x_2} \delta x dx \quad (8)$$

En esta ecuación ρ_0 es la densidad de referencia a la temperatura ambiente. Para gases ideales a presión constante, la temperatura se puede obtener a partir de la relación de Gladstone-Dale.

$$T = \frac{\rho_0}{\rho} T_0 = \frac{n_0 - 1}{n - 1} T_0 \quad (9)$$

En la Ec. 9, n_0 es el índice de refracción a la temperatura ambiente T_0 y T es la temperatura que se busca medir en el experimento.

2.1.2 LA CONSTANTE DE GLADSTONE-DALE

Las técnicas ópticas se usan para determinar la distribución de densidad de flujos en fluidos. La densidad ρ se relaciona al índice de refracción del aire por la relación de Gladstone-Dale:

$$n - 1 = k\rho \quad (10)$$

En la Ec. 10 k define a la constante de Gladstone-Dale, la cual tiene las dimensiones de $1/\rho$ y depende de ciertas características del aire así como de la frecuencia o longitud de onda de la luz utilizada en el sistema óptico. Ya que si se considera a un rayo de luz de ancho finito que es transmitido a través de un flujo con la densidad del flujo variable, se asume que las moléculas del fluido no tienen un momento dipolar eléctrico. Entonces la luz que es una onda electromagnética con su campo eléctrico con el vector E que distorsiona la configuración de la carga de las moléculas del fluido. Un momento dipolar es P es inducido por molécula proporcional al campo eléctrico.

En la tabla 1 se muestran algunos valores de k para el aire a determinadas longitudes de onda de la luz [29]. En los experimentos realizados se usaron los valores de $k = 0.2330$ del aire para la placa, al utilizar una luz con longitud de onda dominante aproximada a 0.3562.

Tabla 1. Constantes de Gladstone-Dale para el aire a 288 Kelvin.

$k(cm^3/g)$	Wavelength(μm)
0.2239	0.9125
0.2250	0.7034
0.2259	0.6074
0.2274	0.5097
0.2304	0.4079
0.2330	0.3562

2.1.3 MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para poder determinar el valor de la densidad de un flujo de un fluido se necesita conocer el valor de δx , tal y como lo indica la Ec. 8. En esta sección se explicará un procedimiento para determinar el valor de δx . Como se mencionó, en un sistema schlieren se detectan las desviaciones de ángulo de rayos de luz. Para tal fin, se utiliza una navaja colocada en el plano focal de la segunda lente (o espejo) para poder detectar las desviaciones de ángulo. El valor de éste ángulo está relacionado con la posición de la navaja. Así, la desviación de un rayo de luz en el plano de observación se traduce en un cambio de intensidad en la iluminación. Dependiendo de la dirección del movimiento de la navaja tendremos mayor o menor intensidad de iluminación en dicho plano de observación, tal como se muestra en Fig. 5. Por tanto, moviendo la navaja desde máxima a mínima iluminación podemos caracterizar los niveles de intensidad en función de la posición de la navaja, correspondiendo cada posición de la navaja un valor específico de δx .

El procedimiento que se utilizó para medir temperatura durante el trabajo de investigación consiste en establecer una relación entre los niveles de intensidad y los desplazamientos

laterales de la navaja. Estas posiciones de la navaja van desde la posición de no corte (máxima intensidad) hasta la posición total de corte (Mínima intensidad)

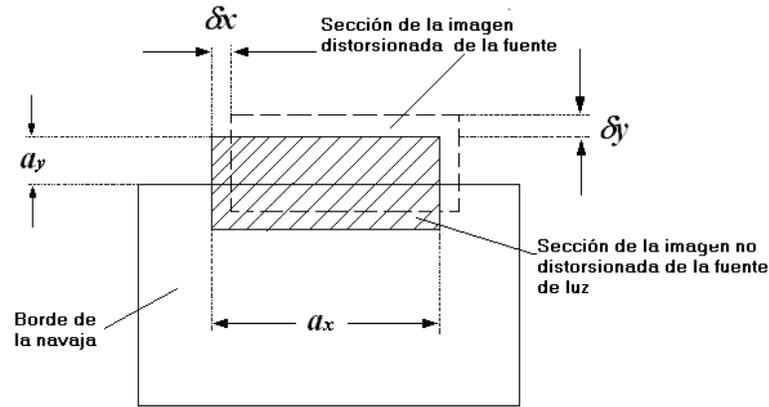


Figura 5. Desplazamiento de la sección de la imagen de la fuente de luz en el plano del borde de la navaja en el sistema de schlieren.

Consideremos lo siguiente, sea $I_{(n,m)}^{\xi}$, una imagen de schlieren sin flujo registrada en el plano de observación del sistema, donde, $n = 0,1 \dots N$ y $m = 0,1, \dots M$ siendo N y M el número de filas y columnas de la imagen en píxeles, ξ indica la posición Δx de la navaja a la cual la imagen de schlieren fue registrada, ξ puede tomar valores de $-k\Delta x_0$ a $k\Delta x_0$ siendo $k = 0,1, \dots, l$ y Δx_0 el espacio entre los desplazamientos consecutivos de la navaja, $\xi = 0$ representa la condición cuando la navaja se encuentra en la posición de referencia (o el lugar donde se harán las mediciones con flujo). De igual forma en este análisis $\xi = 0$ corresponde a la posición de la navaja en la cual la intensidad en plano de observación representa un valor de intensidad intermedia entre las posiciones de la navaja de corte y no corte, por ejemplo cuando los valores de intensidad están alrededor 50% de la luz observada para la condición de no corte. Se usa este valor porque experimentalmente éste proporciona el mayor rango dinámico para que Δx observe una relación casi lineal con las intensidades del sistema schlieren. En la Fig. 6 se muestra una curva característica para un píxel que representa los niveles de intensidad de luz en el plano de observación para las diferentes posiciones de navaja. Note que la curva es representada en términos de $I_{(n,m)}^{\xi} - I_{(n,m)}^0$ vs Δx es decir, la intensidad de luz es expresada como la desviación del valor obtenido cuando la navaja está en la posición de referencia. Esto es equivalente a restar la intensidad de una imagen de schlieren con flujo con la que se obtuvo en la posición de referencia de la navaja. Note también que cada píxel en la imagen de schlieren tendrá una curva de calibración.

Ahora, sea $I_{(n,m)}^p$, una imagen de schlieren registrada en el plano de observación en presencia de flujo, con la navaja en la posición de referencia. Restando $I_{(n,m)}^p$ e $I_{(n,m)}^{\xi}$ de la imagen registrada en $\xi=0$, es decir, sin flujo $I_{(n,m)}^0$, podemos escribir las relaciones como se muestran a continuación.

$$I_{(n,m)}^{\Delta x} = I_{(n,m)}^{\xi} - I_{(n,m)}^0 \quad (11)$$

$$I_{(n,m)}^{\delta x} = I_{(n,m)}^p - I_{(n,m)}^0 \quad (12)$$

Aquí $I_{(n,m)}^{\Delta x}$ e $I_{(n,m)}^{\delta x}$ dan las relaciones entre las variaciones de intensidad de la imagen schlieren sin flujo y con flujo respectivamente para cada píxel. Relacionando la Ec. 11 con la 12 podemos encontrar el valor de δx y por consiguiente la densidad del flujo de fluido.

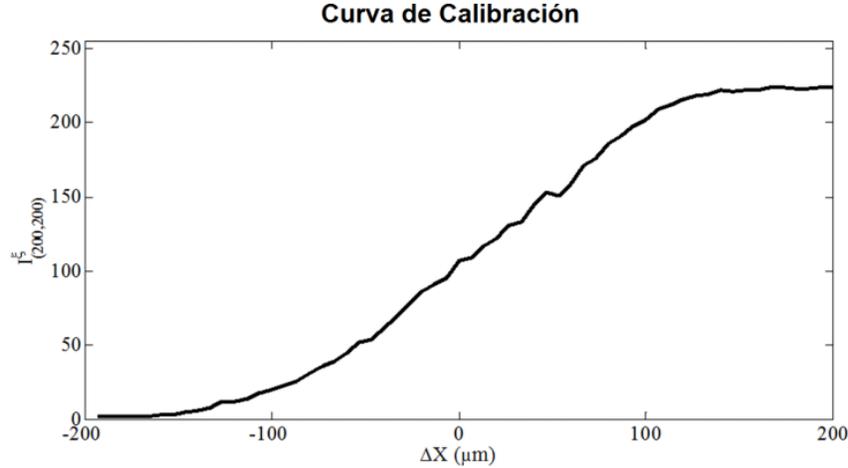


Figura 6. Curva de calibración para el píxel (n, m).

El criterio mostrado en la siguiente ecuación se usó para relacionar las Ecs. 11-12.

$$\delta x_{(n,m)} = \Delta x_{(n,m)} \quad (13)$$

Donde Δx corresponde a.

$$\min |I_{(n,m)}^{\delta x} - I_{(n,m)}^{\Delta x}| \quad (14)$$

Es conveniente mencionar que los valores de intensidad de las curvas de calibración se interpolaron para incrementar su resolución. La interpolación se llevó de 60 a 200 puntos y se usó la función “*pchip (Piece wise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)*” del software MatLab. Debido a que estas curvas se toman directamente de 60 imágenes experimentales y a que estas imágenes no son del todo homogéneas en intensidad. Lo que ayuda a corregir este problema de intensidad es la resta de la imagen de referencia utilizada en las ecuaciones 12-13, ya que también reduce el ruido intrínseco del aparato óptico como el producido por las imperfecciones de las componentes ópticas.

2.2 MEDICIÓN DE VELOCIDAD

En el desarrollo de esta investigación utilizaron dos técnicas: una aplicada a medir la velocidad donde se agregan partículas trazadoras al fluido (en este caso agua), y la segunda técnica cuando el fluido no permite que se le agreguen partículas, como es el caso del aire, ya que afecta el comportamiento natural del flujo de fluido o que las partículas no sigan fielmente el comportamiento del mismo.

2.2.1 VELOCIMETRIA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS

Un sistema PIV consta fundamentalmente de trazadores o marcadores de flujo que generalmente son partículas de algún material. En este sistema se utilizaron partículas de poliestireno, un dispositivo para registro de imágenes (CCD) de la marca Lumenera[®], una fuente de luz intensa, puede ser láser o luz blanca (en las pruebas se utilizó la misma fuente de luz que se tenía en el arreglo schlieren), un sistema para procesar las imágenes (computadora personal) y espejos para formar una hoja de luz. En la Fig. 7 se muestra un sistema PIV. Los marcadores de flujo hacen posible visualizar la dirección del fluido, estos se iluminan con una hoja de luz para hacer visible solo una sección del fluido, ya que los fluidos que se analizan son demasiado rápidos para capturar el movimiento con luz constante, el sistema se ilumina con luz pulsada y de esta manera se obtienen imágenes fijas de las partículas. Estas imágenes de las partículas capturadas se analizan por pares para poder determinar la velocidad del flujo del fluido analizado.

Algunos proveedores comerciales como *TSI*, *DANTEC*, entre otros, venden sistemas sofisticados y completos de PIV que incorporan los elementos mencionados, además de una interfaz de software para el análisis de las imágenes, sin embargo, es de esperar su alto costo. Construir un sistema propio de PIV a bajo costo es posible si se conocen las necesidades específicas del flujo que se quiere medir. Este desarrollo implica el conocimiento de varias áreas de la tecnología. En este trabajo se tratara de proporcionar alguna dirección enfocada a este propósito. Entre las variantes que se pueden tener al diseñar un sistema PIV se debe de considerar, por ejemplo, la simplicidad, el costo y la naturaleza del experimento, si se requiere una sola cámara convencional o estereoscópica, o incluso holográfica. Del mismo modo se debe decidir si se requiere un láser de luz continua o pulsada; además el hardware de adquisición de imágenes podría ser en película fotográfica o en una cámara digital (CCD), aunque el CCD ofrece una serie de ventajas y es la opción preferida en la actualidad pues ofrece velocidades de captura de imágenes más allá del video convencional de 30 fps (cuadros por segundo), las cuales son necesarias para fluidos rápidos. Por último, hay una variedad de opciones en cuanto a plataformas de computación y algoritmos.

Una revisión de la literatura de PIV revela una gran variedad de algoritmos de PIV que se han desarrollado en los últimos años. Y el objetivo de esta tesis es utilizar el sistema schlieren con PIV por lo que no se profundizara en mayores detalles con los tipos de arreglos de PIV que se pueden realizar para diversos experimentos. El enfoque principal de este trabajo será el de un arreglo PIV convencional con una sola cámara Lumenera[®] de correlación PIV. A modo de introducción, es útil examinar en primer lugar un algoritmo simple basado en el seguimiento de las partículas.

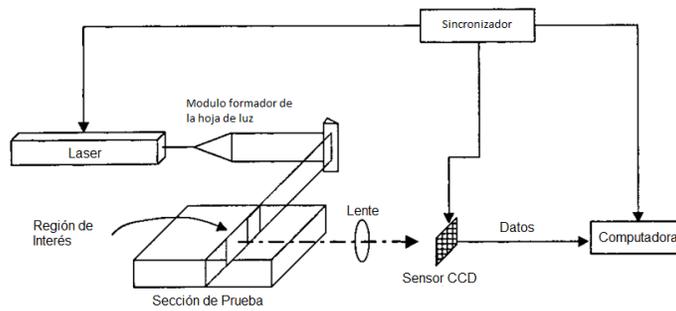


Figura 7. Arreglo óptico de un sistema PIV.

2.2.2 MARCADORES DE FLUJO

Los marcadores o trazadores de flujo son partículas (sólidas, líquidas o gaseosas), empleadas para diseminarse en el volumen del fluido, esto con la intención de que al ser incorporadas sigan las líneas de flujo. Puesto que, a simple vista, el comportamiento del fluido es invisible al ojo humano y a los dispositivos de captura de imagen, el estudio o seguimiento de estas partículas nos permitirá determinar el comportamiento del fluido. Al ser las partículas muy pequeñas, del orden de millonésimas de metro, no pueden ser distinguidas cuando son iluminadas con luz natural por lo que se utiliza una luz intensa de fuentes láser. Los fabricantes de estas partículas, han desarrollado todo un catálogo de tamaños, materiales y características que deben de tener las partículas. Todo esto dependiendo de la aplicación a la que esté dirigida. Por ejemplo existen partículas que reflejan la luz que les incide, como de tipo fluorescente, que remiten luz de determinada longitud de onda, las características de estos marcadores dependen principalmente del tipo de fluido donde son empleadas y cumpliendo dos requisitos importantes, que se describen a continuación.

Flotabilidad: Las partículas deben de flotar inocuamente en el fluido (partículas con una densidad mayor a la del fluido afectarían por su peso al fluido y no manifestarían el comportamiento real).

Visibilidad: las partículas deben asegurar una máxima visibilidad a la longitud de onda que se requiera (entre más grande sean las partículas la visibilidad será mayor).

De acuerdo a la densidad del medio donde se emplean las partículas, por ejemplo, en gases se requieren partículas que en líquidos no pueden flotar con facilidad. Raffel [30] proporciona la tabla de marcadores de flujo.

Para la mayoría de los arreglos experimentales donde se requiera la adición de partículas, éstas tienen que ser depositadas en el fluido antes de pasar por la zona de estudio, pues las partículas del tipo líquido se evaporan rápidamente y las sólidas tienden a aglomerarse. La forma de hacer el sembrado o la inyección de las partículas debe ser de manera que no altere al fluido estudiado y procurando que la distribución de las partículas sea lo más homogénea posible. Los marcadores sólidos solo pueden administrarse en una solución que inyecte mediante pequeños canales colocados a lo largo de una sección del área de trabajo. Los marcadores del tipo líquido pueden suministrarse directamente con vaporizadores o con atomizador. Al seleccionar el tipo de trazadores que se va a utilizar, se debe tener en

cuenta las consideraciones mencionadas, es decir, que se verifique que las partículas sigan la trayectoria del flujo y que sean lo suficientemente visibles para el sistema de adquisición de imágenes [30].

Tabla 2. Tipos de marcadores de flujo usualmente empleados en PIV.

Materiales para medios líquidos			Materiales para medios gaseosos		
Tipo	Material	Diámetro promedio μm	Tipo	Material	Diámetro promedio μm
Sólido	Poliestireno	10-100	Sólido	Poliestireno	0.5-10
	Aluminio	2-7		Aluminio	2-7
	Esferas de vidrio	10-100		Magnesio	2-5
	Gránulos de recubrimientos sintéticos	10-500		Esferas de vidrio	30-100
				Gránulos de recubrimientos sintéticos	10-50
			Diociltalato	<1	
Líquido	Distintos aceites	50-500	Humo	Diferentes materiales combustionados	<1
Gaseoso	Burbujas de oxígeno	50-100	Líquido	Distintos aceites	0.5-10

2.2.3 DISPOSITIVOS PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES EN SISTEMAS PIV

Un dispositivo ampliamente usado es la cámara fotográfica de película química o recientemente las cámaras de CCD. Históricamente se han empleado cámaras de películas fotográficas cuyos negativos eran revelados y digitalizados con el fin de poder computarizar la información captada. Aunque en la actualidad son de uso común las cámaras digitales es cierto, que las películas fotográficas tienen una resolución mayor que cualquier medio de imagen digital. Retomando los comentarios citados en [23], la película estándar de 35 mm de Kodak Technical Pan® de 300 líneas por milímetro tiene una resolución de 10500 x 7500 píxeles y una película de 100 x 125 mm posee una resolución de 30000 x 37500 píxeles, mientras que las cámaras digitales que se usan en los últimos años tienen resoluciones de 2048 x 2048 píxeles. Las características estándar para PIV (*SharpVision 1400-DE de IDT®*) son una resolución de 1360 x 1024 píxeles y una velocidad entre cuadros de hasta 200 ns. Un equipo empleado para la adquisición de imágenes, aunque con menos frecuencia es la cámara de video, la cual puede o no ser adecuada para los sistemas PIV dependiendo de la velocidad del fluido y del tamaño de las partículas. El determinar si el uso de video será conveniente depende de diferentes parámetros que pueden ajustarse o pasarse por alto según los requerimientos del experimento. Otros sensores de imágenes incluyen cristales foto refractivos, películas termoplásticas y holográficas, estas últimas proveen una imagen tridimensional del flujo, por lo cual son muy empleadas en PIV de tres dimensiones. El registro de las imágenes del fluido y no la medición in-situ de la velocidad de éste es la parte medular de la técnica PIV.

El empleo de un adecuado equipo es esencial para el buen desempeño del sistema. De los requerimientos de cómo se va a acoplar el mecanismo de captura de imágenes con el resto del equipo, tanto para transmitir la información a procesar, como para sincronizarse con el equipo de iluminación del fluido se describe a continuación.

2.2.4 FUENTE DE LUZ

Como se ha comentado anteriormente, los trazadores de flujo deben ser pequeños a fin de seguir el flujo con fidelidad, pero al mismo tiempo deben de esparcir la suficiente luz para poder ser capturados por el dispositivo de registro de imágenes, por consecuencia deben iluminarse con una luz de considerable intensidad. Algunas fuentes de luz tienen una potencia suficiente para estos requerimientos como las lámparas de gas (xenón, halógeno, etc.) [25], lámparas de vapor de sodio (sodio, mercurio, etc.) las chispas o arcos eléctricos o los equipos láser. En la mayor parte de los experimentos de PIV se prefieren láseres ya que tienen concentrada su energía luminosa en un solo punto, lo que facilita su manipulación, cosa que en las otras fuentes es necesario encausar para formar una hoja de luz que ilumine el fluido bajo estudio. De las características técnicas de las fuentes de luz láser se encuentra la potencia de emisión y la frecuencia a la que emiten los pulsos, como se describe a continuación.

Láser de helio neón (He-Ne): este láser es de los más comunes en los laboratorios. De baja potencia, emisión continua y su empleo en la velocimetría óptica es más sobre el análisis de películas fotográficas que para la iluminación de fluidos. Su color de emisión está en el rojo (633nm) y su rango de potencia está entre 1 a 10 mW aproximadamente.

Láser de iones de argón: tiene una potencia mucho mayor que el de He-Ne hasta los 100W en la emisión verde-azul, aunque esto significa un incremento en la complejidad de su construcción. Se emplea comúnmente en la velocimetría Doppler y en PIV de bajas velocidades y es de emisión continua.

Láser de rubí: se desempeña óptimamente en la emisión pulsada y puede entregar pulsos de gran energía, sin embargo su emisión (694.3 nm) está en el límite del espectro visible y tanto las películas fotográficas como los sensores CCD tienen una mejor respuesta para menores longitudes de onda.

Láseres de estado sólido de neodimio YAG (Nd-Yag): se usan ampliamente en los sistemas PIV ya que son láseres pulsados de gran energía entre valores típicos de 400 mJ por pulso. Tienen un eficiente sistema de amplificación y buenas propiedades mecánicas y térmicas. Como todos los láseres de potencia, requiere de tener cuidados con el sistema de enfriamiento y en las reglas de seguridad para usuarios [30].

Adicional a la fuente de luz es necesario agregar accesorios que guíen, controlen o expandan la luz que se propagara a través del fluido bajo estudio. En la mayoría de los casos se debe crear una lámina u hoja de luz, pues los sistemas PIV convencionales solo analizan las partículas dentro de una región y no en todo el volumen a la vez. Considerando una fuente de luz láser, los accesorios empleados son, espejos y lentes, las características de

la lámina de luz como extensión y grosor, dependen tanto de las dimensiones de la zona a estudiar como del tipo de trazadores a emplear. Para la elección de un correcto equipo de iluminación se deberá considerar no solo una fuente potente de luz, ya que también hay que tomar en cuenta cuestiones como sus modos de operación y el área donde se instalara el equipo.

2.3 PROPIEDADES DEL MÉTODO PIV

La técnica PIV tiene propiedades que la vuelven sobresaliente entre los sistemas de velocimetría de fluidos. Es una medición no intrusiva, ya que las técnicas en las cuales se coloca un sensor en el campo estudiado se conocen como de tipo intrusiva, pues necesariamente se tiene que introducir en el fluido la punta de prueba y esta altera el comportamiento normal del flujo. Y dependiendo del tipo de fluido esta perturbación puede ser de mayor o menor grado, pero siempre está presente.

Los métodos de medición no intrusivo toman datos del campo sin que exista contacto físico entre el instrumento de medición y el flujo y se recurre generalmente a sistemas ópticos, en el caso de PIV, esto se logra captando las imágenes de partículas que viajan dentro del fluido mismo, de modo que fuera de la presencia de las partículas en el flujo, no se afecta de manera perceptible el medio analizado. Se puede notar que en realidad no se está midiendo la velocidad de la substancia que compone el fluido, sino la velocidad de los marcadores inyectados dentro del fluido. Por ello es vital que las fuerzas que modifiquen el movimiento sean las mismas y de igual magnitud que las del fluido, solo así se puede asegurar que se mide la velocidad real del fluido al medir la velocidad de las partículas.

2.4 DESARROLLO TEÓRICO DE PIV

Cuando se tiene constituido el sistema PIV hay algunas variables que se pueden controlar durante el experimento y una de ellas es la concentración o densidad de las partículas que se agregaran al fluido bajo análisis, la cual debe ser determinada con el fin de obtener fotografías que posteriormente pueda resolver el software de análisis de imágenes. Si la cantidad de partículas es tal que por inspección visual se pueda identificar una misma partícula para los pulsos de luz que se hayan aplicado, para el computo de esta información normalmente se emplean algoritmos de rastreo de partículas o *particle tracking*, los cuales identifican individualmente a cada imagen de partícula y buscan la correspondencia de cada uno de ellas en las imágenes tomadas. Para el caso de PIV de baja densidad se le conoce como Particle Tracking Velocimetry o PTV.

2.4.1 DENSIDAD DE PARTÍCULAS EN EL FLUIDO

Cuando la concentración de marcadores (Fig. 8) es tal que ya no es posible identificar una misma partícula entre exposiciones, pero aún se pueden apreciar estos individualmente, tenemos el caso PIV de densidad media. Ya no resulta viable identificar y asignar una etiqueta a cada imagen de partícula, como en PIV de baja densidad, y se aplican entonces algoritmos que analizan grupos de partículas trazadoras. Si la cantidad de partículas es tan grande que en la imagen estas no se pueden distinguir de manera individual, se designa el término de PIV de alta densidad y es necesario emplear otra técnica de análisis, que se

conoce como Láser Speckle Velocimetry o velocimetría láser de patrones de moteado, que ya no detecta partículas como tales, sino los patrones de interferencia que en conjunto forman.

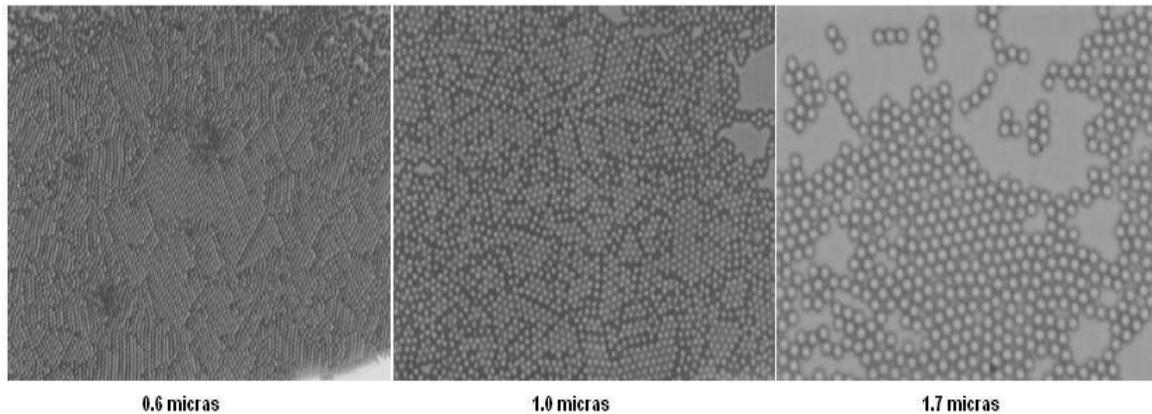


Figura 8. Diferentes densidades y tamaños de partículas en un fluido

2.4.2 PULSOS DE LUZ Y TÉCNICAS DE REGISTRO DE IMÁGENES

La iluminación de alta intensidad que se requiere aplicar al fluido en forma intermitente o pulsada en la técnica de PIV, se puede variar parámetros según las características propias del fluido que se quiera analizar. La variación en la iluminación se hace sobre el tiempo de su aplicación, que es la duración del pulso y en la separación temporal entre ellos afín de obtener información no ambigua de las imágenes captada. Se desea que éstas reflejen solo un instante del movimiento de los marcadores de flujo. Es por ello que los pulsos de luz deben ser lo suficientemente cortos en duración para que logren "*congelar*" a la partícula en el orden de 10 a 25 ns. Si el flujo es lento, los pulsos pueden agrandarse para obtener imágenes más nítidas de los trazadores; pero si el flujo es considerablemente rápido, los pulsos deberán acortarse lo más posible para no obtener "*trazos*" de las imágenes.

Por otro lado, si la separación entre pulsos es muy grande respecto a la velocidad de la corriente del flujo, se podrían perder vectores de velocidad o calcular algunos vectores erróneos. Entre menor sea el tiempo de separación entre pulsos, más exacto es el valor de la velocidad calculada. Existen varios métodos para aplicar los pulsos de luz que quedarán registrados en la imagen, pueden darse más de un pulso en una sola exposición fotográfica, a continuación se explican las variantes al aplicar los pulsos de luz.

Un pulso, un cuadro: La forma básica de iluminación consiste en aplicar un solo pulso de luz a determinado elemento de registro, una emulsión fotográfica u otro medio. La duración de este pulso será suficiente para que el recorrido de las partículas dentro del fluido sea registrado en forma de trazos sobre la imagen.

Dos pulsos, un cuadro: El método de iluminación de un fluido que consiste en usar dos pulsos de muy corta duración dentro de una misma exposición o cuadro, para fines prácticos consideramos que los pulsos aplicados son instantáneos, sin embargo en la realidad estos tienen una duración que puede acortarse o alargarse dependiendo de trazos de las partículas de la técnica descrita con anterioridad, pues para este método de

iluminación y registro se utilizan distintos métodos de análisis de las imágenes. Las imágenes que contienen dos pulsos por cuadro se analizan mediante el método de autocorrelación.

Múltiples pulsos, un cuadro: El modo de iluminación utiliza repetidos pulsos de luz para un cuadro. La forma de analizar este tipo de registro de imágenes es similar al de la técnica de un pulso y un cuadro, pues el conjunto de imágenes de una partícula iluminada múltiples veces, es análogo al trazo dejado cuando se emplea un único pulso largo.

Un pulso, múltiples cuadros: Cuando el método de registro de imágenes es de múltiples cuadros o exposiciones, es posible grabar una secuencia temporal del movimiento de las partículas, lo cual ofrece una ventaja con las anteriores técnicas de iluminación y registro, pues se obtiene la información de la dirección del flujo. Una desventaja es que, debido a la rapidez de operación de las cámaras, el tiempo mínimo entre pulso y pulso es generalmente mayor que en las técnicas de varios pulsos sobre una exposición. Para analizar las imágenes obtenidas con este método se utiliza la correlación cruzada. Una variante para esta técnica es la aplicación de varios pulsos de luz a cada exposición.

En resumen, estas técnicas de iluminación registran el movimiento de las partículas. La manera en que se desarrolla el experimento depende de varios factores, como el tipo de equipo disponible para aplicar y registrar la iluminación y los algoritmos con que se cuenta para procesar la información.

2.4.3 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES: TÉCNICAS DE INTERROGACIÓN

Hay esencialmente cuatro técnicas de interrogación de imágenes en la velocimetría por imágenes de partículas: rastreo de partículas o particle tracking (PT), correlación cruzada, auto correlación y velocimetría láser de patrones de moteado. El rastreo de partículas se emplea en PIV estándar o de densidad media; y la velocidad láser de patrones de moteado en PIV de alta densidad.

2.4.4 RASTREO DE PARTÍCULAS

La velocimetría por rastreo de partículas es una técnica que se utiliza en el caso de PIV de baja densidad, es decir, en las imágenes obtenidas en los experimentos es posible identificar partículas en un cuadro y localizar la misma en la imagen siguiente, esto se puede realizar si la cantidad de partículas trazadoras es relativamente pequeña y si la distancia recorrida por estas de un cuadro a otro es tan corta que no exista la posibilidad de relacionar por error una partícula con otra diferente. Es posible identificar individualmente a cada partícula contenida en la primera imagen y, de acuerdo a ciertos criterios, rastrear la partícula en la imagen siguiente. Una vez localizada una partícula en un par de fotografías, se calcula la distancia que recorrió y se determina su velocidad con el tiempo entre cuadros.

En la práctica existen una serie de circunstancias que dificulta la identificación de partículas, y en este punto se concentran la mayoría de los esfuerzos para mejorar los algoritmos de PTV [31] las cuales se mencionan a continuación.

Reconocimiento de partículas: En una imagen la partícula se caracteriza por su forma, dimensión y distribución de intensidad. Solo aquellas figuras dentro de la imagen que cumplen con los límites especificados para estos parámetros serán tratadas como partículas. En este procedimiento se pretende descartar elementos ajenos al experimento como contaminantes o burbujas. La posición de una partícula se puede determinar por el cálculo del centroide de su área, o bien por el cálculo del centroide de su volumen (definido como el producto del área por su distribución de intensidad). Éste cual se escoge generalmente, pues da una estimación más precisa de la ubicación de la partícula. En imágenes de pocos píxeles de extensión es preferible tener imágenes de partículas lo más grandes posible a fin de disponer de más elementos para calcular su posición. Ya que el tamaño físico de los trazadores está limitado, una técnica que se utiliza para aumentar el tamaño aparente de las partículas es desenfocar la cámara respecto al plano estudiado aunque en este caso se necesita iluminar al fluido con una fuente de luz suficientemente potente.

Correspondencia de partículas: Al tener las partículas localizadas en ambos cuadros el siguiente paso es establecer la correspondencia entre cada una de las partículas presentes en el par de fotografías. Esta labor no es tan trivial, pues los trazadores no se pueden distinguir individualmente por su forma u alguna otra característica además que en el par de fotografías con marcadores de flujo en movimiento algunos solo aparecen en uno de los dos cuadros, ya sea que aún no entraban en el área de visualización en el primer cuadro y lo hicieron durante el segundo o por que salieron del primer cuadro antes de que ocurriera la segunda toma. Entonces se tiene un caso bidimensional de correspondencia de puntos aleatorios. Algunos métodos para tratar con este problema son el método de relajación [32] y las redes neuronales [33].

2.4.5 CORRELACIÓN CRUZADA

El uso de esta técnica depende en principio de la velocidad del fluido y se capturan cuadros que contienen la información de un pulso de luz, entonces se procede a analizar usando técnicas de correlación. El procedimiento consiste básicamente en dividir en celdas o ventanas la primera imagen (tiempo t) y comparar cada una de estas regiones con la imagen siguiente (tiempo $t+\Delta t$) para calcular el valor de la correlación que hay entre ellas.

De esta descripción se distingue una diferencia grande entre esta técnica y el rastreo de partículas, aquí la velocidad se calcula para un grupo de partículas contenida en la celda y no para corpúsculos individuales, además se puede concluir que la exactitud de los desplazamientos calculados están en función del tamaño de la celda y de las características de la imagen en esta celda, más que la resolución en píxeles de la imagen. Una celda o una ventana tan pequeña que llegue a contener solo una partícula, no podrá realizar una correcta evaluación y establecerá una correspondencia con cualquier imagen en la fotografía siguiente. Por el contrario, si la celda es demasiado grande puede contener un grupo de trazadores que cambie totalmente de una fotografía a otra y no podrá obtener una correspondencia al menos aproximada.

2.4.6 AUTO-CORRELACIÓN

La técnica se basa en la naturaleza de las imágenes captadas en el experimento. Si dentro de los límites de PIV de densidad media la cámara convencional no es capaz de obtener imágenes consecutivas con una separación de $1\mu\text{s}$ aproximadamente y utilizar correlación cruzada, entonces para obtener una distancia entre partículas que se pueda resolver para fluidos de velocidad media, se prefiere proyectar dos pulsos de luz por cada fotografía lo que conlleva a una ambigüedad en cuanto a la fase pero se obtiene una mejor resolución temporal. El método de análisis para este tipo de imágenes [23] es la auto-correlación. Para efectos prácticos, esta técnica puede ser considerada un caso especial de correlación cruzada, con la diferencia de que se tiene una sola fotografía, y la ventana de exploración recorre únicamente una imagen; es como tener dos fotografías idénticas.

El cómputo de la función de correlación da un máximo para el desplazamiento cero y dos picos más de menor amplitud. Este máximo corresponde a la correlación de las imágenes consigo mismas, mientras que los otros dos máximos, uno de ellos es el que se ajusta al valor de desplazamiento medio de las partículas y el segundo presenta la misma información pero de signo contrario cuando las imágenes de la segunda exposición se correlacionan con la primera. En la práctica surgen además otros picos en la función de correlación causados por elementos aleatorios como ruido en la imagen o partículas que solo fueron fotografiadas una vez. Se observa en [23], que entre más grande sea el desplazamiento de partículas, la intensidad del par de picos de desplazamiento disminuirá, y su detección será afectada más fácilmente por elementos aleatorios.

Como se puede deducir, una de las desventajas de la auto correlación es que cuando se analiza una imagen con una doble exposición, no es posible determinar la dirección del flujo, a menos que se tome en cuenta toda una serie de estas fotografías; pese a esto, puede que esta técnica sea la más conveniente dependiendo de las características del fluido. Los métodos de interrogación aquí presentados: rastreo de partículas, correlación cruzada y auto correlación, son las técnicas de análisis básicas en PIV.

2.5 FLUJO ÓPTICO

El flujo óptico [34], se define como la distribución de la velocidad del movimiento aparente de los patrones de brillo de una imagen. El flujo se produce por el movimiento relativo entre los objetos y el observador. En consecuencia el flujo óptico puede proveer información sobre el arreglo espacial de los objetos observados y la velocidad de cambio de este arreglo. A diferencia de PIV que se tienen partículas trazadoras, en el flujo óptico se tiene que aislar un objeto para seguir su trayectoria a lo largo del video, es así que se tiene que recurrir a la segmentación de imágenes basada en la detección de discontinuidades del flujo óptico. La identificación equivale a encontrar el objeto de interés de un cuadro al cuadro siguiente en la secuencia de vídeo. Entonces el seguimiento de objetos no identificados es importante cuando se desea determinar el movimiento, es precisamente lo que hace interesante las técnicas para el seguimiento de objetos sin identificar ya que te implica el seguimiento de puntos visuales significativos en lugar de objetos definidos. Un método para lograr esto se encuentra en la referencia [35] donde se determina el flujo óptico, y es el empleo de la técnica de Lucas-Kanade.

Existen numerosos modelos de cálculo de flujo óptico, en la referencia [36] se puede encontrar una comparación entre algunos de ellos. Según [37] estos métodos se pueden clasificar en métodos diferenciales, frecuenciales y de correspondencia.

Métodos diferenciales: Estos métodos están basados en las derivadas espacio-temporales del patrón de intensidad de las imágenes (medido como niveles de gris).

Métodos frecuenciales: En estos métodos se utilizan información de la fase o la energía de salida de filtros sintonizados en velocidad.

Métodos de correspondencia: Hallan desplazamientos a partir de la correspondencia de características estructurales de las imágenes.

La mayoría de las técnicas mencionadas se componen de tres etapas de procesamiento como son filtrado, extracción de medidas o estructuras y la de integración de la información obtenida.

Filtrado previo: Con el fin de destacar estructuras de interés y mejorar la relación de señal a ruido de la imagen, se suele realizar un suavizado espacial y temporal con filtros de Gauss. Normalmente se lleva a cabo mediante la convolución con máscaras discretas que se centran consecutivamente en los distintos puntos de la imagen en el caso de filtrado temporal, este procedimiento requiere imágenes tanto anteriores como posteriores en el instante de tiempo considerado.

Extracción de medidas o estructuras básicas: es necesario obtener de la imagen extracción de medidas como derivadas espacio-temporales o superficies locales de correlación.

Integración de la información: se debe de integrar la información por medio de regularización, correlación o mínimos cuadrados

Como se aprecia en la literatura existen muchos métodos propuestos para este cálculo. El ejemplo de Lucas Kanade mostrado en la referencia [38], en la que se ha desarrollado técnicas para estimar la trayectoria de un objeto, estos métodos son aplicables a dos o tres dimensiones para la ubicación de los objetos dentro de una imagen, siendo el problema principal de estas técnicas el de identificar patrones como bordes o esquinas que ayuden a seguir la trayectoria de los objetos de una imagen

2.5.1 ENCONTRAR LOS BORDES DENTRO DE LA IMAGEN

Es importante considerar lo que constituye exactamente esta característica. Obviamente, si tomamos un punto en una pared en blanco entonces no va a ser fácil de encontrar ese mismo punto en el siguiente fotograma de un vídeo. Y es más si todos los puntos en la pared son idénticos o muy similares, entonces no hay posibilidad de seguimiento de ese punto en los fotogramas siguientes. Existe la posibilidad de que si se elige un punto que no es único, entonces tenemos muchas oportunidades de localizar ese punto en el fotograma siguiente. En la práctica, el punto o característica que seleccione debe ser único e

inconfundible, o casi único, y deben ser parametrizable de tal manera que se puede comparar con otros puntos en otra imagen como se muestra en la Fig. 9.

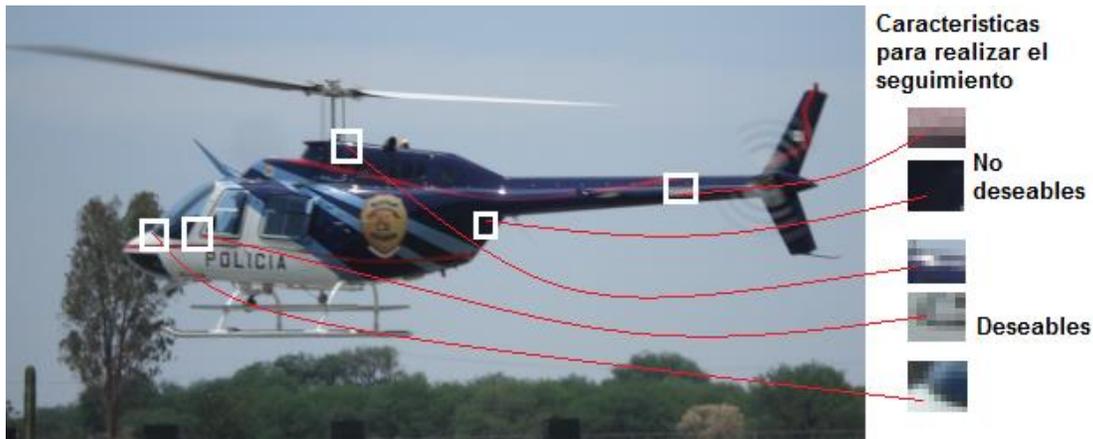


Figura 9. Los puntos seleccionados deben ser fáciles de seguir. Se resaltan los que son deseables como las esquinas.

Volviendo a nuestro ejemplo de la pared en blanco, es fácil buscar puntos que tienen algún cambio significativo pero resulta que esto no es suficiente pero es un comienzo, ya que un punto en el que se tenga un cambio considerable puede estar en el borde de algún objeto, pero podría parecerse a todos los otros puntos a lo largo del mismo borde. Sin embargo si se observan los cambios fuertes en el pixel en las dos direcciones ortogonales, entonces es probable que ese punto sea único, por esta razón muchas características rastreables son llamadas esquinas. Intuitivamente las esquinas y no los bordes son los puntos que contienen suficiente información para ser seguidos de un cuadro a otro.

2.5.2 MÉTODO FLUJO ÓPTICO

Como ya se mencionó, es posible que algunas veces se tenga que evaluar el movimiento entre dos fotogramas (o una secuencia de fotogramas) sin ningún otro conocimiento previo sobre el contenido de esos fotogramas. Típicamente, el movimiento mismo es lo que indica que algo está pasando dentro de la imagen.

El flujo óptico entre dos fotogramas se ilustra en la Fig. 3 donde se puede asociar alguna variable de velocidad con cada píxel en la imagen, o de cierto desplazamiento que representa la distancia que un píxel se ha movido entre fotogramas. Tal construcción se conoce generalmente como un flujo óptico denso al asociar la velocidad de cada píxel en una imagen. El método de Horn-Schunck [35] realizó intentos para calcular la velocidad del campo completo de las imágenes. Utilizando simplemente ventanas alrededor de un píxel de cada fotograma, esto se conoce como coincidencia de bloques.

En la práctica, calcular el flujo óptico denso no es fácil, si se considera el movimiento de una hoja de papel blanco. Muchos de los píxeles en el cuadro anterior simplemente permanecerán en el siguiente, de esta manera solo los bordes pueden cambiar incluso solo aquellos que están perpendiculares a la dirección del movimiento. El resultado es que los

métodos de análisis de flujo óptico denso deben de tener algún método de interpolación entre los puntos que son más fáciles de rastrear con el fin de resolver los puntos que son ambiguos. Las dificultades se manifiestan en el elevado tiempo de procesamiento de los fotogramas.

Esto nos lleva a una opción alternativa: el flujo óptico escaso. Los algoritmos de este tipo se basan en algún medio para especificar el subconjunto que ha de ser rastreado, siempre que estos puntos tengan algunas propiedades deseables, tales como las esquinas que hace el seguimiento robusto y confiable. Para muchas aplicaciones prácticas, el coste computacional del seguimientos de flujo óptico escaso es mucho menor que en el análisis de flujo denso. Se detallara con más claridad el caso más popular: Lucas-Kanade de flujo óptico, este método también tiene una aplicación que funciona con las pirámides de imagen lo que nos permite rastrear los movimientos más rápido. Se trataran dos métodos de Horn-Schuck y el método de correspondencia de bloques.

2.5.3 MÉTODO DE LUCAS-KANADE

El algoritmo de Lucas-Kanade (LK) [38], fue propuesto originalmente en 1981 para obtener resultados en flujo denso, sin embargo debido que el método es fácil de aplicar a un subconjunto de los puntos de la imagen de entrada, se ha convertido en una importante técnica, el algoritmo de LK se puede aplicar en un contexto de flujo escaso por que se basa únicamente en la información local que se deriva de una pequeña ventana que rodea a cada uno de los puntos de interés. El inconveniente del uso de pequeñas ventanas locales es que los grandes movimientos pueden volverse puntos fuera de la ventana local y por lo tanto llegar a ser complicado para el algoritmo encontrarlos; este problema ha dado lugar al desarrollo del algoritmo de la pirámide de LK, que rastrea a partir del más alto nivel de una pirámide de imágenes hasta los niveles inferiores para el seguimiento de los movimientos por las ventanas locales. El método de Lucas-Kanade está basado en la idea básica que se muestra a continuación y estas suposiciones se ilustran el la Fig. 10.

El brillo constante: Un pixel de la imagen de un objeto en la escena no cambia en apariencia, ya que posiblemente se mueve de un fotograma a otro. Para imágenes en escala de grises, esto significa que suponemos que el brillo de un pixel no cambia.

Persistencia temporal o pequeños movimientos: La imagen en movimientos de una parte de la superficie cambia lentamente con el tiempo. En la práctica significa que los incrementos temporales son rápidos, lo suficiente con la escala de movimiento en la imagen del objeto que no se mueve mucho entre fotogramas.



$$I(x + u, y + v, t + 1) = I(x, y, t)$$

Figura 10. Las premisas detrás del método Lucas-Kanade para flujo óptico.

Coherencia espacial: Los puntos vecinos en una escena que pertenecen a la misma superficie tendrán movimiento similar y proyectado para puntos cercanos en el plano de la imagen.

Tomando en cuenta que el primer requisito de un pixel es la constancia de brillo, esto se expresa en la Ec. 15

$$f(x, t) \equiv I[x(t), t] = I[x(t + dt), t + dt] \quad (15)$$

Eso es bastante simple, y significa que nuestra intensidad de los píxeles seguidos no muestra cambios en el tiempo entre fotogramas, lo cual se representa en la Ec. 16.

$$\frac{\partial f(x)}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

La segunda suposición que se refiere a la persistencia temporal, esencialmente significa que los movimientos son mínimos de un fotograma a otro. En otras palabras, podemos ver este cambio como aproximación de una derivada de la intensidad con respecto al tiempo. Para entender las implicaciones de esta hipótesis, primero se considera el caso de una sola dimensión espacial. En este caso podemos obtener la ecuación de consistencia de brillo, substituyendo la condición del brillo $f(x, t)$ mientras se toma en cuenta la dependencia implícita de x en t , $I[x(t), t]$ y aplicando la regla de la cadena para diferenciación parcial esto conlleva a la Ec. 17.

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Big|_t \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \Big|_{x(t)} = 0 \quad (17)$$

Donde I_x es la derivada espacial a través de la primera imagen, I_t es la derivada en el tiempo entre las imágenes, y v es la velocidad que estamos buscando. Llegamos así a la ecuación para la velocidad de flujo óptico en el caso unidimensional que se expresa en la Ec. 18 y en la Fig. 11 se muestra gráficamente.

$$v = -\frac{I_t}{I_x} \quad (18)$$

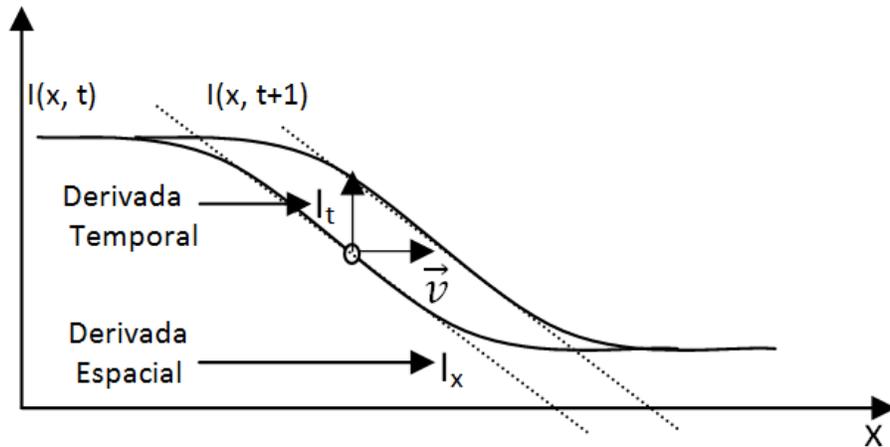


Figura 11. Seguimiento en el caso de una dimensión.

Para el problema de seguimiento en una sola dimensión. Considere la Fig. 11 que muestra un "borde" que se mueve hacia la derecha a lo largo del eje coordenado x . Se trata de identificar la velocidad v con la que el borde está en movimiento, y como se representa en la Fig. 11 se observa velocidad, donde el vector de tiempo apunta hacia arriba y vector desplazamiento v es la pendiente (derivada espacial). El signo negativo corrige la pendiente del eje coordenado x . En la Fig. 11 se revela otro aspecto de la formulación de flujo óptico, ya que probablemente las suposiciones no son del todo cierto, es decir, la luminosidad de la imagen no es realmente estable, y el intervalo entre imágenes son a menudo no tan rápido en relación al movimiento. Por lo tanto, la solución no es exacta, sin embargo si estamos lo suficientemente cerca de la solución, entonces podemos iterar una solución. La iteración de la solución se muestra en la Fig. 12, donde se utiliza la primera estimación inexacta de la velocidad como el punto de partida para la próxima iteración y entonces se repite el proceso.

Hay que tener en cuenta que podemos mantener la misma derivada espacial en el eje x , calculada en el primer fotograma debido a la constancia de brillo y a la suposición de que los pixeles en movimiento en el eje x no cambian. Esta reutilización de la derivada espacial ya calculada nos ahorra un importante costo computacional. La derivada temporal aún debe ser calculada para cada iteración y por cada fotograma. Si estamos lo suficientemente cerca de la solución, estas iteraciones convergen con exactitud dentro de las primeras cinco iteraciones y este se conoce como el método de Newton, si nuestra estimación no estaba cerca del resultado, entonces el método de Newton en realidad diverge.

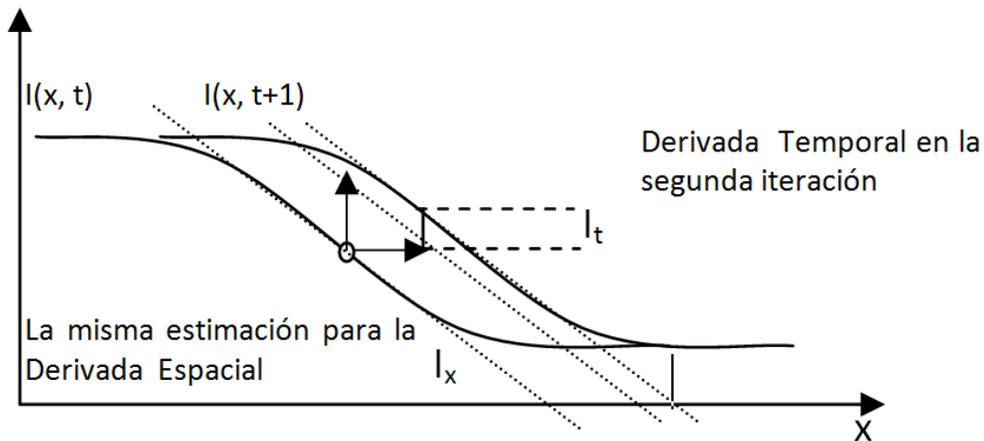


Figura 12. Iteración para refinar la solución de flujo óptico (método de Newton).

Tomando en cuenta la solución unidimensional, se generaliza a imágenes en dos dimensiones. Para hacer esto basta con añadir una coordenada y cambiar la notación, al componente de la velocidad en el eje coordenado y entonces se llamara V y el componente de la velocidad en el eje coordenado X se llamara U , por lo que:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (19)$$

Desafortunadamente, para esta única ecuación se tienen dos incógnitas para cualquier píxel dentro de la imagen. Esto significa que las mediciones de un solo píxel están limitadas y no se pueden utilizar para obtener una solución única para el movimiento de dos dimensiones en ese punto. En su lugar sólo podemos resolver la componente de movimiento que es perpendicular a la línea descrita por la ecuación de flujo. En la Fig.13 se presentan los detalles matemáticos y geométricos.

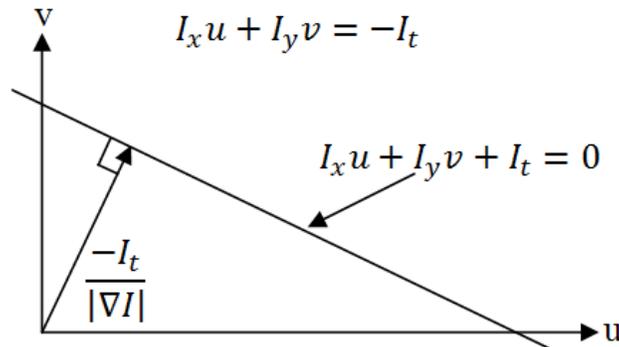


Figura 13. Flujo óptico bidimensional en un solo píxel.

Los resultados de flujo óptico normales tienen el inconveniente de la apertura se observa cuando se tiene una pequeña apertura o ventana en la que se mide el movimiento. Cuando se detecta movimiento con una pequeña apertura, suele aparecer solo un borde y no una esquina, entonces el borde por si solo es insuficiente para determinar exactamente en qué dirección se está moviendo todo el objeto. La Fig. 14 representa gráficamente este inconveniente.

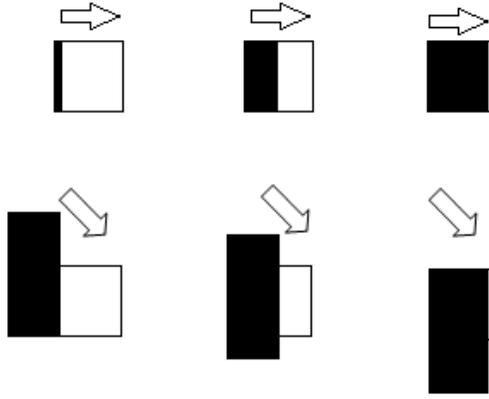


Figura 14. Problema de la apertura: cuando un objeto está descendiendo, a través de la ventana de apertura (fila superior) solo vemos un borde moviéndose hacia la derecha.

Cuando no es posible resolver el movimiento completo de un píxel entonces se emplea la última hipótesis de flujo óptico. La cual dice: si el conjunto de píxeles se mueve coherentemente, entonces podemos resolver el movimiento del píxel central utilizando los píxeles circundantes y así establecer un sistema de ecuaciones. Como ejemplo, si se utiliza una ventana de 5x5 de los valores de brillo alrededor del píxel al que se calculara su movimiento, entonces se pueden configurar 25 ecuaciones. Por supuesto la ventana puede ser de 3x3, 7x7, o cualquier tamaño que se elija. Si la ventana es demasiado grande, entonces el resultado final romperá con el supuesto de que el movimiento es coherente. Si la ventana es demasiado pequeña se observara el problema de apertura. La restricción de suavidad propuesta en [26], se basa en la suposición de que los puntos vecinos en el objeto visto tienen velocidades similares y que el campo de velocidad de los patrones de brillo de la imagen varía suavemente en casi todas partes. Esto se expresa formalmente mediante el empleo de mínimos cuadrados de la magnitud del gradiente de velocidad del flujo. Sin embargo, sólo cuando se visualiza un objeto rígido con una superficie suave y continua es entonces esta una suposición válida.

La restricción de suavidad direccional sugiere que el campo de flujo debe ser suave sobre la imagen en términos de su dirección en lugar de su magnitud. Entonces el problema es reducir al mínimo el error total del cambio de brillo en la imagen y la salida de la velocidad del flujo, quedando como resultado final un par de ecuaciones para cada pixel en una imagen. Estas ecuaciones pueden expresarse de manera iterativa como:

$$u^{n+1} = u^{-1} - I_x[I_x u^{-n} + I_y v^{-n} + I_t]/(\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2) \quad (20)$$

$$v^{n+1} = v^{-1} - I_y[I_x u^{-n} + I_y v^{-n} + I_t]/(\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2) \quad (21)$$

Donde α , es un factor de ponderación utilizado para compensar las regiones en donde el gradiente de brillo es pequeño. Por ser un algoritmo que utiliza aproximaciones hasta converger a un valor definido, se debe hacer experimentalmente. La velocidad media se puede calcular como:

$$\bar{u}_{i,j,k} = \frac{1}{6} \{u_{i-1,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i+1,j,k} + u_{i,j-1,k}\} + \frac{1}{12} \{u_{i-1,j-1,k} + u_{i-1,j+1,k} + u_{i+1,j-1,k} + u_{i+1,j+1,k}\} \quad (22)$$

$$\bar{v}_{i,j,k} = \frac{1}{6} \{v_{i-1,j,k} + v_{i,j+1,k} + v_{i+1,j,k} + v_{i,j-1,k}\} + \frac{1}{12} \{v_{i-1,j-1,k} + v_{i-1,j+1,k} + v_{i+1,j-1,k} + v_{i+1,j+1,k}\} \quad (23)$$

El gradiente espacial y temporal se puede calcular mediante el uso de las Ecs. 24-26. Estas ecuaciones se utilizan para calcular los campos de velocidades que se presentan dentro de la imagen utilizando la técnica de flujo óptico.

$$I_x \approx \frac{1}{4} \{I_{i,j+1,k} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j+1,k} - I_{i+1,j,k} + I_{i,j+1,k+1} - I_{i,j,k+1} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i+1,j,k+1}\} \quad (24)$$

$$I_y \approx \frac{1}{4} \{I_{i+1,j,k} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j+1,k} - I_{i,j+1,k} + I_{i+1,j,k+1} - I_{i,j,k+1} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i,j+1,k+1}\} \quad (25)$$

$$I_t \approx \frac{1}{4} \{I_{i,j,k+1} - I_{i,j,k} + I_{i+1,j,k+1} - I_{i+1,j,k} + I_{i,j+1,k+1} - I_{i,j+1,k} + I_{i+1,j+1,k+1} - I_{i+1,j+1,k}\} \quad (26)$$

CAPÍTULO 3

TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN LÍQUIDOS

3.1 INTRODUCCIÓN TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN LÍQUIDOS

Como se mencionó anteriormente la medición de la temperatura es muy importante para una gran variedad de ramas de la ciencia. Las técnicas de campo completo como schlieren han sido ampliamente usadas para visualizar los flujos de fluidos, la ventaja de usar el arreglo schlieren para medir temperatura es su implementación relativamente fácil, su bajo costo, y el uso de una fuente de luz convencional además de su alta sensibilidad. Como se mencionó en los capítulos iniciales, para visualizar el desplazamiento del fluido en líquidos, es necesario agregar partículas trazadoras al medio y como estos trazadores dependen de las características del fluido (densidad y viscosidad) se utilizaron partículas de poliestireno con la finalidad de utilizar con las imágenes obtenidas con arreglo schlieren velocimetría por imágenes de partículas.

El objetivo de este trabajo de investigación es usar la técnica de schlieren para medir simultáneamente temperatura y velocidad del fenómeno de la convección natural del agua al ser calentada. En contraste con aproximaciones previas en esta investigación se utilizó solo una fuente de luz y una cámara uniendo las técnicas de schlieren y PIV para obtener una medición simultánea. El objetivo principal no es un estudio exhaustivo de un flujo sino más bien de establecer un procedimiento para obtener la temperatura y velocidad en un flujo de fluido, este tipo de fluido fue seleccionado debido a la simplicidad del problema, sin embargo, el procedimiento se puede aplicar a una variedad de diferentes tipos de fluidos y que es el objetivo de futuras investigaciones sobre este tema.

3.2 MÉTODO PARA MEDIR TEMPERATURA EN LÍQUIDOS

En este capítulo se dará un procedimiento para determinar el valor de la temperatura en un medio no-homogéneo. Como hemos mencionado, en un sistema schlieren detectamos desviaciones de ángulo de rayos de luz. El sistema que se ha utilizado es el arreglo schlieren en configuración Z, donde en el área de prueba se colocó un contenedor lleno con agua como se observa en la Fig. 15. Para observar el efecto schlieren se usó una navaja colocada en el plano focal del segundo espejo para así detectar las desviaciones de ángulo. El valor de éste ángulo está relacionado con la posición de la navaja. De esta manera, la desviación de un rayo de luz en el plano de observación se nota como un cambio de intensidad en la iluminación. Dependiendo de la dirección del movimiento de la navaja, ya sea en eje x o el eje y, tendremos mayor o menor intensidad de iluminación en dicho plano de observación. De esta manera, moviendo la navaja desde una posición máxima al mínimo de iluminación podemos caracterizar los niveles de intensidad en función de la posición de la navaja, correspondiendo cada posición de la navaja un valor específico de Δx .

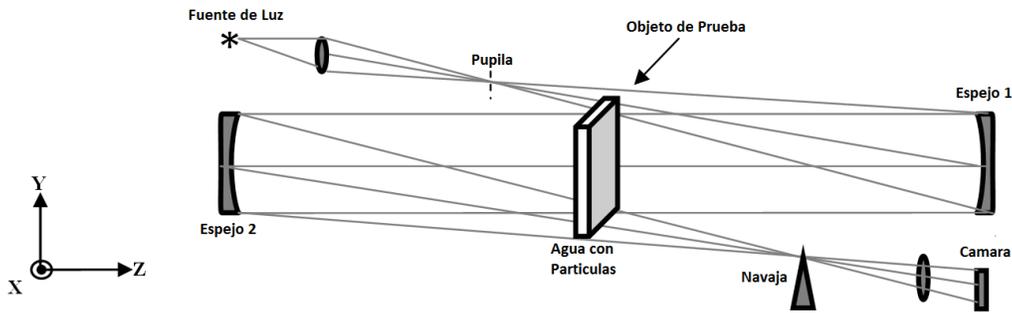


Figura 15. Arreglo schlieren en configuración Z en el área de prueba se colocó un contenedor con agua.

El procedimiento que proponemos para medir temperatura en este trabajo consiste en establecer una relación entre los niveles de intensidad y los desplazamientos laterales de la navaja. Estas posiciones de la navaja van desde la posición de no corte (máxima intensidad) hasta la posición total de corte (mínima intensidad). Y el algoritmo que se usa en este caso para la medición de temperatura se describió en la sección 2.1.3. Como se mencionó anteriormente, se necesita un procedimiento previo para obtener la curva de calibración que requiere un mínimo de 40 imágenes obtenidas desde mínima intensidad hasta un máximo de intensidad, por lo que se hizo necesario implementar un algoritmo de control para la captura automática de imágenes, por medio del control de motores a pasos de una base que tiene desplazamientos en el eje x con paso de 1.25 micras de la marca Standa® como la mostrada en la Fig. 16.



Figura 16. Montura de traslación en un eje con paso de 1.25 μ m.

Se realizó un algoritmo de control y un diseño de una placa de circuito impreso. Con esta mejora se logró observar que cuando el valor de intensidad es de aproximadamente 50% de la luz total para la condición de no-corte, se definió un rango dinámico para Δx que tienen una relación casi lineal con la intensidad schlieren. Experimentalmente se determinó, como necesario, una posición de la navaja que permitiera un 50% de la intensidad de la luz ya que en la primera etapa de investigación se utilizaron partículas de poliestireno en el fluido para poder medir la velocidad. Se iluminó con un led de luz blanca y se observó que cuando la intensidad se incrementaba a un nivel de 90% el efecto schlieren se debilitaba y, cuando se disminuía el nivel a un 20% de intensidad, las partículas tendían a presentar un efecto de

corte lateral como se muestra en la Fig. 17. Con este tipo imágenes resultaba complicado determinar la velocidad del fluido.

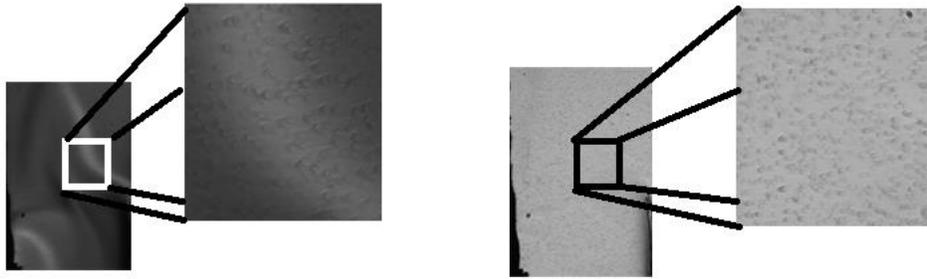


Figura 17. Efecto de mover la navaja desde una posición máxima a una mínima. A un 90% imagen izquierda, y a un 20% imagen derecha.

Con la ayuda del sistema de control se logró determinar que en la posición de la navaja donde se producía el 50% de nivel de intensidad se tenían los mejores resultados, tanto para observar el efecto schlieren como para la visualización de las partículas. Entonces se procedió a capturar las imágenes de calibración que posteriormente se convertirían en curvas de calibración, como las mostradas en la Fig. 6. Ya con las curvas se procedió con los pasos mencionados en la sección 2.1.3

3.3 CAMPOS DE VELOCIDAD EN LÍQUIDOS USANDO PIV.

Para medir los campos de velocidad se utilizaron las mismas imágenes de schlieren para calcular la temperatura del flujo de fluido. Para realizar la obtención de los vectores de velocidad se utilizó un software comercial de PIV provisto por IDT Inc. Este software utiliza una técnica de malla libre en conjunto con un algoritmo de procesamiento de segundo orden [39] para obtener la velocidad. Este algoritmo está diseñado para mejorar la precisión y la resolución espacial de los esquemas de correlación cruzada convencional. Los algoritmos de correlación cruzada y la localización de picos fueron reportadas por Lourenco y Krothapalli [40]. En este enfoque de procesamiento las imágenes con partículas se encuentran en la región de interrogación, con ventanas de interrogación cuadradas que están en el rango de tres a cuatro píxeles. Una vez detectadas las partículas en la ventana de correlación por medio de un método de umbral basado en el gradiente de intensidad de la imagen, se aplica una operación de enmascaramiento para eliminar el nivel de fondo y las partículas en los límites de las ventanas de interrogación.

El desplazamiento entre los pares de imágenes es encontrado por correlación cruzada. Cada par de partículas contribuye a una aproximación de segundo orden del desplazamiento que es evaluado en una malla sin estructurar. El flujo de fluido en cualquier punto es descrito por una función polinómica de segundo orden adaptada por un algoritmo de mínimos cuadrados, los cuales están dados por la siguiente ecuación.

$$\vec{u} = \vec{a}x^2 + \vec{b}x + \vec{c}y^2 + \vec{d}y + \vec{e}xy + \vec{f} \quad (27)$$

La ventaja de esta aproximación es que no solamente representa una aproximación de segundo orden para el campo de velocidad sino que también para los campos de velocidad

en los vórtices. Lourenco [40] demostró que este enfoque mejora la precisión y la resolución espacial más sustancialmente que los métodos tradicionales de PIV. En su estudio encontró que los errores fueron confinados en un intervalo de ± 0.025 píxeles, incluso para grandes desplazamientos hasta de nueve píxeles.

3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este experimento está enfocado a medir la temperatura y velocidad del fenómeno de convección del agua, la cual está contenida en un recipiente de vidrio que se colocó sobre una plancha de calentamiento, cuyas dimensiones son de 7.3x12 cm. La plancha configurable se fijó a valores de temperatura de 22, 28, 31 y 34 °C. Se utilizó el arreglo schlieren, en configuración tipo Z, como el que se muestra en la Fig. 15, este sistema incluye dos espejos esféricos similares con un diámetro de 0.15 m y una distancia focal de 1.54 m, se utilizó una navaja se desplazó en la dirección del eje “x” o en el eje “y” por un micrómetro motorizado, cuyo desplazamiento por paso fue de 1.25 μm .

El sistema también incluye un led de 5 mm de diámetro de luz blanca y alto brillo, el cual tiene una intensidad luminosa de 2500 lm y una longitud de onda dominante de 0.31 referido a las coordenadas del diagrama de cromaticidad. Para el análisis del flujo se usó un recipiente de vidrio con dimensiones de 71x27x2 mm. Se utilizó agua tridestilada dentro del recipiente al cual se le agregaron partículas de poliestireno de 50 μm , utilizadas para calcular los vectores de velocidad. El contenedor de agua fue posicionado horizontalmente en una mesa holográfica. La dirección de la corriente del flujo del fluido es en la dirección “y”, por lo que el filo de la navaja se coloca paralelo a esta dirección. Las imágenes schlieren fueron capturadas con una cámara de la marca Lumenera modelo LU175M que tiene una resolución de 1280x1024 píxeles a 15 cuadros por segundo y se guardaron en formato BMP a escala de 8 bits de niveles de grises. Estas resoluciones tanto como espaciales y temporales de la cámara nos permiten capturar las principales características de la dinámica del flujo de fluido en estudio.

El primer paso del experimento es capturar las imágenes schlieren en niveles de gris sin flujo para poder mover la navaja desde una posición donde se bloquee totalmente la luz a una posición donde pase toda la luz. Estas imágenes son utilizadas para obtener la curva de calibración como la mostrada en la Fig. 6. Durante el proceso, el recipiente de vidrio fue llenado con agua tridestilada que contenía partículas de poliestireno cuidando que la densidad de sembrado de partículas fuera aproximado a 5-8 partículas por cada área de prueba con la opción del software en 24x24 píxeles. El agua en el tanque se mantuvo a temperatura ambiente de 20 °C durante la etapa de calibración. Posteriormente se adquirieron un total de 40 imágenes de schlieren para los cuatro valores de temperaturas estudiados antes mencionadas. Se reitera que las imágenes obtenidas con el arreglo schlieren se utilizaron para obtener la temperatura y la velocidad al mismo tiempo por lo que se colocó la navaja a un 50% de intensidad que basado en pruebas preliminares las partículas aún eran visibles sin perder el efecto schlieren con lo que se obtuvieron los mejores resultados.

3.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA.

El valor de ρ_x puede ser determinado usando la Ec. 7, se integra usando la regla trapezoidal que es una de las formulas cerradas de Newton-Cotes para poder obtener el valor de la densidad para ρ cómo se mencionó en la Ec. 8, los resultados de la intensidad son substituidos como se mencionó en la sección 2.1.1 y en la Ec. 9, para obtener la temperatura de interés. En la Fig. 18, se muestra un diagrama del procedimiento utilizado. Para obtener las curvas de calibración para cada pixel la navaja es desplazada lateralmente con ayuda de la base motorizada desde -1.25mm a 1.25mm con un tamaño de paso de $\Delta x = 62.5\mu m$, y en cada posición de la navaja una imagen de schlieren es obtenida. La Fig. 19 muestra algunas imágenes de calibración para diferentes posiciones de la navaja, todas las imágenes se restaron con la imagen de referencia con la posición de la navaja en el origen $\xi=0$, la imagen schlieren de referencia está indicada con cuadro rojo la cual indica la mayor sensibilidad al realizar los experimentos y esta imagen se obtiene con la ayuda de la curva de calibración escogiendo una imagen que se encuentre en la parte central en intensidad de la curva de calibración.

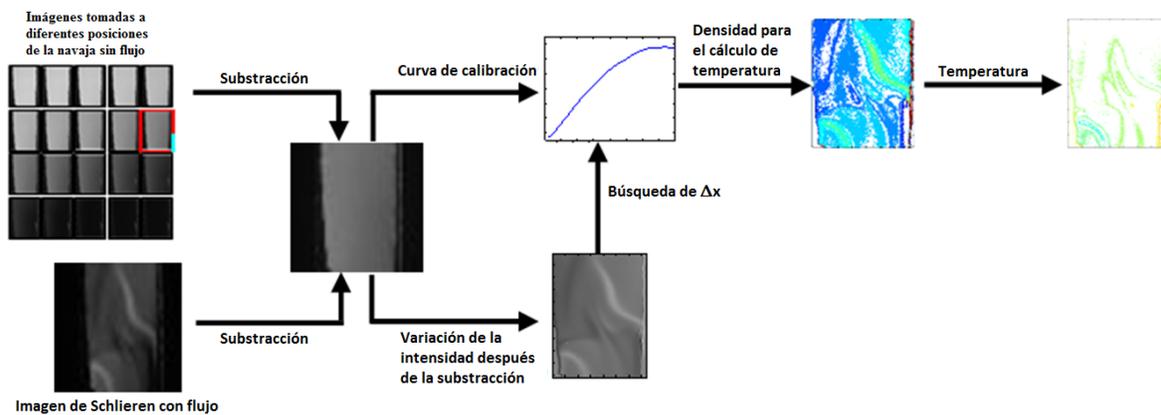


Figura 18. Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de imágenes schlieren.

En la parte inferior del diagrama de flujo, se tiene una imagen schlieren en presencia de flujo, y esta imagen se resta con la imagen de referencia sin flujo y con la navaja en la posición de referencia. La intensidad de la desviación de la luz para cada pixel de la imagen está directamente relacionada con la posición de la navaja a partir de las curvas de calibración. Con el fin de aumentar la resolución en Δx , cada curva de calibración se interpola a partir de 40 a 250 puntos mediante el uso de un polinomio de interpolación cubica de Hermite proporcionada por el software de Matlab. Este algoritmo no modifica la forma de la curva.

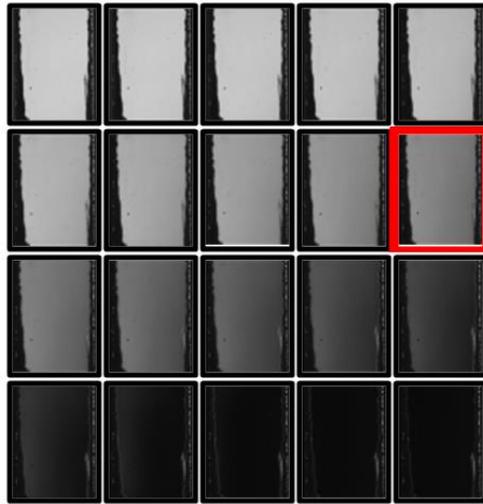


Figura 19. Imágenes utilizadas para la curva de calibración sin flujo.

Una sección ampliada de las imágenes tomadas en los experimentos se muestra en la Fig. 20, donde una imagen schlieren instantánea se muestra con partículas en el interior del recipiente con agua, en la que se aprecia la distorsión de las partículas de $50\ \mu\text{m}$ con la navaja colocada a un 60% de intensidad aproximadamente. Se puede observar que una parte de las partículas son recortadas, haciendo el análisis de PIV más complicado para el software. La temperatura y la velocidad de este tipo de imágenes schlieren se calculan utilizando el procedimiento descrito en las secciones 2.1 y 2.4 respectivamente.

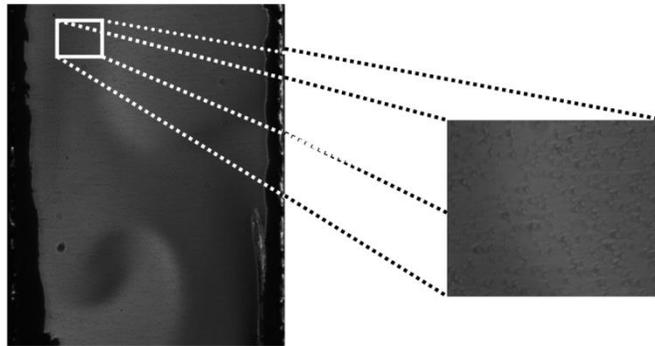


Figura 20. Imágenes experimentales del flujo para mediciones simultaneas de schlieren y PIV.

En la Fig. 21, se muestra imágenes de schlieren y las gráficas de contorno de la temperatura para los cuatro casos estudiados (22°C , 28°C , 32°C , y 34°C establecidos con el control de temperatura de la plancha). Las imágenes schlieren muestran los patrones característicos de este tipo de flujo de fluidos. Un filtro de promediado se aplicó a los datos de temperatura para reducir el ruido de alta frecuencia provocado por las partículas presentes en el flujo de fluido. Se encontró que la temperatura del contenedor de agua es consistente con el valor de la temperatura medida mediante el uso de termopar.

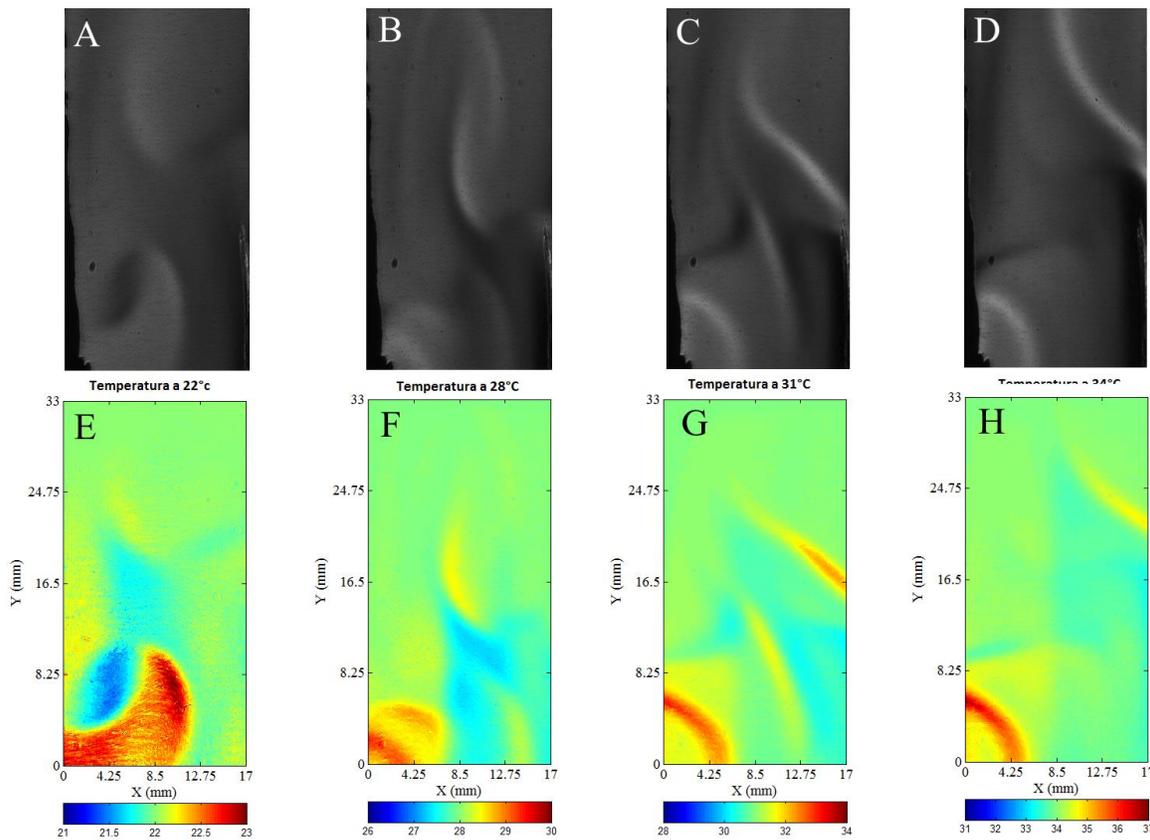


Figura 21. A-D, Ejemplo de patrones en imágenes schlieren a diferentes temperaturas, E-H grafica de contornos de los campos de temperatura.

3.6 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD

A partir del análisis experimental se deduce la necesidad de considerar la calidad de las imágenes schlieren como un tema clave en la aplicación del análisis PIV, por lo que la escala y la resolución de la imagen se determinan por tres factores principales: la máxima resolución de la cámara y el tamaño del sensor del CCD; la distancia focal de la lente utilizada y la escala del flujo en estudio. Además, las imágenes schlieren tienen problemas de calidad de imagen adicionales que surgen de la sensibilidad de la óptica de refracción de las perturbaciones en el flujo bajo investigación. Como PIV requiere la identificación de partículas desde el flujo de fluido, y la técnica de schlieren añade sombras al contorno del gradiente de densidad, entonces se ve afectada la medición de la velocidad. Para reducir el error en la medición causado por las sombras del efecto schlieren, se hace necesario el equilibrio entre la sensibilidad del sistema schlieren y la definición de las partículas para el método PIV. Este equilibrio se define por la posición de la navaja que se encontró experimentalmente alrededor del 50%, ya que la afectación en la visualización de las partículas se minimiza en esa posición, como se observa en la Fig. 20. Para el caso de esta investigación se colocó la navaja tratando de evitar el efecto de supresión de las partículas en las mediciones de velocimetría.

En los resultados experimentales se consideró un flujo de fluido que se genera durante la convección de calor por la simplicidad del problema, sin embargo el procedimiento se puede aplicar a diferentes tipos de flujos de fluidos, y es el objetivo de trabajos futuros

sobre este tema. La distancia de la cámara PIV fue elegida para maximizar la resolución, manteniendo las partículas en la región de la profundidad de foco seleccionada de acuerdo a la profundidad del contenedor. En el experimento, las partículas dispersan luz en el flujo de fluido en la dirección en que viaja la luz, lo que en PIV resulta ser el ángulo de transmisión más eficiente. Se encontró que la fuente de luz empleada fue suficiente para poder obtener las imágenes de PIV. Las imágenes de schlieren obtenidas se analizaron mediante el uso del software de IDT Inc. En nuestro análisis se utilizó una ventana de interrogación de 32 píxeles y la información de la velocidad se interpola en una malla de 45x60 puntos.

En nuestro experimento, el número aparente de partículas disminuye cuando el filo de la navaja aumenta más del 50% como se mencionó anteriormente. Aunque hay un aumento porcentual en la sensibilidad de schlieren ocasiona que disminuya la resolución del sistema de PIV. Sin embargo para reducir este efecto se calculó el parámetro de contraste que define si un punto de malla puede ser omitido o considerado dentro del software de análisis. El valor que se utiliza es el mínimo aceptado para el software de IDT (0,05). En la Fig. 22 se muestran dos imágenes consecutivas tomadas a diferentes instantes de tiempo con una separación de 1/15s las cuales contienen partículas de poliestireno de 50 μm .

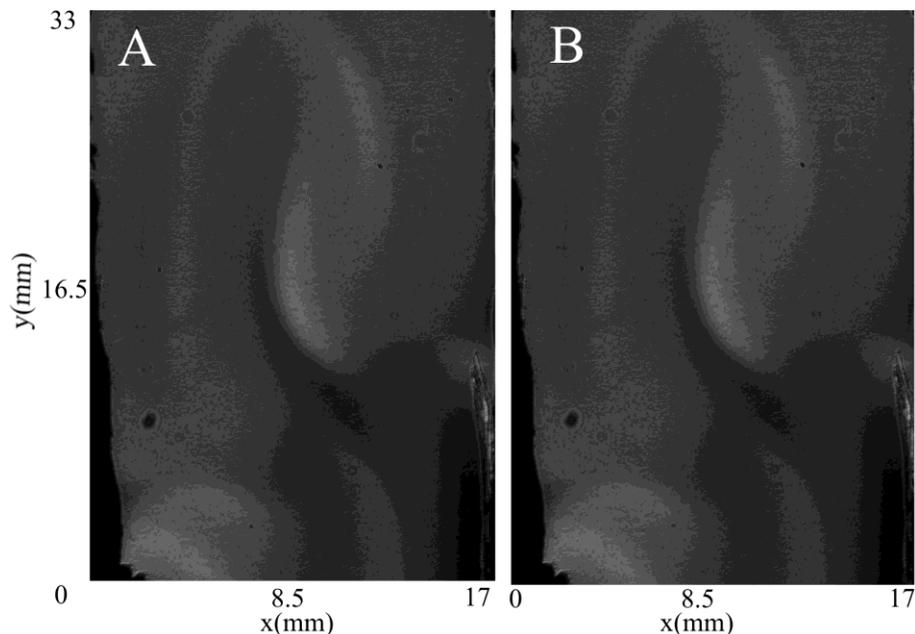


Figura 22. Imágenes típicas de partículas de las mediciones de PIV, las imágenes A y B están tomadas con un tiempo de separación de 1/15 s con partículas de 50 μm .

Los resultados de PIV para las imágenes de schlieren se pueden observar en la Fig. 23. En la figura se muestra un espacio vectorial de una imagen PIV instantánea del flujo de agua por convección a diferentes temperaturas (22°C, 28°C, 31°C y 34°C), en las cuales se nota el flujo de convección característico del agua al ser calentada por una placa de control térmico. Una revisión de los resultados mostro que la distribución de la velocidad del flujo de convección obtenida, por el método propuesto, captura las principales características del flujo de fluido bajo estudio a una velocidad máxima de 0.0108 m/s, 0.0131 m/s, 0.0136 m/s y 0.099 m/s que se encontraron en todo el campo analizado del flujo de fluido en cada caso.

Se observó que los resultados de PIV corresponden cuando el flujo de fluido se analizó sin navaja y cuando se analiza junto con las mediciones schlieren.

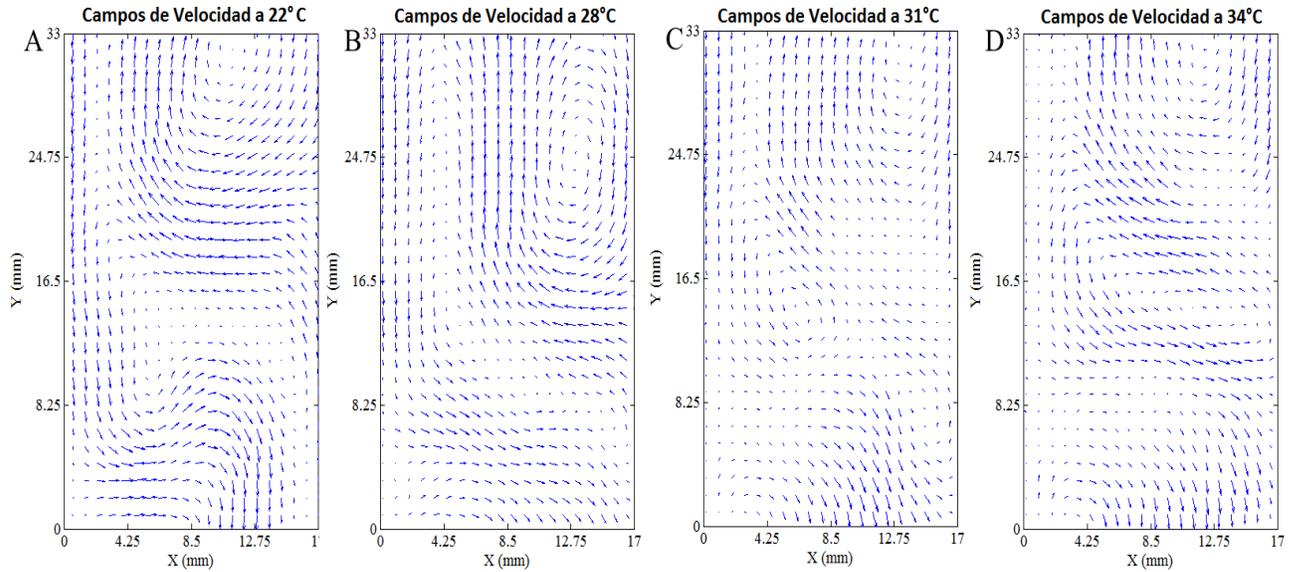


Figura 23. Desplazamiento de las partículas encontradas con el método de PIV aplicado a la convección natural del agua al calentarse.

El nuevo enfoque que se presentó en el desarrollo del trabajo de investigación permite la combinación de las técnicas de schlieren y PIV utilizando una sola fuente de luz (led), y ha demostrado ser una herramienta muy eficaz para la obtención de densidad y velocidad de manera simultánea para el patrón de flujo analizado. La Fig. 24 muestra los resultados experimentales de laboratorio acerca de la convección natural del agua provocadas por una placa térmica rectangular a 22°C. La Fig. 24-A es una imagen del flujo natural de agua al ser calentada y tomada con el arreglo schlieren y con la navaja al 50%. La Fig. 24-B muestra un mapa de contorno de la distribución de la temperatura obtenida por el método de schlieren realizando la resta de la imagen con la de referencia para evitar ruido. La Fig. 24-C muestra el campo de velocidad obtenida por el método de PIV a través del software de IDT, y finalmente es graficado en la Fig. 24-D el campo de velocidad superpuesta a la distribución de la temperatura.

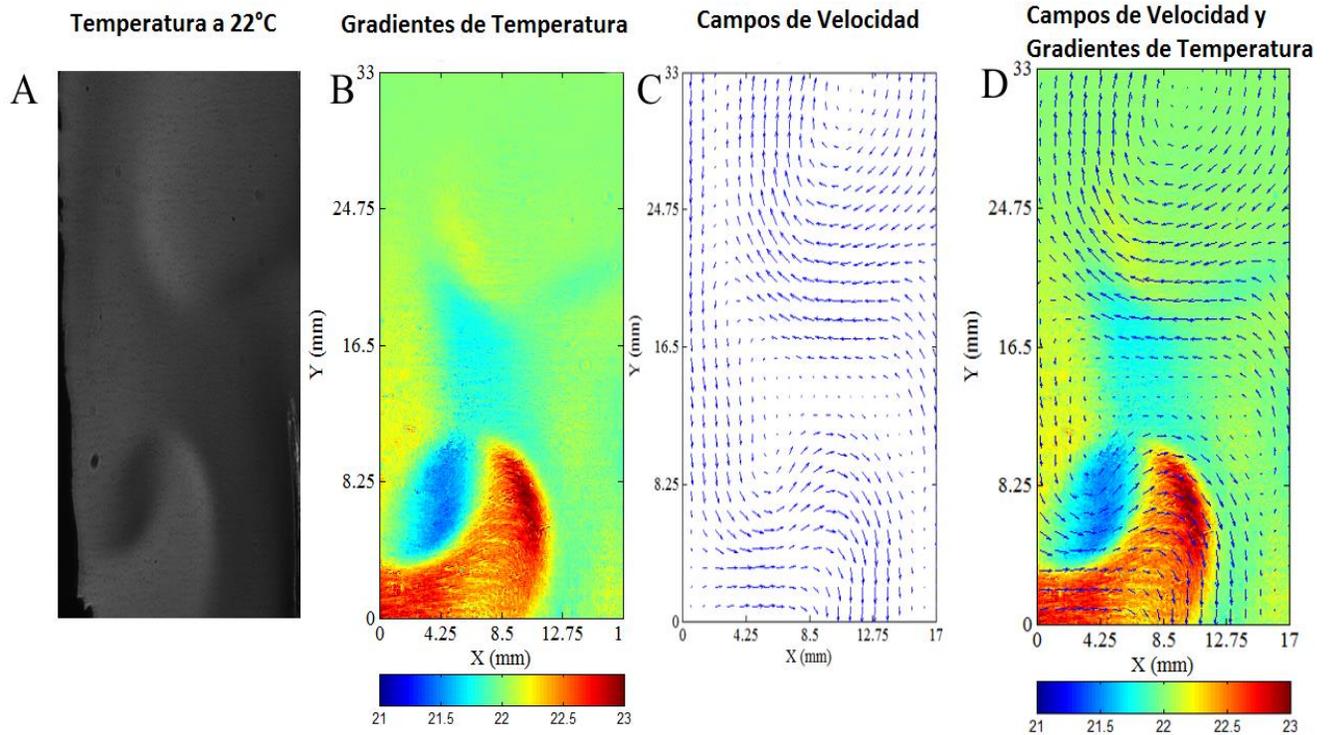


Figura 24. A) Imagen de schlieren original, B) análisis de temperatura, C) campo de vectores de velocidad, D) temperatura y velocidad de la misma región de interés.

CAPÍTULO 4. TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL AIRE

4.1 INTRODUCCIÓN A TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL AIRE

El flujo de fluido provocado por una placa de metal calentada ha sido ampliamente estudiado y reportado en la literatura [41]. Este fenómeno se encuentra en aplicaciones de ingeniería como la refrigeración en equipos electrónicos, la calefacción, la producción de energía, colectores solares, y en la naturaleza: por lo que es materia de interés en áreas de astrofísica, geofísica y ciencias de la atmosfera entre otros. Para una caracterización adecuada de un flujo de convección se requiere del conocimiento de la velocidad y la temperatura del mismo. Sin embargo, en un flujo de fluido por convección del aire es difícil colocar partículas trazadoras con el fin de utilizar la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) y así medir la velocidad. En el capítulo 3 de esta tesis se propuso un método para medir la velocidad de un flujo de fluido al ser calentado, pero esta metodología se ve rebasada cuando se trata de un fluido como es el flujo de convección natural del aire al ser calentado, por lo que se propone un método alternativo para medir la temperatura y la velocidad.

Las técnicas ópticas de campo completo han sido desarrolladas para determinar la temperatura y la velocidad en fluidos, y un número de técnicas conocidas como fluorescencia inducida por láser, interferometría holográfica, fotografía de láser speckle, schlieren o una combinación de estas pueden ser empleadas como se revisó en la sección 1.2 [42]. En la mayoría de estas técnicas, para un campo de fluido en tres dimensiones, se realiza la integración a lo largo de un camino óptico, lo que produce un promedio de la medición de la temperatura y velocidad. Sin embargo, mediciones locales de temperatura y velocidad no pueden ser determinadas de una sola imagen. Pero para flujos de fluido en dos dimensiones es posible determinar la temperatura y velocidad promedio en la dirección de la iluminación. Se puede notar que con este enfoque se requiere menos esfuerzo computacional que el utilizado en la técnica de tomografía, y las mediciones pueden realizarse en situaciones donde el ángulo de visión es restringido y la técnica de tomografía no es posible.

En este trabajo de investigación, se muestra un sistema clásico de schlieren que puede ser utilizado para medir la velocidad y temperatura en un flujo de convección del aire. La técnica schlieren nos permite detectar las variaciones del índice de refracción en un flujo de fluido y permite observar el estado del flujo de convección natural del aire. Como se puede observar, la técnica de schlieren es una técnica que requiere de la integración a lo largo de una trayectoria de la dirección de iluminación, pero a pesar de este inconveniente la técnica ha sido utilizada en diferentes aplicaciones. Por ejemplo, ha sido usada frecuentemente para cuantificar la temperatura en fluidos, y un número de técnicas conocidas como son: color schlieren, schlieren de fondo orientado, y calibración schlieren han sido utilizadas. El éxito de la técnica de schlieren radica en su implementación relativamente fácil, es de bajo costo, usa una fuente de luz convencional un led, tiene alta sensibilidad a los cambios de índice de refracción y no tiene afectaciones por las vibraciones [25]. El sistema de schlieren clásico que se utilizó durante esta investigación se explicó en la sección 2.1.1, se empleó el sistema en configuración Z como es mostrado en la Fig. 25. En esta figura se observa la configuración clásica con la diferencia en el área de prueba donde se colocó un recipiente

para poder confinar el flujo de aire con la finalidad de que no sea perturbado por el medio circundante, y así aproximar el flujo del aire a dos dimensiones.

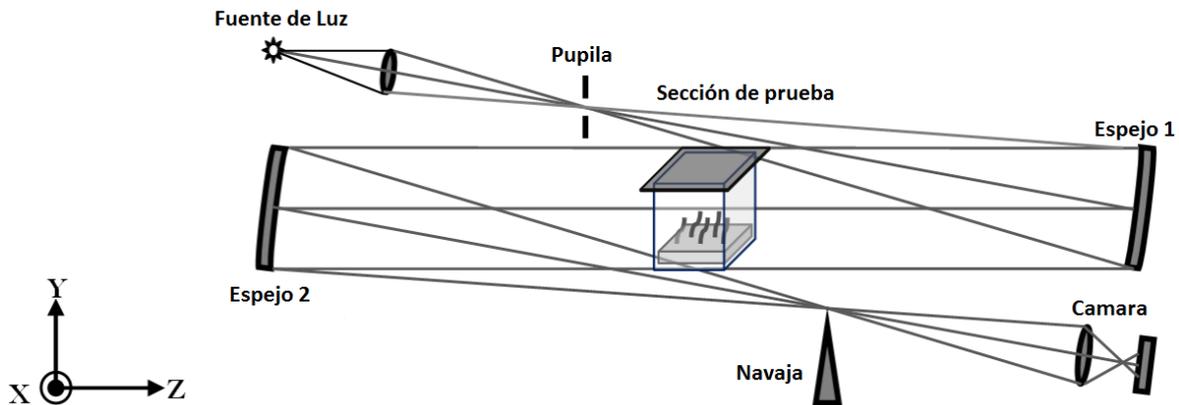


Figura 25. Esquema de schlieren en configuración Z usado para aplicar la técnica de Flujo Óptico.

La técnica propuesta en este trabajo de investigación se aplica para medir temperatura y velocidad de un flujo de convección del aire provocado por una placa de metal caliente. La placa fue fijada a una temperatura específica y las pruebas se realizaron con el flujo confinado en un recipiente de vidrio y el flujo sin confinar. Este tipo de fluido fue seleccionado por que se encuentra en una gran variedad de aplicaciones y para el caso del flujo confinado se aproxima a un flujo en dos dimensiones. Vale la pena mencionar que el objetivo principal de este trabajo no es el estudio exhaustivo del flujo de fluido, sino de establecer un procedimiento para obtener la temperatura y velocidad de un flujo de convección del aire al ser calentado. En contraste con los enfoques de las técnicas mencionados anteriormente, se utiliza una sola fuente de luz y una sola cámara en el arreglo schlieren configuración Z para medir los campos de velocidad y temperatura simultáneamente.

4.2 MÉTODO PARA MEDIR TEMPERATURA EN EL AIRE

Como se mencionó en el capítulo anterior cuando un rayo de luz pasa a través de un medio no-homogéneo sufre una desviación en su trayectoria en cierto ángulo. Este ángulo depende del índice de refracción y del espesor del medio que se está analizando. La metodología empleada se explica en la sección 2.11, en la experimentación se aplicó la Ec. 7 donde ρ es la densidad del aire, y h es el espesor del medio no homogéneo bajo análisis, en la dirección de propagación de la luz. La constante de Glastone-Dale K depende de la composición del medio y de la longitud de onda de la luz que ilumina el sistema. Una vez que ρ ha sido determinada de la Ec. 8, esta puede ser sustituida en la Ec. 9 para obtener la temperatura correspondiente. El método para medir la temperatura ha sido explicado en el capítulo anterior, la idea básica del procedimiento para medir la temperatura es relacionar los niveles de gris de la imagen schlieren con la posición de la navaja colocada en el plano focal del sistema. La posición transversal puede cubrir las condiciones desde máxima intensidad a mínima intensidad. Este procedimiento se utiliza para obtener la curva de

calibración como la mostrada en la Fig. 6, para obtener los resultados de temperatura se utilizó el procedimiento explicado en la sección 2.1.1 con las imágenes de calibración mostradas en la Fig. 27 y en la referencia [43], se hace una descripción más detallada del procedimiento usado en este trabajo para determinar las mediciones de temperatura.

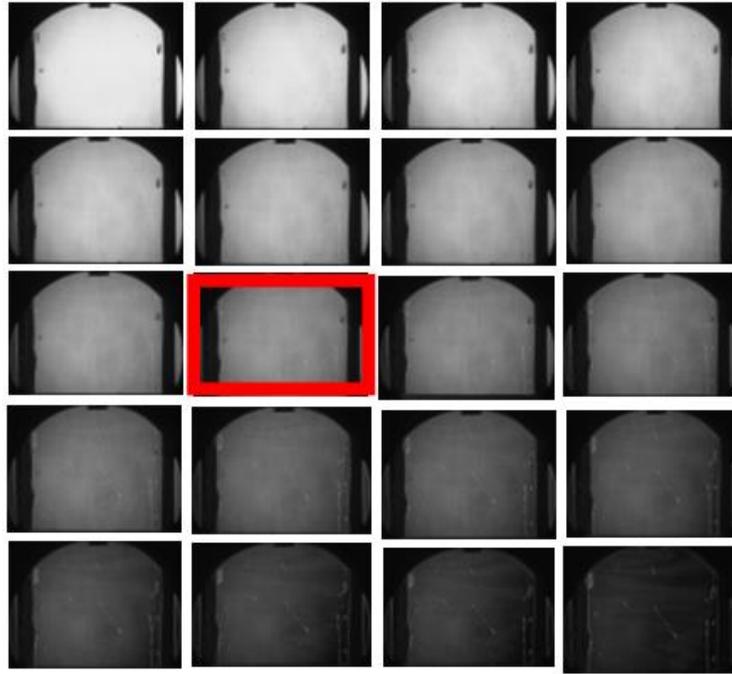


Figura 26. Imágenes utilizadas para la curva de calibración con el recipiente para confinar el flujo de fluido de aire.

4.3 CAMPOS DE VELOCIDAD EN EL AIRE (FLUJO ÓPTICO).

Como se mencionó anteriormente para medir la velocidad en fluidos como el aire donde es complicado insertar partículas trazadoras. Se puede considerar la técnica de flujo óptico que es la distribución de la velocidad aparente del movimiento del patrón de brillo en una imagen [35]. La suposición básica en la técnica de flujo óptico es que los niveles de gris de los objetos en tomas subsecuentes no cambian con el tiempo. En particular se trabajó con fluidos donde esta suposición es válida por la velocidad de la cámara a 15 fps, lo cual nos permite seguir la metodología que se encuentra en la sección 2.5.3. en particular la persistencia temporal. En las Ec. 20-21 de esta sección, se asume un valor de α el cual es un factor de ponderación utilizado para compensar a las regiones en donde el gradiente de brillo es pequeño. Por ser un algoritmo que utiliza aproximaciones hasta converger a un valor definido se consideró un valor encontrado experimentalmente de 30. Con este valor se procedió a implementar la Ec. 22-23 para calcular los campos de velocidad de imágenes obtenidas con un arreglo schlieren como la mostrada en la Fig. 27. Es preciso hacer notar que usando esta técnica para los campos de velocidad se obtiene una alta resolución espacial.

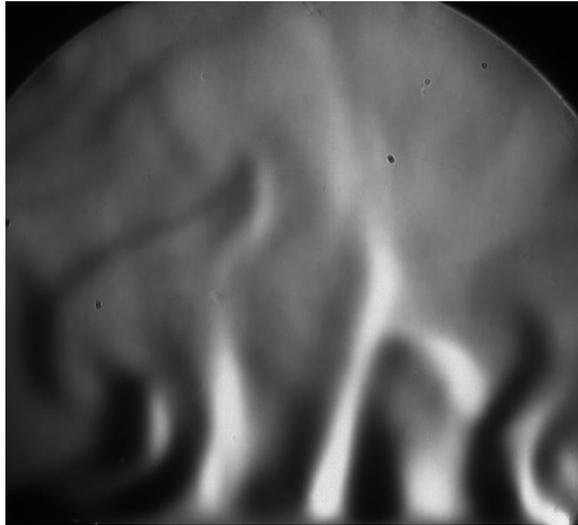


Figura 27. Flujo natural del aire sin confinar al ser calentado.

4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este experimento está dirigido a medir la temperatura y velocidad de la convección del aire causado por una placa de metal con control térmico. El dispositivo utilizado fue el de Torrey Pines Scientific de dimensiones 7.3x11cm, tal como se muestra en la Fig. 28. El rango de control de temperatura es de -10 a 100 °C. En los experimentos, la placa rectangular fue configurada para una temperatura de 90 °C. El flujo de convección fue analizado en dos configuraciones diferentes: cuando el flujo fue confinado por un recipiente de vidrio con dimensiones de 9x13x20 cm y cuando el flujo no fue confinado.



Figura 28. Placa con temperatura configurable de la compañía Torrey Pines Scientific.

Se utilizó en esta investigación la configuración Z del arreglo schlieren de la Fig. 25, esta incluía dos espejos esféricos con diámetro $D=0.15\text{m}$, una distancia focal $f=1.54\text{m}$, y una navaja que podría ser trasladada en la dirección x o y con un micrómetro con tamaño de paso de $1.25\mu\text{m}$, el sistema también incluían un led de 5 mm de diámetro de alta intensidad (2500 lm) y una longitud de onda dominante en 0.31nm . Las imágenes schlieren fueron adquiridas con una cámara Lumenera LU175M, a 15 cuadros por segundo y a una

resolución de 1280x1024 píxeles, en formato BMP a escala de 8 niveles de gris. Esta configuración fue seleccionada para permitir capturar las características principales de la dinámica del fluido bajo estudio. El primer paso del experimento consistió en capturar los niveles de gris de las imágenes de schlieren sin flujo para diversas posiciones de la navaja. Estas imágenes fueron usadas con propósitos de calibración, lo cual fue explicado en la sección 2.11. En este experimento se adquirieron un total de 100 imágenes schlieren para los dos casos bajo estudio, todas las mediciones fueron realizadas en un cuarto a una temperatura ambiente de 25°C. Es preciso notar que las mismas imágenes de schlieren fueron usadas para calcular las dos variables de interés: temperatura y velocidad.

4.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA.

Con el fin de demostrar la viabilidad del enfoque propuesto en esta investigación, se calculó la temperatura y velocidad de un flujo de convección del aire de imágenes schlieren que se explicó en la sección 2.1.1. En la Fig. 29 se muestra un diagrama de flujo indicando el procedimiento para obtener la temperatura y velocidad de las imágenes schlieren, aplicando la técnica de flujo óptico por ser difícil colocar partículas.

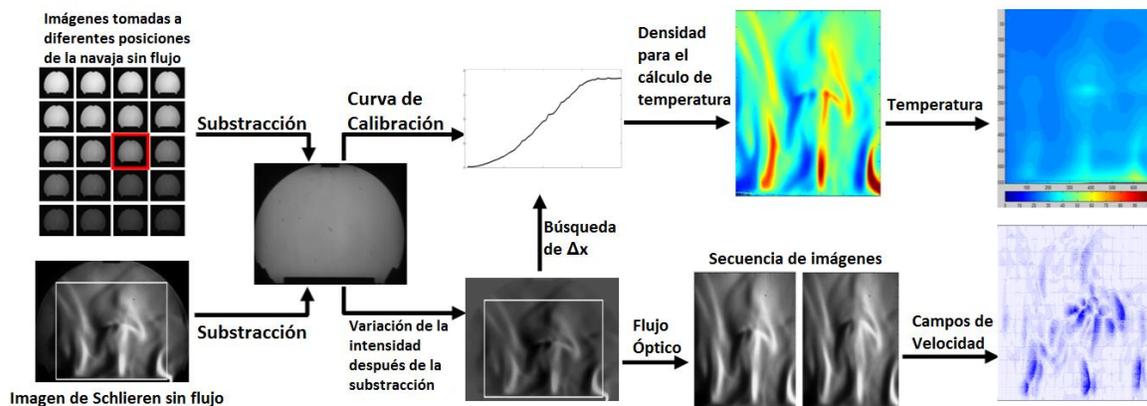


Figura 29. Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura y velocidad de imágenes schlieren aplicando la técnica de flujo óptico.

En nuestros resultados experimentales, se consideró un flujo de convección de aire por la simplicidad del problema. Pero este procedimiento puede ser aplicado a diferentes tipos de fluidos en los que no se puede aplicar la técnica de PIV, lo cual es el objetivo de trabajos futuros. Para cada temperatura bajo prueba se tomaron un total de 100 imágenes de schlieren, y se obtuvo una curva de calibración para cada pixel para obtener la temperatura. Como se mencionó anteriormente, cada calibración es determinada grabando imágenes de schlieren moviendo la navaja lateralmente desde -1.25mm a 1.25mm con un paso de $\Delta x = 62.5 \mu\text{m}$. Estas imágenes son restadas de la imagen obtenida con la navaja en la posición de referencia. En el diagrama de flujo de la Fig. 29, la imagen de referencia es indicada con un cuadro rojo esta posición de la navaja es en la que obtenemos mayor sensibilidad para al realizar los experimentos y esta imagen se obtiene con la ayuda de la curva de calibración escogiendo un punto o imagen que se encuentre en la parte central en intensidad de la curva, en la Fig. 6 se muestra una curva de calibración típica que es usada para calcular la temperatura, la cual representan la posición de la navaja contra la desviación de intensidad.

Después de este procedimiento, todas las imágenes de schlieren obtenidas en presencia de flujo son restadas de la imagen con la navaja en la posición de referencia, entonces la desviación de intensidad para cada pixel se relaciona directamente con la posición transversal de la curva de calibración. Este procedimiento se explicó en la sección 2.1.1. Esta metodología se sigue para obtener la temperatura de interés.

En la Fig. 30, se muestran dos imágenes de schlieren instantáneas y la gráfica de su temperatura correspondiente en los dos casos bajo estudio. Una sección de las imágenes de schlieren fue seleccionada para medir la temperatura. En los dos casos el patrón de flujo de fluido, que muestran las imágenes de schlieren, es provocado por los cambios de densidad debido a la variación de la temperatura de la placa. Esta placa calienta el fluido que la rodea y se eleva debido a la convección natural del aire caliente. En el segundo caso el flujo de aire no confinado muestra un patrón al azar debido a las corrientes de aire que ingresan al sistema, y para el caso del flujo de fluido confinado en el recipiente de vidrio el patrón de flujo radial en el centro de la placa metálica. En este caso este tipo de fluido se aproxima a dos dimensiones.

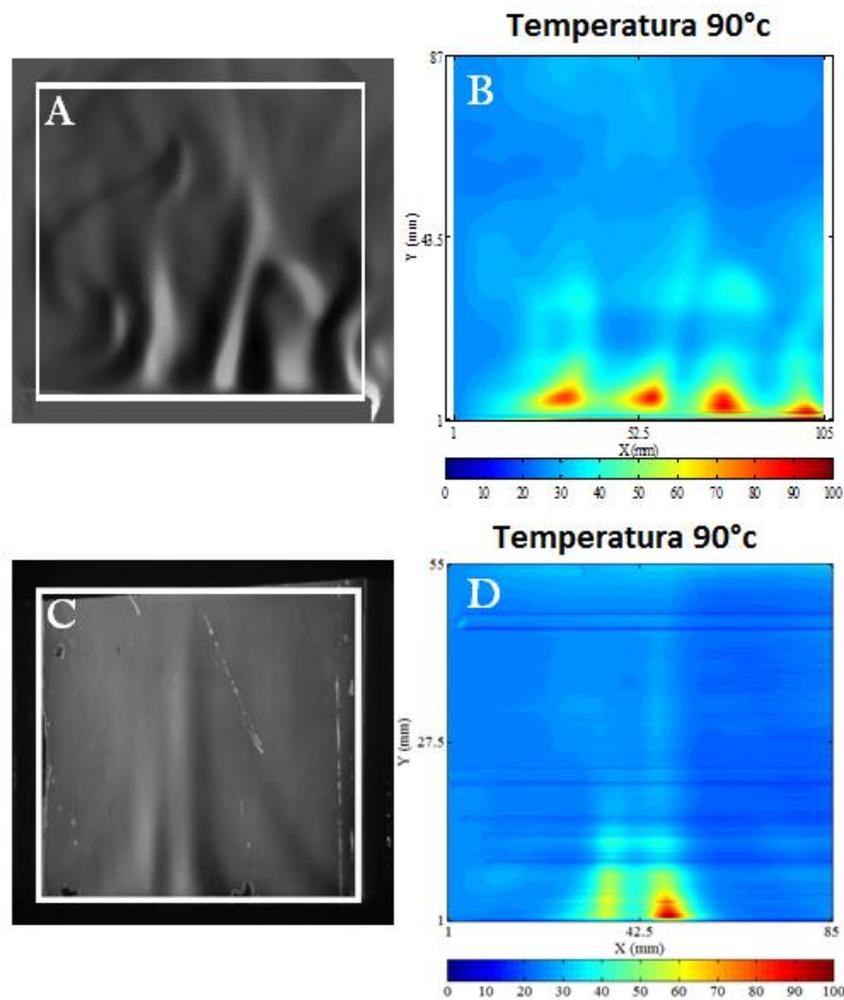


Figura 30. Imágenes schlieren instantáneas y sus gradientes de temperatura, A-B) flujo de fluido sin confinar; C-D) flujo de fluido confinado.

Para cada caso se encontró que la temperatura cerca de la superficie de la plancha caliente es consistente con el valor programado y que se puede comparar con las mediciones realizadas en la superficie con un termopar tipo k. Se promedió la temperatura de 100 imágenes tomadas con el arreglo schlieren. Se observó que con este número de imágenes promediadas, el patrón resultante de la imagen promedio no presentaba cambios. Este promedio se utiliza para reducir la influencia de fluctuaciones en el fluido como se muestra en la Fig. 31. Las mediciones fueron tomadas a lo largo de la placa caliente a 5mm de la superficie por lo tanto las medidas realizadas con el termopar deben ser promediadas a lo largo del eje z antes de ser comparadas con las mediciones realizadas con el arreglo de schlieren.

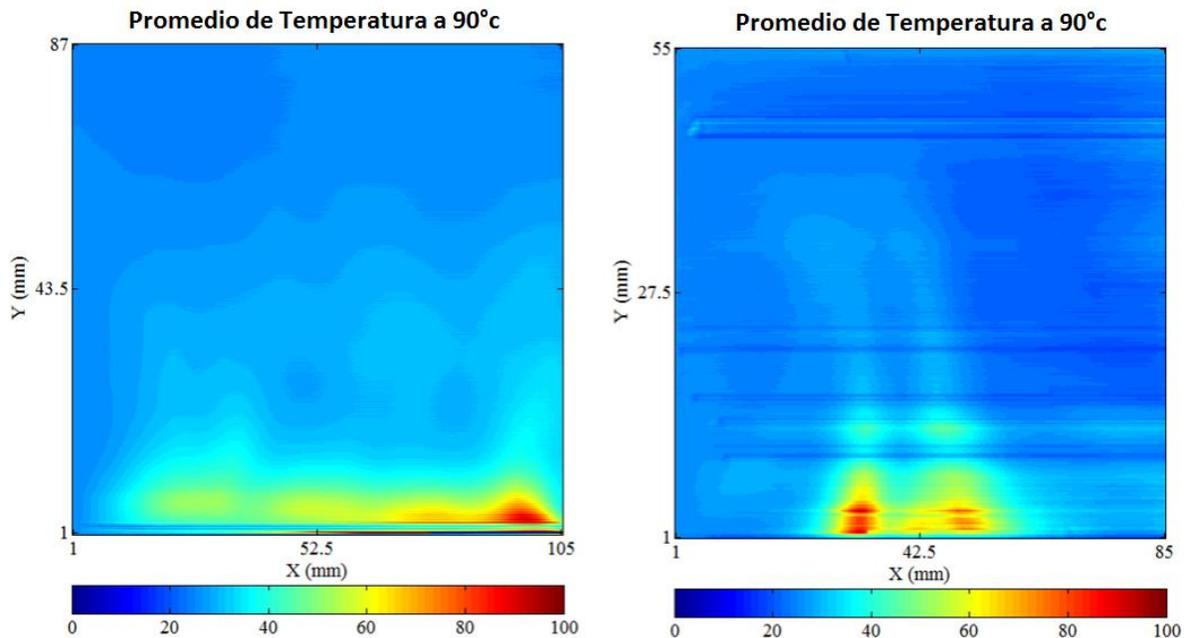


Figura 31. Promedio de los campos de temperatura usando 100 imágenes schlieren para un flujo confinado (Izq.) y no confinado (Der.)

Se encontró que la temperatura en medio de la sección bajo prueba fue consistente con las mediciones realizadas con el termopar [25], correspondientes a 5mm de separación de la superficie de la placa caliente y son consistentes con los valores de 64 y 67 °C respectivamente como se muestra en la Fig. 31, es importante mencionar que las mediciones de schlieren son integradas a lo largo del camino óptico que atraviesa el objeto bajo prueba, por lo tanto variaciones en la comparación se pueden encontrar principalmente en el flujo no confinado ya que es un fluido tridimensional. Como siempre, las comparaciones pueden hacerse cerca de la superficie de la placa caliente, donde las variaciones no son muy grandes y donde el flujo de fluido tiene un patrón de flujo radial en el centro de la placa metálica que puede ser considerado en dos dimensiones. Es diferente para el proceso experimental donde se utilizó en fluido confinado en un recipiente de vidrio, las comparaciones entre schlieren y el termopar pueden ser realizadas a diferentes distancias de la superficie de la placa caliente ya que el fluido puede considerarse que es de dos dimensiones.

4.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA VELOCIDAD.

Como se explicó anteriormente, en este tipo de flujos de fluidos las imágenes de schlieren no muestran información de la velocidad utilizando técnicas de correlación, porque es difícil sembrar partículas. Sin embargo, usando el procedimiento descrito en la sección 2.5.3, se puede extraer los campos de velocidad de imágenes schlieren. La medición del desplazamiento del patrón de brillo entre dos imágenes de schlieren consecutivas es obtenida directamente de la secuencia de imágenes. El intervalo entre cada par de imágenes es fijado por la cámara digital. Entonces los campos de velocidad pueden ser obtenidos del desplazamiento del flujo de fluido con respecto a la velocidad de captura de imágenes. En la parte inferior del diagrama de flujo mostrado en la Fig. 29 se observa el procedimiento para obtener los vectores de velocidad a partir de una imagen schlieren. Para estos cálculos el conjunto de imágenes obtenidas en presencia de flujo en la zona bajo estudio son restadas de la imagen con la navaja en la posición de referencia y con este procedimiento se elimina el ruido presente en las imágenes.

Las 100 imágenes de schlieren utilizadas para calcular temperatura se usan para calcular los mapas de velocidad, entonces un total de 100 pares de imágenes de schlieren deben ser obtenidos para calcular los campos de velocidad. Para realizar las iteraciones se propuso un factor de α de 30 para las ecuaciones. En la Fig. 32 son mostradas la primera y segunda imagen de las consecutivas instantáneas a una temperatura de 90°C para la prueba de flujo confinado y sin confinar en el recipiente. En la misma figura se muestran los vectores de velocidad que se obtuvieron aplicando la técnica de flujo óptico a imágenes obtenidas con el arreglo de schlieren.

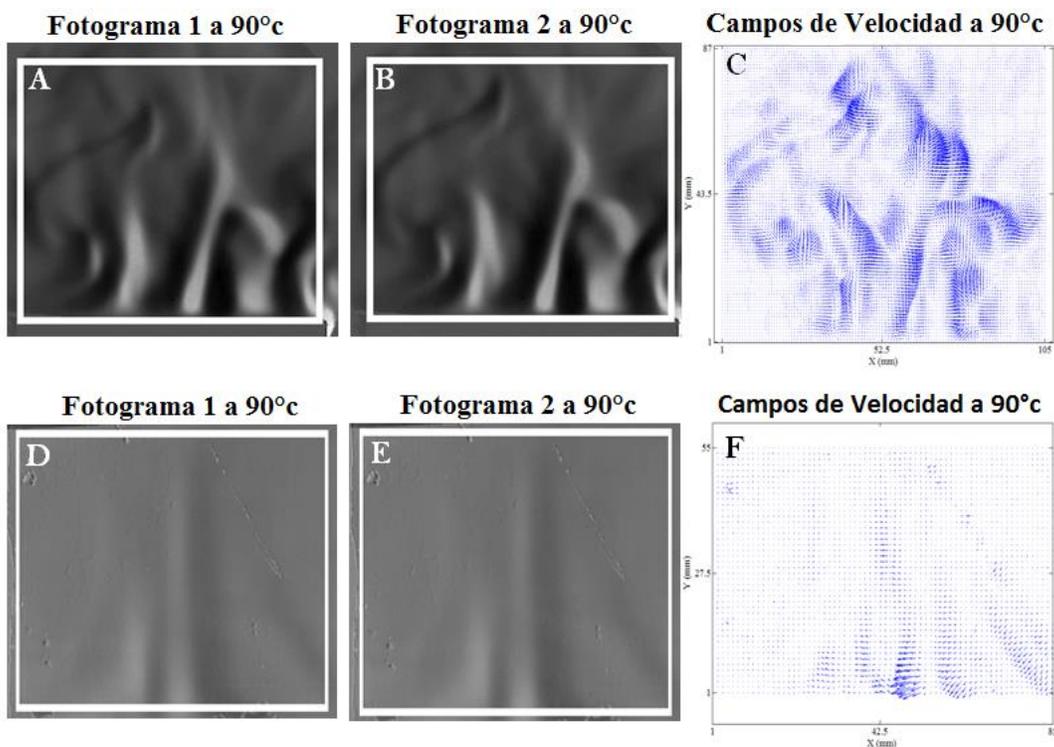


Figura 32. Imágenes de schlieren a diferentes instantes de tiempo con sus respectivos campos de velocidad, A-C flujo sin confinar, D-F flujo confinado.

Un promedio de velocidad de 32.8 mm/s fue calculado para el flujo de fluido sin confinar y con una velocidad promedio de 30.3 mm/s para el fluido confinado en el recipiente de vidrio. Es importante recalcar que las imágenes de schlieren fueron capturadas a una velocidad de 15 Hz. Las imágenes procesadas solo tienen información donde los gradientes de densidad son visibles. Se puede notar que los gradientes de densidad son más visibles cuando el fluido no estaba confinado en el recipiente de plástico ya que el flujo es perturbado por el aire que entra al sistema. Entonces más vectores de velocidad pueden ser obtenidos en este caso de estudio. Para el flujo de fluido cuando está confinado, los vectores de velocidad son concentrados principalmente en el patrón de flujo radial en el centro de la placa metálica que forma en el fluido. La Fig. 33 muestra una imagen schlieren instantánea, el cálculo de temperatura, la velocidad calculada y el campo de velocidad superpuesto en la distribución de la temperatura para obtener las características principales de un flujo de convección del aire.

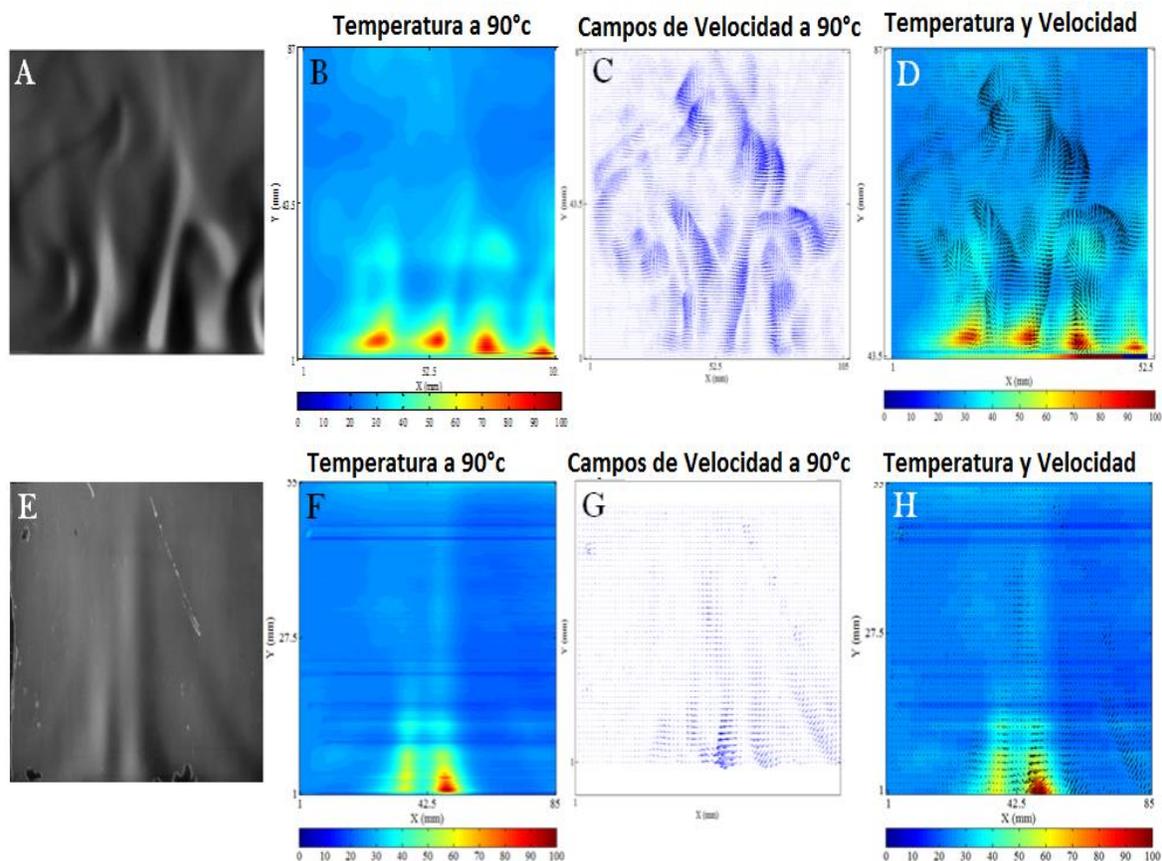


Figura 33. A y E Imágenes obtenidas con el arreglo schlieren, B y F análisis de temperatura, C y G campos de velocidad, D y H temperatura y velocidad de la misma región de interés para un flujo confinado (superior) y sin confinar (inferior).

CONCLUSIONES

El trabajo de investigación presentado corresponde al desarrollo y puesta en marcha de un sistema schlieren en configuración Z, el cual mide campos de velocidad y temperatura en flujos de convección por gradientes de temperatura, generados por una placa de metal caliente. Por la naturaleza del trabajo de investigación, implicó el manejo de diversas disciplinas, de las cuales se analizan las matemáticas utilizadas, los arreglos ópticos empleados, el análisis de imágenes y la programación para automatizar parte de los procesos involucrados. En este trabajo se partió de las técnicas ópticas de visualización de flujos, se observó que estas técnicas eran muy adecuadas para la medición cualitativa de ciertas variables físicas como la velocidad, densidad y presión en ciertos flujos de fluidos, como se menciona en el trabajo realizado por C. Alvares [43], Estas técnicas ópticas pueden ser utilizadas para la cuantificación de estas variables físicas, haciendo las configuraciones pertinentes. Por lo que en esta investigación se utilizó la técnica óptica de campo completo de schlieren, aplicada a flujos de fluidos transparentes. Se logró caracterizar la unión de dos técnicas para medir temperatura y velocidad, la primera parte correspondió a combinar la técnica de schlieren con la técnica de PIV y se continuó con combinación de la técnica de schlieren con flujo óptico donde no es posible usar partículas.

En la primera parte de esta investigación se implementó el arreglo schlieren en configuración Z con los elementos ya mencionados en los primeros capítulos. Las mejoras propuestas en este trabajo fueron en la forma de obtener la curva de calibración. Esta se realizaba manualmente para un total de 40 imágenes, a las cuales se les aplicaba el método de interpolación. Estas imágenes se capturaban con la ayuda de una base micrométrica con un paso de $1.25 \mu\text{m}$ que se logró automatizar captura de imágenes con lo que se garantizaba que la curva de calibración estuviera centrada en los rangos de intensidad. Para lograr fusionar las técnicas de Schlieren-PIV se utilizó una fuente de luz blanca, para poder utilizar el software de IDT Inc fue necesario utilizar partículas de poliestireno de $50 \mu\text{m}$ ya que fueron con las que se obtuvo el mejor resultado de vectores de velocidad. Es necesario recordar que este análisis se realizó en un recipiente con agua tridestilada que fue calentada a varias temperaturas de las que se muestran los resultados de 22, 28, 31 y 34 °C, estas mediciones fueron corroboradas por medio de un termopar tipo K, los vectores de velocidad fueron mostrados por medio del software de IDT lo cual arrojó los vectores característicos de un flujo de convección.

Una revisión de los resultados mostró que la distribución de la velocidad del flujo de convección obtenida por medio de imágenes de schlieren, captura las principales características del flujo de fluido bajo estudio a una velocidad máxima de 0.0108 m/s, 0.0131 m/s, 0.0136 m/s y 0.099 m/s. Nuestra propuesta mostró que para utilizar las imágenes de Schlieren-PIV es necesario colocar la posición a un 50% de la navaja que actúa como un filtro, ya que es importante para tener un balance entre los gradientes de temperatura y velocidad. En este estudio se mostró que para obtener resultados de PIV es suficiente una cámara convencional y una fuente de luz blanca para bajas velocidades de flujo de fluido.

En los inicios de la investigación se realizaron pruebas con distintos tipos de partículas utilizadas en el arreglo de schlieren en configuración Z, pero como lo menciona la teoría de PIV, las partículas deben seguir fielmente el flujo de fluido. De esta manera se debe cuidar

el tamaño de las partículas empleadas, pues se puede ver afectada la precisión de las mediciones de temperatura y velocidad del fluido. Se observó que para partículas más pequeñas se debía de mover la navaja a un mínimo de 80% con lo que se dejaba pasar suficiente luz para poder ver las partículas pero el efecto de observar el gradiente de temperatura disminuía y el caso contrario era colocar la navaja a un 20% con lo que los gradientes de temperatura aumentaba pero se generaban zonas donde las partículas desaparecían de la imagen el análisis. Los resultados encontrados en el capítulo tres, referente a la temperatura y velocidad en agua fueron publicados como se muestra en Adrián Martínez et. Al [44].

La segunda parte del trabajo de investigación se centró en realizar una optimización del sistema schlieren en arreglo Z, con los inconvenientes mencionados anteriormente se procedió a evitar el uso de partículas para poder obtener los gradientes de temperatura. Esto nos llevó a revisar otras técnicas para medir velocidad en una imagen, con lo que se seleccionó la técnica de flujo óptico, y se caracterizó para poder usar los desplazamientos de los gradientes de intensidad como un objeto moviéndose entre imágenes. Esta nueva técnica sirve para poder utilizar las imágenes de schlieren cuando el fluido tiene propiedades que hacen imposible el sembrado de partículas. Se realizaron dos pruebas en las cuales se analizó el flujo de fluido de convección natural del aire al ser calentado por una placa caliente, la primera prueba se realizó con el fluido confinado por un recipiente de vidrio para evitar que el aire circundante afectara el comportamiento natural del mismo. En la segunda prueba realizada se retiró el recipiente de vidrio, lo cual permitió que el aire circundante perturbara el fluido.

De estas pruebas se concluyó que se puede utilizar imágenes de schlieren en conjunto con la técnica de PIV para analizar fluidos donde es posible insertar partículas. En el caso de que sean fluidos como el aire o el gas donde es imposible hacer el sembrado de partículas es entonces recomendable utilizar la técnica schlieren junto con la técnica de flujo óptico para obtener las mediciones de los campos de velocidad y temperatura del fluido a analizar. Las principales ventajas de este método radican en la sencillez del montaje experimental, donde los accesos ópticos son limitados, donde existen cambios en el índice de refracción y donde no se puede agregar partículas trazadoras como el caso de flujos de convección. Una desventaja de esta técnica radica en que la luz que ilumina el objeto que se estudia se integra a lo largo del camino óptico. Por lo que flujos turbulentos son muy difíciles de analizar debido a la tridimensionalidad del flujo.

TRABAJO A FUTURO

El sistema que se utilizó en el desarrollo de esta investigación está confinado a pruebas de laboratorio donde se desempeña satisfactoriamente. Sin embargo tiene gran potencial para expandir los límites de la aplicación. En el trabajo a futuro está el desarrollo de dispositivos ópticos para aplicar la técnica de schlieren en áreas más grandes de investigación así como fuera del laboratorio y en diversas aplicaciones. Debido a que se logró comprobar, en la investigación realizada, que se puede medir temperatura y velocidad sin necesidad de utilizar partículas, surge la idea de poder exportar estas técnicas a la robótica móvil a donde los ambientes no son controlados y se encuentran condiciones diferentes a las habituales en los laboratorios. Finalmente, se buscará automatizar todo el proceso para poder hacer el sistema más robusto al complementar la visualización de las variables con algún tipo de control del proceso.

REFERENCIAS

- [1] A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, "Flames: their structure, radiation and temperature", 2a edition revised, The Macmillan company New York, (1960).
- [2] M. Born and E. Wolf, "Principles of optics", 7a ed. Cambridge University Press, (1999).
- [3] A. Toepler, "Beobachtungen nach einer neuen optischen methode" Maximilian Cohen und Sohn, Bonn, (1864).
- [4] C. Huygens, "Ouvres complètes", Nijhoff, La Haye, (1901).
- [5] J. P. Marat, "Recherches physiques sur le feu", Cl. Ant. Jombert, Paris, (1780).
- [6] L. Focault, "Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté", Annales de l'Observatoire Imperial de Paris vol. 5, pp. 197-237, (1859).
- [7] Wolfgang Merzkirch, "Flow visualization", 2a edition, Academic Press, Inc. (1987).
- [8] Selected schlieren optics, Editor, Jurgen R. Meyer-Arendt, General Editor Milestone Series, Brian J. Thomson, Spie Milestone Series Vol. 61. (1992).
- [9] E. Mach and J. Sommer. "Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von explosions schallwellen", Sitzungsab. D. k. Acad. D. Wiss.Math. Naturw. Cl. Wien, vol. 75, pp.101-130, (1877).
- [10]L. Prandtl, "NeueUntersuchungüber die strömendeBewegung der Gase und Dämpfe", PhysicalischeZeitschrift, vol. 8, pp. 23-30, (1907).
- [11]Schardin, H. C. Cranz. Chapter 1 of BeiträgezurBallistik and technischen Physic, ed. H. Schardin. J. A. Barth, Leipzig, pp. 1-8, (1938).
- [12]R. J. North, "A brief review of some recent schlieren, schlieren-interferometer, and interferometer methods", WehrtechnischeMonatshefte, vol. 63, pp. 174-187, (1966).
- [13]H. H. Pearcey, "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).
- [14]F. J. Weinverg, "Optics of flames: including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics", Butter worths, London, (1963).
- [15]D. D. Maksutov, "Schlieren methods in the study of optical systems", Problems in advance physics, Vol. 23 GTTI Iz-datel'stvo, Leningrad, (1934).
- [16]L.A. VASILE'EV, "Schlieren Methods", Israel Program for Scientific Translations Ltd, pp 69.
- [17]G. L. Brown and A. Rshko, "On density effects and large structure in a turbulent mixing layer", J. Fluid Mech. Vol. 64, pp. 775-816, (1974).
- [18]R. A. Burton, "The application of schlieren photography in fluid flow and heat transfer analysis", M. S. M. E. Thesis, University of Texas, (1951).
- [19]L. M. Weinstein, "Large-field High-brightness focusing schlieren system", AIAA J., vol. 31, pp. 1250-1255, (1993).
- [20]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, pp 2-13, (1995).
- [21]U. Köpf, "Application of speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects", Optics Comm. Vol. 5, pp. 347, (1972).
- [22]H Richard, M. Raffel, M. Rein, J. Kompenhans, G. E. A. Meier "Demonstration of the applicability of a backgroun oriented schlieren (BOS) method

- [23]R. J. Adrian. "Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics", Annual review of fluid mechanics, vol. 23, pp. 261-304. (1991).
- [24]J. A. Guerrero. "Development of the particle image velocimetry (PIV) technique for three dimensions: tunnelling velocimetry", Tesis de doctorado, Centro de investigaciones en óptica, (2002).
- [25]W. Merzkirch, "Flow visualization", Ed. Academic Press, ISBN: 0-12-491351-2, (1987).
- [26]B. Horn, B. Schunck, "Determining optical flow", Artificial intelligence Vol. 17, pp. 185-203. (1981).
- [27]Wolfgang Merzkirch, "Flow Visualization", 2a edition, Academic Press, Inc. (1987).
- [28]Stavroudis ON. "The optics of rays, wavefronts, and caustics", New York: Academic Press, Inc. (1972).
- [29]Hand book of fluid dynamics and fluid machinery, 3er Volume, Applications of Fluid Dynamics, Edited by Joseph A. Schetz and Allen E. Fuhs, John Wiley & sons, Inc. (1996).
- [30]M. Raffel, C. E. Willert, J. Kompenhans. "Particle Image Velocimetry, a practical guide", Ed. Springer-Verlag ISBN:3-540-63683-8. (1998).
- [31]H. B. Kim, S. J. Lee, "Performance improvement of two frame particle tracking velocimetry using a hybrid adaptative scheme", Meas. Sci. Technol. Vol.13, pp. 573-582. (2002).
- [32]K. Ohmi, H. Y. Li, "Particle tracking velocimetry using a discrete relaxation method", Proceedings, Sixth triennial international symposium on fluid control, measurement and visualization, (2000).
- [33]G. Labonté, "A new neural network for particle tracking velocimetry", department of mathematics and computer science, royal military college of canada. Exp. Fluids vol. 26, pp. 340-346. (1999).
- [34]J. J. Gibson, "The senses considered as perceptual system", Houghton-Mifflin, Boston, (1966).
- [35]B. Horn, B. Schunk, "Determining optical flow", A. I. Memo No. 572, MIT. (1980).
- [36]C. McCarthy, N. Barnes, "Performance of optical flow techniques for indoor navigation with a mobile robot ", In Int. Conf. On Robotics and Automation (ICRA Q04), pp. 5093-5098, (2004).
- [37]J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques", Int. J. Of Computer Vision, Vol 12, pp. 43-77, (1994).
- [38]B. D. Lucas, T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision", DARPA, Proceedings of image understanding workshop, pp 121-130 (1981).
- [39]L. M. Lourenco and A. Krothapalli, "True resolution PIV: a mesh-free second-order accurate algorithm", 10 th International symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, (2000).
- [40]L. M. Lourenco, M. B. Alkisar and A. Krothapalli, "3D PIV system for wind tunnel applications," 37th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, Paper-99-0273, Reno, US. (1999).
- [41]Graham O. Hughes and Ross W. Griffiths, "Horizontal convection," Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 40, pp. 185-208 (2008).

- [42]J. A. Schetz and A. E. Fuhs, Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery: Experimental and Computational Fluid Dynamics Wiley, Vol. 2, (2009).
- [43]C. Alvarez Herrera, D. Moreno Hernández, B. Barrientos García and J. A. Guerrero Viramontes, "Temperature measurement of air convection using a schlieren system," Opt. Láser Technol. Vol. 41, pp. 233–240, (2009).
- [44]A. Martínez González, J. A. Guerrero Viramontes, D. Moreno Hernández. "Temperature and velocity measurement fields of fluids using a schlieren system", Appl. Opt. Vol. 51, No.16, pp. 3519–3525 (2012).
- [45]A. Martínez González, D. Moreno Hernández, J. A. Guerrero Viramontes. "Measurement of temperature and velocity fields in a convective fluid flow in air using schlieren images ", Appl. Opt. Vol. 52, No. 22, pp. 5562-5569, (2013).