



Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.

**MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y ANÁLISIS EN FLUJOS
DE FLUIDO TRANSPARENTES UTILIZANDO LA
TÉCNICA DE SCHLIEREN**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS (ÓPTICA)

Presenta:

M. en C. Cornelio Alvarez Herrera

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

LEÓN, GUANAJUATO,

MÉXICO

Abril 2009

Centro de Investigaciones en Óptica A. C.

**MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y ANÁLISIS EN FLUJOS
DE FLUIDO TRANSPARENTES UTILIZANDO LA
TÉCNICA DE SCHLIEREN**

***COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS (ÓPTICA)***

Presenta:

M. en C. Cornelio Alvarez Herrera

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

LEÓN, GUANAJUATO,

MÉXICO

Abril 2009

*Dedicada a la memoria:
De mi hermano Chente
y
de mi papá*

Agradecimientos familiares

Agradezco a mi padre Benjamín y madre María Santos por la educación y el apoyo constante que me dieron. A todos mis hermanos Lucila, Norma, Benjamín, José, Efrén, Juan y Braulio, que siempre me apoyaron. A los sobrinos mayores Alfredo, Magda y Cendy por el respeto y admiración que fueron para mí. También a mis sobrinos menores que como son muchos no los nombraré pero que de alguna forma pensaba en ellos para superarme.

Agradecimientos

El agradecimiento principal es para mi asesor de tesis el Dr. David Moreno Hernández por su incansable esfuerzo y por guiarme en este trabajo de investigación. Se agradece también al Dr. Bernardino Barrientos García y al Dr. Moisés Cywiak Garbarcewicz por sus comentarios. Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACY) por la beca de doctorado otorgada para la realización de éste trabajo de investigación. Gracias a Dirección de Formación Académica en especial a Guille y Laura. Agradezco a la Dra. Reyna Araceli Duarte Quiroga, Ricardo Valdivia Hernández, Octavio Pompa, Carlos Juarez, al Dr. J. Asención, a los trabajadores de taller óptico y mecánico en especial al chuy y al milla. Agradezco al Dr. Ramón Rodríguez Vera, al Dr. Ricardo Benjamín Flores Hernández, al Dr. Fernando Mendoza, y a Carlos Perez. Agradezco a los compañeros de generación Mauricio, José Luis, Haggeo, Claudio, Daniel, Paulino. Agradezco a Armando Gómez Vieyra, A Lelio de la Cruz, Mario Alberto Ruiz. Agradezco a Gilda, Ruth, Irma, Yenisey, Diana, Lorena, Jesus Manuel Santana, Jesús Muñoz, Cesar Castillo, Gilberto Anzueto, Tonatiuh, Raymundo, Chemo, Isidro, Rider, Lecona, Luis Enrique Segoviano, Julio Cesar Estrada, Manuel de la Torre, Memo Cardenas, Martín Olmos, Jesus Jimenez, Cruz Meneses, José Luis Maldonado. Agradezco a todos los Maestros, a todo el Personal que aquí labora y a todos los estudiantes.

Resumen

La temperatura es uno de los parámetros que frecuentemente se miden en una gran variedad de aplicaciones. Impacta de varias formas el mundo de la física, química y la biología. Por tal motivo han surgido varias técnicas ópticas para poder medir dicha variable. Existen varias técnicas ópticas para medir la temperatura y son preferidas porque son de campo completo y no perturban al medio al que se le está midiendo algún parámetro físico. Cada una de estas técnicas ofrece ventajas y desventajas mutuamente.

En el contexto del estudio de la dinámica de fluidos y combustión, las técnicas ópticas usadas para medición de temperatura han probado ser factibles para su estudio por ser técnicas de campo completo y no invaden al medio en cuestión. Algunas de las técnicas utilizadas para éste fin, podemos mencionar las siguientes: mapeo de deflexión por fotografía de moteado, método de rejilla fuera de foco, interferometría de la cual se derivan el interferómetro de Mach-Zehnder y el interferómetro de desplazamiento lateral, y la técnica schlieren.

En el presente trabajo de investigación proponemos la técnica schlieren como técnica de medición de campos de temperatura en flujos de fluido. Usamos la técnica por ser de campo completo, por no perturbar el fluido, por ser fácil de implementar, por ser robusto y ser de bajo costo. Lo más costoso del sistema es la computadora para el procesamiento de las imágenes de schlieren. Aunque la técnica se usa usualmente para visualizar, en este trabajo hacemos algunos cambios pertinentes para poder hacer mediciones de temperatura.

Los flujos que se estudiaron con la técnica schlieren son el flujo de convección producido por una placa metálica rectangular calentada a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el flujo de gases provenientes de una tobera circular generados por la combustión de una flama para 4 diferentes premezcla aire/combustible. Los resultados obtenidos con la técnica schlieren se validan con las mediciones hechas con un termopar. Los resultados de ambos métodos comparan razonablemente.

La naturaleza espacial y temporal de los datos experimentales nos permite estudiar su comportamiento dinámico, en particular, el flujo de combustión de la tobera circular para las diferentes premezclas aire/combustible. Por tal motivo, aplicamos el método (POD) o Descomposición Ortogonal Propia a los datos experimentales del flujo de combustión para entender la función que tiene cada premezcla aire/combustible en el tamaño de la flama y en la distribución de temperatura del dicho flujo.

Contenido

Dedicación	III
Agradecimientos familiares	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	IX
Nomenclatura	X
Abreviaciones	XIII
Lista de publicaciones, conferencias y trabajo derivado de esta investigación	XIV

Capítulo 1. Introducción a la medición de temperatura

- 1.1 Técnicas puntuales
 - 1.1.1 Métodos de alambre caliente o (Hot-wire methods)
- 1.2 Técnicas de campo completo
 - 1.2.1 Mapeo de deflexión por fotografía de moteado
 - 1.2.2 Método de rejilla fuera de foco
 - 1.2.3 Interferometría
 - 1.2.3.1 Interferómetro de Mach-Zehnder
 - 1.2.3.2 Interferómetro de desplazamiento lateral (Shearing)
- 1.3 La Técnica de schlieren
- 1.4 Tipos de arreglos de schlieren
 - 1.4.1 El arreglo de Toepler modificado
 - 1.4.2 schlieren de fondo orientado
 - 1.4.3 Schlieren de fondo orientado (BOS)
 - 1.4.4 Rainbow schlieren o schlieren de color
- 1.5 Bibliografía

Capítulo 2. Desarrollo teórico para medición de temperatura

- 2.1 Introducción
- 2.2 La ecuación de un rayo que pasa a través de un medio in-homogéneo e isotrópico
- 2.3 La constante de Gladstone-Dale
- 2.4 Método para la medición de temperatura
- 2.5 Conclusiones
- 2.6 Bibliografía

Capítulo 3. Desarrollo experimental

- 3.1 Arreglo experimental del sistema schlieren en configuración-Z
- 3.2 Sistema para la obtención de los datos
- 3.3 Calibración del sistema schlieren

- 3.4 Obtención de datos experimentales
- 3.5 Mediciones con termopar
 - a) Para la placa metálica
 - b) Para la flama
- 3.6 Conclusiones

Capítulo 4. Resultados

- 4.1 Resultados experimentales
 - 4.1.1 Resultados experimentales para la placa metálica
 - 4.1.2 Análisis de error en la temperatura de la placa
- 4.2 Resultados experimentales para la flama
 - 4.2.1 Procesamiento de los resultados experimentales para la flama
- 4.3 Conclusiones
- 4.4 Bibliografía

Capítulo 5. El método de POD

- 5.1 Introducción
- 5.2 Teoría del método de POD
- 5.3 Análisis de POD de los campos de temperatura
 - 5.3.1 Constantes de reconstrucción
- 5.4 Conclusiones
- 5.5 Bibliografía

Capítulo 6. Conclusiones generales y trabajo a futuro

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Trabajo a futuro

Lista de figuras

Figura 1.1 Esquema de un pirómetro óptico

Figura 1.2 Arreglo experimental para la medición de ángulos utilizando fotografía de moteado

Figura 1.3a Arreglo del método de rejilla

Figura 1.3b a) Imagen de referencia, b), c) y d) corresponden a imágenes de campos de aire calentado por una pluma de caudín a diferentes tiempos de captura

Figura 1.4 Interferómetro Mach-Zehnder

Figura 1.5 Elemento óptico para Interferómetro de desplazamiento lateral (Shearing)

Figura 1.6 Interferómetro de desplazamiento lateral (shearing)

Figure 1.7 Reconstrucción del arreglo de schlieren propuesto por Robert Hooke

Figura 1.8 Arreglo de la prueba de la navaja de Foucault

Figura 1.9 Arreglo experimental de Toepler

Figura 1.10 Arreglo de configuración-Z

Figura 1.11 Arreglo de schlieren de doble paso con prisma

Figura 1.12 Arreglo de Background Oriented Schlieren (BOS) o schlieren de fondo orientado (BOS)

Figura 1.13 Arreglo de schlieren de color

Figura 2.1 Arreglo en configuración-Z

Figura 2.2 Desviación de un rayo de luz en un objeto in-homogéneo (imagen tomada de Merzkirch [2])

Figura 2.3 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 (imagen tomada de Merzkirch) [2].

Figura 2.4 Curvas de calibración. a) Curva de calibración para el píxel (n,m) y b) Desviación Media y Standard de las curvas de calibración MxN de las imágenes de Schlieren.

Figura 3.1 Arreglo experimental de Schlieren con la placa metálica entre los dos espejos

Figura 3.2. Tobera o soplete visto a) de frente b) de lado, también se observa la forma de la zona de reacción de la flama a simple vista

Figura 3.3 Arreglo experimental que muestra la válvula de control del gas y el manómetro de presión para la tobera o soplete

Figura 3.4 Rejilla utilizada para la calibración de las dimensiones del sistema schlieren

Figura 3.5 Variación de las imágenes de intensidad, la imagen con un rectángulo representa a la imagen en la cual la posición de la navaja se escogerá para la obtención de los resultados experimentales, también se muestra una amplificación de la misma para mayor detalle.

Figura 3.6 Curva de calibración para un píxel de la imagen

Figura 3.7 Diagrama de flujo que explica la obtención de datos y el procesado para la obtención de temperatura en la flama

Figura 3.8 Puntos donde se colocó la punta del termopar y posición del plano central sobre la placa para la medición de temperaturas

Figura 3.9 Termómetro de tipo K

Figura 3.10 Termopar tipo R

Figura 4.1 Imágenes instantáneas schlieren del aire caliente sobre la superficie de la placa correspondientes a los gradientes en intensidad en dirección-x, a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$

Figura 4.2 Gradientes de densidad instantáneos sobre la placa metálica para a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$

Figura 4.3 Gráfica de contornos de los campos de temperatura para temperatura de la placa de: a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$. Se incluyen acercamientos de las imágenes

Figura 4.4 Campo de temperaturas de aire caliente sobre la placa obtenidas con un termopar a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$

Figura 4.5 Comparación entre mediciones de promedios de temperatura obtenidos con schlieren y termopar a: a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$

Figura 4.6 Error relativo estimado entre las mediciones realizadas con schlieren y termopar para las temperaturas de la placa metálica de a) 50°C y b) 80°C

Figura 4.7 Imágenes instantáneas del flujo de gases calientes correspondientes a los gradientes en intensidad en la dirección-x para, a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA

Figura 4.8 Gradientes de densidad obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA

Figura 4.9 Campos instantáneos de temperatura obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA

Figura 4.10 Campos de temperatura en promedio obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA

Figura 4.11 Máximos de temperatura en promedio obtenidos con termopar y Schlieren

Figura 5.1 Primeros cuatro POD modos correspondientes a los cuatro diferentes conjuntos de datos obtenidos de la flama a 4 diferentes ventilaciones

Figura 5.2 Energías relativas acumuladas para los cuatro casos estudiados o pmezclas

Figura 5.3 Distribución de energías en porcentajes para los cuatro casos estudiados o pmezclas

Figura 5.4 Primeras cuatro constantes de reconstrucción para 1VA

Figura 5.5 Primeras cuatro constantes de reconstrucción para 2VA

Figura 5.6 Primeras cuatro constantes de reconstrucción para 3VA

Figura 5.7 Primeras cuatro constantes de reconstrucción para 4VA

Lista de tablas

Tabla 1.1 Algunos termopares comerciales usados en flamas

Tabla 2.1 Constantes de Gladstone-Dale para el aire a 288 Kelvin

Tabla 2.2. Valores de la constante de Gladstone-Dale para diferentes tipos de gases

Tabla 4.1 Cálculos de incertidumbre para las mediciones de temperatura

Tabla 5.1 Energía relativa de los POD modos (E^n) %

Nomenclatura

Capítulo 1

K	Kelvin
W	Watt
m	Metro
°C	Grado centígrado
mm	Milímetro

Capítulo 2

x, y, z	Variables espaciales x , y y z .
$n(x, y, z)$	Índice de refracción de un objeto transparente.
$\mathbf{P}(x, y, z)$	Vector de posición en el espacio
ds	Longitud de arco
\mathbf{P}'	Derivada del vector de posición con respecto de ds
∇n	Gradiente del índice de refracción n
$\frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial con respecto a x
$\frac{\partial}{\partial y}$	Derivada parcial con respecto a y
$\frac{\partial}{\partial z}$	Derivada parcial con respecto a z
ε	Ángulo de desviación de un rayo de luz
ε_x	Ángulo de desviación de un rayo de luz en la dirección x
ε_y	Ángulo de desviación de un rayo de luz en la dirección y
δx	Desplazamiento en dirección x sobre el plano de observación
δy	Desplazamiento en dirección y sobre el plano de observación
Q y Q^*	Posiciones de los rayos desviados sobre el plano de observación
ζ_1	Posición sobre el eje z en donde comienza el medio u objeto de prueba
ζ_2	Posición sobre el eje z en donde termina el medio u objeto de prueba
l	Distancia del objeto de prueba al plano de observación
ζ	Puede representar a las componentes x o y según sea el caso, y también indica la posición Δx de la navaja para cualquier imagen
ρ_o	Densidad del aire a temperatura ambiente
ρ	Densidad del flujo reprobada
ρ_x	Gradiente de densidad del flujo reprobada en la dirección x
h	Grosor del objeto de prueba definido por $h = \zeta_2 - \zeta_1$
cm	Centímetro
m	Metro
g	Gramo
kg	Kilogramo

K	Constante de Gladstone-Dale, $K = 0.2259 \text{ cm}^3/\text{g}$ a $\lambda=607.4\text{nm}$
T_0	Temperatura ambiente
T	Variable de temperatura
a_x	Desplazamiento de la navaja en la dirección x
a_y	Desplazamiento de la navaja en la dirección y
$I_{(n,m)}^\xi$	Imagen de schlieren sin flujo
$n = 0,1,\dots,N$	Subíndice de filas
$m = 0,1,\dots,M$	Subíndice de columnas
N	Número de filas
M	Número de columnas
Δx	Posición de la navaja
Δx_0	Espacio entre un desplazamiento de la navaja a otro
$k = 0,1,\dots,l$	Pasos consecutivos de la navaja
$\zeta = 0$	Posición de referencia de la navaja
$I_{(n,m)}^0$	Imagen de referencia, sin flujo
$I_{(n,m)}^p$	Imagen tomada con flujo en la posición $\zeta = 0$
$I_{(n,m)}^{\Delta x}$	Variaciones de intensidad de la imagen schlieren sin flujo
$I_{(n,m)}^{\delta x}$	Variaciones de intensidad de la imagen schlieren con flujo
$\Delta x_{(n,m)}$	Imagen de intensidad constante, sin flujo
$\delta x_{(n,m)}$	Imagen de intensidad constante, con flujo

Capítulo 3

nm	Nanómetro
μm	Micrómetro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
m	Metro
x,y,z	Variables espaciales x , y y z .
lm	Lumen
λ	Longitud de onda
$^\circ\text{C}$	Grado centígrado
$P = 1.1\text{kPa}$	Presión del gas
$\Delta x = 100\mu\text{m}$	Separación entre mediciones

Capítulo 4

Cm	Centímetro
H	Sección del flujo de prueba que es atravesada por el haz de luz
$h = 7.3\text{cm}$	Para la placa metálica
$D_{tobera}=1.9\text{cm}$	Diámetro de la tobera

$h = D_{tobera}$	Para la tobera
$\zeta = 0$	Posición de referencia de la navaja
Δx	Separación entre mediciones
ρ_o	Densidad del aire a temperatura ambiente
ρ	Densidad del flujo reprobado
ρ_x	Gradiente de densidad del flujo reprobado en la dirección x
T_o	Temperatura ambiente
T	Variable de temperatura
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
f_2	Foco del sistema schlieren
K	Constante de Gladstone-Dale, $K = 0.2259 \text{ cm}^3/\text{g}$
σ_{ρ}	Incertidumbre de densidad
σ_T	Incertidumbre de temperatura

Capítulo 5

POD	“Proper Orthogonal Decomposition” (Descomposición Ortogonal Propia)
\mathbf{x}	Coordenadas cartesianas (x,y)
t	Variable tiempo
$T(\mathbf{x}, t)$	Temperatura medida
\bar{T}	Temperatura media
$T'(\mathbf{x}, t)$	Temperatura fluctuante
Ω	Dominio bidimensional donde la temperatura toma lugar
$R(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$	Matriz promedio de correlación
n, m	Número de modo
ϕ^n	Eigenfunción correspondiente al modo n
$\langle \rangle$	Promedio temporal
$\zeta^n(t)$	Coefficiente temporal o constante de reconstrucción
L	Número de imágenes instantáneas del ensamble de temperatura
i, j	Subíndices de la matriz C
$C_{i,j}$	Matriz simétrica real con dimensiones $L \times L$
λ^n	Eigenvalor o valor propio
A	Eigenvector o vector propio
E^n	Energía

Abreviaciones

LED	(Light Emission Diode) o Diodo emisor de luz
CCD	(Charge-Coupled Device) o dispositivo de carga acoplada
POD	(Proper Orthogonal Decomposition) o Descomposición Ortogonal Propia
PCHIP	(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)
<i>fps</i>	(Frames per second) o Imágenes por segundo
1VA	Una ventana abierta
2VA	Dos ventanas abiertas
3VA	Tres ventanas abiertas
4VA	Cuatro ventanas abiertas
BOS	(Background Oriented Schlieren) o Schlieren por Fondo Orientado
PIV	(Particle Image Velocimetry) o Velocimetría por imágenes de partículas
RSD	(Rainbow Schlieren Deflectometry) o Deflectometría por Schlieren de color
DNS	(Direct Numerical Simulation) o Simulación Numérica Directa

Lista de publicaciones, conferencias y trabajo derivado de esta investigación

Artículos publicados con estricto arbitraje

Internacional

1. C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández, B. Barrientos-García, J. A. Guerrero-Viramontes, Temperature measurement of air convection using a Schlieren system, *Optics & Laser Technology* 41 (2009) 233–240.
2. C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández and B. Barrientos-García, Temperature measurement of an axisymmetric flame by using a schlieren system, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 10 (2008) 104014 (7pp). *Artículo seleccionado del congreso RIAO/OPTILAS 2007 para aparecer en una edición especial del Journal of Optics A: Pure and Applied.*

Artículos publicados sin arbitraje

Internacional

1. C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández, et al. "Temperature measurement of the air convection using a Schliere system", RIAO/OPTILAS 2007, October 21-26, Campinas, Sao Paulo, Brazil.

Trabajos presentados en congresos

Congreso internacional

RIAO/OPTILAS 2007 Campinas, Sao Paulo, Brazil, Oct. 2007 Temperature measurement of the air convection using a Schlieren system, C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández, et al.

Congreso nacional

C. Alvarez, D. Moreno, B. Barrientos y F. Mendoza, "Modelos de Bajo Orden Para el Análisis del Flujo Alrededor de un Cilindro Circular". Presentado en el X congreso Nacional de Física, organizado por la Sociedad Mexicana de Física, Hermosillo, Sonora, México, octubre del 2004.

C. Alvarez Herrera, D. Moreno Hernández y B. Barrientos García, "Medición de temperatura en flujos compresibles", XII Congreso de la División de Dinámica de Fluidos y Plasmas Sociedad Mexicana de Física 2006

C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández, et al. "Medición de temperatura en aire caliente" IV Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, 24-25 Mayo 2007, León, Gto. México

Capítulo 1

Introducción a la medición de temperatura

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

Las técnicas mencionadas anteriormente miden el cambio de fase de un frente de onda que atraviesa objetos de prueba o de fase. Los objetos de fase usualmente tienen una distribución de índice de refracción no uniforme. Algunos fenómenos físicos afectan al

índice de refracción, y el índice de refracción está relacionado con la temperatura, densidad y presión. Los métodos ópticos sirven para medir cambios de índice de refracción y por consiguiente relacionarlo con la densidad o temperatura. La temperatura es uno de los parámetros que frecuentemente se miden en una gran variedad de aplicaciones. Impacta de varias formas al mundo de la física, química y la biología. Por tal motivo han surgido varias técnicas ópticas y no ópticas para poder medir dicha variable.

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

1.1 Técnicas puntuales

Métodos de alambre caliente o (Hot-wire methods)

La temperatura de un alambre inmerso en una flama de gases puede medirse en tres formas [1]:

Por su resistencia eléctrica

Por termo-electricidad en una unión bi-metálica o termopar

Por su brillantez o emisividad, con pirómetro óptico.

a) La termometría por resistencia es comúnmente utilizada para la determinación del máximo valor de temperatura en flamas producidas en sopletes de oxígeno-acetileno a baja presión. Esta técnica funciona con la variación de la resistencia al aumentar la temperatura. Para hacer este tipo de mediciones es necesario contar con alambres muy finos de algún metal noble usado como resistencia. Alambres de 10 μ m de diámetro han sido utilizados para instrumentos de medición como el (Hot Wire Anemometry) en sus siglas en Inglés o métodos de alambre caliente. Para la calibración de estos aparatos se puede hacer a través del diámetro del alambre y su longitud o la utilización de valores estándar en un baño de temperatura. Estos dispositivos tienen problemas en la zona de reacción causados por la catálisis de los elementos que intervienen en la combustión, estos problemas se pueden eliminar al cubrir el alambre con una capa de sílica o de alguna tierra rara. El aparato es

simple ya que consta de una resistencia pero es menos conveniente de utilizar que un termopar [2].

b) En este trabajo se dará énfasis al termopar, ya que este es un instrumento barato, de fácil implementación y muy eficaz para censar la temperatura en flujos de gases calientes, aunque este sea una técnica puntual [3]. Este consta de una unión bi-metálica haciendo uso de la propiedad termoeléctrica de este tipo de unión llamada efecto Seebeck. Se genera un potencial eléctrico cuando existe una diferencia de temperaturas entre las uniones, este potencial se puede censar con un medidor de voltaje y se puede ver la correspondencia entre temperatura y voltaje [2, 4].

Existen varios tipos de termopares, teniendo diferentes aplicaciones según lo que se requiera medir. Por ejemplo, en la tabla siguiente se mencionan algunos de ellos [2, 5 y 49],

Tabla 1.1 Algunos termopares comerciales usados en flamas

Tipo de Termopar	Temperatura vs. Voltaje EMF (V/K)x10e6	Límite de la temperatura de operación (K)	Medición en:
Cromel-Alumel	12	1275	De uso general
Cu-Constantan (55% Cobre 45% Nickel)	14	400	Baja temperatura
Fe-Constantan (55% Cobre 45% Nickel)	17	900	Uso general
Ir-Ir/0.4Rh	1.2	1800	Flama de mezcla pobre
Pt/Pt/0.1Rh	3.2	1550	Flama de mezcla pobre
Pt/0.13Rh-Pt	3.6	1600	Flama de mezcla pobre
Pt/0.3Rh-Pt/0.06Rh	2.4	1800	Flama de mezcla pobre
W-Rh (Tungsten-Rhenium)	4.1	2200	Flama de mezcla rica (Gases de salida de los cohetes)
W-W/0.26Rh	4.8	2800	Flama de mezcla rica
W/0.05Rh-W/0.26Rh	3	2800	Flama de mezcla rica
W-Mo/0.5Rh		2500	Flama de mezcla rica

En estos termopares, el alambre que mide normalmente está más frío que la flama, esto se debe a la pérdida de calor por radiación, y tal vez por conducción. Existen varios métodos para corregir este error en la medición de temperatura.

Mientras más delgados los alambres conductores sean, estos se acercarán cada vez más a la verdadera temperatura de la flama. Existe obviamente un conjunto de límites debido a los esfuerzos mecánicos de los alambres, pero es posible extrapolar resultados para alambres de diferentes espesores hasta llegar a un alambre más delgado.

La transferencia de calor depende incluso de la velocidad de los gases de la flama que pasan a través del alambre, así que si los gases de la flama son succionados sobre un termopar entonces la temperatura del termopar aumentará con la velocidad de succión. La pérdida de calor puede ser por radiación. Esta se puede reducir con el uso de protecciones alrededor del termopar; protecciones de metal pulido como platino son más efectivos, pero para flamas relativamente frías es posible utilizar protecciones de acero. Algunos autores hacen algunas correcciones de error producido por radiación, convección y conducción aplicando un modelo matemático y haciendo el balance de energías aplicado a un termopar [6].

Las principales limitaciones de los métodos de hot-wire o alambre caliente son debidos a los puntos de fusión de los alambres y a los efectos de catálisis sobre la superficie.

El platino, con un punto de fusión de 1769°C , es el metal más adecuado y es el que se usa más generalmente. Para los termopares se pueden usar en unión con iridio o con aleaciones con platino-iridio. El iridio tiene un punto alto de fusión, probablemente alrededor de 2454°C , pero empieza a volatilizarse después de esta temperatura. El osmio tiene un muy alto punto de fusión pero forma oxido volátil. El uso de metales como el tungsteno o tántalo protegidos con una capa refractaria o encerrados en un tubo refractario puede ser posible medir altas temperaturas.

Los métodos de hot-wire, generalmente, no son convenientes para mediciones en la zona de reacción de una flama porque aparecen efectos de catálisis debido a que el alambre es grande o por lo menos comparable en tamaño con el espesor de la zona de reacción y provoca disturbios en la flama misma.

c) El método de pirómetro óptico es un método que no invade, que funciona con la radiación de los cuerpos. La temperatura de la emisión de una flama es medida con la comparación de la luz de una temperatura conocida. En pirómetros comerciales, el filamento de una lámpara incandescente es superpuesto en forma óptica con la imagen de la flama, la temperatura del filamento se ajusta cambiando el voltaje hasta que las temperaturas del filamento y de la flama se igualan. La calibración de este aparato se hace

con la ayuda de un cuerpo negro. Las emisiones de las flamas pueden ser muy débiles en el visible, por lo que se requiere sembrar en las flamas cierto tipo de materiales en polvo tales como (sales de sodio, litio, hierro, yodo, etc.) dependiendo del valor de la temperatura de la flama en que se está trabajando. Los materiales utilizados para la coloración de la flama tienen el inconveniente de que solo soportan alrededor de 1700 °K y la resolución espacial es de aproximadamente de 1mm. En la figura 1.1 se puede observar el esquema de este aparato [1, 2] .

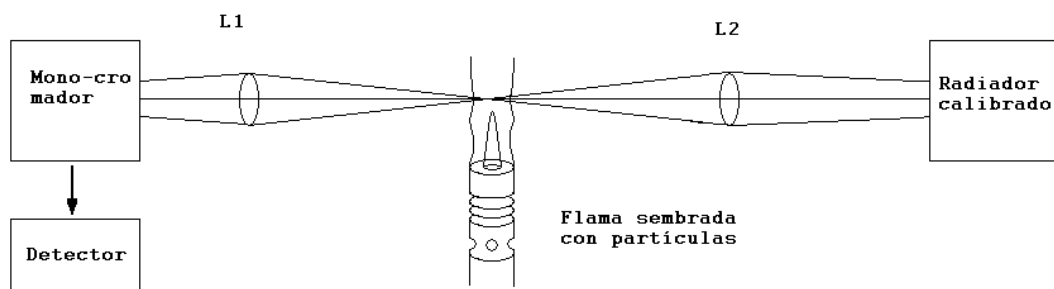


Figure 1.1 Esquema de un pirómetro óptico.

1.2 Técnicas de campo completo

Como se sabe, cualquier cuerpo caliente en contacto con aire, transferirá calor a éste, al haber diferencia de temperaturas también habrá diferencia de densidades y por lo tanto habrá diferencia de índices de refracción. Estas diferencias de índices de refracción desviarán la dirección de un rayo de luz que pasa a través del aire, actuando como una lente. Estas deflexiones no las podemos ver a simple vista por lo cual necesitamos una variedad de instrumentos ópticos para visualizarlas y después cuantificarlas [42]. Algunas de las técnicas utilizadas para este fin, son las siguientes: mapeo de deflexión por fotografía de moteado, método de rejilla fuera de foco, interferometría de la cual se derivan el interferómetro de Mach- Zehnder y el interferómetro de desplazamiento lateral y la prueba de la navaja o schlieren [7,8]. A continuación se dará una breve reseña del funcionamiento y descripción de cada una de ellas.

1.2.1 Mapeo de deflexión por fotografía de moteado

Esta técnica es un método que sirve para medir desplazamientos y deformaciones en el plano [7]. Los primeros que aplicaron esta técnica fueron Köpf [9] y Debrus et al. [10], ellos mostraron que esta técnica puede ser modificada para que la deflexión de la luz en un campo de índice de refracción pueda ser determinada cuantitativamente. En la figura 1.2. se pueden observar los detalles de este sistema.

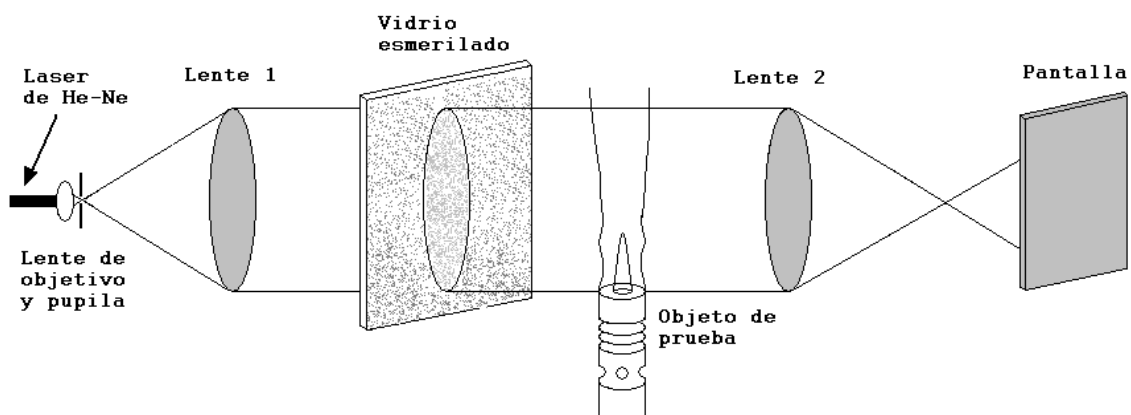


Figura 1.2. Arreglo experimental para la medición de ángulos utilizando fotografía de moteado.

En este sistema óptico, la fuente de luz es por lo regular un láser de He-Ne, que se expande con un filtro espacial y este a su vez se colima con una lente 1, el haz de luz colimada pasa a través del vidrio esmerilado el cual tiene gránulos distribuidos en forma aleatoria, la lente 2 formará una imagen del vidrio esmerilado en la pantalla de igual forma que el mismo vidrio, en forma granular o en forma de patrón de moteado. A la imagen capturada sin objeto de prueba se le llama imagen de referencia. Al colocar un objeto de prueba con índice de refracción entre el vidrio y la lente 2 se visualizará en la pantalla desplazamientos de los gránulos causados por los cambios de índice de refracción del objeto de prueba que para este caso es un flujo de fluido transparente [7].

1.2.2 Método de rejilla fuera de foco

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

los ángulos de deflexión de los rayos a traves de los desplazamientos que sufre la rejilla al haber flujo de prueba. Este método se caracteriza por la simplicidad en la implementación y el procesamiento de los resultados se hizo cómodo para el estudio cuantitativo de frentes de onda. Este método fue desarrollado después por otros científicos tales como Ostroumov [8 y 11]. Las rejillas pueden ser de de diferente forma como líneas paralelas, círculos concéntricos, ó con aberturas arbitrarias o pantallas.

Para asegurar que la luz no cause efectos borrosos en los bordes de las sombras de la rejilla se requiere una fuente de luz puntual o lo más cercana a puntual. En mediciones cuantitativas se requiere identificar correctamente los puntos de la rejilla en el plano cuando no hay presencia de flujo y en presencia del mismo. En la figura 1.3a. [8] se puede observar un arreglo experimental de este sistema.

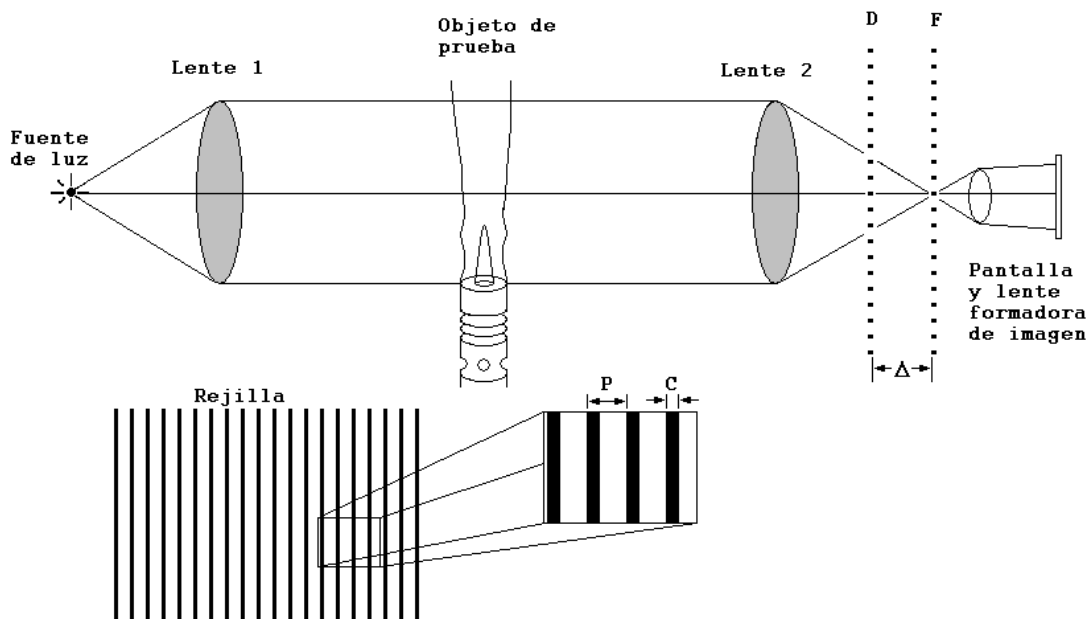


Figure 1.3a. Arreglo del método de rejilla

Al desplazar la rejilla fuera de foco las bandas oscuras se tornarán en forma de sobras oscuras, y al colocar alguna in-homogeneidad en el sistema, entre las lentes las sombras se desplazarán, deformando su forma. En la figura 1.3b. se puede observar las imágenes de un campo de aire caliente utilizando deflectometría con una rejilla.

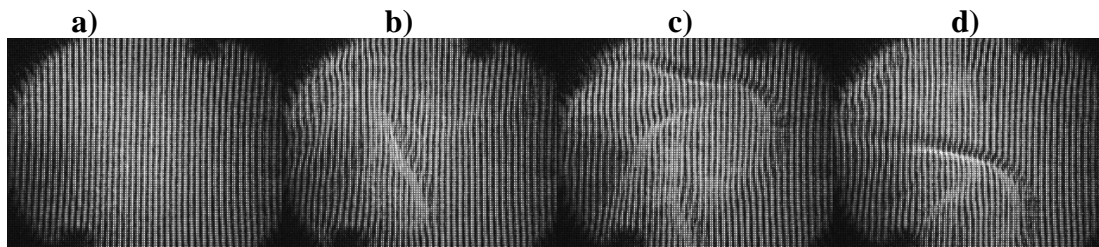


Figura 1.3b a) Imagen de referencia, b), c) y d) corresponden a imágenes de campos de aire calentado por una pluma de caudín a diferentes tiempos de captura.

Otro método parecido, conocido como efecto moire, ocurre cuando dos rejillas se superponen una sobre la otra, y rotadas un cierto ángulo. Se forman franjas de intensidad formadas por la interferencia de estas rejillas, éste método puede funcionar con cualquier tipo de luz, siendo de muy fácil implementar [15].

1.2.3 Interferometría

La interferometría es una técnica óptica que utiliza la interferencia de la luz de dos frentes de onda, esta ocurre al pasar un haz de luz a través de un objeto transparente y al combinarse en una pantalla con otro haz de referencia. La luz utilizada en este tipo de sistema debe de tener alta coherencia espacial y temporal. Los interferómetros más comunes para este propósito son el interferómetro de Mach-Zehnder, y el interferómetro de desplazamiento lateral.

1.2.3.1 Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder es comúnmente utilizado en túneles de viento para visualización y cuantificación de flujos de fluido, este método es sensible a los cambios de fase causados por el objeto de prueba. Este método fue diseñado por Jamin en 1856 [12] y utilizado en 1878 por Mach y Weltrubski [13] para el estudio del fenómeno de la dinámica de gases. Ernest Mach reconoció que para el mejor estudio de este fenómeno se debería de usar un método con un haz de referencia separado del otro. En la figura 1.4. se puede observar el arreglo experimental de este método.

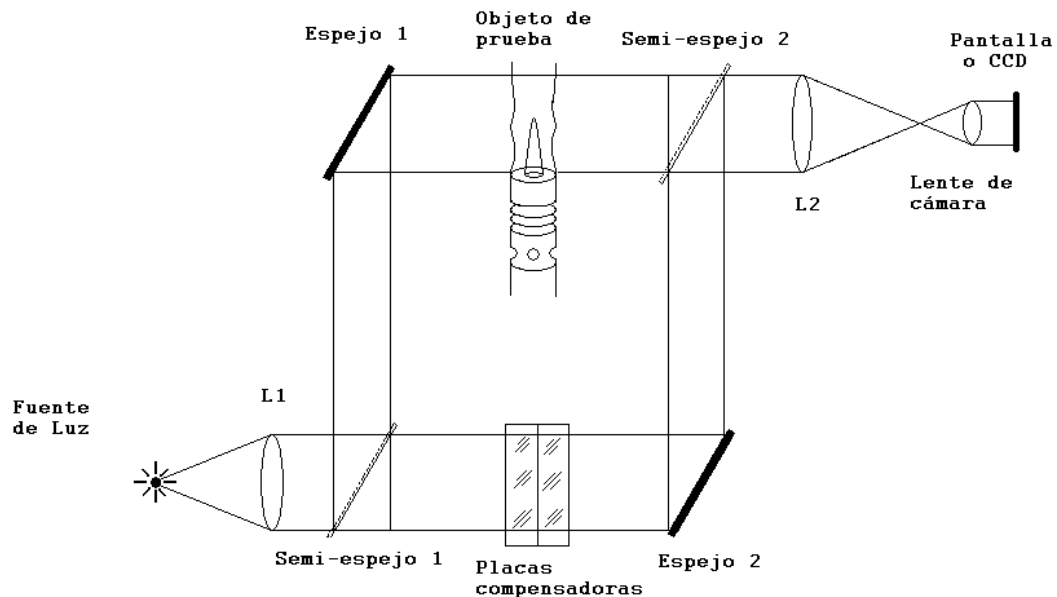


Figura 1.4. Interferómetro Mach-Zehnder

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

1.2.3.2 Interferómetro de desplazamiento lateral (shearing)

Este método utiliza el principio de interferometría de dos haces y se requiere un elemento óptico que provea de dos haces al mismo tiempo y que los dos haces atraviesen al objeto de prueba como se puede ver en la figura 1.5. Estos interferómetros tienen la característica de que los dos haces pasan por el objeto de prueba, teniendo un rango de la forma $d/D < 1$, donde D es el diámetro del campo de prueba, esto quiere decir que no necesitan imagen de referencia para su funcionamiento. Los instrumentos que proveen un corte (shear) constante en una sola dirección normal al eje óptico son llamados interferómetros de shearing lateral. Es posible generar interferómetros de shearing en dirección radial con respecto al eje óptico y son llamados interferómetros de shearing radial, estos instrumentos son sensibles al cambio de gradientes del índice de refracción.

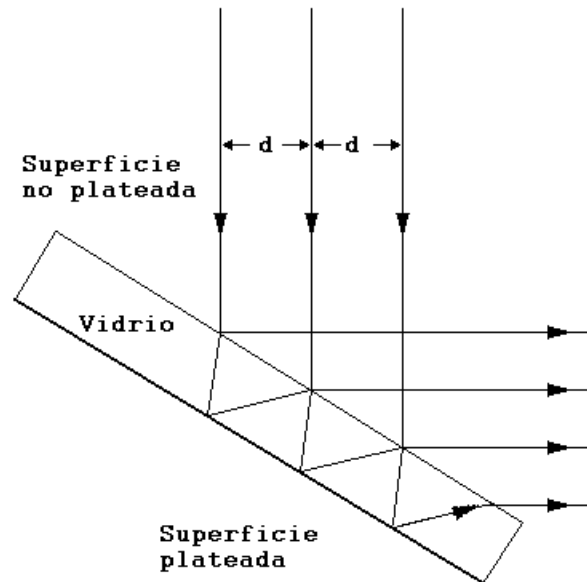


Figura 1.5. Elemento óptico para Interferómetro de desplazamiento lateral (shearing)

El interferómetro shearing más utilizado es el que utiliza una placa de vidrio plano como el que se muestra en la Figure 6. Este sistema óptico sólo consta de una fuente de luz, una lente colimadora, una placa de vidrio plana plateada en una de sus caras, y un sistema formador de imágenes [7, 16 y 17].

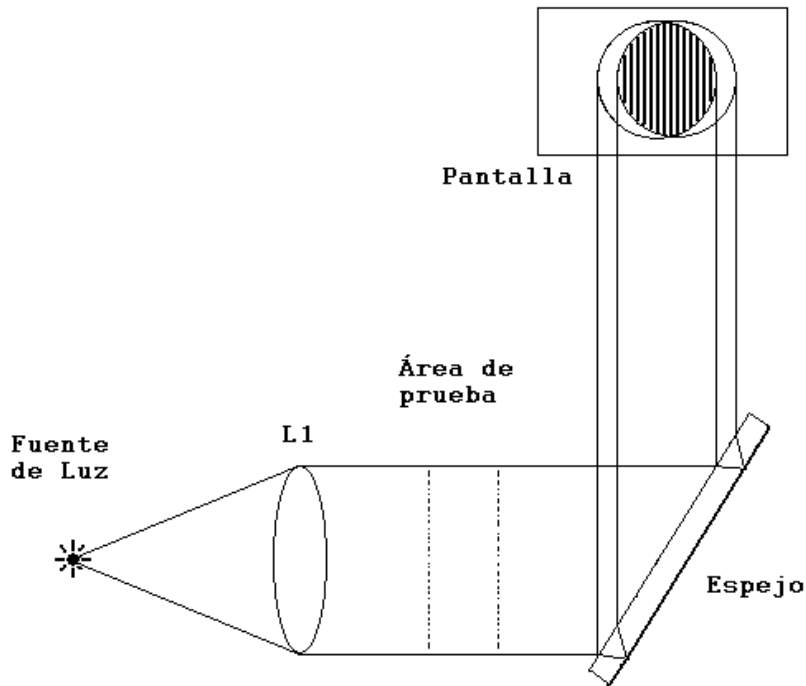


Figura 1.6. Interferómetro de desplazamiento lateral (shearing)

Lo escrito previamente en este capítulo corresponde a un breve detalle de las técnicas de medición utilizadas para la medición de temperatura principalmente en flamas, o en flujos de fluido. A continuación se describirá la técnica de schlieren, técnica que utilizamos en esta investigación para la medición de temperatura.

1.3 La Técnica de Schlieren

La palabra Schlieren proviene de la palabra en alemán “schliere” que significa inhomogeneidad, que para este caso viene siendo partículas de polvo en algún líquido transparente o cambios de densidad en algún flujo de fluido transparente. Los primeros trabajos que empezaron a hablar sobre este tema fueron los realizados por Robert Hooke[18, 19], L. Foucault[20] y A. Toepler[21], 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[22]. Robert Hooke, quien desarrollo un método, para mostrar los lados de una flama y la visualización de los gases de la combustión de una flama de

una vela. Aunque en aquellos momentos aún no se conocía con el nombre de schlieren. En la figura 1.7 se muestra la forma experimental de este sistema de schlieren [19].

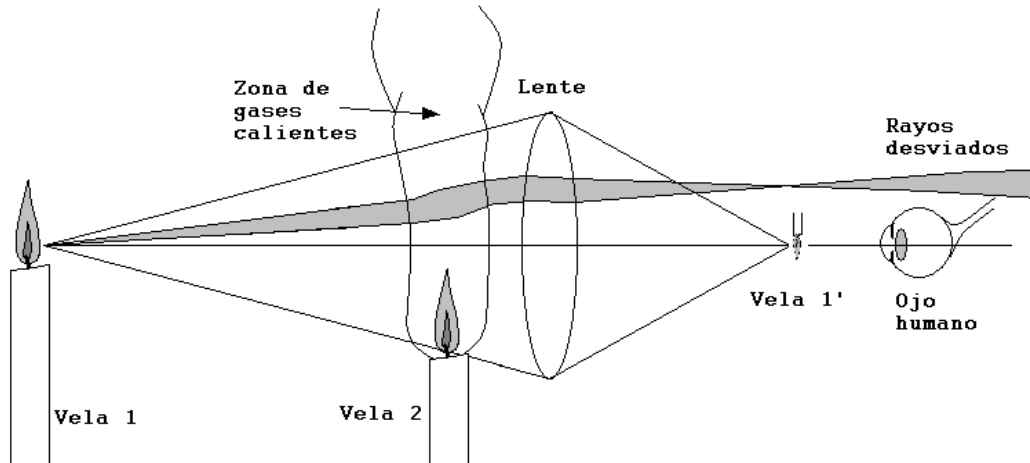


Figure 1.7 Reconstrucción del arreglo de schlieren propuesto por Robert Hooke

Jean Paul Marat, en [23, 24] publicó un volumen nombrado *La Física del Fuego*, que contenía aparentemente la primera imagen de la visualización óptica de un flujo óptico nunca impresa. [23].

Leonard Foucault [18, 20] hizo importantes contribuciones a la óptica de medios inhomogéneos, desarrolló la prueba de la navaja para espejos utilizados en telescopios astronómicos, esto ayudó a que los telescopios tuvieran mayor calidad. La importancia de este trabajo radica en que era la primera vez que se utilizaba una máscara (pupila, diafragma, filtro o borde de navaja) externa a la pupila del ojo humano para producir imágenes de schlieren, como se muestra en la figura 1.8 [18, 23, 20, 14].

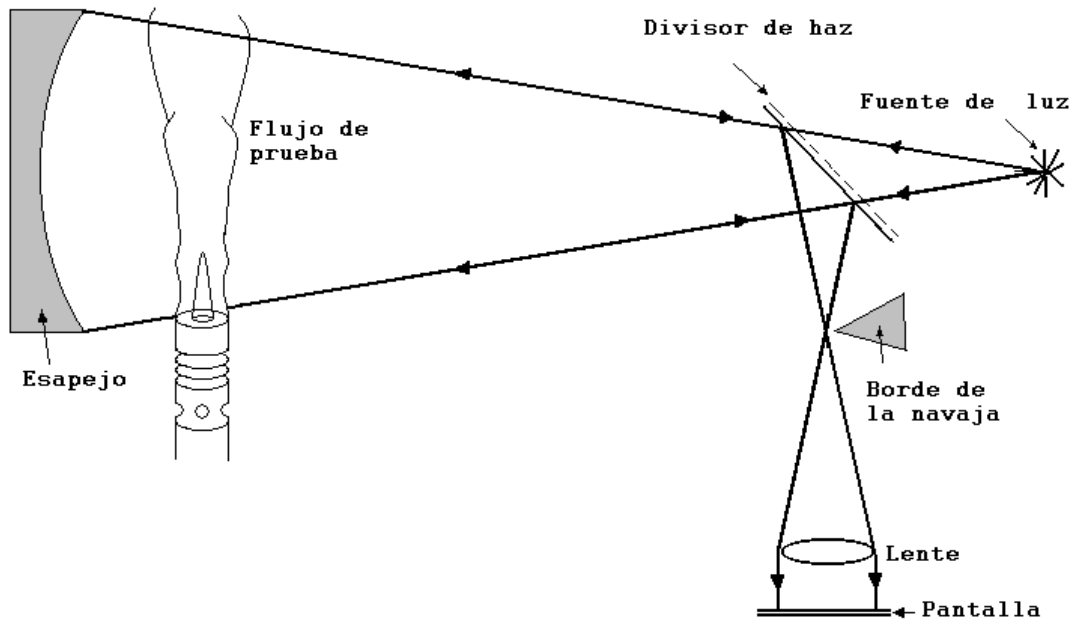


Figura 1.8 Arreglo de la prueba de la navaja de Foucault

August Toepler reinventó algo similar a la técnica de schlieren en 1859 y la nombró en nombre de lo que el observaba en la figura 1.9 se muestra el arreglo de Toepler ver [7, 18, 23, 20, 14].

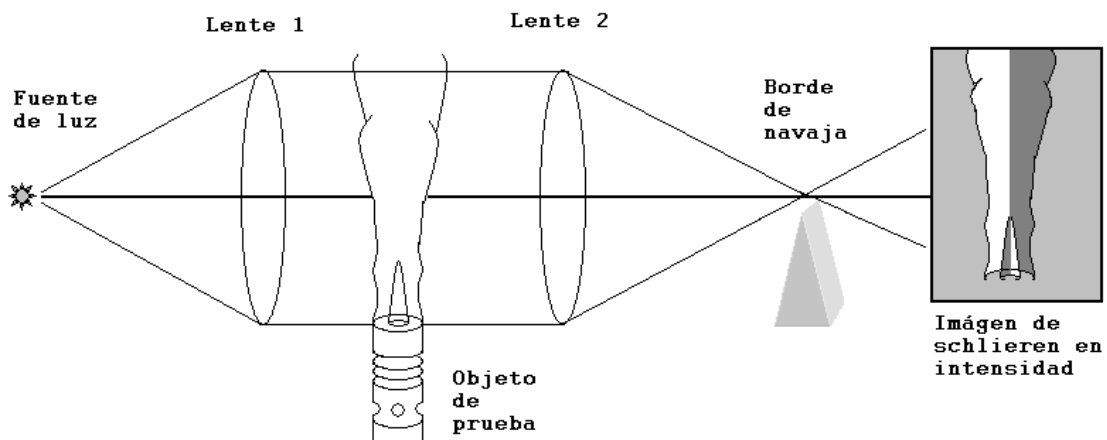


Figura 1.9 Arreglo experimental de Toepler

Quien reconoció a la técnica schlieren como una herramienta invaluable, fue Ernst Mach[25]. Él contribuyó mucho en el desarrollo de la dinámica de gases; Mach combinó la fotografía con schlieren, estos desarrollos permitieron la medida precisa de la velocidad de

las ondas. En Alemania a la técnica de schlieren la utilizaba L. Prandtl[26] como herramienta clave para liderar la dinámica de fluidos. Carl Cranz y sus estudiantes como H. Schardin[27]. En la tesis de Schardin, se provee por primera vez un background teórico sólido de la teoría de schlieren por imágenes.

Usando la técnica de schlieren de filtro graduado propuesto por North[28] y otras mediciones, H. Pearcey[29] 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*[30], contiene comentarios acerca de la teoría de schlieren y shadowgraph, el es quien propone el nombre de shadowgramas.

Investigadores rusos también intervinieron en el desarrollo de los métodos de schlieren. El investigador ruso famoso por la fabricación de telescopios D. D. Maksutov[31] publicó un libro en 1934 titulado “Schlieren methods in the study of optical systems”. Él incluso introdujo el alambre o filamento como elemento cortador en vez del borde de la navaja. Vasil’ev[8] empezó su carrera aplicando instrumentos de schlieren e interferometría al fenómeno de la dinámica de gases del programa espacial Soviético. El diseñó varios instrumentos de schlieren.

Así pues las imágenes de schlieren y shadowgraph han impactado importantemente a la ciencia y la tecnología. Brown y Roshko[32] publicaron un trabajo donde con la utilización de shadowgraph observaron estructuras coherentes en la mezcla de dos flujos planos de gas.

Ralph Ashby Burton[33] y varios contemporáneos desarrollaron independientemente la idea de óptica de schlieren con fuente extendida, sugerida anteriormente por Schardin. Más reciente mente esta idea ha sido desarrollada en la NASA por M. Weinstein. En 1990 Weinstein[34] 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 [34, 35].

La lista de investigadores continúa creciendo día con día, ya que aun se sigue trabajando sobre este tema.

1.4 Tipos de arreglos de Schlieren

Existen una gran variedad de arreglos del sistema schlieren utilizados por varios autores utilizando diferentes componentes como lentes, espejo, rejillas, vidrios esmerilados etc. También se han utilizado diferentes fuentes de luz ya sean de filamento, lámparas de mercurio, sodio, xenón, láser y últimamente diodos de luz blanca. Así también en vez de bordes de navaja se han utilizado filtros de color y máscaras de diferente forma, dando origen a varios tipos de arreglos de schlieren. 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.

1.4.1 El arreglo de Toepler modificado

El arreglo propuesto por Toepler como se puede apreciar en la figura 1.9 se puede modificar de muchas formas según el objeto que se quiera visualizar o la aplicación que se quiera realizar. Lo anterior se puede realizar ya sea utilizando lentes, espejos, prismas etc. Como se puede observar en las siguientes figuras. En la figura 1.10 se muestra el arreglo de schlieren de configuración-Z.

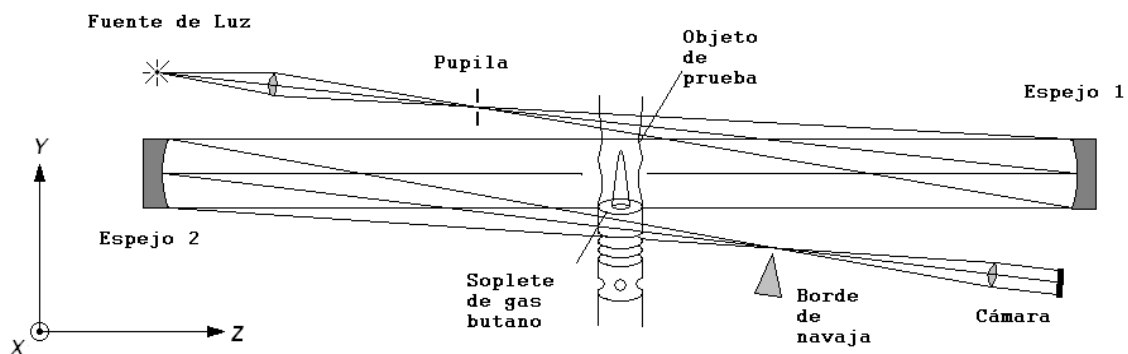


Figura 1.10 Arreglo de configuración-Z

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, se aumenta 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.

Otra forma de aumentar la sensibilidad del sistema es haciendo pasar dos veces al haz de luz por el objeto de prueba, esto se puede lograr ya sea como se muestra en la figura 1.8 con la prueba de la navaja de Foucault o con la utilización de un prisma como se muestra en la figura 1.11 [7].

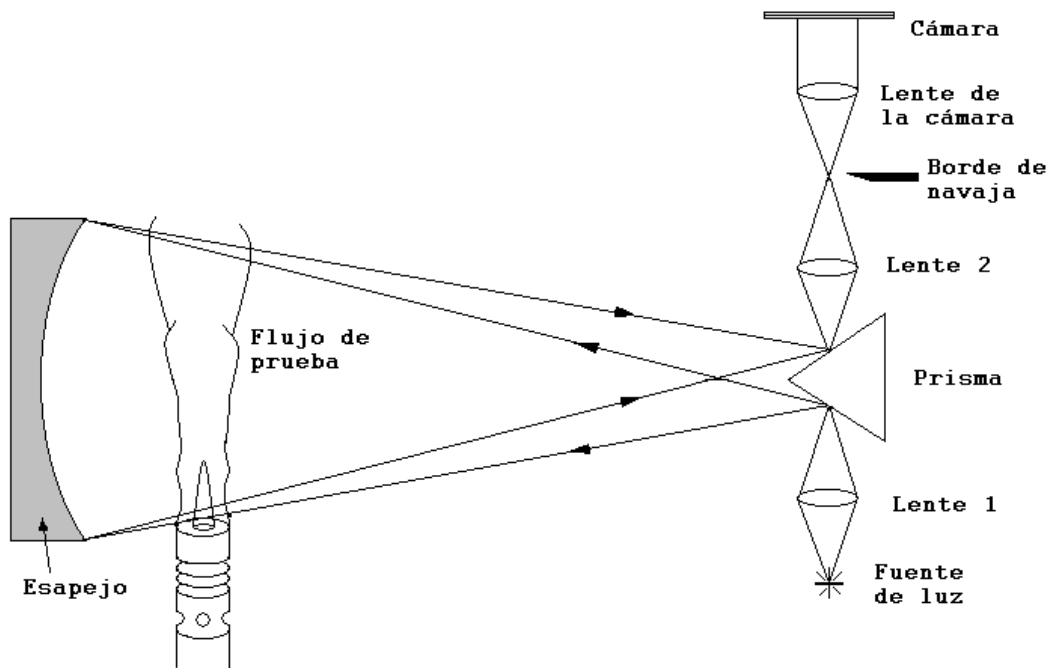


Figura 1.11 Arreglo de schlieren de doble paso con prisma

Este arreglo de schlieren es muy sencillo ya que consta de un solo espejo, el inconveniente de este arreglo es que se pueden ver dos imágenes traslapadas del objeto de prueba aunque está libre de coma y astigmatismo.

1.4.2 Schlieren de fondo orientado (BOS)

La técnica de (BOS) o 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) [9], ésta técnica funciona para grandes escalas y fuera de laboratorio. Esta técnica ofrece las ventajas de que se puede obtener información de un

flujo de fluido ya sea cualitativa o cuantitativamente [36]. Al introducir un objeto transparente entre el fondo granuloso y el sistema formador de imágenes se obtendrá en la pantalla una imagen del objeto causada por el cambio de índice de refracción del mismo. Para obtener la información del fluido es necesario obtener una imagen de referencia sin flujo, y las de más imágenes de la prueba con flujo, de las imágenes resultantes se utilizan métodos de correlación. Existen varios algoritmos optimizados de correlación comúnmente utilizados en velocimetría de partículas o PIV. El arreglo experimental de este método de schlieren se puede observar en la figura 1.12 para más detalle de este sistema se puede ver [37, 38, 39].

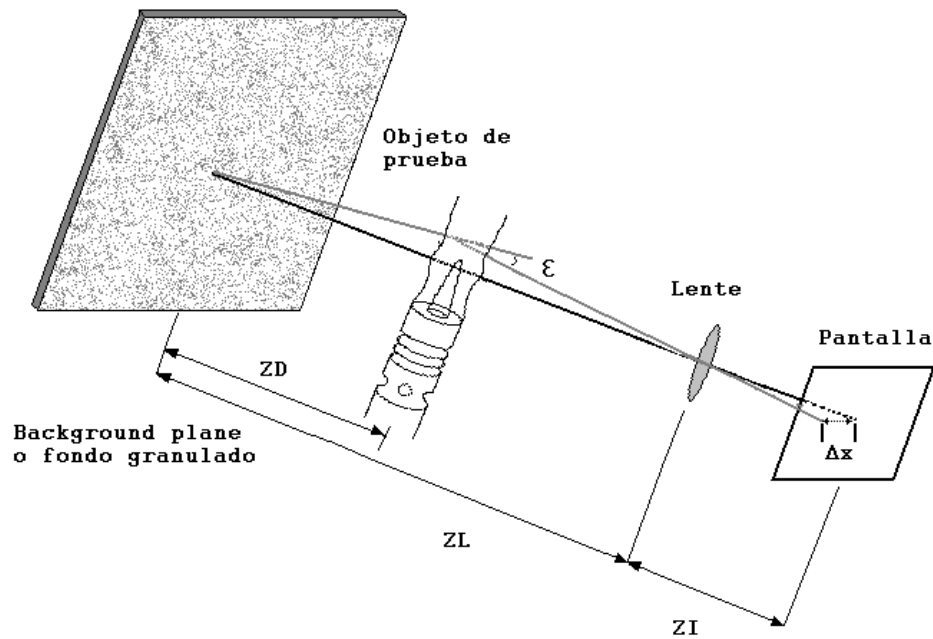


Figura 1.12 Arreglo de Background Oriented Schlieren (BOS)

1.4.3 Rainbow Schlieren o schlieren de color

El método de Rainbow Schlieren Defletometry RSD es un tipo de arreglo que puede cuantificar densidad de un flujo de fluido transparente, ya sean gases o una flama. 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 como se puede observar en la Figura 1.13. 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 [23, 40-46].

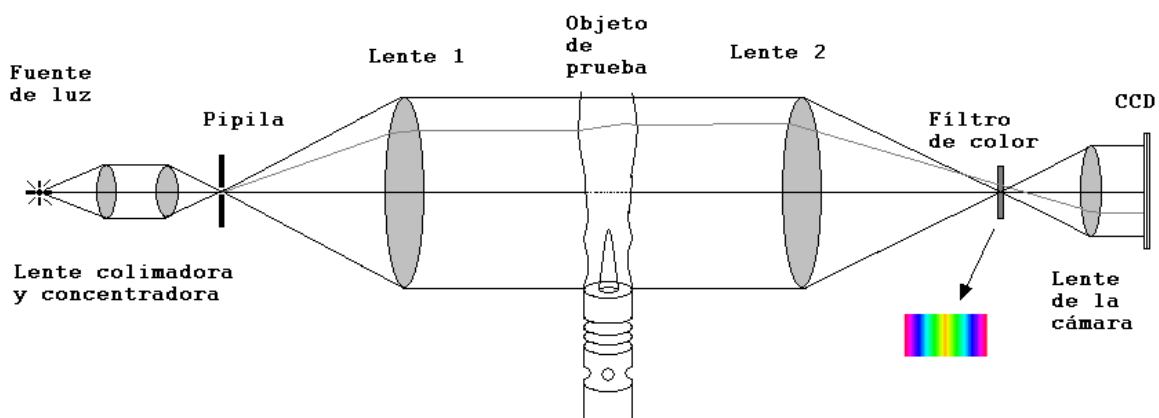


Figura 1.13 Arreglo de rainbow schlieren

1.5 Bibliografía

- [1] Gaydon, A. G. / Wolfhard, H. G. Flames. Their Structure, Radiation and Temperature. Second edition revised, The Macmillan Company New York 1960,
- [2] R.M Fristrom, Flame Structure and Processes, Oxford University Press,1995. pp.115.
- [3] Kenneth Kar, Stephen Roberts, Richard Stone, Martin Oldfield and Boy Ferencik, Instantaneous Exhaust Temperature Measurements Using Thermocouple Compensation Techniques, SAE International, 2003.
- [4] P.H. Egli, Thermoelectricity, John Wiley and Sons (1960).

- [5] R. C. Warren, Design of Thermocouple Probes for Measurement of Rocket Exhaust Plume Temperatures, Commonwealth of Australia. 1994.
- [6] K. S. Shannon and B.W. Butler, A review of Error Associated With Thermocouple Temperature in Fire Environments, USDA Forest Services Laboratory, Rocky Mountain Research Station, Missoula, Montana.
- [7] Wolfgang Merzkirch, Flow Visualization, second edition, Academic Press, Inc. 1987.
- [8] L.A. VASILE'EV, Schlieren Methods, Israel Program for Scientific Translations Ltd, pp 69
- [9] U. Köpf. Application of speckling for measuring the deflection of laser light by phase objects, *Optics Comm.* **5** (1972), p. 347.
- [10] Debrus, S., et al, Groundglass Differential Interferometer, (1972), *Appl. Opt.*, Vol.11, pp.853-857.
- [11] Ostroumov, G. A. *Doklady AN SSSR*, **81**, No, 5 887 (1950)
- [12] J. Jamin. *Pogg. Ann.* 98, S. 345 (1856)
- [13] Mach, E. & Weltrubsky, J. von 1878 Über die Formen der Funkenwellen. *Sitzungsber. Kaiserl. Akad. Wiss Wien, Math.-Naturwiss. Kl. Abt. 1* **78**, 551{560.
- [14] Optical Shop Testing. Second Edition, Edited by Daniel Malacara, A wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Ink, 1992. pp.321.
- [15] Oded Kafri, Ilana Glatt, The Physics of Moiré Metrology, A wiley-Interscience Publication, John Wiley a& Sons, Ink, 1990. pp. 5.

- [16] Priti Singh, Chandra Shakher, Measurement of the temperature of a gaseous flame using a shearing plate, *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1) pp.80–85
- [17] Harald Philipp, Heribert Fuchs, Ernst Winklhofer and Georg Pretzler Flame diagnostics by light sheet imaging and by shearing interferometry, *Optical Engineering*, 1993, 32(5), pp.1025-1032.
- [18] **Selected Schlieren Optics**, Editor, Jurgen R. Meyer-Arendt, General Editor Milestone Series, Brian J. Thomson, Spie Milestone Series Volume Ms 61. 1992.
- [19] Robert Hook, “Of a new property in the air,” *Micrographia observation LVIII*, 217-219, *London* (1665).
- [20] L. Foucault, “Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté,” *Annales de l’Observatoire Imperial de Paris* 5, 197-237 (1859).
- [21] A Toepler, “Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode,” *Maximilian Cohen und Sohn, Bonn* (1864).
- [22] Huygens, Ch., *Ouvres Complètes*, 13, 172-173 (*Nijhoff, La Haye*, 1901).
- [23] G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer Berlin, 2001
- [24] Marat, J. P. *Recherches physiques sur le feu. Cl. Ant. Jombert, Paris*, 1780
- [25] Mach E. and J. Sommer. Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von explosionschallwellen. *Sitzungsb. D. k. Acad. D. Wiss.Math. Naturw. Cl. Wien*, **75**:101-130, 1877.

- [26] Prandtl, L. Neue Untersuchung über die strömende Bewegung der Gase und Dämpfe. *Physicalische Zeitschrift*, **8**(1): 23-30, 1907.
- [27] Schardin, H. C. Craz. Chapter 1 of *Beiträge zur Ballistik and technischen Physic*, ed. H. Schardin. J. A. Barth, Leipzig, pp. 1-8, 1938.
- [28] North R. J. A brief review of some recent schlieren, schlieren-interferometer, and interferometer methods. *Wehrtechnische Monatshefte*, **63**(7-supplement): 174-187, 1966.
- [29] Pearcey, H. H., A method for the prediction of the onset of buffeting and other separation effects from wind tunnel test on rigid models. Report 20, 631, British Aeronautical Research Council, 1958.
- [30] Weinverg, F. J. Optics of flames: including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics. Butterworths, London, 1963.
- [31] Maksutov, D. D. Tenevye metody issledovaniya opticheskikh system (*Schlieren methods in the study of optical systems*), *Problems in advance physics*, Vol. 23 GTTI Iz-datel'stvo, Leningrad, 1934.
- [32] Brown G. L. and A. Rshko., On density effects and large structure in a turbulent mixing layer. *J. Fluid Mech.* **64**(4): 775-816, 1974.
- [33] Burton, R. A. The application of schlieren photography in fluid flow and heat transfer analysis, *M. S. M. E. Thesis, University of Texas*, 1951.
- [34] Weinstein, L. M. Large-field High-brightness focusing schlieren system. *AIAA J.*, **31**(7): 1250-1255, 1993.

- [35] G. S. Settles, Elizabeth B. Hackett, James D. Miller and Leonard M. Weinstein, Full-Scale Schlieren Flow Visualization. In Flow visualization VII, ed J. P. Crowder. Begell House, NY, 1995 pp 2-13.
- [36] H Richard, M. Raffel, M Rein, J. Kompenhans, G. E. A. Meier Demonstration of the applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) method
- [37] Gaurav Vasudeva, Damon R. Honnery and Julio Soria, Non-Intrusive measurement of a density field using the Background Oriented Schlieren(BOS) method, Fourth Australian Conference on Laser Diagnostic in Fluid Mechanics and Combustion, 2005.
- [38] G. E. Elsinga, B.W. van Oudheusden¹, F. Scarano¹ and D.W. Watt, Assessment and application of quantitative schlieren methods with bi-directional sensitivity: CCS and BOS, Proceedings of PSFVIP-4 June 3-5, 2003, Chamonix, France.
- [39] S. Loose, H. Richard, T. Dewhirst, M. Raffel, Background oriented schlieren (BOS) and particle image velocimetry (PIV) applied for transonic turbine blade investigations, Institut für Strömungsmechanik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bunsenstrasse 10, 37073 Göttingen, Germany
- [40] Rajani P. Satti, Pankaj S. Kolhe, Semih Olcmen, and Ajay K. Agrawal, Miniature rainbow schlieren deflectometry system for quantitative measurements in microjets and flames, Applied Optics, 2007, Vol. 46, No. 15.
- [41] <http://www.omega.com/>.
- [42] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 7 edition, Cambridge University Press, 1999.

Capítulo 2

Desarrollo teórico para medición de temperatura.

2.1 Introducción

En este capítulo se mostrará el procedimiento para poder medir temperatura en flujos de fluido. En la figura 2.1 se muestra la configuración de schlieren usada en esta investigación. El arreglo óptico consta de una fuente de luz, dos espejos esféricos, una navaja colocada en el plano focal del segundo espejo y un plano de observación, que en nuestro caso es una cámara digital. 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 (ver figura 2.2). Esta desviación en los rayos de luz es proporcional a las variaciones del índice de refracción, y para el caso de flujos de fluido, ésta variación en el índice de refracción se puede relacionar con la densidad del fluido.

En las siguientes secciones se presenta el desarrollo teórico para la medición de la temperatura a partir del desplazamiento, δx , que sufren los rayos de luz al pasar por un medio in-homogéneo.

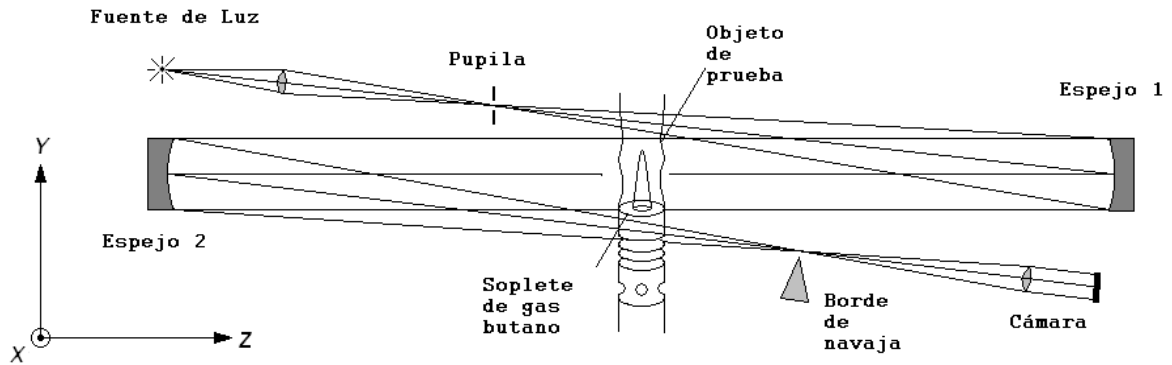


Figura 2.1 Arreglo en configuración-Z

2.2 La ecuación de un rayo que pasa a través de un medio in-homogéneo e isotrópico

Cuando un rayo de luz pasa a través de un medio in-homogéneo e isotrópico este sufre una desviación en su trayectoria un cierto ángulo [2]. 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 inhomogéneo viene dada por la ecuación (2.1) [1].

$$d(n\mathbf{P}')/ds = \nabla n, \quad (2.1)$$

donde, $n=n(x,y,z)$ es el índice de refracción, $\mathbf{P}=\mathbf{P}(x,y,z)$ es un vector de posición, \mathbf{P}' es la derivada de \mathbf{P} con respecto a ds y $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ representa la longitud de arco. En la figura 2.2 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 in-homogéneo sufre desviaciones de ángulo muy pequeñas, podemos hacer la siguiente aproximación; $ds = dz$. Así, la ecuación (2.1) se puede aproximar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(n \frac{\partial x}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.2)$$

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

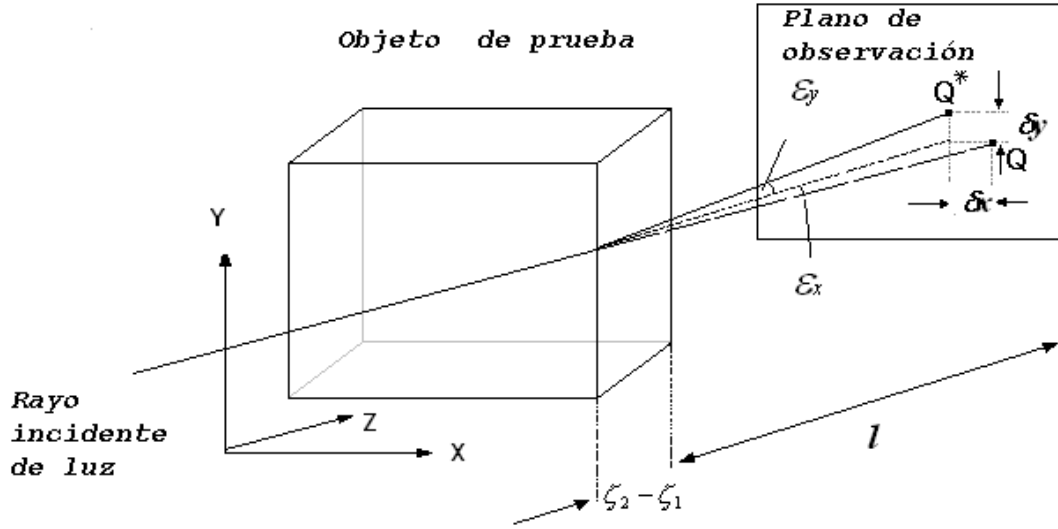


Figura 2.2 Desviación de un rayo de luz en un objeto in-homogéneo [2]

Integrando la ecuación (2.2) a lo largo de la dirección z , tenemos:

$$\left(n_2 \frac{\partial x}{\partial z} \right)_{\zeta_2} - \left(n_1 \frac{\partial x}{\partial z} \right)_{\zeta_1} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial x} dz$$

$$\left(n_2 \frac{\partial y}{\partial z} \right)_{\zeta_2} - \left(n_1 \frac{\partial y}{\partial z} \right)_{\zeta_1} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz$$
(2.3)

Donde, $n_1 \sim n_2 \sim 1$ es el índice de refracción en la interfase entre aire y medio inhomogéneo, y, considerando también que

$$\frac{\partial x}{\partial z} \Big|_{\zeta_1} = \frac{\partial y}{\partial z} \Big|_{\zeta_1} = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial z} \Big|_{\zeta_2} = \frac{\delta x}{l} = \tan \varepsilon_x, \quad \frac{\partial y}{\partial z} \Big|_{\zeta_2} = \frac{\delta y}{l} = \tan \varepsilon_y,$$

podemos escribir la ecuación (2.3) de la siguiente manera,

$$\tan \varepsilon_x = \frac{\delta x}{l} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial x} dz$$

$$\tan \varepsilon_y = \frac{\delta y}{l} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz.$$
(2.4)

Las ecuaciones (2.4) muestran cuantitativamente los cambios de índice de refracción de un objeto con medio in-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 flujos compresibles e incompresibles.

El método de schlieren es sensible a los cambios de la primera derivada del índice de refracción, n [2]. Este sistema mide la desviación del ángulo ε descrito por la ecuación (2.4). Nuestro interés en este trabajo es medir estas desviaciones y relacionarlo a la densidad del fluido que se estudia.

El siguiente paso en nuestro desarrollo matemático es poner la ecuación (2.4) en función de la densidad. Asumamos que para ángulos pequeños la $\tan(\varepsilon) \approx \varepsilon$ entonces la ecuación (2.4) queda de la forma:

$$\varepsilon_\xi = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{\partial n}{\partial \xi} dz$$
(2.5)

donde ξ puede ser la dirección x o y dependiendo de la dirección en la que se esta usando el sistema schlieren. En nuestro caso, se emplea la dirección, x , como dirección en que recorrerá la navaja en el sistema schlieren. Combinando la ecuación (2.5), con la ecuación $\varepsilon = \delta x/l$ y la ecuación de Gladston-Dale; $n-1 = \rho K$, se obtiene:

$$\rho_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\delta x}{lhK},$$
(2.6)

donde, $h = \zeta_2 - \zeta_1$, es el grosor del medio in-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 con la siguiente integral [3];

$$\rho(x) = \rho_0 + \frac{1}{lhK} \int_{x_1}^{x_2} \delta x dx \quad (2.7)$$

donde ρ_0 es la densidad de referencia a la temperatura ambiente. Para gases ideales a presión constante, la temperatura se puede obtener de la relación de Gladstone-Dale de la siguiente manera,

$$T = \frac{\rho_0}{\rho} T_0 = \frac{n_0 - 1}{n - 1} T_0 \quad (2.8)$$

en la ecuación (2.8), n_0 es el índice de refracción a la temperatura ambiente T_0 , y T es la temperatura que se busca en nuestros experimentos.

2.3 La constante de Gladstone-Dale

Las técnicas ópticas se usan para determinar la distribución de densidad en flujos de fluido. La densidad, ρ , se relaciona al índice de refracción de un gas por la ecuación de Gladstone-Dale, tal y como se mencionó anteriormente.

$$n-1 = K\rho \quad (2.9)$$

donde K define a la constante de Gladstone-Dale la cual tiene las dimensiones de $1/\rho$ y depende de ciertas características del gas así como de la frecuencia o longitud de onda de la luz usada, esta constante depende débilmente de la longitud de onda de la luz utilizada en el sistema óptico. En la tabla 2.1 se muestra algunos valores de K para el aire a

determinadas longitudes de onda de la luz [4]. En la Tabla 2.2, se muestran algunos valores de la constante de Gladstone-Dale para diferentes gases con sus respectivas longitudes de onda utilizadas en la medición.

Tabla 2.1 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

La constante de Gladstone-Dale para una mezcla de gases puede ser calculada de la siguiente manera [2]:

$$n - 1 = \sum K_i \rho_i, \quad (2.10)$$

donde K_i y ρ_i son las constantes de Gladstone-Dale y las densidades parciales de cada componente individual del gas. Si uno define la constante de Gladstone-Dale de la mezcla por $n - 1 = K\rho$, donde ρ es la densidad de la mezcla, se tiene entonces

$$K = \sum K_i \frac{\rho_i}{\rho} \quad (2.11)$$

Tabla 2.2. Valores de la constante de Gladstone-Dale para diferentes tipos de gases

Gas	$K (cm^3 / g)$	Longitud de onda $\lambda(\mu m)$	Temperatura (K)
He	0.196	0.633	295
Ne	0.075	0.633	295
Ar	0.157	0.633	295
Kr	0.115	0.633	295
Xe	0.119	0.633	295
H ₂	1.550	0.633	273
O ₂	0.190	0.589	273
N ₂	0.238	0.589	273
CO ₂	0.229	0.589	273
NO	0.221	0.633	295
H ₂ O	0.310	0.633	273
CF ₄	0.122	0.633	302
CH ₄	0.617	0.633	295
SF ₆	0.113	0.633	295

donde (ρ_i / ρ) designa las fracciones de masa que contienen cada una de las fracciones de la mezcla del gas. Dentro de una aproximación de primer orden, la constante de Gladstone-Dale para el aire puede ser determinada de la ecuación (2.11) usando los respectivos valores del Oxígeno O₂ y el Nitrógeno N₂. El término de segundo orden constituye a los gases nobles, humedad y contaminantes [2]. La suma total de las fracciones de masa debe de ser igual a la unidad [6]

Un ejemplo de la ecuación (2.11) viene explicado en [5]. Con la utilización de un quemador de gas natural, con el 100% de acceso de aire, después del balance estequiométrico, el porcentaje de masa para cada componente resulta de la reacción de: 8.00% de CO₂, 6.21% de H₂O, 74.48% de N₂ y 11.31% de O₂.

De la Tabla 2.2, tomando los valores de las constantes de los gases involucrados en el ejemplo en $[m^3 / kg]$. Tenemos que:

$$K_{(H_2O)} = 3.10e-4$$

$$K_{(CO_2)} = 2.29e-4$$

$$K_{(\text{NO})} = 2.21\text{e-}4$$

$$K_{(\text{N}_2)} = 2.38\text{e-}4$$

$$K_{(\text{O}_2)} = 1.19\text{e-}4$$

$$K_{tot} = (8/100) \cdot K_{(\text{CO}_2)} + (6.21/100) \cdot K_{(\text{H}_2\text{O})} + (74.48/100) \cdot K_{(\text{N}_2)} + (11.31/100) \cdot K_{(\text{O}_2)},$$

quedando como resultado una constante total en donde intervienen diferentes gases en la combustión de: $K_{tot} = 2.2829\text{e-}004\text{m}^3/\text{kg}$.

En nuestros experimentos usamos, los valores de K del aire para la placa y K_{tot} calculada para la flama, aunque los valores no difieren en mucho como se puede apreciar en la tabla 2.1 el cual también se puede utilizar la constante del aire para la flama sin que ocurran cambios significantes, aunque por formalidad se utiliza la calculada para el caso de la flama.

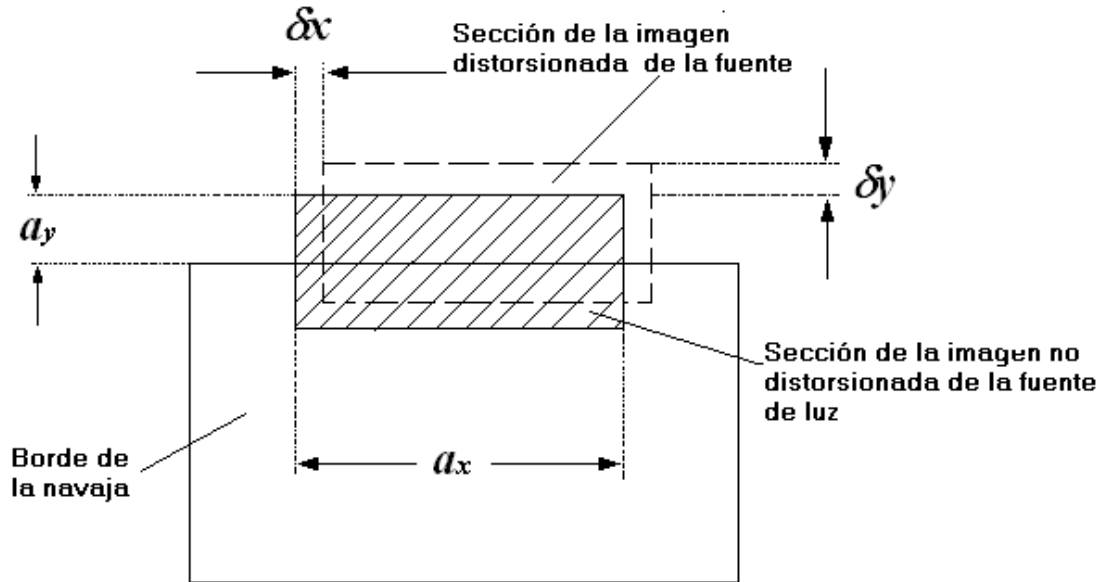


Figura 2.3. Desplazamiento de la sección de la imagen de la fuente de luz en el plano del borde de la navaja en el sistema de schlieren [2].

2.4 Método para la medición de temperatura

Para poder determinar el valor de la densidad de un flujo de fluido se necesita conocer el valor de δx , tal y como se puede ver en la ecuación (2.7). En ésta sección se dará un procedimiento para determinar dicho valor.

Como hemos mencionado, en un sistema schlieren detectamos desviaciones de ángulo de rayos de luz. Para tal fin, usamos una navaja colocada en el plano focal de la segunda lente (o espejo) para poder detectar las mencionadas 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 nota como 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 (ver figura 2.3). De esta manera, 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 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).

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, i.e. ξ puede tomar valores de $-k\Delta x_0$ a $k\Delta x_0$, siendo $k = 0, 1, \dots, l$ siendo 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, i.e. cuando los valores de intensidad están alrededor 40% 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 figura 2.4a 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 $I_{(n,m)}^p$ y $I_{(n,m)}^{\xi}$ de la

imagen registrada en $\zeta=0$, es decir, sin flujo, $I_{(n,m)}^0$. Podemos escribir las siguientes expresiones,

$$I_{(n,m)}^{\Delta x} = I_{(n,m)}^{\zeta} - I_{(n,m)}^0 \quad (2.12)$$

$$I_{(n,m)}^{\delta x} = I_{(n,m)}^p - I_{(n,m)}^0 \quad (2.13)$$

Aquí $I_{(n,m)}^{\Delta x}$ y $I_{(n,m)}^{\delta x}$ dan las relaciones entre las variaciones de intensidad de la imagen schlieren sin flujo y con flujo respectivamente para cada píxel. Relacionando la ecuación (2.12) con la (2.13) podemos encontrar el valor de, δx , y por consiguiente la densidad del flujo de fluido.

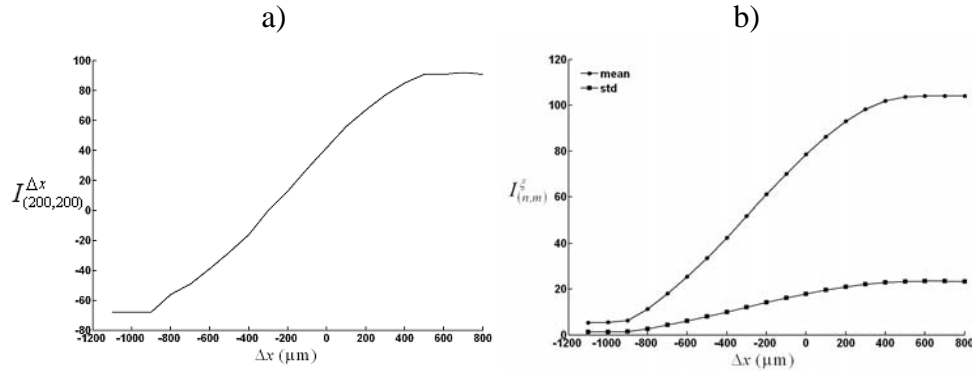


Figura 2.4 Curvas de calibración. a) Curva de calibración para el píxel (n,m) y b) Desviación media y standard de las curvas de calibración MxN de las imágenes de schlieren.

El siguiente criterio se usó para relacionar las ecuaciones (2.12) y (2.13):

$$\delta x_{(n,m)} = \Delta x_{(n,m)}, \quad (2.14)$$

donde Δx corresponde a la condición

$$\min \left| I_{(n,m)}^{\delta x} - I_{(n,m)}^{\Delta x} \right| \quad (2.15)$$

Es conveniente mencionar que los valores de intensidad de las curvas de calibración se interpolaron para incrementar su resolución. La interpolación se llevo de 20 a 200 puntos y se usó la función “pchip (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) ” del software MatLab. En la figura 2.4a se representa a la curva de calibración para un solo píxel, obtenida sin flujo, para 200 puntos obtenidos con la interpolación. Lo interesante de esta interpolación es que la curva sigue fidedignamente a los puntos obtenidos experimentalmente, por lo tanto no es necesario obtener más puntos experimentales para la obtención de esta curva. En la figura 24b se muestra la curva de calibración obteniendo el valor medio de cada imagen experimental obtenida sin flujo, y además se muestra con los valores de la desviación estándar para cada imagen, donde se puede observar que sí existe desviación entre los puntos de las curvas de calibración, debido a que estas curvas se toman directamente de veinte 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 $I_{(n,m)}^0$ utilizada en las ecuaciones 2.12 y 2.13, ya que también reduce el ruido intrínseco del aparato óptico como el producido por las imperfecciones de las componentes ópticas.

Conclusiones

Se utiliza la ecuación del rayo de luz dentro de un medio transparente e inhomogeneo para determinar la ecuación del gradiente de un campo de densidad. La ecuación se usa para calcular campos de temperatura en flujos de fluido. En este capítulo se propuso un método experimental para poder determinar estos campos de temperatura usando un sistema schlieren tipo-Z y usando la ecuación del gradiente de un campo de densidad.

Referencias.

- [1] Stavroudis ON. The optics of rays, wavefronts, and caustics. New York: Academic Press, Inc.; 1972.
- [2] Wolfgang Merzkirch, Flow Visualization, second edition, Academic Press, Inc. 1987.
- [3] G. S. Settles, Schlieren and Shadowgraph Techniques, Springer Berlin, 2001
- [4] Hand book of fluid dynamics and fluid machinery, Volume Three, Applications of Fluid Dynamics, Edited by Joseph A. Schetz and Allen E. Fuhs, John Wiley & sons, Inc. 1996.
- [5] Iraídes Aparecida de Castro Villela, José Luz Silveira, Ecological efficiency in thermoelectric power plants, Applied Thermal Engineering 27, (2007), pp. 840–847.
- [6] http://es.wikipedia.org/wiki/Fracci%C3%B3n_molar

Capítulo 3

Desarrollo experimental

3.1 Arreglo experimental del sistema schlieren en configuración-Z

El arreglo óptico propuesto en esta investigación se utilizará para medir campos de temperatura del aire calentado por una placa metálica y la combustión de gases provenientes de una flama. Utilizaremos el arreglo óptico schlieren tipo-Z, este arreglo es comúnmente utilizado para la visualización de flujos de fluidos en túneles de viento. En la figura 2.1 se muestra el arreglo utilizado. El arreglo schlieren tipo-Z usado en esta investigación consiste de dos espejos esféricos con un diámetro de 0.15m y una distancia focal de 1.54m, una navaja de rasurar que se puede desplazar en la dirección x y y con la ayuda de un micrómetro, como fuente de iluminación usamos un diodo emisor de luz (LED) de 5mm de diámetro con una emisión de luz blanca de 2500lm de intensidad y tiene una longitud de onda dominante de $\lambda = 0.31\text{nm}$.

La placa metálica que se utilizó en nuestros experimentos es rectangular con dimensiones de 7.3 cm \times 12 cm, el sistema electrónico de la placa nos permite variar la temperatura de -10 °C a 100 °C con resolución de un grado y la temperatura de la superficie de la placa se puede observar en una pantalla de cristal líquido. En la figura 3.1 se puede ver la placa que se utilizó y la forma como se colocó en el arreglo óptico. El flujo de convección generado por la diferencia de temperatura entre la superficie de la placa y el medio circundante era en la dirección vertical.

La tobera usada en este experimento tiene dos cilindros concéntricos de diferente diámetro con configuración simétrica en el eje. Los diámetros del cilindro interno y externo son de 5mm y 19mm respectivamente, en la figura 3.2 se muestra la tobera usada en los experimentos. Como se puede ver en la figura 3.2, la tobera contiene cuatro

ventanas de ventilación de forma circular usadas para proveer de la mezcla adecuada entre aire y combustible.

El aire entra por las ventanas de la tobera por efecto Venturi. La forma y tamaño de la flama depende principalmente del flujo de aire que entra por las ventanas de ventilación y de la presión del gas butano. Los experimentos se realizaron para una, dos, tres y cuatro ventanas de ventilación abiertas. La presión del gas butano se controla con una válvula del soplete portátil localizada en la parte superior del tanque o bote de gas butano. Por la limitante en la velocidad de adquisición de imágenes de la cámara que se utilizo en estos experimentos se uso una presión de gas de 1.1 kPa.

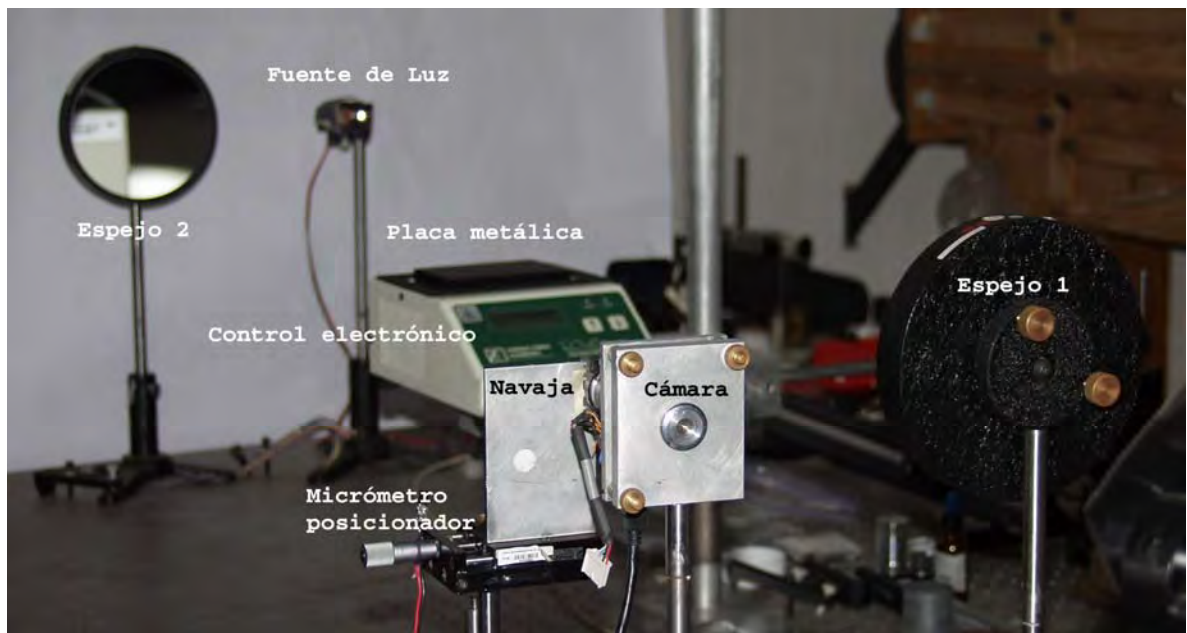


Figura 3.1. Arreglo experimental de schlieren con la placa metálica entre los dos espejos.

Para que el experimento fuera repetitivo la presión del gas era medida con la ayuda de un manómetro electrónico tipo DM2 marca Airflow (ver figura 3.3). La tobera se colocó en forma vertical a la mesa óptica, entre los dos espejos del sistema schlieren.

La dirección de los gases de combustión y aire calentado alrededor de la flama es vertical con respecto a la mesa y se mueven de forma ascendente. El filo de la navaja es

paralelo a la dirección de los flujos de combustión pero su desplazamiento se hace en la dirección- x tomando como sistema de referencia el mostrado en la figura 2.1.

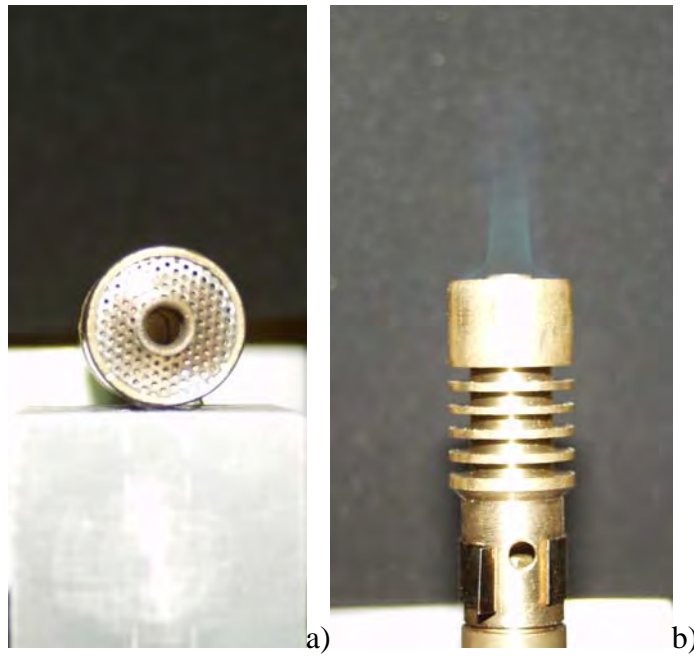


Figura 3.2. Tobera o soplete visto a) de frente b) de lado, también se observa la forma de la zona de reacción de la flama a simple vista



Figura 3.3. Arreglo experimental que muestra la válvula de control del gas y el manómetro de presión para la tobera o soplete.

3.2 Sistema para la obtención de los datos

La obtención de las imágenes del sistema óptico schlieren se hizo usando una cámara digital marca *Lumenera*. La cámara permite registrar de 30 a 60 imágenes por segundo (*fps*) a una resolución espacial de 640×480 píxeles. Las imágenes son guardadas en formato BMP y digitalizadas a 8-bits en niveles de gris. La cámara es controlada con el software de la cámara utilizando una computadora personal de escritorio. La resolución espacial y temporal de la cámara permite obtener las características dinámicas de los flujos de fluido en estudio. Para formar la imagen sobre el CCD de la cámara se utiliza una lente *navitar* de 2cm de diámetro y 50mm de distancia focal.

3.3 Calibración del sistema schlieren

Se hacen dos tipos de calibración para el sistema schlieren; estas consisten en:

- a) Calibración para las dimensiones reales del flujo en estudio. Para obtener las dimensiones del flujo se utiliza una rejilla en forma de cuadrícula como se muestra en la figura 3.4. Se obtiene una imagen de esta cuadrícula en la posición donde se harán las mediciones. El tamaño de un cuadrado en la imagen se relaciona con su dimensión real, obteniéndose de esa manera el tamaño del píxel en unidades reales. El valor real del tamaño del píxel se utilizará más adelante para poder realizar la integración numérica en la obtención de densidad.
- b) Curvas de calibración. Consisten en obtener curvas que nos relacionen niveles de gris con desviación de rayos de luz.

Para poder medir la temperatura necesitamos primeramente obtener las curvas de calibración tal como se explicó en el capítulo anterior. La figura 3.5 muestra las imágenes de calibración para cada posición de la navaja.

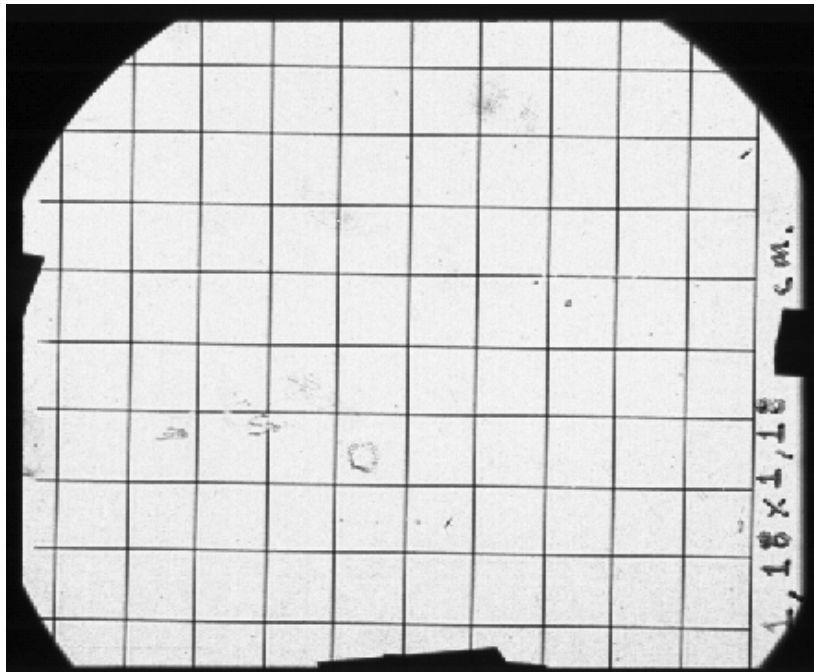


Figura 3.4. Rejilla utilizada para la calibración de las dimensiones del sistema schlieren.

Para obtener estas curvas de calibración primeramente se obtienen imágenes de intensidad del sistema schlieren sin flujo de prueba tal y como se explico en la sección 2.4. Estas imágenes se obtienen desplazando la navaja con la ayuda de un micrómetro. Las curvas de calibración para cada píxel se obtienen moviendo lateralmente la navaja desde -1 mm a 1 mm con una separación entre mediciones de $\Delta x = 100 \mu\text{m}$. La figura 3.5 se muestran las variaciones de intensidad para cada imagen schlieren para diferentes posiciones de la navaja. En la figura 2.4a y b de capítulo 2 se muestra una curva de calibración característica de este sistema óptico para un píxel específico su promedio y desviación estandar.

De las posiciones de la navaja en que se tomaron las imágenes de la figura 3.5, se selecciona la posición en la que haremos nuestras mediciones (posición de referencia). La figura 3.5 muestra una imagen schlieren rodeada con un cuadro blanco, esta es la posición de la navaja en que obtenemos mayor sensibilidad para realizar nuestros 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.

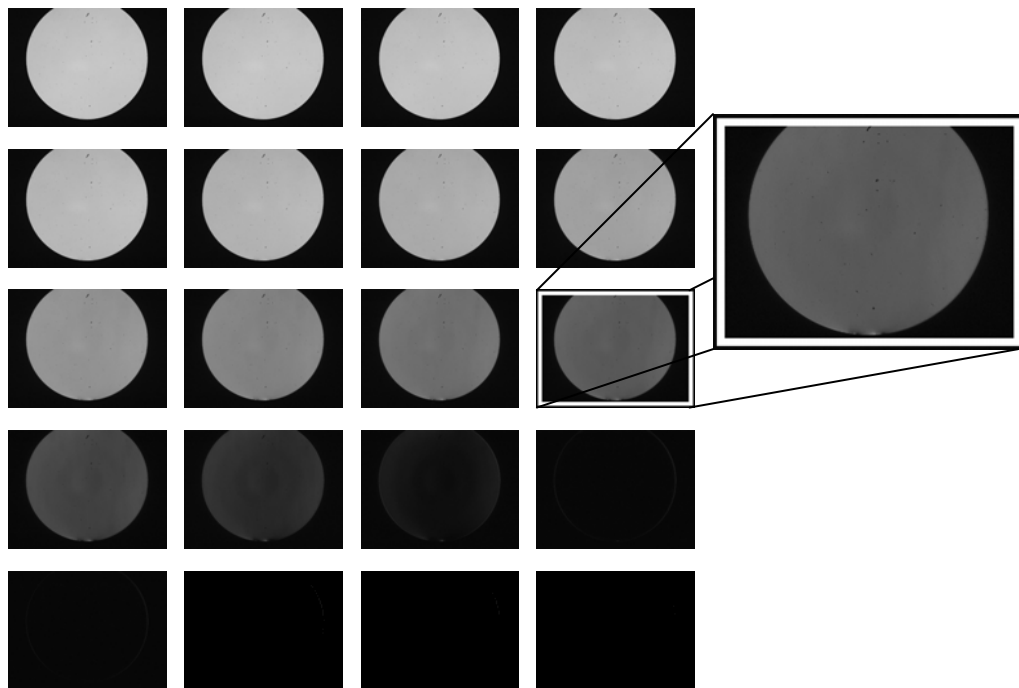


Figura 3.5. Variación de las imágenes de intensidad, la imagen con un rectángulo representa a la imagen en la cual la posición de la navaja se escogerá para la obtención de los resultados experimentales, también se muestra una amplificación de la misma para mayor detalle.

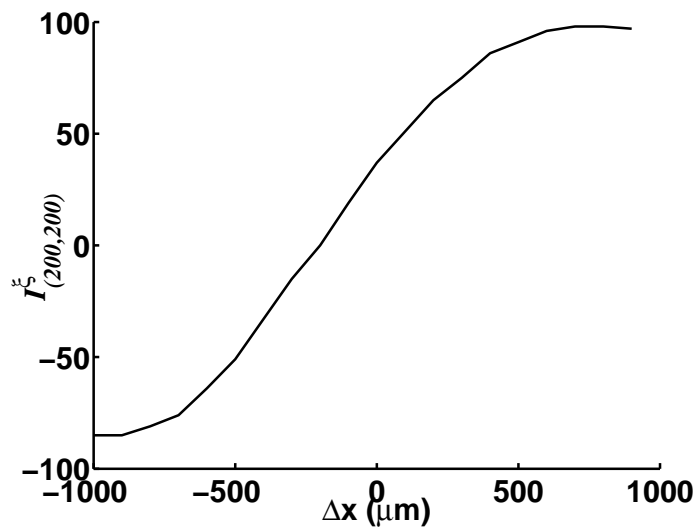


Figura 3.6. Curva de calibración para un píxel de la imagen.

3.4 Obtención de datos experimentales

Una vez seleccionado el punto de la navaja donde se obtendrán los resultados experimentales, se coloca el flujo de prueba, ya sea la placa metálica a la temperatura que se va a estudiar o la flama de gas. En las figura 3.7 se muestra un diagrama de bloques para obtención de la curva de calibración, de las imágenes schlieren y el procesado de estas. En esencia el diagrama de flujo muestra el procedimiento explicado en la sección 2.4 para la obtención de la temperatura.

Algo muy importante que se tiene que realizar es medir la temperatura ambiente del laboratorio, ya que esta temperatura nos servirá como referencia para la obtención de información de los datos obtenidos al hacer el procesado de datos. La temperatura ambiente se obtiene con la ayuda de un termopar de tipo K.

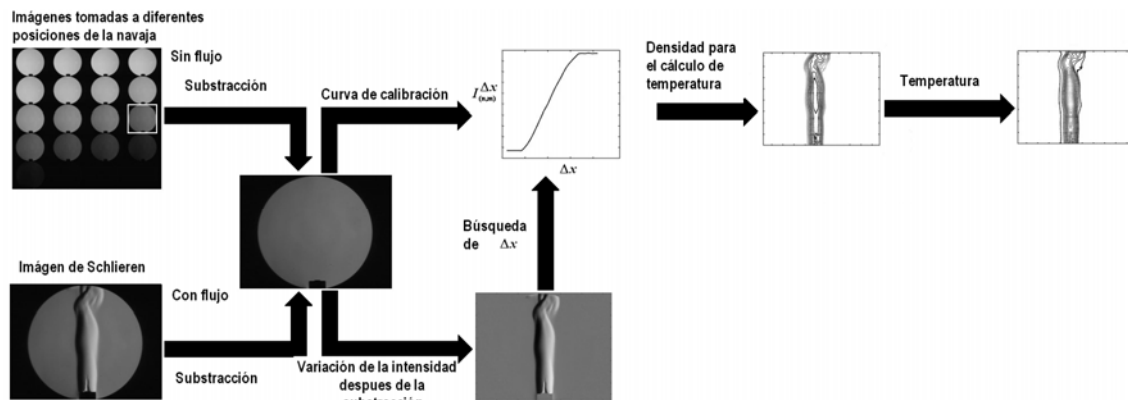


Figura 3.7. Diagrama de flujo que explica la obtención de datos y el procesamiento para la obtención de temperatura en la flama.

3.5 Mediciones con termopar

Los resultados obtenidos con la técnica schlieren son validados con las mediciones hechas con un termopar. Puesto que los valores de temperatura de la placa y la flama son de rangos diferentes se usan dos termopares tipo K y R.

a) Para la placa metálica

Se hacen mediciones puntuales con un termopar de tipo K a lo largo de la parte central de la placa y a diferentes alturas, tal y como se muestra en la figura 3.8. Las mediciones se hicieron en cada punto, dando el tiempo suficiente para que la punta del termopar alcanzara la temperatura del aire circundante. Estas mediciones se hicieron para dos temperaturas diferentes de la placa: $T = 50^{\circ}\text{C}$ y 80°C . Para el desplazamiento lateral de la punta del termopar se utilizó un riel óptico que contenía una escala en centímetros.

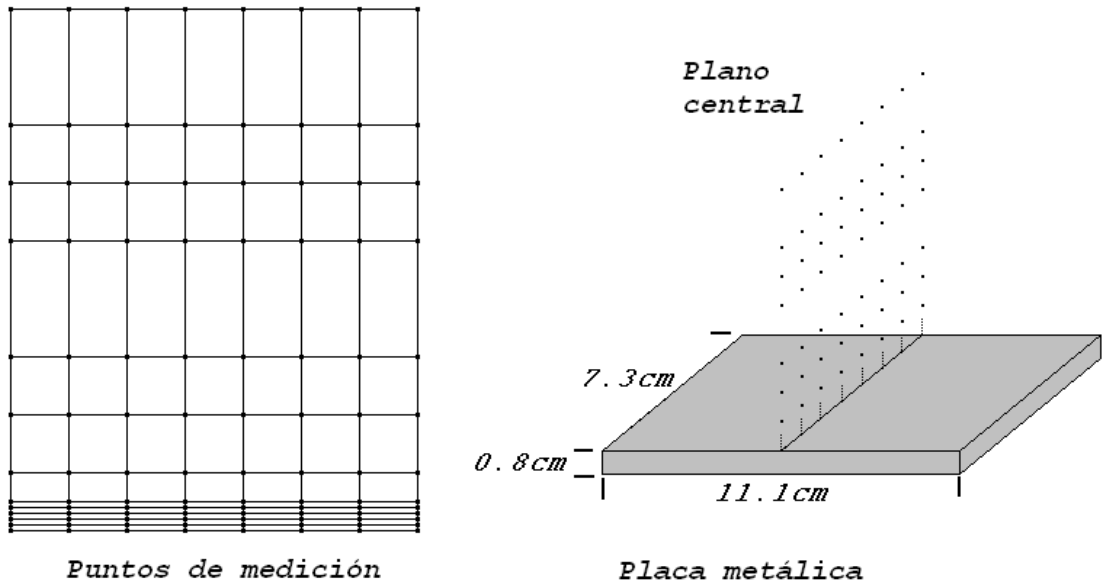


Figura 3.8. Puntos donde se colocó la punta del termopar y posición del plano central sobre la placa para la medición de temperaturas.

En la figura 3.9 se observa el termopar de tipo K provisto por *Fluke 52 serie II*, utilizado para obtener las mediciones de temperatura descritas en la figura anterior, el rango de operación de este instrumento va de -200 a 1372 y con una precisión de $\pm [0,20\% + 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}]$.



Figura 3.9. Termómetro de tipo K.

b) Para la flama

Para la flama, se utiliza un termopar de tipo R provisto por *Omega* el cual tiene la capacidad de medir temperaturas de 0°C hasta 1767 °C con un 0.1% de error. La punta del termopar contiene 1.5mm de diámetro como se puede apreciar en la figura 3.10. Las mediciones en la flama se hicieron para las cuatro diferentes premezclas o ventanas abiertas de la tobera, se mide primero la temperatura ambiente, en este caso fue de 20°C. y después se obtuvieron las mediciones de temperatura para los valores máximos para cada premezcla, los resultados se mostrarán en la sección de resultados.



Figura 3.10 Termopar tipo R

3.6 Conclusiones

Se describe y se muestra el arreglo experimental utilizado en el desarrollo de este trabajo. Tal arreglo es el sistema schlieren de tipo Z, mostrado en la figura 3.1, en esta figura también se puede observar a la placa metálica posicionada en el área de prueba. Se describe la obtención de datos y las especificaciones de la cámara utilizada para este propósito. Para comenzar a obtener los datos experimentales se hacen las calibraciones de dimensión (con una rejilla cuadrículada, tomada sin flujo de prueba ver figura 3.4) y de intensidad (utilizando las imágenes de intensidad sin flujo y la curva de calibración ver figuras 3.5 y 3.6) del sistema schlieren. Después de hacer las calibraciones del sistema se escoge la imagen gravada sin flujo de prueba que será utilizada para procesar nuestros datos experimentales y además se toma la posición de la navaja en que se capturó esta imagen para obtener nuestros resultados experimentales con flujo. En la figura 3.7 se muestra un esquema para explicar la obtención de los resultados comenzando desde la obtención de resultados experimentales hasta la obtención de los resultados de temperatura con el sistema schlieren y la prueba de la navaja. Para corroborar los resultados de temperatura obtenidos con schlieren, se obtienen resultados de temperatura de forma puntual y en promedio con la ayuda de termopares, de tipo K para la placa metálica y de tipo R para la flama.

Capítulo 4

Resultados experimentales

En el capítulo anterior se expusieron los procedimientos experimentales para medir temperatura en campos de flujo de fluido transparente y aplicándoles el método de la curva de calibración explicado en el capítulo 2 se llegó a los resultados finales. A continuación se mostrarán los resultados experimentales obtenidos con los procedimientos anteriores, se mostrarán los resultados procesados y también se compararán estos resultados con mediciones realizadas con termopar, también explicado el proceso en el capítulo anterior para cada caso respectivamente.

4.1 Resultados experimentales

Siguiendo el procedimiento dado en el diagrama de flujo del capítulo 3, se procedió a medir la temperatura del flujo de convección de una placa caliente y una flama. En cada caso se obtuvieron 300 imágenes de schlieren a una velocidad de adquisición de imágenes de 30 y 60 (*fps*) para la placa y la flama respectivamente, y ambos análisis a una resolución espacial de 640×480 píxeles.

Cada una de las imágenes de schlieren que se obtuvieron para los casos de la placa y flama se restan con la imagen sin flujo obtenida en la posición de la navaja $\xi = 0$, que viene siendo la imagen con el recuadro blanco en la figura 3.5. Las desviaciones en intensidad para cada píxel se buscan en la curva de calibración correspondiente a cada píxel, para así de esta manera obtener el valor Δx representado en la ecuación (2.14).

El valor del gradiente de densidad ρ_x se determina usando las ecuaciones 2.5 y 2.9. La ecuación (2.6) se integra usando la regla trapezoidal para poder obtener el valor de la densidad, ρ . El valor resultante de la densidad se sustituye en la ecuación (2.8) y de esta manera se obtiene finalmente la temperatura.

4.1.1 Resultados experimentales para la placa metálica

Para el caso de la placa caliente se hicieron mediciones para una temperatura en la superficie de la placa de 50 °C y 80 °C. En la figura 4.1 se muestra una imagen schlieren instantánea para cada una de las temperaturas bajo estudio. El campo de observación de las imágenes schlieren que se obtuvieron es de aproximadamente 12×12 cm. En la misma figura se observa el borde de la placa y las columnas de aire caliente que emana de la superficie de la placa. Este aire ascendente es provocado por la diferencia de densidad del aire cerca de la placa y el circundante. El flujo presenta un comportamiento aleatorio tanto temporal como espacial. Aunque no se hicieron mediciones de velocidad, se observó una velocidad mayor en el flujo para el caso $T=80\text{ °C}$.

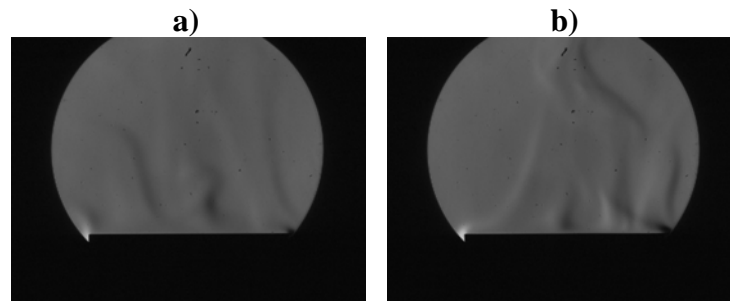


Figura 4.1. Imágenes instantáneas schlieren del aire caliente sobre la superficie de la placa correspondientes a los gradientes en intensidad en dirección-x, a) $T = 50\text{ °C}$ y b) $T = 80\text{ °C}$.

En las figura 4.2 se muestran los gradientes de densidad para ambas temperaturas de la placa. En la figura 4.3 se muestran los contornos de campos de temperatura para los dos valores de la temperatura en la superficie de la placa.

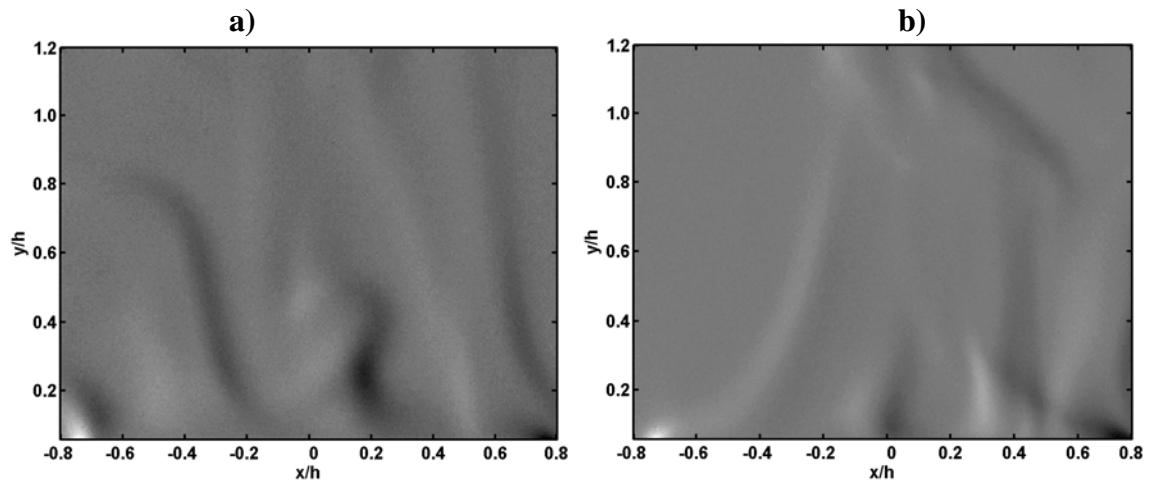


Figura 4.2. Gradientes de densidad instantáneos sobre la placa metálica para a) $T = 50\text{ °C}$ y b) $T = 80\text{ °C}$.

A los campos de temperatura obtenidos se les aplica un filtro de tipo promedio para reducir el ruido de altas frecuencias. En la misma figura, las coordenadas en dirección x e y han sido normalizadas con el valor de $h = 7.3\text{cm}$ correspondiente a la ancho de la placa. Se encuentra que la temperatura cercana a la superficie de la placa es consistente con los valores de la superficie de la placa que se muestra en la pantalla de cristal líquido del control de la placa. Para obtener una mejor vista del flujo en la interfase placa-aire, a la figura 4.3 se le hace un acercamiento, estos acercamientos están incluidos en la misma figura.

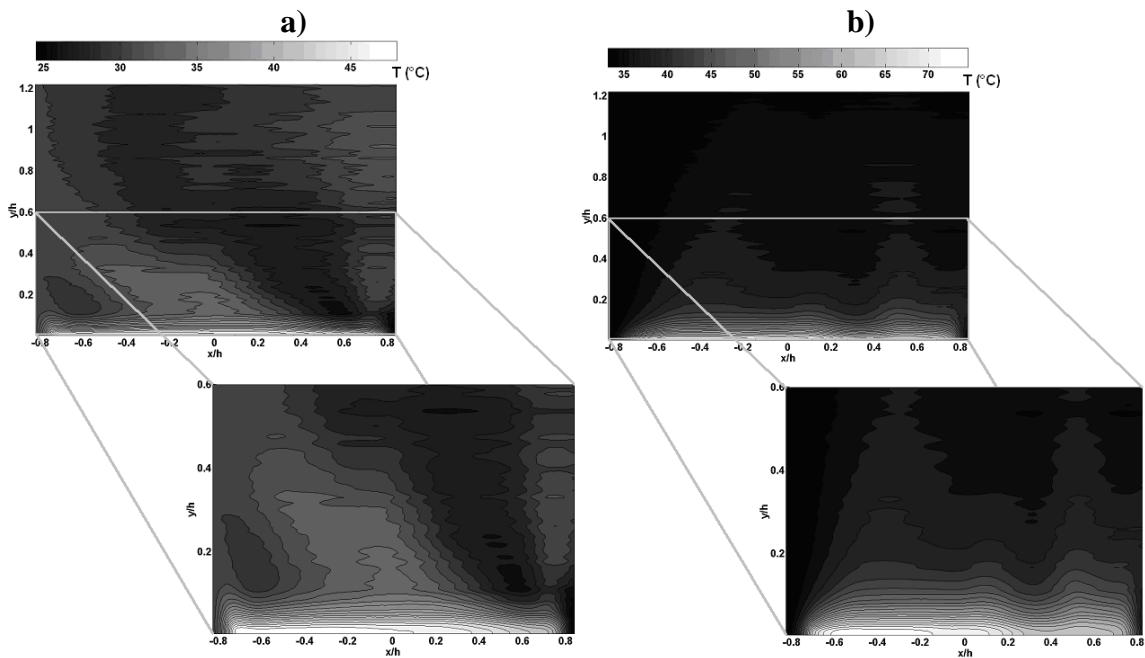


Figura 4.3 Gráfica de contornos de los campos de temperatura para temperatura de la placa de: a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$. Se incluyen acercamientos de las imágenes.

Los campos de temperatura obtenidos con la técnica schlieren se comparan con mediciones hechas con un termopar tipo K (ver sección 3.5). Las mediciones realizadas con el termopar son valores promedios, por consiguiente para poder comparar con los resultados de la técnica schlieren se calcula el promedio usando las 300 imágenes que se obtuvieron con dicha técnica. Las mediciones con el termopar se hicieron en la forma explicada en la sección 3.5. En la figura 4.4 se muestra las mediciones hechas con el termopar para ambos casos de temperatura. Estas mediciones se integraron a lo largo del eje z para poder hacer una comparación fidedigna con las mediciones hechas con la técnica schlieren. La figura 4.5 muestra la comparación entre ambos resultados, los resultados hechos con ambas mediciones concuerdan entre ellos. Los resultados cercanos a la superficie de la placa concuerdan mejor. Esto es debido a que los flujos de convección del fluido fluctúan más al alejarse de la placa a una de altura $y/h = 0.5$. Incluso, los valores promedio muestran que para el caso de 50°C la temperatura de la placa, existen más fluctuaciones que para el caso de la temperatura de la placa a 80°C .

Cabe destacar que otros autores han realizado trabajos similares a este, como el realizado por Atul[2], aplicando la técnica de schlieren conjuntamente con Interferometría con Mach-Zehnder y Shadowgraph, a una cavidad rectangular con agua como flujo de trabajo y calentada en el fondo de ésta, resultando en la comparación mejor la técnica de schlieren debido a la refracción de la luz láser utilizada en el interferómetro para este propósito, y los resultados de Shadowgraph también son buenos cuando el flujo de fluido se torna turbulento.

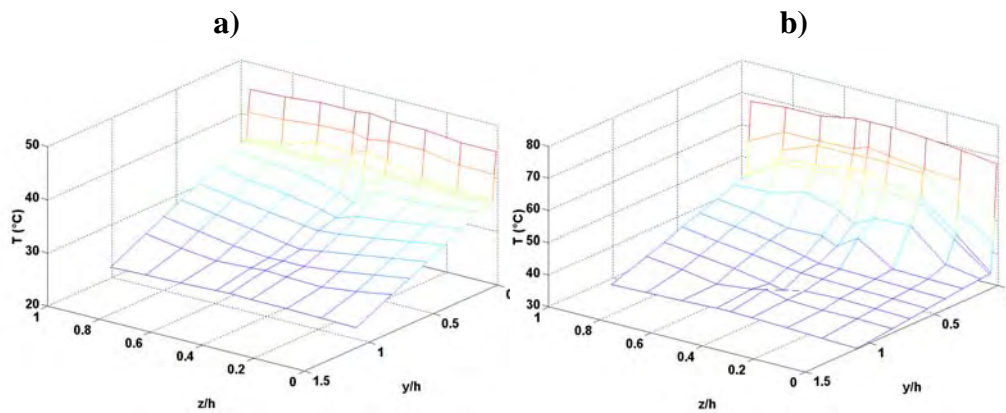


Figura 4.4 Campo de temperaturas de aire caliente sobre la placa obtenidas con un termopar a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$.

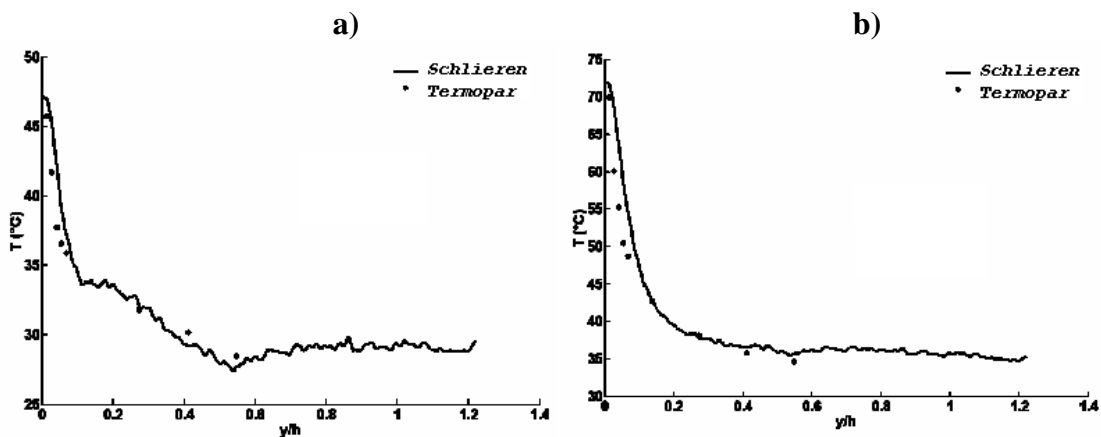


Figura 4.5. Comparación entre mediciones de promedios de temperatura obtenidos con schlieren y termopar a: a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ y b) $T = 80^{\circ}\text{C}$.

4.1.2 Análisis de error en la temperatura de la placa

La incertidumbre de las mediciones de temperatura de la placa metálica será caracterizada en esta sección. Como la medición principal es la temperatura, la ecuación (2.8) puede ser expresada en la siguiente forma

$$T = T(\rho, \rho_0, T_0), \quad (4.1)$$

donde ρ es una integral que depende de Δx , f_2 , K y h ; (ver ecuación 2.7), donde en f_2 corresponde a la constante de distancia l de la ecuación 2.7. En el análisis descrito en la sección 2.2, los valores de ρ_0, T_0, f_2, K y h son consideradas como constantes y ρ es la única variable dependiente. Entonces la incertidumbre aplicada al caso de la temperatura, está dada por

$$\sigma_T = \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \right) \sigma_\rho \quad (4.2)$$

donde σ_T y σ_ρ son las incertidumbres de temperatura y densidad, la ecuación (4.2) puede expresarse como respectivamente.

$$\left(\frac{\sigma_T}{T} \right) = \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho} \right) \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) se usó para el estudio de errores causados por la medición de temperatura. La desviación estándar de la densidad, σ_ρ , la calculamos usando las 300 imágenes de schlieren que obtuvimos.

La tabla 4.1 muestra los valores de incertidumbre para cada temperatura en cuestión. La primer columna en la tabla corresponde a la altura normalizada en la

dirección- y , donde, $y = 0.1$ a 4cm . La segunda y tercer columna corresponden a los valores de incertidumbre para las mediciones de $T = 50^\circ\text{C}$ y $T = 80^\circ\text{C}$ respectivamente. Se obtienen valores de incertidumbres mínimas y máximas de 0.3°C y 8°C respectivamente para las mediciones de temperatura de $T = 50^\circ\text{C}$, y mínimas y máximas de 0.3°C y 1.5°C respectivamente para las mediciones de temperatura de $T = 80^\circ\text{C}$ respectivamente. Cerca de la superficie los valores de incertidumbre para ambas mediciones son similares. Sin embargo, al alejarse de la superficie la diferencia en los valores de incertidumbre son más significantes. Esto puede ser debido a las diferencias en el nivel de fluctuaciones que se presentan en ambos casos.

También, el error relativo estimado entre las imágenes de schlieren y las mediciones hechas con termopar se muestra en la figura 4.6. Se observan desviaciones entre las mediciones principalmente en los puntos cercanos a la superficie de la placa metálica. Esto se debe principalmente a que las primeras cinco mediciones hechas con el termopar se hicieron con separación de un milímetro y el instrumento utilizado para trasladar al termopar tenía una resolución de un milímetro, por consiguiente la incertidumbre derivada al posicionar el termopar es mayor que cualquier otra fuente de error.

Tabla 4.1 Cálculos de incertidumbre para las mediciones de temperatura.

y/h	$\sigma_T (50^\circ C)$	$\sigma_T (80^\circ C)$
0.0137	0.3	0.3
0.0274	0.9	0.8
0.0411	1.5	1.2
0.0548	2.1	1.5
0.0685	2.7	1.7
0.1370	3.4	1.6
0.2740	4.1	1.2
0.4110	7.5	1.5
0.5479	8.2	1.5

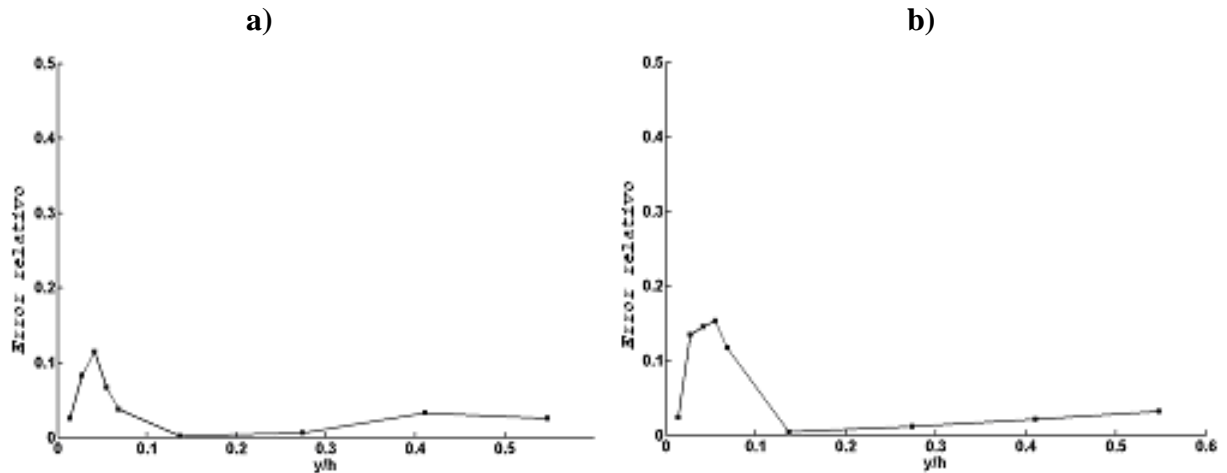


Figura 4.6. Error relativo estimado entre las mediciones realizadas con schlieren y termopar para las temperaturas de la placa metálica de a) 50°C y b) 80°C.

4. 2 Resultados experimentales para la flama

Para el caso de la flama se obtuvieron resultados experimentales de campos de temperatura para 4 mezclas aire/combustible. Estas son para una, dos, tres y cuatro ventanas abiertas, en lo siguiente para cada caso usaremos la terminología 1VA, 2VA, 3VA y 4VA para señalar el número de ventanas abiertas. En la figura 4.7 se muestra una imagen schlieren instantánea para cada mezcla aire/combustible analizada.

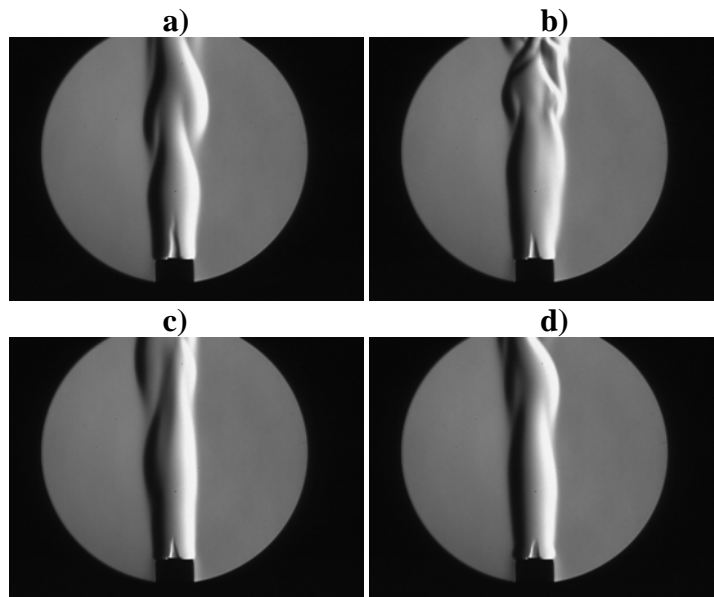


Figura 4.7 Imágenes instantáneas del flujo de gases calientes correspondientes a los gradientes en intensidad en la dirección-x para, a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA.

Como se puede observar, en las imágenes de la figura 4.7, en la zona de reacción de la flama que se encuentra a la salida de la tobera, sobre el cilindro concéntrico central, se encuentran gases sin consumir y las características de esta zona de reacción son una parte muy importante para el comportamiento y características de la flama.

La característica principal visible en esta zona de reacción corresponde a la altura de la flama, ya que dependiendo del tamaño de esta zona se podrá inferir si la flama se comporta de forma laminar o de forma turbulenta o si esta consta de mezcla aire/combustible rica o pobre. Por ejemplo al observar con detalle las cuatro imágenes de la figura 4.7 se ven las diferencias entre el tamaño de la zona de reacción, viendo que este tamaño está íntimamente ligado a la cantidad de flujo de aire entrante por las ventanas de la tobera. De forma general en la figura 4.7 a), la altura de la zona de reacción sobrepasa al diámetro de de la tobera que es $D_{tobera} = 1.9\text{cm}$, esto es para una 1VA, en la figura 47 b) son 2VA y se puede observar que la altura de la zona de reacción disminuye drásticamente a casi la mitad del diámetro de esta, después en las figuras 4.7 c) y d) para 3VA y 4VA respectivamente se observa que existe una ligera reducción de de la altura.

Ahora bien ¿esto que nos quiere decir? Por el comportamiento de la altura de la zona de reacción se puede decir que no tiene comportamiento lineal con la ventilación y

que el flujo de aire para 1VA no es suficiente para crear una buena mezcla aire/combustible.

Vemos que el comportamiento de la zona de reacción de la flama se atribuye al flujo de entrada de aire que es variado por el número de ventanas abiertas como se ha dicho anteriormente, el aumento de este flujo hace que la velocidad y la turbulencia aumente por lo tanto es mejor la premezcla y además es el suficiente volumen para que no existan moléculas de carbón libres en busca de oxígeno proveniente del aire atmosférico que circunda alrededor de la flama. Por lo dicho anteriormente en este párrafo, la zona de reacción de la figura 4.7 a) es poco turbulenta y crece debido a los restos de carbón y anhídrido carbónico que aún se encuentran sin reaccionar con el aire alrededor de la flama. Por otro lado en la figura 4.7 d) el flujo de aire entrante es mucho y aumenta esta turbulencia, haciendo que la premezcla sea buena y no existan moléculas de combustible libres y la combustión se realice casi totalmente al instante en que la premezcla sale de la tobera, haciendo que la zona de reacción sea pequeña, al momento de producirse esta flama la zona de reacción se veía más turbulenta y además emitía un ligero ruido esto en el experimento.

Lo dicho en los dos párrafos anteriores se fundamenta en las condiciones en que se realizó el experimento; al momento de generar a la flama se tenía la limitación de la adquisición de datos de la cámara ya que esta no era lo suficientemente rápida para capturar todos los detalles para una presión más alta del gas butano que la utilizada, entonces se optó por generar una flama con la presión del gas butano tal que la flama producida por esta estuviera en los límites de la adquisición de datos de la cámara y además que no produjera una flama de color amarilla para el caso de 1VA debido que el color amarillo de la flama es ruido para el sistema schlieren. Entonces la presión ideal en el experimento fue de $P = 1.1kPa$, como se explicó en el capítulo 3.

4.2.1 Procesamiento de los resultados experimentales para la flama

Para el caso de la flama, se obtienen los siguientes gradientes mostrados en la figura 4.8, en esta figura se muestran cuatro imágenes instantáneas correspondientes a los

gradientes de densidad para las cuatro diferentes ventilaciones en la tobera. En esta misma figura se puede observar claramente el tamaño de la zona de reacción en la flama así como la disminución de la altura con respecto a la ventilación.

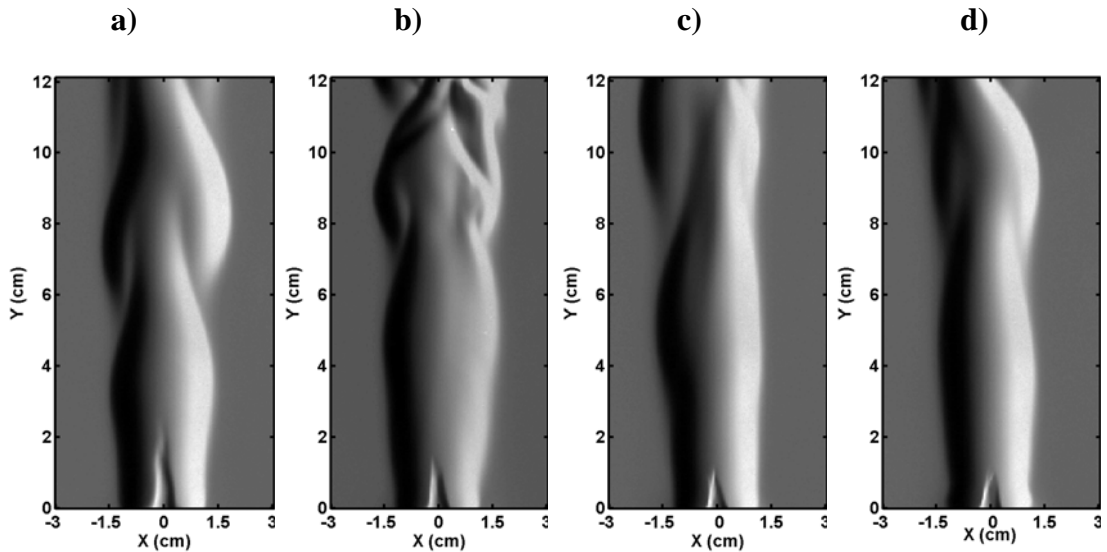


Figura 4.8 Gradientes de densidad obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA.

De los gradientes de densidad obtenidos con la ecuación (2.6) se obtienen los campos de densidad por medio de la ecuación (2.7) y utilizando la densidad y la ecuación (2.8) se obtiene finalmente la temperatura. En la figura 4.9 se muestran cuatro imágenes correspondientes a los campos instantáneos de temperatura, en estos campos se observa que los máximos de temperatura se generan en la parte superior de la flama y se propagan en dirección ascendente.

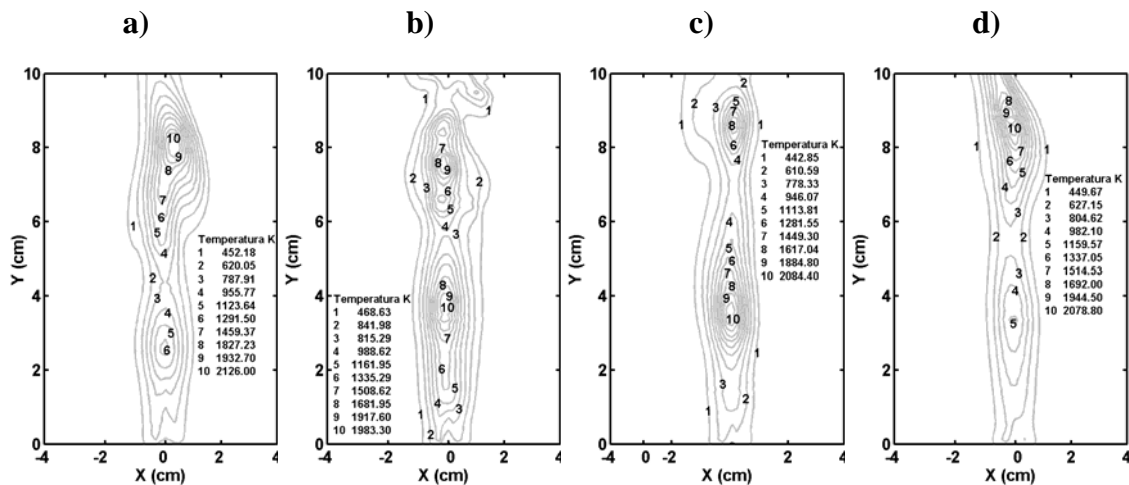


Figura 4.9 Campos instantáneos de temperatura obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA.

A continuación se muestran en la figura 4.10, el promedio de los campos de temperatura tomados de 300 imágenes para cada mezcla o ventilación, en estos campos de temperatura promedio se puede observar que aparecen extendidas las máximas temperaturas en la parte central del campo excepto para la premezcla utilizando 2VA, ya que en esta aparecen dos máximos separados, uno en la parte superior de la zona de reacción y otro en la parte superior de los gases calientes.

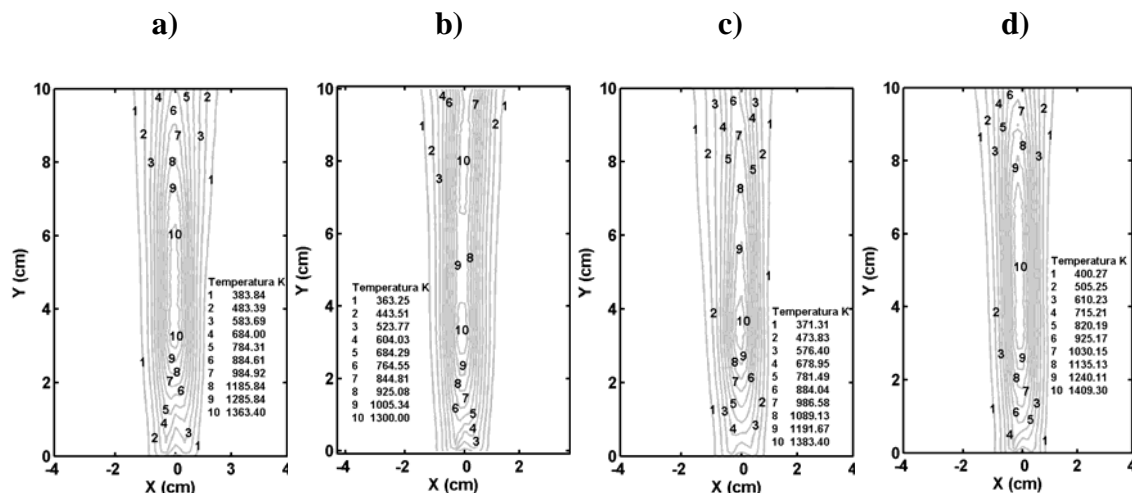


Figura 4.10 Campos de temperatura en promedio obtenidos de la flama para a) 1VA, b) 2VA, c) 3VA y d) 4VA.

La comparación de temperaturas entre las obtenidas con un termopar y las obtenidas con schlieren se pueden observar en la figura 4.11. Como la punta de termopar mide temperaturas puntuales y en promedio, se comparó los máximos de temperatura en promedio obtenidos con el termopar con los máximos de temperatura en promedio obtenidos con schlieren. Las gráficas de temperaturas mostradas empatan entre ambas mediciones.

Los valores obtenidos de temperatura están del orden de los obtenidos por Shakher C. [3], donde utiliza las técnicas de fotografía por speckle, interferometría por speckle shearing e interferometría de Talbot obteniendo buenos resultados para una flama simétrica en el eje.

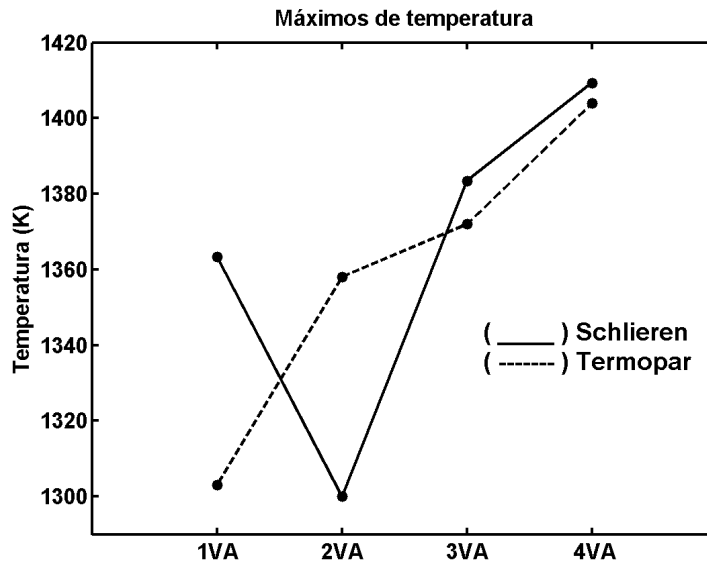


Figura 4.11 Máximos de temperatura en promedio obtenidos con termopar y schlieren

4.5 Conclusiones

En este capítulo se mostraron resultados experimentales obtenidos con la técnica óptica llamada schlieren o común mente prueba de la navaja, para el flujo de aire calentado por una placa metálica figura 4.1 y para el flujo de gases calientes generados por una flama que a su vez es producida por una tobera circular que funciona a base de la premezcla gas butano/aire figura 4.6. A estos resultados experimentales se les aplicó respectivamente el el

método de la curva de calibración para obtener campos de gradientes de densidad mostrados en las figuras 4.2 y 4.7. Los gradientes de densidad se utilizaron para la generación de los campos de temperatura al integrarlos linealmente.

La técnica de schlieren para la obtención de los resultados experimentales más el procesamiento posterior de éstos con el método de la curva de calibración hacen factible éste método para la obtención de temperatura, los resultados de la temperatura en promedio se compararon con mediciones realizadas con un termopar de tipo K para el aire calentado por la placa metálica y un termopar de tipo R para los gases calientes generados por la flama, observando que ambos casos empatan como se observa en las figuras 4.5 y 4.11.

A los resultados de temperatura correspondientes al aire calentado por la placa metálica se les realizó un análisis de error, este se muestra en la tabla 4.1 donde se muestran los valores de incertidumbre para los casos de la placa metálica calentada a 50°C y 80°C respectivamente, además el error relativo entre las mediciones realizadas con schlieren y termopar muestran que es conveniente la aplicación de este nuevo método de medición como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6.

En las figuras 4.9 y 4.10 se mostraron los campos de temperatura instantáneos y en promedio respectivamente para las cuatro ventilaciones diferentes en que reobtuvieron los resultados experimentales. Las comparaciones de máximos de temperatura medidos en promedio de los resultados de schlieren y termopar concordaron muy bien como se observa en la figura 4.11.

Bibliografía

- [1] Garg S. Cattafesta L. N. III, Quantitative Schlieren Measurements of Coherent Structures in a Cavity Shear Layer, *Exp in Fluids*, 2001; 30: 123-134.
- [2] Atul Srivastava, Atanu Phukan, P.K. Panigrahi, K. Muralidhar, Imaging of a convective field in a rectangular cavity using interferometry, schlieren and shadowgraph, *Optics and Lasers in Engineering* 42 (2004) 469–485

- [3] Shakher C, Daniel Pramila A J and Nirala A K 1994, Temperature profile measurement of axisymmetric gaseous flames using speckle photography, speckle shearing interferometry, and Talbot interferometry *Opt. Eng.* **33** 1983–8

Capítulo 5

El método de POD

5.1 Introducción

El método llamado en inglés Proper Orthogonal Decompositio (POD) fue originalmente propuesto por Lumley [1] para extraer estructuras coherentes en flujos turbulentos. El método proporciona un conjunto de funciones bases organizadas para un conjunto de datos. La propiedad más importante del método de POD, es que, éste optimiza en el sentido de que provee el camino más eficiente de capturar las características dominantes de un proceso infinito-dimensional con solo unas cuantas funciones. Por esta razón el método de POD ha sido usado extensamente para examinar flujos turbulentos, particularmente en el análisis de datos en Simulación Numérica Directa o DNS en sus siglas en inglés [2,3].

Para nuestro caso, a los resultados de campos de temperatura obtenidos con la técnica de schlieren para una flama de gas butano para las cuatro premezclas aire/combustible se estudian usando el método POD.

5.2 Teoría del método de POD

En esta parte se hará una breve introducción y la notación usada del método POD. Las variables \mathbf{x} y T son coordenadas cartesianas (x,y) y mediciones de temperatura respectivamente. Una variable en el tiempo que describe a la temperatura $T(\mathbf{x},t)$ puede ser definida como

$$T(\mathbf{x},t) = \bar{T} + T'(\mathbf{x},t) \quad (5.1)$$

donde \bar{T} es el promedio del conjunto de datos y T' es la componente variable en el tiempo con su valor medio igual a cero.

La descomposición ortogonal propia consiste en encontrar una serie de funciones características, ϕ , (en los siguiente se les llamará eigenfunciones o modos), con su respectivo al valor de energía, λ , o valor característico (o eigenvalor), para un conjunto de datos [1, 4]. Siguiendo el procedimiento propuesto por Berkooz *et. al.* [5], la esencia del método es resolver la siguiente ecuación integral:

$$\iint_{\Omega} R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \phi^n(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \lambda^n \phi^n \quad (5.2)$$

donde Ω es un dominio bidimensional donde la temperatura toma lugar. El superíndice n denota en este caso el número de modo y el kernel, R , es la función promedio de auto-correlación expresada como

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \langle T(\mathbf{x})T(\mathbf{x}') \rangle. \quad (5.3)$$

En la ecuación (5.3), el símbolo $\langle \rangle$ representa al promedio temporal del conjunto de datos.

La solución de la ecuación (5.2) se representa por un conjunto de funciones base ϕ^n , con propiedades especiales usadas para el propósito de derivar las ecuaciones dinámicas vía la proyección de Galerkin [2].

Las eigenfunciones forman un sistema ortogonal, el cual puede ser normalizado de la siguiente manera

$$(\phi^m, \phi^n) = \delta_{mn} \lambda^n \quad (5.4)$$

en donde δ_{mn} es la delta de Kronecker y los paréntesis (\cdot, \cdot) denotan producto escalar. Las funciones base, ϕ^n , son completas en el sentido que T es representada como una expansión de funciones ortogonales

$$T(\mathbf{x}, t) = \sum_{n=1}^L \zeta^n(t) \phi^n(\mathbf{x}) \quad (5.5)$$

donde el coeficiente temporal, ζ^n , es el producto escalar entre T y ϕ^n . Esto significa que, ζ^n es la proyección de T en la dirección representada por ϕ^n . Una importante propiedad de las eigenfunciones es que estas se pueden descomponer como una combinación lineal de los valores instantáneos de T :

$$\phi(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^L A^k T(\mathbf{x}, t_k) \quad (5.6)$$

donde las eigenfunciones, ϕ^n , poseen todas las propiedades intrínsecas de la temperatura T . En esta aplicación, por simplicidad, el método de imágenes instantáneas (o *snapshots* POD en sus siglas en inglés) propuesto por Sirovich [6] ha sido utilizado para calcular los eigenvalores y eigenfunciones. Entonces, R puede ser expresado como

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L T^n(\mathbf{x}) T^n(\mathbf{x}'). \quad (5.7)$$

Aquí, L es el número de imágenes instantáneas del conjunto de datos de campos de temperatura. Si las ecuaciones (5.2), (5.6) y (5.7) se combinan, se obtiene la siguiente expresión

$$CA = \lambda A \quad (5.8)$$

donde C es una matriz con dimensiones $L \times L$ definida como

$$C_{i,j} = (T_i, T_j). \quad (5.9)$$

En la ecuación (5.8), C es una matriz simétrica real, esta tiene eigenvalores reales positivos y los valores de A pueden ser ordenados en orden decreciente de sus correspondientes eigenvalores $\lambda^1 > \lambda^2 > \dots > \lambda^n > 0$.

5.2 Análisis de POD de los campos de temperatura

La ecuación (5.8) es usada para calcular las eigenfunciones y eigenvalores de los 300 campos de temperatura que se obtuvieron con la técnica schlieren. Por consiguiente se tendrán 300 modos POD con sus respectivos eigenvalores. La energía asociada con las diferentes eigenfunciones es contenida en sus correspondientes eigenvalores λ^n . Los valores relativos de λ^n reflejan la cantidad de energía en cada modo POD, el cual se representa como:

$$E^n = \frac{\lambda^n}{\sum_{n=1}^M \lambda^n} \quad (5.10)$$

En la Tabla 5.1 se muestran algunos valores de la energía relativa en porcentaje para los primeros 10 modos POD.

Tabla 5.1 Energía relativa de los modos POD (E^n) %.

Número de Modos	E_{1VA}	E_{2VA}	E_{3VA}	E_{4VA}
1	29.07	40.99	26.64	21.23
2	26.74	12.73	16.30	17.60
3	12.38	11.34	15.10	16.02
4	7.16	6.45	9.12	9.69
5	5.45	6.29	8.71	7.97
6	4.30	4.04	4.13	4.79
7	2.70	2.80	2.99	4.05
8	2.08	2.20	2.39	3.31
9	1.54	1.95	1.88	1.87
10	1.43	1.62	1.43	1.86

Nótese que para algunos de los modos representados en la tabla 5.1 la energía se presenta en pares. Es decir, el valor de energía del modo siguiente es similar; por ejemplo; en el caso 1VA, los eigenvalores se comportan de forma par o casi del mismo valor en (E_{1VA}^1, E_{1VA}^2) , (E_{1VA}^5, E_{1VA}^6) , (E_{1VA}^7, E_{1VA}^8) y $(E_{1VA}^9, E_{1VA}^{10})$; excepto para el par (E_{1VA}^3, E_{1VA}^4) . Para el caso de la premezcla 2VA los pares son (E_{2VA}^2, E_{2VA}^3) , (E_{2VA}^4, E_{2VA}^5) , (E_{2VA}^7, E_{2VA}^8) y $(E_{2VA}^9, E_{2VA}^{10})$, apareciendo separados como impares E_{2VA}^1 y E_{2VA}^6 . Para 3OS los eigenvalores se comportan de igual manera que para el caso anterior, esto es (E_{3VA}^2, E_{3VA}^3) , (E_{3VA}^4, E_{3VA}^5) , (E_{3VA}^7, E_{3VA}^8) y $(E_{3VA}^9, E_{3VA}^{10})$, apareciendo separados E_{3VA}^1 y E_{3VA}^6 . Por último, en el caso de 4VA aparecen como pares los eigenvalores: (E_{4VA}^2, E_{4VA}^3) , (E_{4VA}^4, E_{4VA}^5) , (E_{4VA}^6, E_{4VA}^7) y $(E_{4VA}^9, E_{4VA}^{10})$, apareciendo separados E_{4VA}^1 y E_{4VA}^8 . Este comportamiento también se presenta en la forma de los modos POD. En la figura 5.1 se muestra los primeros 4 modos POD para cada caso que se estudia. Los valores positivos de los contornos están representados por las líneas continuas y los valores negativos de los contornos están representados por líneas discontinuas. Se puede observar por la figura 5.1 que los modos que aparecen como pares de energía muestran una forma similar pero desplazados espacialmente. Este comportamiento es característico de esta clase de flujos; lo modos que aparecen en pares es el mismo modo, la función que tienen estos modos es que cuando se desarrollan temporalmente se van intercambiando de posición [7].

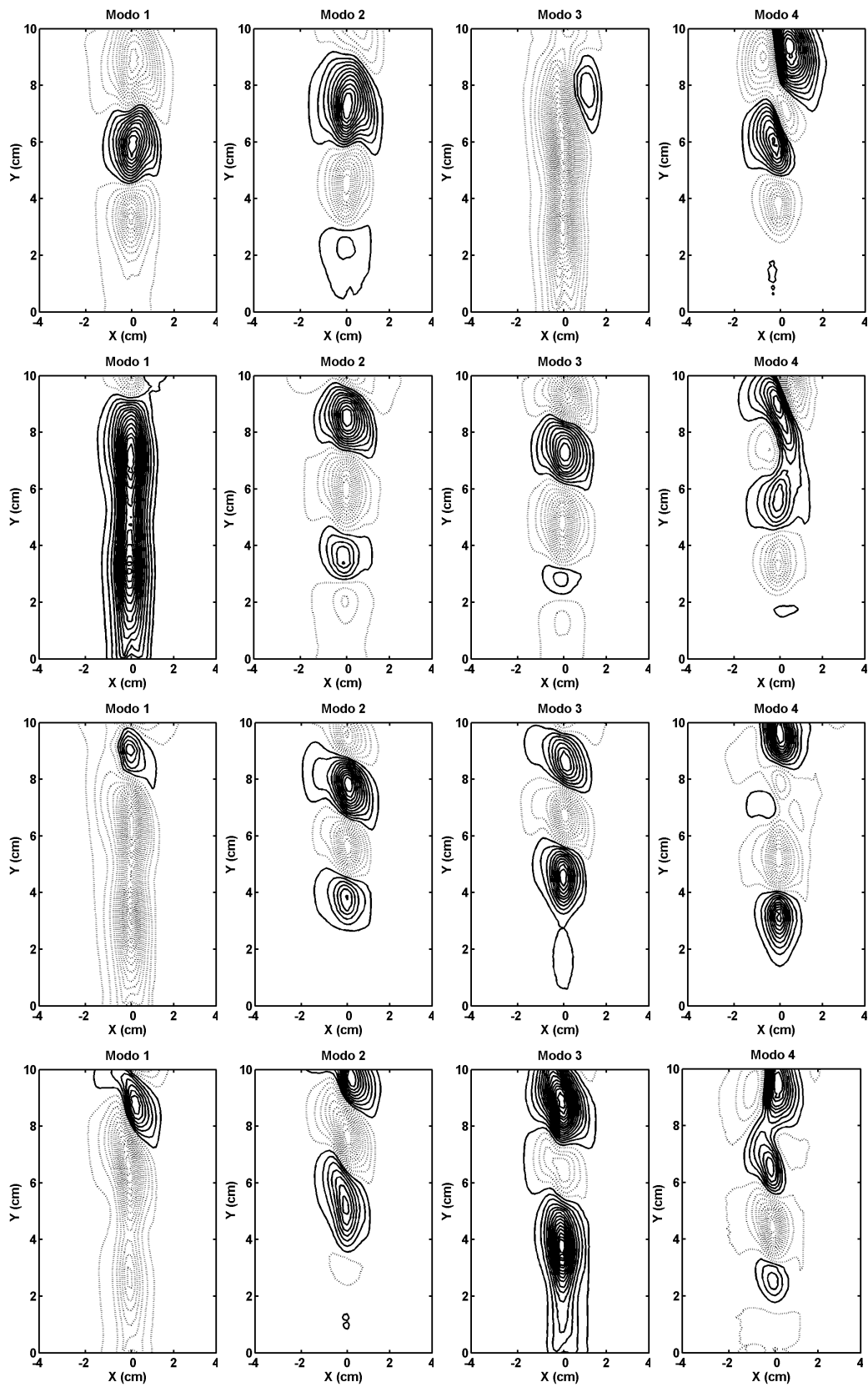


Figura 5.1. Primeros cuatro POD modos correspondientes a los cuatro diferentes conjuntos de datos obtenidos de la flama a 4 diferentes ventilaciones.

También, por la forma de los modos POD podemos deducir algunas diferencias en el tipo de flama, por ejemplo; el tamaño de la forma de los patrones de los modos de la flama y en la forma del primer modo POD para los casos 2VA, 3VA y 4VA. Estas diferencias pueden ser relacionadas con las diferentes velocidades de salida del flujo de fluido proveniente de la boquilla de la tobera para cada caso.

Utilizando la ecuación (5.5) podemos notar que la mayor cantidad de energía se obtiene 92.85%, 90.41, 88.69 y 88.39 del total de la energía contenida en los primeros 10 modos POD para cada premezcla analizada.

Con estos primeros modos se obtienen las principales características del conjunto de datos que describen al flujo de fluido. Nótese que el porcentaje de energía es mayor cuando la premezcla es rica en combustible, es decir, para una ventana de ventilación abierta, esto quiere decir que la energía del sistema está distribuida en los primeros modos y en unos cuantos, en cambio la energía para los 10 primeros disminuye conforme se abren las ventanas o debido a que la energía se distribuye en más modos, aumentando la turbulencia en la flama y en consecuencia se requieren más modos para acercarse a la energía total del sistema, entonces si aumenta la turbulencia quiere decir que hay una mejor premezcla y en consecuencia una mayor eficiencia en la combustión.

En la figura 5.2 se muestran las energías acumuladas normalizadas a uno, para los cuatro casos estudiados, donde la línea continua corresponde para 1VA, la línea cortada es para 2VA, la línea punteada es para 3VA y por último la línea con raya y punto corresponde para 4VA.

En la figura 5.3 se muestran los valores de la distribución de energías para los cuatro diferentes casos estudiados, para los primeros 7 valores de la tabla 5.1 representados en forma de gráfica de contornos, para el caso de 1VA la energía está concentrada en los primeros tres modos, el máximo de la gráfica corresponde al primer modo POD del caso

2VA, para 3VA y 4VA se puede ver que la energía está concentrada mas uniformemente en los siete primeros modos involucrados.

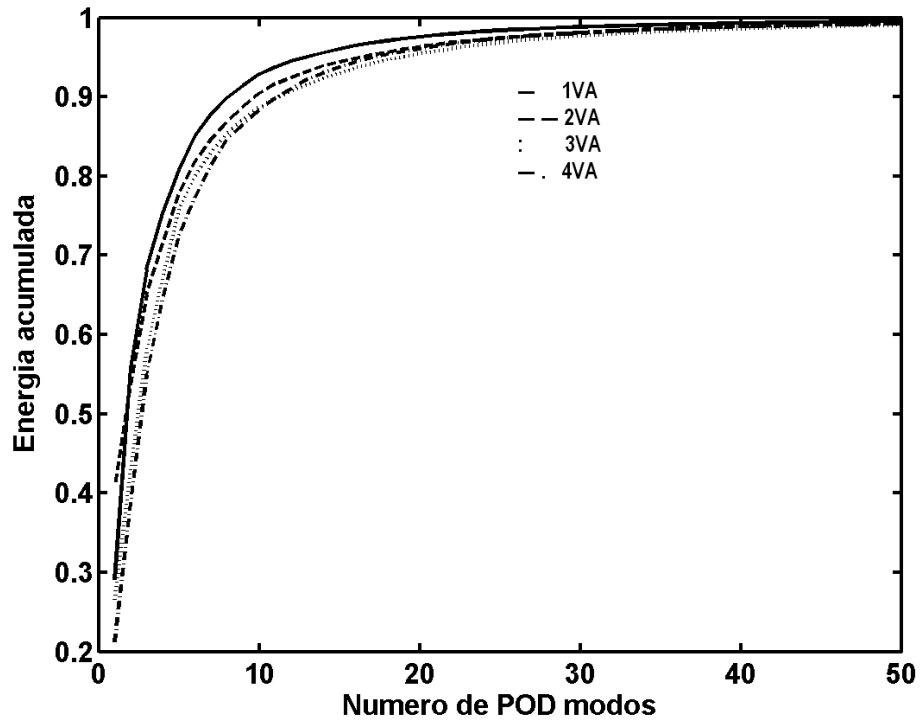


Figura 5.2. Energías relativas acumuladas para los cuatro casos estudiados o premezclas.

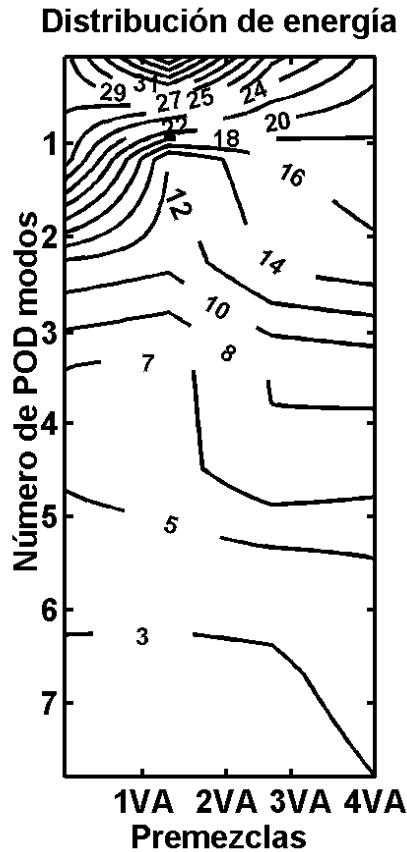


Figura 5.3. Distribución de energías en porcentajes para los cuatro casos estudiados o premezclas.

5.2.1 Constantes de reconstrucción

Las constantes de reconstrucción aparecen en la ecuación (5.5) como una función de peso que varía temporalmente. Esta constante describe la variación temporal del conjunto de datos usados en el método POD. Usualmente se usa para comparar la validez de modelos de bajo orden obtenidos por proyección Galerkin [2] y para reconstruir cualquier instantánea del conjunto de datos.

En nuestro caso, con unas cuantas de estas $\zeta^n(t)$, también llamadas anteriormente coeficientes temporales, podemos reconstruir con poco error, nuestro conjunto de datos correspondientes a los campos instantáneos de temperatura a los que se les aplicó el método de POD, junto con los modos POD o eigenfunciones ϕ^n .

En la figura 5.4 se muestran las primeras cuatro constantes de reconstrucción para los cuatro casos que estamos estudiando. Al igual que la energía y la forma de los modos POD, las constantes de reconstrucción son similares para cuando las energías de los eigenvalores están en pares. Para 1VA, la constante de reconstrucción presenta en los dos primeros modos un comportamiento periódico. Se observa una onda modulada, aunque al analizar el contenido de frecuencias, existen varias frecuencias en el orden de 5 a 20 Hz, con una frecuencia dominante de 16 Hz. Este mismo comportamiento se presenta en los modos 2 y 3 de los 2VA, 3VA y 4VA.

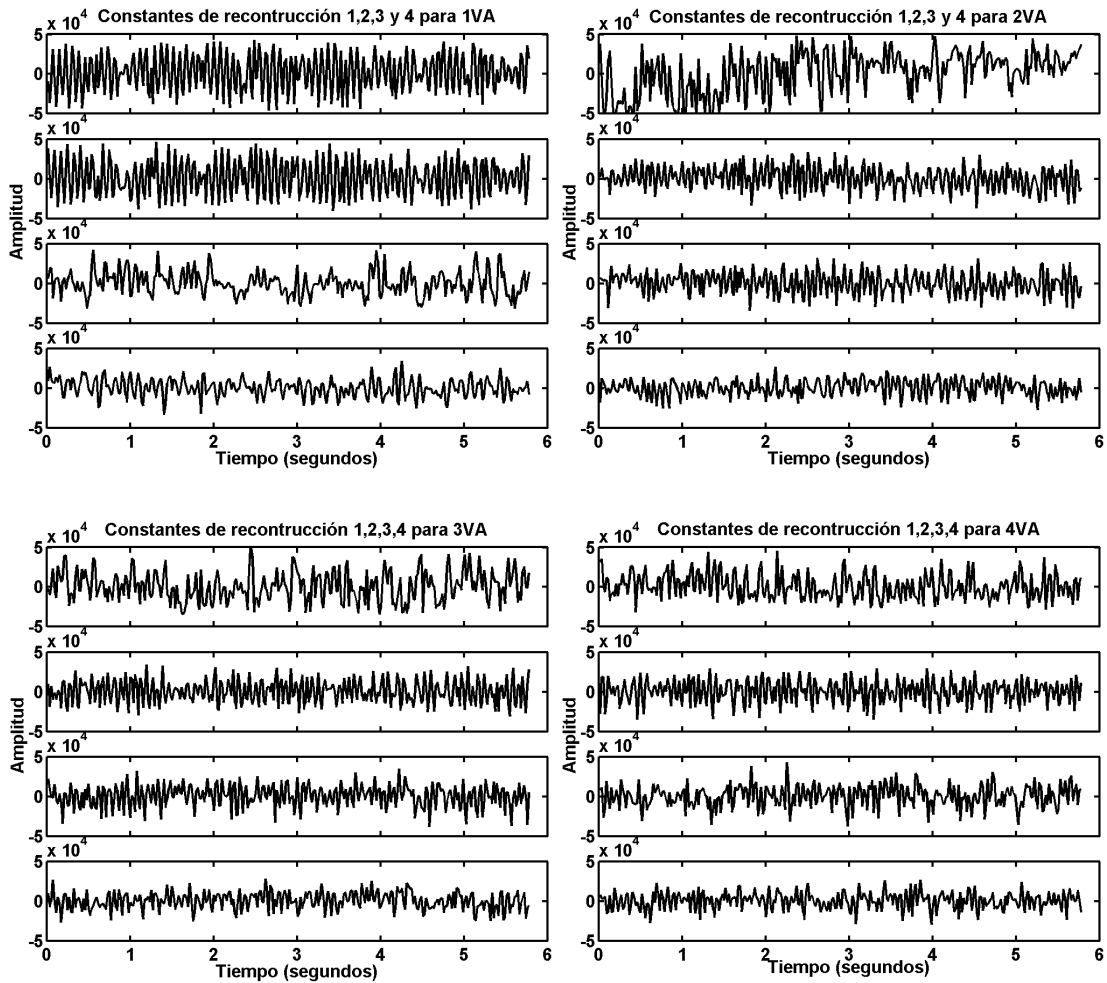


Figura 5.4. Primeras cuatro constantes de reconstrucción. Desde arriba y de izquierda a derecha, para 1VA, 2VA, 3VA y 4VA.

5.3 Conclusiones del capítulo

Se explica brevemente el método de POD (Proper Orthogonal Decomposition en sus siglas en inglés) o Descomposición Ortogonal Propia. Al conjunto de imágenes instantáneas de temperatura obtenidas con la técnica óptica de schlieren se le aplica el método de POD. Se obtienen las eigenfunciones o POD modos, junto con los eigenvalores y las constantes de reconstrucción o coeficientes temporales para cuatro casos de ventilación 1VA, 2VA, 3VA y 4VA, haciendo el análisis de cada uno de ellos.

El análisis hecho para las eigenfunciones, eigenvalores y constantes de reconstrucción concuerdan muy bien con el conjunto de imágenes instantáneas de temperatura.

Referencias

- [1] Lumley L., The structures of inhomogeneous turbulent flows, *Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagations*. Edited by A. M. Yaglom and V. I. Tatarsky (Moskow: Nauka), 1967.
- [2] Rempfer D. 1996, Investigations of boundary-layer transition via galerkin projections on empirical eigenfunctions, *Phys. Fluids*, **8**, 175
- [3] Rowley C. W. Colonius T. and Murray R. M. 2000, POD based models of self-sustained oscillations in the flow past and open cavity, *AIAA paper 2000-1969* (June).
- [4] Sirovich L., Turbulent and the dynamics of coherent structures *Q. Appl. Math.*, 1987, **45**, pp. 561.
- [5] Bercooz G, Holmes P. and Lumley J. L., The orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 1993, **25**, pp. 539.
- [6] Sirovich L., Turbulent and the dynamics of coherent structures *Q. Appl. Math.*, 1987, **45**, pp. 561.
- [7] Rajae M, Karlsson S K F and Sirovich L 1994 Low-dimensional description of free-shear-flow coherent structures and their dynamical behaviour, *J. Fluid Mech.* **258** 1

Capítulo 6 Conclusiones generales y trabajo a futuro

6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación partimos de las técnicas ópticas de visualización de flujos, vimos que estas técnicas eran muy adecuadas para la medición cualitativa de ciertas variables físicas como la velocidad, densidad y presión en ciertos flujos de fluido. Lo interesante de estas técnicas ópticas es que también pueden ser utilizadas para la cuantificación de estas variables físicas, haciendo los arreglos pertinentes. Para este trabajo se utilizó la técnica óptica de campo completo de schlieren aplicada a flujos de fluido transparentes, del trabajo ya desarrollado como el método de Toepler. Se partió para proponer y desarrollar el método de *la curva de calibración*, el cual consiste básicamente en la medición de los ángulos de desviación causados por las variaciones del índice de refracción de estos flujos de fluido que se utilizan como objeto de prueba en el arreglo experimental de schlieren. Para la realización de tales mediciones, el arreglo experimental de schlieren en configuración-Z nos arroja como resultados gradientes en intensidad del flujo de prueba.

Para hacer tales mediciones de resultados experimentales se obtuvo una curva de calibración con imágenes en intensidad capturadas sin flujo de prueba, la curva obtenida describe las variaciones de intensidad en función del desplazamientos del borde de una navaja, es decir $I_{(n,m)}^{\xi} - I_{(n,m)}^0$ vs Δx . Se utilizaron 20 imágenes capturadas a diferentes posiciones de la navaja con movimiento en dirección- x , empezando de la posición de no corte máxima intensidad a corte total mínima intensidad. Al momento en que se realiza el experimento se escoge la imagen que nos genere la máxima sensibilidad del sistema con la ayuda de la curva de calibración. Una vez que se escogió la imagen en esa posición

correspondiente de la navaja se capturaron los resultados experimentales con flujo de prueba y obtuvieron los gradientes en intensidad.

Ahora bien, como los valores de intensidad en los campos de gradientes toman valores de los puntos y además entre los puntos de la curva de calibración, se hizo una interpolación de veinte puntos a doscientos puntos con la función (PCHIP) de Matlab y utilizando las ecuaciones (2.12, 2.13 y 2.14) en conjunto con el procedimiento descrito en la ecuación (2.15) $\min |I_{(n,m)}^{\delta x} - I_{(n,m)}^{\Delta x}|$ que nos sirve para encontrar el valor de la intensidad píxel por píxel de los campos de intensidad, transformándolos a campos de desplazamiento. Una vez que se obtuvieron los gradientes en función de los campos de desplazamiento, de la aproximación para ángulos pequeños de la relación $\varepsilon = \delta x/l$, se obtienen los gradientes en función de los ángulos de desviación. Luego con la relación de Gladstone-Dale se obtienen los campos de gradientes de densidad e integrando a esta se obtiene la densidad. Finalmente mediante la ecuación(2.8) los campos de temperatura, son calculados.

Este método de la curva de calibración se aplicó a dos flujos diferentes. Primero fue al flujo de aire ascendente calentado por una placa metálica: un proceso a temperatura $T = 50^{\circ}\text{C}$ y otro proceso a $T = 80^{\circ}\text{C}$. Segundo, fue a los gases calientes despedidos por la combustión en una tobera compuesta por dos cilindros concéntricos la cual consumía la premezcla gas aire/gas butano, produciendo una flama a una presión constante del gas y a cuatro diferentes ventilaciones de flujo de aire.

Los resultados de temperatura obtenidos con la técnica óptica de schlieren en conjunto con el método de la curva de calibración se comparan con mediciones hechas con un termopar de tipo K para el aire calentado con la placa metálica y de tipo R para los gases calientes despedidos por la combustión, empatando bien las comparaciones. Las comparaciones de temperatura obtenidas tanto para el aire calentado por la placa como para los gases de la combustión, muestran que la técnica óptica de schlieren en conjunto con el método de la curva de calibración es un método sencillo, barato y robusto para su aplicación en ambientes industriales y fuera de laboratorio, es decir, no es necesario acondicionar el lugar en el cual se llevara a cabo la prueba.

A los resultados de temperatura de aire calentado por la placa metálica se les realizó un análisis de error mostrados en la tabla 4.1. Se obtuvieron valores de incertidumbres mínimas y máximas de 0.3°C y 8°C respectivamente, para las mediciones de temperatura de $T = 50^{\circ}\text{C}$ y mínimas y máximas de 0.3°C y 1.5°C respectivamente, para las mediciones de temperatura de $T = 80^{\circ}\text{C}$, respectivamente, las incertidumbres cerca de la placa son parecidas mientras si se aleja de la placa difieren ya sea debido a las fluctuaciones del flujo. También, el error relativo estimado entre las temperaturas de schlieren y las mediciones hechas con termopar se muestra en la figura 4.6. Se observan desviaciones entre las mediciones principalmente en los puntos cercanos a la superficie de la placa metálica debidas a la forma de medición ya que las primeras mediciones cerca de la placa se hicieron al límite de la resolución de posicionamiento del sistema o sea 1mm de resolución. Cabe destacar que otros autores han realizado trabajos similares a este, como el realizado por Atul[2], aplicando la técnica de schlieren conjuntamente con Interferometría con Mach-Zehnder y Shadowgraph, a una cavidad rectangular con agua como flujo de trabajo y calentada en el fondo de ésta, resultando en la comparación mejor la técnica de schlieren debido a la refracción de la luz láser utilizada en el interferómetro para este propósito, y los resultados de Shadowgraph también son buenos cuando el flujo de fluido se torna turbulento.

A los resultados de temperatura de la flama correspondientes a un ensamble temporal de 300 imágenes instantáneas de campos de temperatura se les aplicó el método POD, obteniendo eigenfunciones o modos y eigenvalores del sistema, para las cuatro ventilaciones distintas de premezcla 1VA, 2VA, 3VA, y 4VA. Se les realizó el análisis a los resultados obtenidos e indican que la eficiencia de combustión depende de la cantidad de flujo o ventilación de la premezcla de aire/combustible ya que a mayor flujo de aire se incrementa la velocidad de este creando mayor turbulencia que cuando es menor, y si existe mayor turbulencia disminuye el tiempo de premezclado generando una mejor combustión. Esto se puede observar en el tamaño de la zona de reacción de la flama en comparación con el número de ventanas abiertas y con las energías contenidas en los diez primeros modos para los cuatro casos diferentes (1VA,92.85%), (2VA,90.41%),

(3VA,88.69) y (4VA,88.39). Los modos y coeficientes temporales muestran el mismo comportamiento. A partir de los valores de energía que la energía contenida en 1VA(más laminar) es mayor que en los otros casos resultando con menos energía el caso de 4VA(menos laminar empezando a ser turbulenta). En el fenómeno de combustión la turbulencia es sinónimo de eficiencia y menos productos de contaminación por lo cual 4VA es la más eficiente.

6.2 Trabajo a futuro

El trabajo a futuro está en el desarrollo de dispositivos ópticos que funcionen con la técnica de schlieren, que sean robustos y reales, que se puedan implementar fuera del laboratorio ya sea en la industria o de investigación en el campo real, una segunda aplicación sería como aparatos demostrativos que se puedan mostrar en aulas de clase sin la necesidad de una mesa holográfica. También se tratará de desarrollar más la técnica, buscar nuevas aplicaciones como en la biología, medicina y estudiar nuevos fenómenos como se muestra en la figura 6.1.

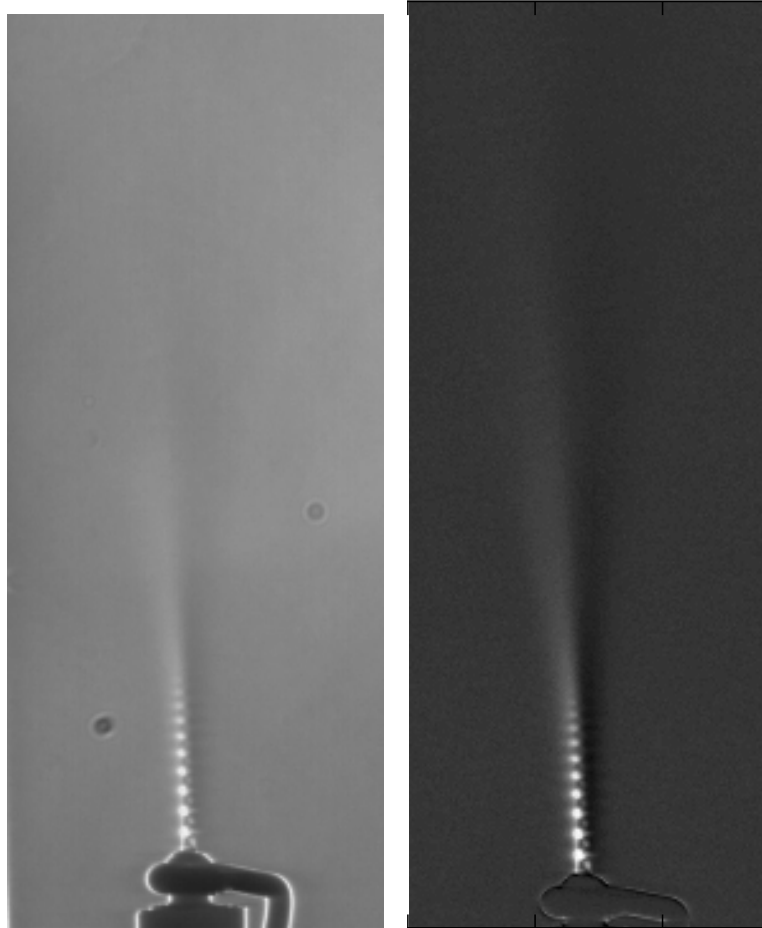


Figura 6.1 Chorro de aire a alta velocidad, a) visualizado con la técnica de schlieren y b) Imagen con flujo menos imagen de referencia.