

Visualización de un flujo de convección mediante un arreglo tipo Schlieren

Viewing a convection flow using the Schlieren technique

MORALES-LARRAGA, Alan†, GÓMEZ-VIEYRA, Armando*, REAL-RAMÍREZ, César Augusto y MIRANDA-TELLO, José Raúl

Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

ID 1^{er} Autor: Alan, Morales-Larraga / ORC ID: 0000-0002-3394-2905, CVU CONACYT ID: 839629

ID 1^{er} Coautor: Armando, Gómez-Vieyra / ORC ID: 0000-0003-0290-1518, CVU CONACYT ID: 170266

ID 2^{do} Coautor: César Augusto, Real-Ramírez / ORC ID: 0000-0003-0376-3575, CVU CONACYT ID: 43153

ID 3^{er} Coautor: José Raúl, Miranda-Tello / ORC ID: 0000-0002-5888-5732, CVU CONACYT ID: 101411

DOI: 10.35429/JOIE.2019.9.3.12.18

Recibido 19 de Febrero, 2019; Aceptado 31 de Marzo, 2019

Resumen

En este trabajo se utiliza un sistema Schlieren con el propósito de visualizar un flujo de convección, causado por la superficie de enfriamiento de una celda Peltier. Los elementos del montaje experimental son una fuente de luz blanca LED (450nm-650nm) que consume 300nW de potencia eléctrica medida, un relevador reflectivo óptico tipo Z, una navaja, un sistema de adquisición de imágenes basado en una cámara Edmund EO02018C con sensor CMOS-RGB y componentes optomecánicos. Se diseñó un programa para el análisis del vídeo de referencia y del vídeo del flujo de convección. Como primer paso se realizó la integración numérica y el desenvolvimiento de fase para obtener los gradientes de temperatura del fenómeno bajo estudio y su evolución temporal. Después, se analizó cada capa de detección, procesando los datos que entregan mayor información de este fenómeno. Es importante notar que la capa roja de la cámara presenta un mejor contraste en la visualización del fenómeno, sin embargo, se ve más afectada por la difracción de luz indeseable. Por consiguiente, la capa verde de la cámara, resulta óptima para analizar el fenómeno, con este estudio se corrobora que la técnica de Schlieren resulta idónea para observar fenómenos donde el gradiente de temperatura es pequeño y donde se tienen flujos de convección.

Flujo de convección, difracción, visualización

Abstract

In this work a Schlieren system is proposed. It is used to visualizing a convection flow, caused by the cooling surface a Peltier cell. The experimental assembly elements are a white LED light source (450 nm – 650 nm) that consumes 300 nW of measured electrical power, a Z-type optical reflective relay, a knife, an image acquisition system based on an Edmund EO02018C camera with CMOS RGB sensor and optomechanical components. A program for the analysis of the reference and the convection flow video was designed. As a first step, numerical integration and the phase unwrapping were carried out to obtain the temperature gradients of the phenomenon under study and its temporal evolution. Then, each detection layer was analyzed, processing the data that provide more information on this phenomenon. It is important to note that the red layer of the camera has a better contrast in the visualization of the phenomenon, however, it is more affected by undesirable light diffraction. Therefore, the green layer of the camera is optimal for analyzing the phenomenon, this study confirms that that the Schlieren technique is ideal for observing phenomena where the temperature gradient is small and there are convection flows.

Convection flow, diffraction, visualization

Citación: MORALES-LARRAGA, Alan, GÓMEZ-VIEYRA, Armando, REAL-RAMÍREZ, César Augusto y MIRANDA-TELLO, José Raúl. Visualización de un flujo de convección mediante un arreglo tipo Schlieren. Revista de Ingeniería Innovativa. 2019. 3-9: 12-18

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: agvtex@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

Introducción

Un serio problema en la actualidad es el calentamiento excesivo de dispositivos semiconductores y el cómo lograr un efectivo sistema de enfriamiento para asegurar su correcto funcionamiento. Para el análisis, evaluación y visualización de los flujos de calor en los dispositivos, es posible usar sensores puntuales, sin embargo, al emplear técnicas ópticas se tiene la ventaja de poder visualizar en forma continua y en un campo completo estos flujos alrededor de los dispositivos.

Entre estas técnicas, destaca la técnica de Schlieren, que es ampliamente utilizada en el campo de la investigación y la ingeniería, aplicándose principalmente en la visualización de campos de velocidad de flujo de fluidos (Martínez-González, Moreno-Hernández, & Guerrero-Viramontes, 2013), medición de la temperatura, en los procesos de combustión de flamas (Aguilar Fernández, Gómez Vieyra, Miranda Tello, & Álvarez Herrera, 2014; Alvarez-Herrera, Moreno-Hernández, & Barrientos-García, 2008; Gómez-Vieyra, Alvarez-Herrera, Vergara-Vázquez, & Pérez-Sanchez, 2017), la compresión del aire alrededor de los proyectiles (Settles & Hargather, 2017) en aeronáutica, entre otras muchas aplicaciones.

Del mismo modo, ha sido demostrado su potencial en la medición y evaluación de flujos de convección (Alvarez-Herrera, Moreno-Hernández, Barrientos-García, & Guerrero-Viramontes, 2009; Alvarez-Herrera, Murillo-Ramírez, Pérez-Reyes, & Moreno-Hernández, 2015). La técnica de Schlieren se basa en los cambios del índice de refracción de medios translúcidos (como el aire) sensibles a la variable a medir, como lo es, en este caso, el de la temperatura.

Estas alteraciones en el índice de refracción del medio debido al cambio de temperatura, provocan una alteración local en la dirección de los rayos de luz (Figura 1), lo que conlleva a poder visualizar el fenómeno de convección e indirectamente a medir cambios de la temperatura. La técnica fue formalmente propuesta por Robert Hooke en el siglo XVII y reinventada por Foucault y Toepler en el siglo XIX (G. S. Settles, 2001).

Esta técnica se sustenta en la ley de Gladstone - Dale:

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

Esta ecuación relaciona la densidad ρ del fluido y el índice de refracción n del medio, donde k es la constante del fluido (Panigrahi & Krishnamurthy, 2012). En este trabajo se emplea un arreglo de Schlieren para visualizar en campo completo, de manera temporal, el comportamiento del flujo de convección de aire provocado por la superficie de enfriamiento de una celda tipo Peltier. Todo esto con el objetivo estudiar la naturaleza del flujo de convección en los procesos de enfriamiento de dispositivos semiconductores.

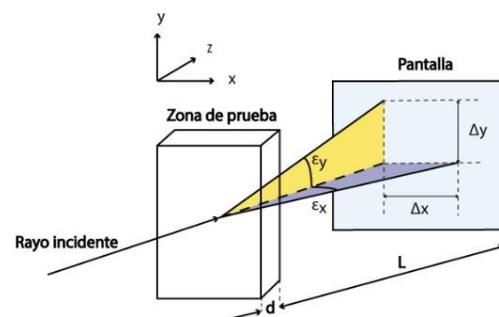


Figura 1 Haz de luz que pasa a través de un medio no homogéneo

Fuente: *Elaboración Propia*

Arreglo experimental

La Figura 2 muestra el esquema del arreglo Schlieren armado para este trabajo de investigación. El cual está formado por un sistema de iluminación: compuesto por un LED D blanco de 10 mm con un espectro de emisión entre 450nm y 650nm (Figura 3), una lente biconvexa L_1 de distancia focal $f_1 = 19$ mm con diámetro de 1 in y un diafragma de apertura A utilizado para eliminar componentes indeseables del haz de luz; un relevador óptico que consta de dos espejos esféricos E_1 y E_2 en una configuración tipo Z, los espejos tienen un diámetro de 75 mm y una distancia focal $f_{E_1 y E_2} = 500$ mm con película reflejante de aluminio, entre los espejos se encuentra el área de la muestra, en este caso la celda Peltier. En el foco del segundo espejo, se coloca de manera vertical una navaja N , la cual realiza el procesamiento óptico para obtener el gradiente espacial en x , el cual es explicado por la Teoría de la Óptica de Fourier.

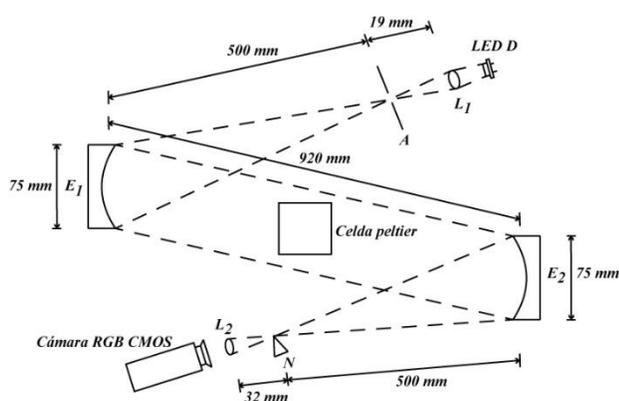


Figura 2 Diagrama del arreglo experimental utilizado
Fuente: Elaboración Propia

El subsistema de adquisición de imágenes está conformado por una lente L_2 de distancia focal $f_2 = 50$ mm, la cual se encarga de enfocar la imagen proveniente de la navaja en la cámara RGB CMOS marca Edmund EO2018C, que captura fotogramas a 1600×1200 píxeles en formato AVI y tiene un sensor de $1/1.8''$. La cámara se comunica a una computadora personal mediante un puerto USB 3.0.

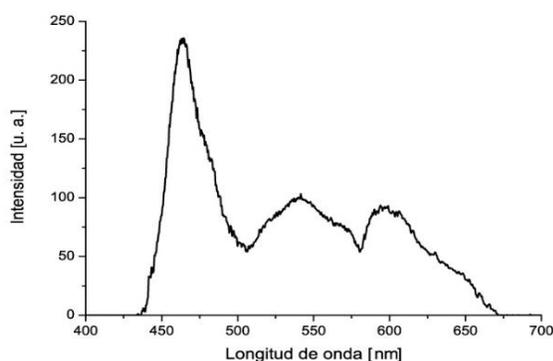


Figura 3 Espectro de emisión del LED D blanco de 10 mm medido a través de un espectrómetro Spectra – 1
Fuente: Elaboración Propia

El proceso de alineación para encontrar el ajuste adecuado del sistema es muy importante, se debe hallar la posición óptima de la fuente de luz, de la navaja y del subsistema de adquisición de imágenes, para obtener la mejor visualización del fenómeno de convección en los videos.

Procesamiento de datos

Se procesaron los videos con un algoritmo que realiza el desenvolvimiento de fase de los mapas de gradiente de temperatura.

El filo de la navaja en el arreglo experimental se colocó verticalmente, esto provoca que solo se afecten los rayos de luz perpendiculares a él, además de que los gradientes de densidad que se desplazan hacia la derecha se visualicen como áreas claras, mientras que los gradientes que se desplazan hacia la izquierda se visualicen como áreas oscuras. Esta condición nos va a dar la dirección de integración en torno del eje x .

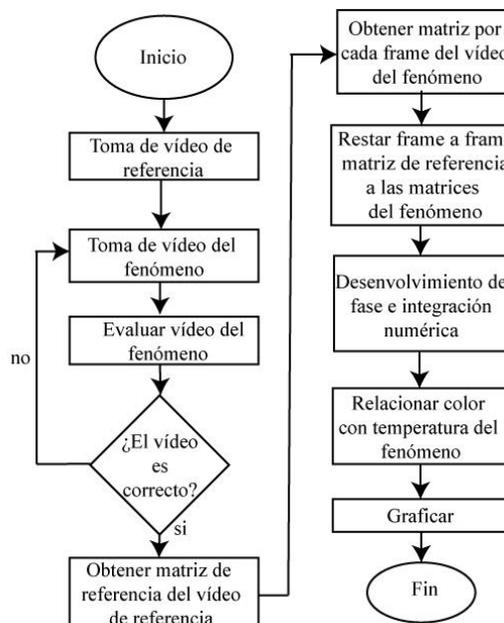


Figura 4 Diagrama de flujo del procesamiento de datos
Fuente: Elaboración Propia

La programación del método de integración fue desarrollada por el Dr. Cornelio Álvarez Herrera en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y la Universidad Autónoma de Chihuahua (Cisneros Martínez, 2015). En primera instancia, el programa realiza el desenvolvimiento de fase mediante una integración directa de los datos capturados experimentalmente utilizando la sumatoria de los diferenciales en la dirección del eje x , después se resta la matriz creada del video del fenómeno a la matriz de referencia de cada uno de los frames deseados y se calcula una matriz promedio, por último, se realiza una representación gráfica del mapa de colores de la matriz promedio. Para este trabajo, el programa fue modificado para normalizar el mapa de colores con la temperatura ambiente, para mostrar la escala de temperatura y realizar el recorte adecuado del área de interés del fenómeno de convección y obtener la representación gráfica de cada uno de los frames del fenómeno y finalmente observar su evolución temporal.

Para relacionar el mapa de colores con la temperatura en las imágenes obtenidas, se obtuvo la curva de la calibración del sistema. Para obtener esta, se dejó trabajar el sistema unos minutos para que se estabilizara. Se tomaron mediciones puntuales a través del espacio con un termopar, primero de manera horizontal a través de la superficie de la celda Peltier y después de manera vertical sobre el centro de la celda Peltier. Se tuvo en cuenta la posición relativa en el vídeo y en el espacio de la muestra.

Los datos obtenidos se ajustaron a una ecuación lineal que relaciona el valor del color de cada pixel con la temperatura correspondiente. Esta ecuación de ajuste fue introducida al software computacional.

$$T = 16.49x + 8.19 \quad (2)$$

Donde T representa la temperatura en grados Celsius asociada al pixel y x representa el valor del color en la posición del pixel. También se realizó la correspondiente conversión de pixeles a centímetros para ajustar los ejes cartesianos de las imágenes obtenidas. Al adquirir los datos experimentales la temperatura ambiente fue de 21.4 °C, medidos por un termómetro fijo.

Análisis de resultados

Se obtuvieron diversos vídeos del fenómeno de difracción de luz, en los cuales es posible observar el flujo de convección de aire alrededor de la celda Peltier. En la Figura 5 se muestran tres capturas continuas del fenómeno en estudio. Al examinar esta imagen es posible apreciar que el flujo de convección no es muy visible, ya que al tratarse de un fenómeno que evoluciona en el tiempo, es preciso observar de manera completa el vídeo que captura. Las imágenes presentan poca nitidez y también es posible observar que en el flujo de convección existe un gradiente de temperatura muy pequeño o que este gradiente de temperatura se concentra en un área de la imagen muy pequeña.

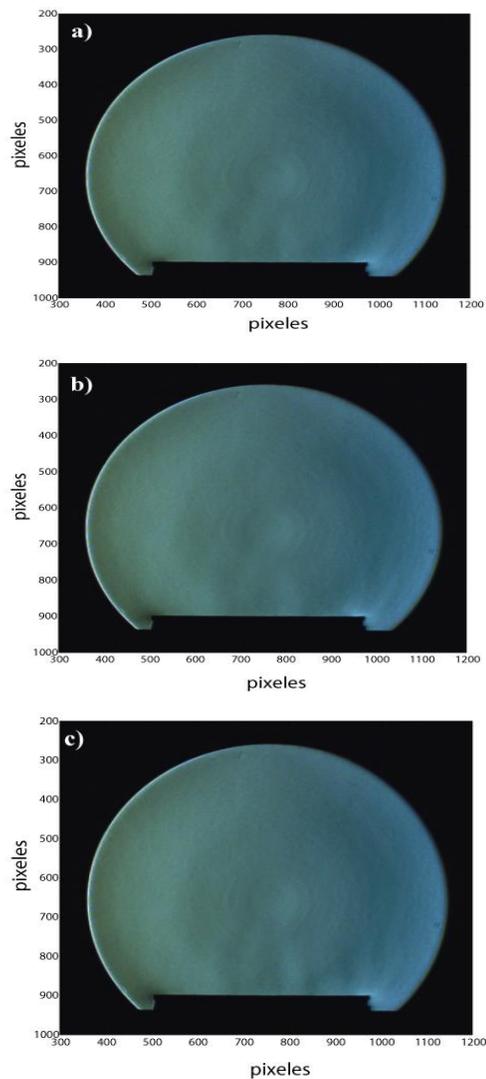


Figura 5 Imágenes obtenidas del vídeo del fenómeno de refracción de luz debida a cambios locales del índice de refracción por el cambio dinámico de temperatura a los tiempos a) 21.0 s, b) 21.7 s y c) 22.4 s

Fuente: Elaboración Propia

Los datos obtenidos al procesar los vídeos del fenómeno muestran que de las tres capas de captura del fenómeno (RGB), la capa verde es la que presenta menor sensibilidad a la difracción de la luz indeseable y, por lo tanto, contiene mayor información del fenómeno (Figura 6). Por tal razón, se trabajó sobre la capa verde para realizar la integración numérica de los vídeos.

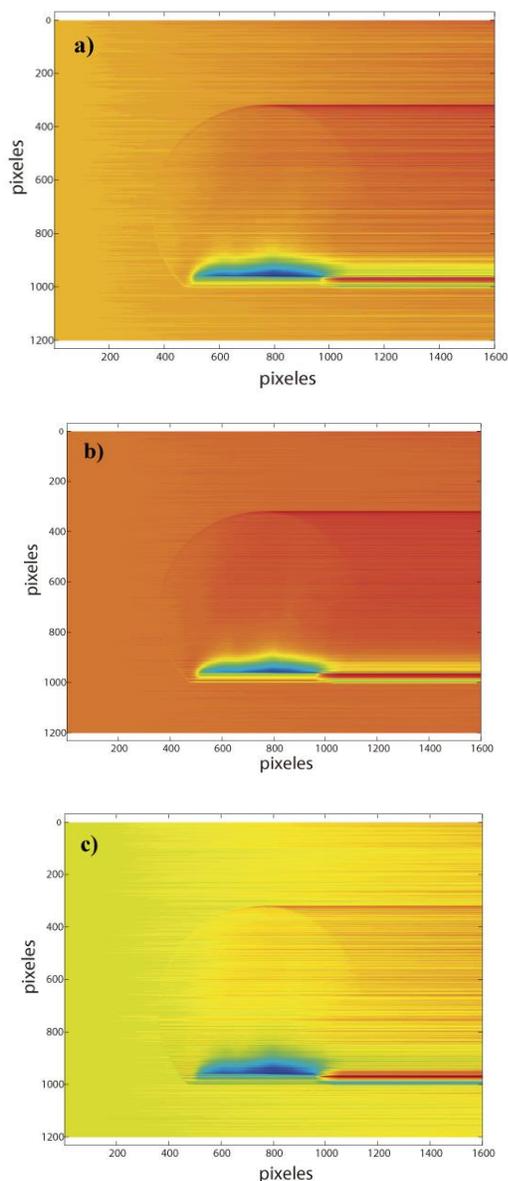


Figura 6 Imagen de las capas a) roja, b) verde y c) azul de los datos experimentales procesados

Fuente: *Elaboración Propia*

Fuente: *Elaboración Propia*

En la Figura 7 se muestra la imagen ya recortada y procesada con su respectiva barra de temperatura. Al analizar esta imagen podemos ver que, en su mayoría, el fenómeno se concentra alrededor de un centímetro por encima de la celda de Peltier y que la celda al enfriarse de manera homogénea, el flujo de convección es también homogéneo sobre la celda. En esta imagen se puede notar que el gradiente de temperatura se concentra en un área pequeña de la figura.

Al observar multiples imágenes (ver Figura 8) es posible analizar la evolución temporal del fenómeno de flujo de convección, así como obtener la información necesaria para lograr realizar simulaciones numéricas que nos permitan estudiar los flujos de convección causados por otro tipo de estructuras de enfriamiento.

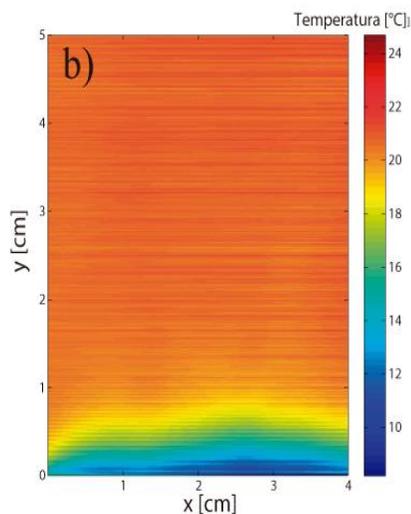
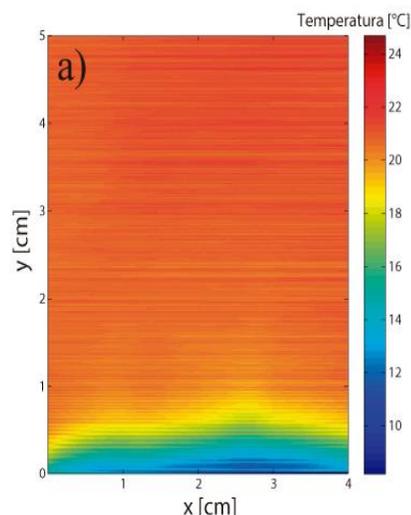
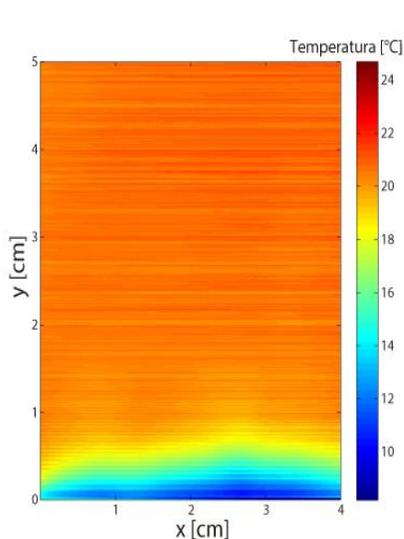


Figura 7 Imagen de la capa verde procesada donde se muestra la barra de temperatura y su respectiva escala

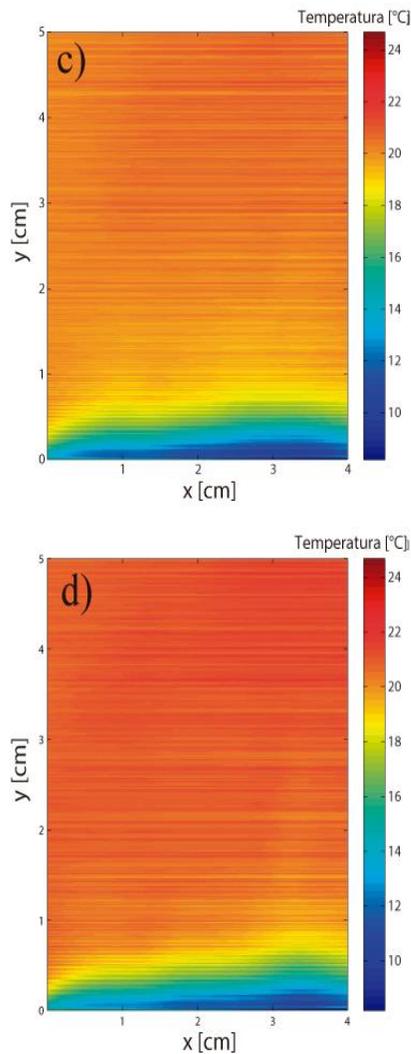


Figura 8 Evolución temporal del fenómeno. a) 7.5 s, b) 10.5 s, c) 21 s y d) 29 s

Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

El sistema óptico de Schlieren comprobó que es sensible a detectar alteraciones en el medio por pequeñas que estas sean y sin importar la región en que estas sucedan. Se pudo visualizar por medio del sistema óptico, el flujo de convección causado por la superficie de enfriamiento de la celda Peltier, el cual es un fenómeno en el que el gradiente de temperatura tiene cambios en una región muy pequeña. La técnica de visualización de Schlieren puede medirla adecuadamente. Por lo tanto, se comprobó que la técnica propuesta es una excelente herramienta para poder visualizar el flujo de convección con gradientes de temperatura bajos. Se puede recomendar otra aplicación de esta técnica que normalmente se asocia con la visualización de fenómenos con altas temperaturas, como turbinas, flamas y en balística (Settles & Hargather, 2017).

Referencias

Aguilar Fernández, E., Gómez Vieyra, A., Miranda Tello, J. R., & Álvarez Herrera, C. (2014). Instrumentación de un Sistema Schlieren Unidimensional para la Adquisición de los Mapas de Gradiente de Temperatura (pp. 1–7). Puerto Vallarta, Jalisco: SOMI.

Alvarez-Herrera, C., Moreno-Hernández, D., & Barrientos-García, B. (2008). Temperature measurement of an axisymmetric flame by using a Schlieren system. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, *10*(10), 104014. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/10/104014>

Alvarez-Herrera, C., Moreno-Hernández, D., Barrientos-García, B., & Guerrero-Viramontes, J. A. (2009). Temperature measurement of air convection using a Schlieren system. *Optics & Laser Technology*, *41*(3), 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.07.004>

Alvarez-Herrera, C., Murillo-Ramírez, J. G., Pérez-Reyes, I., & Moreno-Hernández, D. (2015). Proper orthogonal decomposition applied to laminar thermal convection in a vertical two plate channel. *Journal of Optics*, *17*(6), 65602. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/6/065602>

Cisneros Martínez, J. A. (2015). *Medición de la temperatura mediante un sistema Schlieren monocromático para analizar procesos de combustión*. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F.

Gómez-Vieyra, A., Alvarez-Herrera, C., Vergara-Vázquez, K. B., & Pérez-Sánchez, G. G. (2017). Medición y análisis del proceso de combustión en un sistema Schlieren en la región visible e infrarrojo cercano. *Revista de Sistemas Experimentales*, *4*(11), 13–21.

Martínez-González, A., Moreno-Hernández, D., & Guerrero-Viramontes, J. A. (2013). Measurement of temperature and velocity fields in a convective fluid flow in air using Schlieren images. *Applied Optics*. <https://doi.org/10.1364/ao.52.005562>

Panigrahi, P. K., & Krishnamurthy, M. (2012). *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer. SpringerBriefs in Thermal Engineering and Applied Science* (1a ed.). Springer-Verlag New York.

Settles G. S. (2001). *Schlieren and Shadowgraph Techniques Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6>

Settles, G. S., & Hargather, M. J. (2017). A review of recent developments in Schlieren and shadowgraph techniques. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 25. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5748>