

Práctica 6

Técnica Schlieren

Luis Arturo Ureña Casarrubias
José Antonio Aguilar Ibarra

Laboratorio de Óptica

9 de noviembre de 2024

Resumen

En la vida diaria es posible observar la refracción de la luz debido a diferencias en la densidad del aire provocadas por gradientes de temperatura en, por ejemplo, los techos de los automóviles en un día caluroso. Las técnicas schlieren y de sombrografía permiten observar este mismo fenómeno para situaciones más generales que pueden incluso no involucrar principalmente a la temperatura, desde el chorro de aire de un estornudo hasta las ondas de choque de un avión supersónico. En este reporte usamos esta técnica para observar las corrientes de convección de aire que provocan objetos más calientes que el aire circundante como un encendedor de cocina o el aliento, por ejemplo.

1. Introducción

Con la técnica Schlieren es posible observar cómo varía el índice de refracción de un medio en tiempo real y de forma no invasiva, es decir, sin alterar el medio con los instrumentos de medición. Para gases los cambios en el índice de refracción puede relacionarse con su densidad ρ usando la ecuación de Gladstone-Dale

$$n = 1 + K\rho, \quad (1.1)$$

donde K es una constante (Schmidt, 2015). A su vez, como la densidad de un gas se relaciona con su temperatura, esta técnica permite hacer un “mapa de temperaturas” de fluidos (Ángeles Martínez et al., s.f.).

La técnica fue desarrollada por primera vez en el siglo XVII por el físico Robert Hooke, pero se volvió una herramienta estándar en el laboratorio hasta mediados del siglo XIX con el trabajo de August Toepler (Settles & Hargather, 2017). Al inicio su uso reducía a puramente lo cualitativo, pero con la incorporación de técnicas de procesamiento digital de

imágenes se volvió posible obtener resultados numéricos en tiempo real y compararlos con simulaciones numéricas como las realizadas en (Ángeles Martínez et al., s.f.).

Existen distintos arreglos ópticos para generar las imágenes schlieren, (Settles & Hargather, 2017) menciona cinco, cuatro que emplean lentes y/o espejos para enfocar luz blanca incoherente sobre una navaja y así separar los rayos refractados y uno que emplea un fondo patrón para detectar las desviaciones. La técnica más reciente, el schlieren orientado al fondo (*BOS* por sus siglas en inglés), emplea procesamiento óptico digital reciente y no requiere por lo tanto de instrumentos ópticos caros y preciosos, además de que permite obtener imágenes schlieren para el vuelo de helicópteros y aviones supersónicos, como se muestra en la figura 4, donde el fondo patrón fue el desierto de Mojave debajo de la nave, que fue eliminado digitalmente en el post-procesamiento.

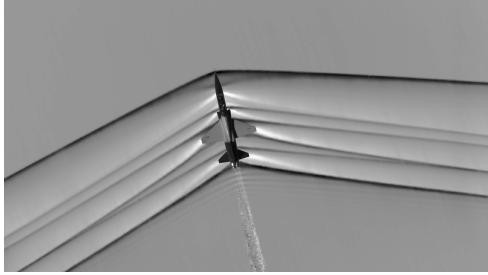


Figura 1: La técnica BOS revela las ondas de choque provocadas por un jet T-38 Talon en vuelo supersónico y el flujo turbulento del escape.

2. Marco Teórico

Un rayo de luz que atraviesa una interfaz de cambio en el índice de refracción en ángulo con la normal experimentará una refracción; explícitamente, si el rayo se propaga en la dirección z , entonces su trayectoria satisface

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x},$$

donde x es una dirección perpendicular a la dirección z (Schmidt, 2015). Entonces la desviación angular del rayo debido a la refracción es

$$\tan \epsilon_x \simeq \epsilon_x = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz,$$

donde la integral se realiza en la región de índice de refracción variable (Ángeles Martínez et al., s.f.). Esta última expresión nos indica que la desviación de la luz al atravesar la zona refractiva depende no solo de su índice de refracción sino también de sus gradientes en las direcciones perpendiculares a su propagación y a las dimensiones de dicha zona. Son estas desviaciones las que se manifiestan con las técnicas de fotografía schlieren y de sombrografía.

Hay una diferencia entre estas dos técnicas. La sombrografía es sensible a cambios en la segunda derivada de la densidad del medio, lo que la vuelve ideal para visualizar capas fronterizas y flujo turbulento, mientras que la fotografía schlieren solo permite detectar cambios en la primera derivada de la densidad. Esta diferencia se debe a que al usar schlieren se separan los rayos refractados usando una navaja, como se muestra en la figura 2.

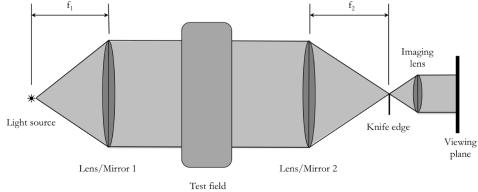


Figura 2: Después de que la luz es refractada en la zona *test field* son enfocados por una lente sobre una navaja ubicada en la distancia focal f_2 .

Si un rayo es refractado hacia la navaja, la porción de la imagen de donde provino ese rayo se oscurecerá, y si es alejado de la navaja por la refracción, la porción se iluminará; así la técnica es sensible a gradientes de la densidad perpendiculares a la navaja (Schmidt, 2015).

Volviendo a la ecuación (1.1), para los gases la constante K suele rondar entre el 0.1×10^{-3} y $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ y en condiciones estándares de presión y temperatura la densidad del aire es de 1.2 kg/m^3 , por lo que el índice de refracción para el aire varía únicamente en la tercera o cuarta cifra decimal.

3. Metodología Experimental

El arreglo óptico empleado se muestra en la figura 3. En él, una fuente de luz proyecta un haz sobre un espejo parabólico a una distancia $d_1 = 190 \text{ cm}$ que enfoca al haz reflejado sobre un punto a una distancia $d_2 = 175 \text{ cm}$, en la distancia focal del espejo, donde se encuentra una navaja perpendicularmente a la dirección de propagación. Esta navaja, como se discutió en la sección anterior, bloquea a algunos de los rayos refractados en la zona de pruebas y genera la fotografía schlieren.

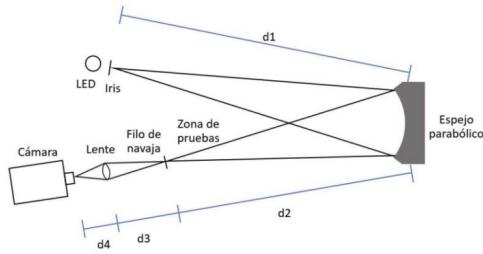


Figura 3: Imagen tomada de (Ángeles Martínez et al., s.f.).

Los rayos que no son bloqueados por la navaja divergen e inciden sobre una lente a una distancia $d_3 = 6\text{ cm}$, que enfoca el haz en una cámara a $d_4 = 4\text{ cm}$ de la navaja.

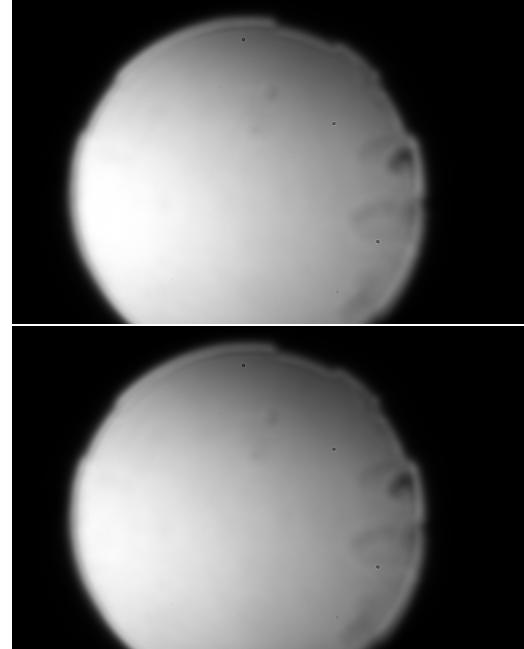


Figura 4: La primera imagen se tomó cuando uno de los integrantes exhalaba en la zona de pruebas y la segunda se sostenía un llavero calentado con el mechero de la siguiente figura.

4. Resultados

En el laboratorio de óptica obtuvimos 16 imágenes schlieren donde en tiempo real pudimos detectar las corrientes de convección de aire que provocaron los gradientes de temperatura generadas por un encendedor de cocina, manos frotadas, aliento, metal calentado y un teléfono.

Sin embargo, más tarde se encontró que en las imágenes guardadas estas corrientes no son visibles. En las siguientes figuras mostramos algunas de las imágenes guardadas.

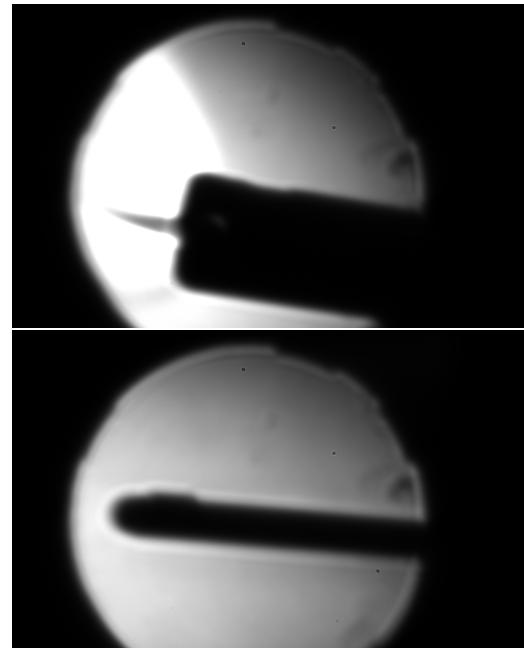


Figura 5: En la primera imagen se muestra la proyección de un mechero encendido y en la segunda el perfil de un iPhone 8.

5. Conclusiones

La técnica Schlieren es eficaz para visualizar en tiempo real y de manera cualitativa los gradientes de temperatura en el aire alrededor de objetos calientes. Las observaciones realiza-

das en el laboratorio de óptica sugieren que la técnica puede ser ajustada para estudios más detallados, al optimizar los parámetros como la posición de la navaja y el control del contraste, mejorando la capacidad de detectar gradientes menores de temperatura.

Referencias

- Ángeles Martínez, Morales Cruzado, Sarmiento Gómez & Pérez Gutiérrez. (s.f.). Visualización y modelado de temperatura del aire alrededor de una placa conductora de calor. Consultado el 6 de noviembre de 2024, desde https://drive.google.com/file/d/1_gPCaRmzRnf7DHvg5kf2pLZXEsSaKLki/view
- Schmidt, B. S. (2015). *Schlieren Visualization*.
- Settles, G. S., & Hargather, M. J. (2017). A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 042001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5748>