

## Medición y análisis del proceso de combustión en un sistema schlieren en la región visible e infrarrojo cercano

GÓMEZ-VIEYRA, Armando†<sup>1</sup>, ALVAREZ-HERRERA, Cornelio<sup>2</sup>, VERGARA-VÁZQUEZ, Karla Beatriz<sup>1</sup> y PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua

Recibido Marzo 30, 2017; Aceptado Mayo 28, 2017

### Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema Schlieren que emplea diferentes longitudes de onda. El objetivo es poder determinar los campos de temperatura y los procesos de absorción de luz por los compuestos generados en el proceso de combustión. Empleando un relevador óptico reflectivo tipo Z, una navaja, un arreglo óptico de iluminación y una cámara CMOS RGB se instrumenta un arreglo schlieren. Como fuentes de luz se emplearon nueve diodos emisores de luz en el visible y en el infrarrojo cercano, que se caracterizaron espectralmente. Empleando un programa diseñado en LabView se obtuvo un video de referencia y un video de los gradientes de temperatura. Realizando una integración numérica se obtiene la densidad de temperatura. Se analizó individualmente cada capa de detección de la cámara RGB, como la fuente luz está limitada en ancho de emisión espectral, claramente se observa su dominio sobre alguna de las capas de detección de la cámara. Sin embargo, se siguen detectando algunos fenómenos característicos en las capas no dominantes, que pueden deberse a interacciones no lineales con los compuestos generados en la reacción o al proceso de emisión de la combustión. La técnica de Schlieren aplicada con diferentes longitudes de onda revela más detalles sobre el proceso de combustión y absorción óptica en las flamas como predice la relación de Gladstone-Dale.

### Schlieren, combustión, temperatura, espectroscopia

**Citación:** GÓMEZ-VIEYRA, Armando, ALVAREZ-HERRERA, Cornelio, VERGARA-VÁZQUEZ, Karla Beatriz y PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina. Medición y análisis del proceso de combustión en un sistema schlieren en la región visible e infrarrojo cercano. Revista de Sistemas Experimentales. 2017, 4-11: 13-21.

### Abstract

In this work the implementation of a Schlieren system that uses different wavelengths is presented. The objective is to determine temperature fields and processes light absorption by the compounds generated in the combustion process. Using a Z-type reflective optical relay, a knife, an optical illumination arrangement and a CMOS RGB camera, a schlieren arrangement is implemented. As light sources, nine light emitting diodes were used in the visible and the near infrared, which were characterized spectrally. Using a program designed in LabView, a reference video and a video of the temperature gradients were obtained. Performing a numerical integration gives the temperature density. Each detection layer of the RGB camera was analyzed individually, as the light source is limited in spectral emission width, its domain is clearly observed on some of the detection layers of the camera. However, some characteristic phenomena continue to be detected in the non-dominant layers, which may be due to non-linear interactions with the compounds generated in the reaction or the combustion emission process. Schlieren technique applied with different wavelengths reveals more details about the combustion in flames and chemical absorption as predicted the Gladstone-Dale relation.

### Schlieren, combustion, temperature, spectroscopy

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La visualización de los procesos de combustión y los flujos de temperatura generados son de gran interés para la ciencia básica y aplicada. La medición de estos procesos se realiza comúnmente por procesos ópticos, que incluyen LDV (Laser Doppler Velocimetry) homogénea, la velocimetría Doppler de contraste de fase, la interferometría por desplazamiento lateral, interferometría holográfica, fotografía de moteado láser, schlieren, fotodeflección o una combinación de varias. Todos estos métodos son empleados ampliamente debido a que son técnicas de campo completo y se basan en el hecho de que cualquier fuente de calor en contacto con un fluido transparente, transferirá calor a este, habiendo diferencia de temperaturas, densidades y en consecuencia una diferencia en los índices de refracción. Las diferencias en los índices de refracción desviarán la dirección de un rayo de luz que pase a través del fluido transparente, ya que este último actúa como una lente.

La técnica de schlieren es una de las técnicas más antiguas y más ampliamente utilizadas para la medición de la temperatura y otras propiedades de los gases, que se remonta generalmente a Foucault (1859) y Toepler (1864). En los últimos años, la técnica schlieren se ha utilizado para cuantificar los campos de velocidad de un fluido, así como su gradiente de temperatura.

Donde la interpretación es descrita por la ecuación de Gladstone-Dale que conecta a la misma constante  $K$  de Gladstone-Dale con la longitud de onda utilizada en la medición y la variación local de los índices de refracción en la zona de medición. Sin embargo, hay información en las pruebas ópticas que no son estudiadas adecuadamente ya que se ha empleado únicamente la óptica física.

Esta información es la generación y proceso de transición en el proceso de combustión de gas licuado de petróleo (LP) o cualquier otro combustible. Tradicionalmente estos procesos se han estudiado empleando espectroscopía. La espectroscopía basa su funcionalidad en las interacciones de la radiación con la materia para obtener información sobre una muestra. La muestra se estimula aplicándole energía en forma de calor, energía eléctrica, luz, partículas o reacciones químicas. Con lo cual se puede evaluar procesos de generación, absorción, transmisión o reflexión de la energía radiante.

Basado en esta perspectiva, recientemente, se implementó un arreglo schlieren, con una cámara monocromática, donde se evalúan procesos de absorción en la región del visible. La mayor limitante que presentaba este trabajo era que no se podían identificar adecuadamente los procesos de absorción por los compuestos generados en la combustión y la generación de luz del proceso de combustión. Para solucionar esto se tuvo que implementar una cámara a color y extender el rango de análisis a la región del infrarrojo cercano.

## Desarrollo

El sistema Schlieren, del alemán “schliere” que se traduce como inhomogeneidad, se refiere a los cambios de densidad en un fluido transparente, debido al contacto con una fuente de calor, esto involucra un cambio en la temperatura, una dirección de máximo crecimiento de ésta y una diferencia en los índices de refracción; por la naturaleza de la muestra, al pasar la luz a través de la llama de LP, los haces de luz transmitidos estarán desviados con respecto al eje de la luz incidente.

El estudio de la flama y la visualización del proceso de combustión a través de emplear una fuente de luz de ancho de banda bien definido y un detector selectivo por ancho de banda, nos permite explorar propiedades estudiadas comúnmente por la espectroscopía.

El sistema experimental de schlieren implementado, Fig. 1, consta de un sistema de iluminación que se compone de un LED D, lente L1 con  $f=19\text{mm}$  y apertura A, un par de espejos E1 y E2 en configuración oblicua en forma de Z, que coliman y vuelven a enfocar el haz de luz y finalmente el filtraje para obtener el mapa de gradientes (navaja N, lente L2 con  $f=50\text{mm}$  y una cámara con sensor tipo CMOS de color Edmund EO2018C). El LED (D) se sustituye dependiendo de la longitud de onda que se desea evaluar. La lente L1, se posiciona a 38mm del LED, con lo cual forma una imagen puntual a 38mm, donde se coloca la apertura A con el objetivo de eliminar componentes indeseables y en consecuencia se deja pasar un haz de luz homogéneo.

Este haz se expande al ir propagándose, hasta llegar al espejo E1, el cual lo colima. El tubo de luz sigue viajando hasta llegar al espejo E2. El espacio entre ambos espejos es la zona donde se coloca la muestra a evaluar. La reflexión de haz en el espejo E2 provoca que forme una imagen puntual. La posición de esta imagen determina donde se coloca la navaja, con lo cual se producirá la función gradiente del campo, que será captado por el sensor CMOS con ayuda de la lente L2. Para realizar el desenvolvimiento de fase de los mapas de gradiente de temperatura, se emplea un programa escrito bajo la plataforma de Matlab (desarrollado en el CIO y en la UACH), que realiza un promedio de todos los fotogramas para cada LED y se hará una resta con el video de referencia para procesar las imágenes y obtener las temperaturas en campo completo de de la flama.

Los LEDs empleados en este sistema, son 6 en el visible (ver Tabla 1 y Fig. 2) y en el infrarrojo (Tabla 2 y Fig. 3). Como referencia se empleo siempre un led de luz blanca, su espectro se puede observar en la Fig 2.

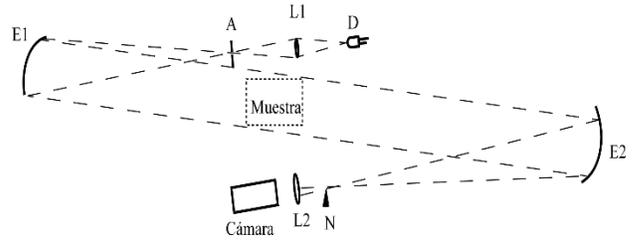


Figura 1 Sistema experimental de schlieren implementado

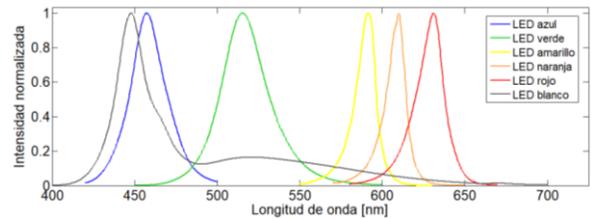


Figura 2 Espectro de emisión de los LEDs visibles empleados

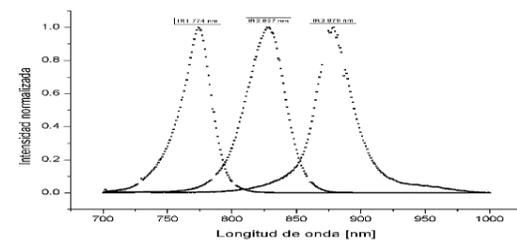


Figura 3 Espectro de emisión de los LEDs infrarrojos empleados

Longitud de onda [nm]	Color
457	Azul
515	Verde
591	Amarillo
610	Naranja
630	Rojo

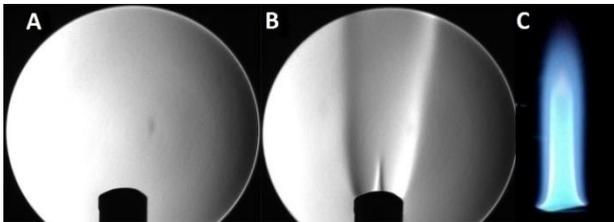
Tabla 1 Longitud de onda central de los LEDs visibles empleados y color

Longitud de onda [nm]	LED
774	IRV1
827	IRV2
879	IRV3

**Tabla 2** Longitud de onda central de los LEDs infrarrojos

Los LED son alimentados por una fuente de voltaje no comercial, basada en un circuito integrado LM317 y un Arduino como visualizador de ajuste de voltaje.

Una imagen de referencia y una del gradiente de temperatura, así como la flama típica obtenida se muestran en la Fig. 4. La cámara CMOS esta programada en un Interface de LabView. El procesamiento de los videos se realiza en Matlab.



**Figura 4.** **A.** Fotograma de la captura de video sin ninguna alteración, **B.** Fotograma de la captura de video con la alteración de la flama, **C.** Fotografía real de la flama de gas LP

Una vez que se obtuvieron todos los gradientes para cada LED, se procesaron las imágenes con un algoritmo de integración numerica para calcular las densidades de temperatura de la flama de gas LP.

## Resultados

La Fig. 5 muestra las imágenes desenvueltas normalizadas obtenidas de los LEDs visibles: blanco, azul, verde y rojo. En esta Figura se pueden observar las tres capas de detección procesadas independientemente y el promedio de estas.

La Fig. 6 muestra las imágenes desenvueltas normalizadas obtenidas de los LEDs visibles: amarillo, naranja y rojo. En esta Figura se pueden observar las tres capas de detección procesadas independientemente y el promedio de estas. Se ve claramente un dominio de detección de la capa roja de la cámara.

La Fig. 7 muestra las imágenes desenvueltas normalizadas obtenidas de los LEDs infrarrojos: IRV1, IRV2, IRV3 y un blanco usado como referencia. En esta Figura se pueden observar las tres capas de detección procesadas independientemente y el promedio de estas.

## Discusión

Las Figs. 5, 6 y 7 presentan los mapas de gradientes normalizados, cuando la iluminación del sistema está limitada en ancho de banda. Por esta razón, las imágenes pertenecientes a iluminación del LED blanco, el cual emite con más componentes espectrales arrojaron una mejor resolución. Es claro que, al emitir en todo el rango espectral, todas las capas de la cámara detectarían componentes de refracción. Sin embargo, para el objetivo de este trabajo, esta iluminación no permite discriminar componentes espectrales de la emisión o absorción, pero es una excelente referencia respecto a los demás resultados.

Cuando la fuente LED está limitada, claramente se observa su dominio sobre alguna de las capas de detección de la cámara. Sin embargo, se siguen detectando algunos fenómenos característicos en las capas no dominantes.

Si se observa con detalle la Fig. 5, las capas RGB de la cámara, en realidad describe la presencia de algún fenómeno de emisión de luz debido al proceso de combustión de la flama.

Se debe resaltar que pueden existir fenómenos no lineales de emisión debido a los residuos de la combustión o a los productos químicos de la combustión.

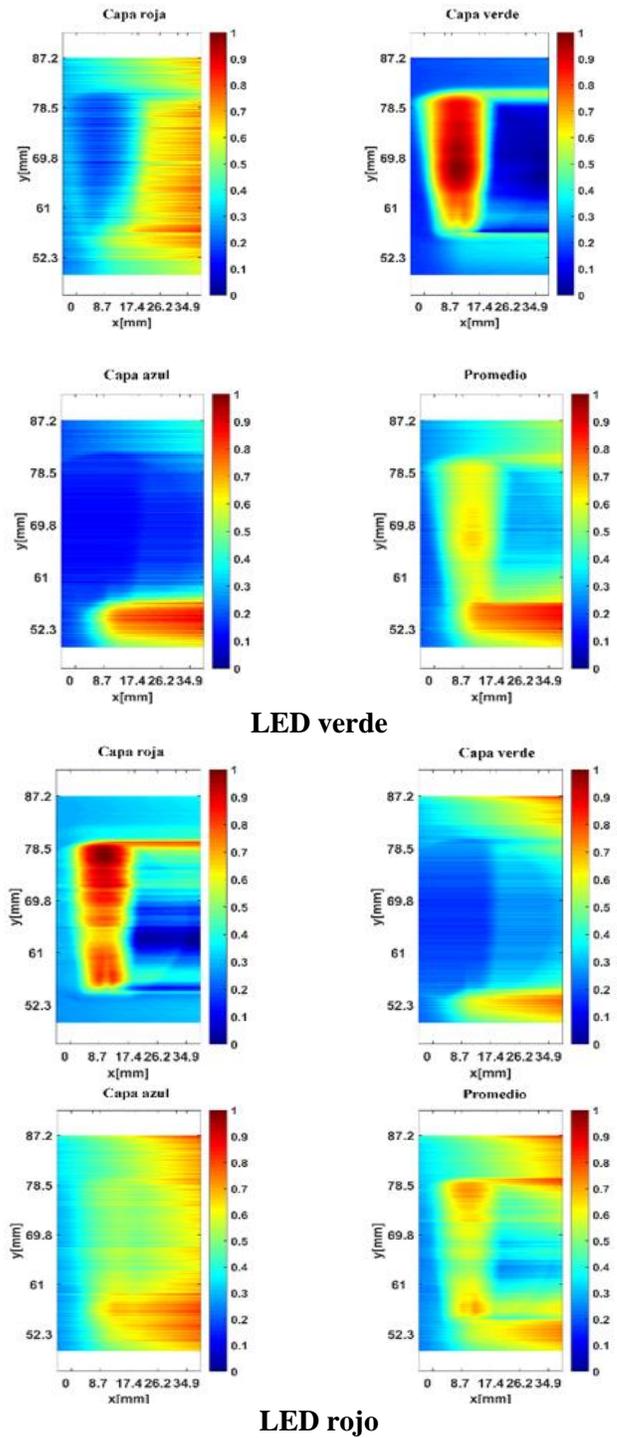
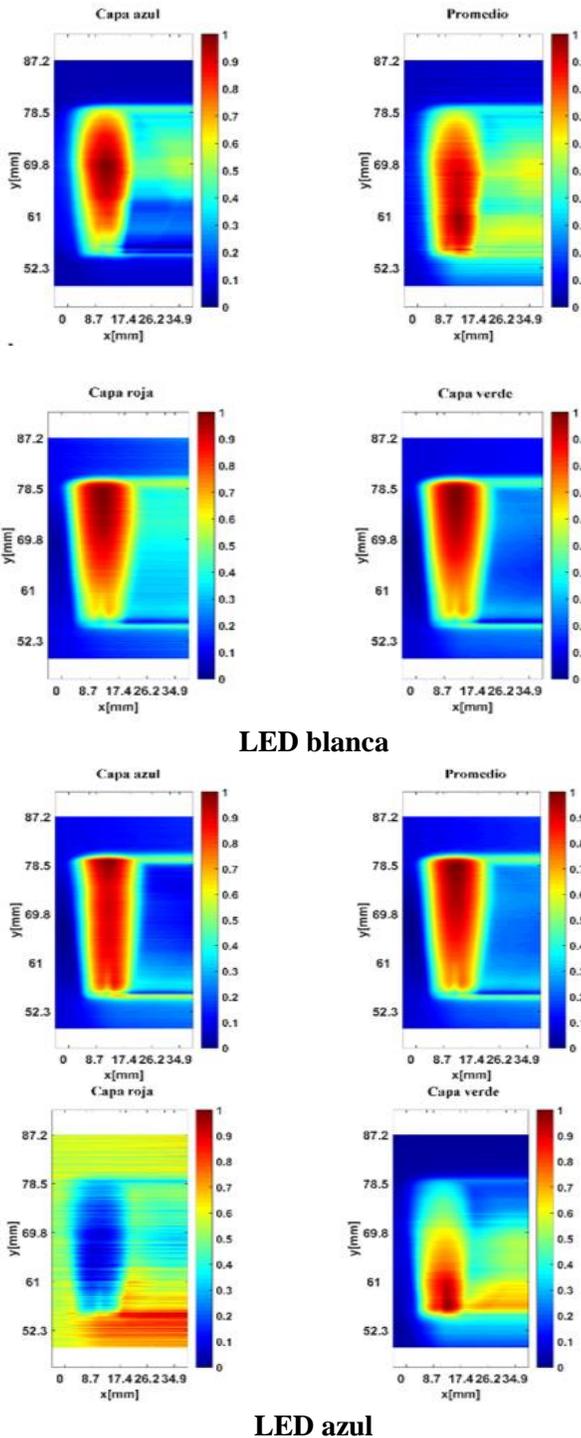
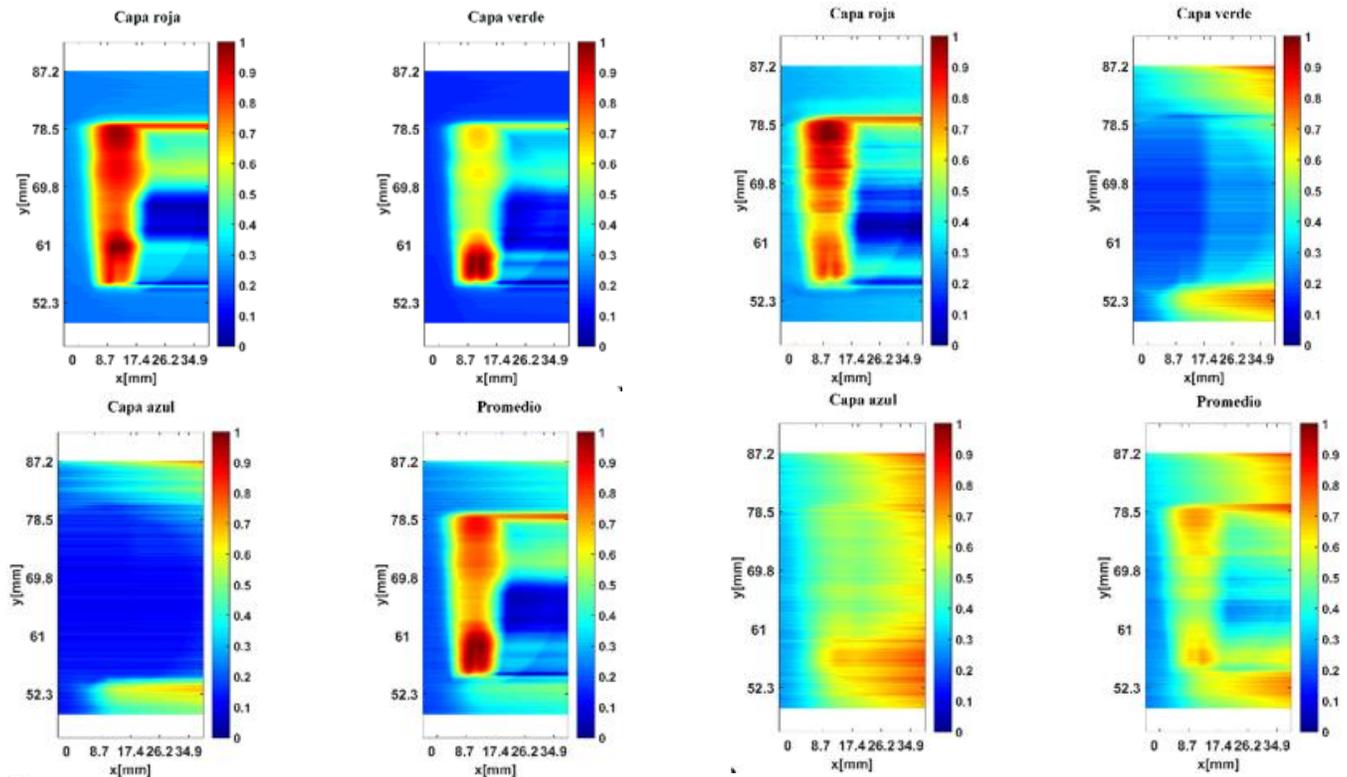


Figura 5 Mapas de temperatura normalizada desarrollada para los LEDs blanco, azul, verde y rojo



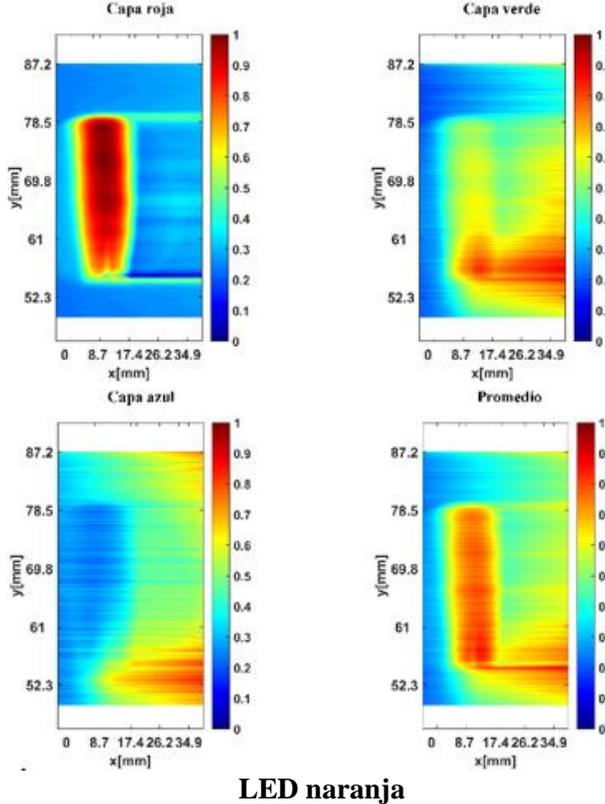
**LED amarillo**

**LED rojo**

**Figura 6** Mapas de temperatura normalizada desenvuelta para los LEDs amarillo, naranja y rojo

Es importante observar que, al iluminar con el LED azul, la capa dominante será el pixel azul, sin embargo, en la capa roja y verde de detección también se observan remanentes. Al iluminar con los LEDs verde y rojo se observan efectos similares.

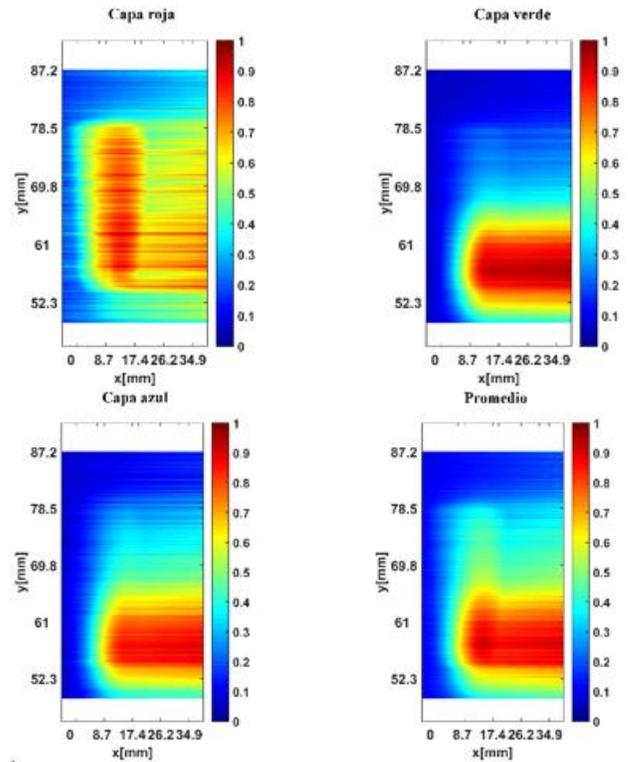
En la Fig. 6, donde se observan los resultados en las regiones próximas al rojo, es claramente visible que la capa del detector en verde, es sensible a las intensidades que no son perfectamente rojas. Lo cual implica una limitante, ya que no es posible discriminar adecuadamente los fenómenos buscados.



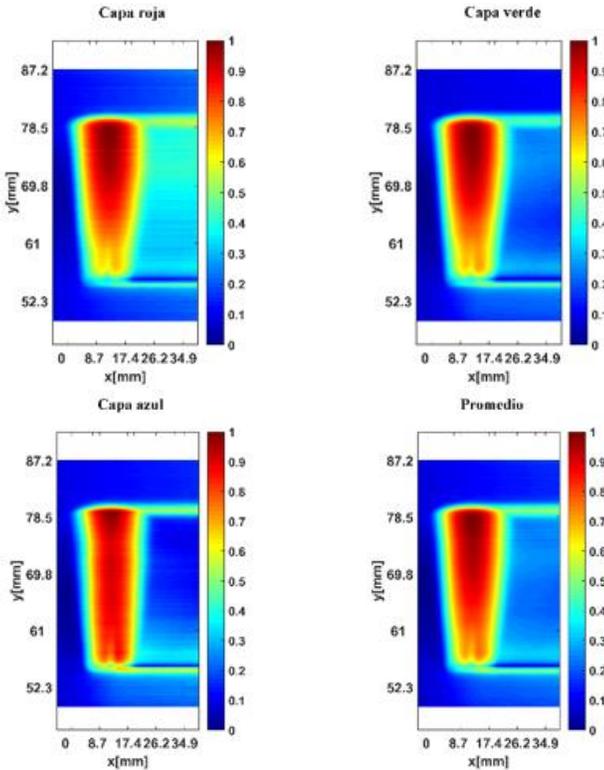
**LED naranja**

En la Figura 7, se observan los campos de temperatura normalizados obtenidos del sistema con iluminación en infrarroja, se puede observar que la mayor cantidad de información se encuentra en la capa roja de detección.

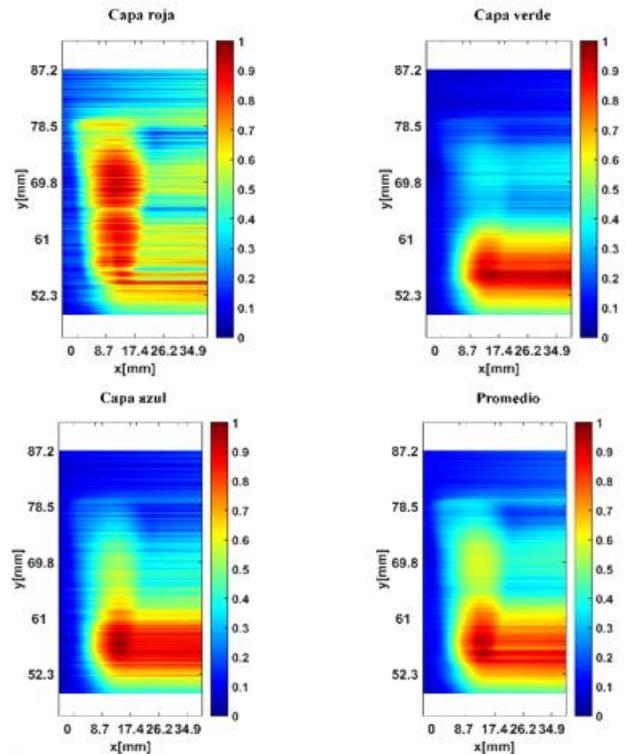
Sin embargo, también se observa información en las capas verde y azul, que es bastante similar a los resultados obtenidos con la iluminación con el LED rojo (ver Fig. 6). Esto asegura que lo que se observa son procesos de emisión de luz, de la combustión, sin embargo, también asegura que al propagarse se encuentran los efectos de refracción del aire por la temperatura.



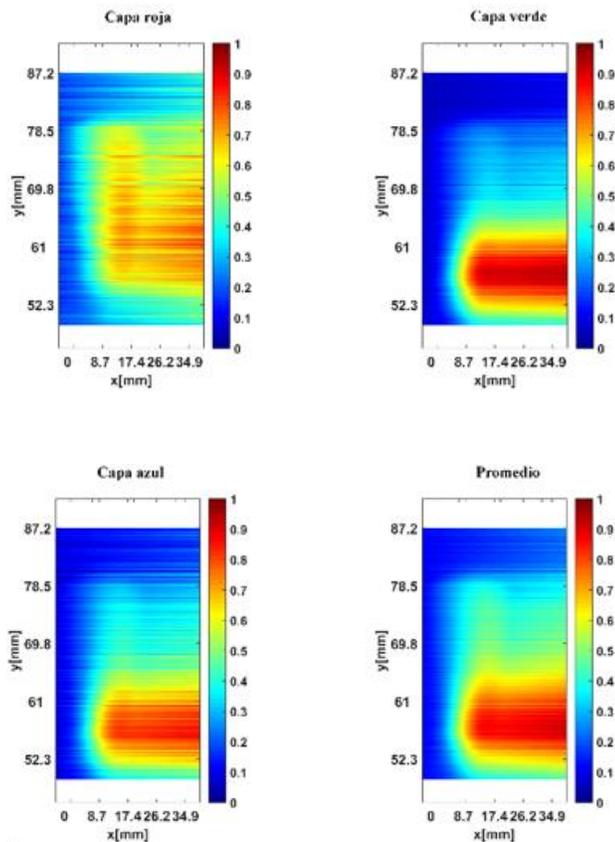
LED IR1



LED blanco



LED IR2



LED IR3

**Figura 7** Mapas de temperatura normalizada desenvuelta para los LEDs blanco, IR1, IR2 e IR3

Cabe señalar que es necesario realizar la correlación de las imágenes y un análisis más profundo desde el punto de vista de la espectroscopía. La idea inicial era poder observar procesos de absorción, sin embargo, también se puede afirmar que se observan procesos de generación de componentes espectrales de la reacción misma.

### Agradecimiento

Los autores agradecen al Departamento de Ciencias Básicas por el apoyo para la caracterización de las fuentes de luz.

### Conclusiones

El sistema Schlieren funciona básicamente con la transmisión de la luz, en consecuencia, debe de ser la componente de intensidad más importante. La variación de la fuente de iluminación, de un LED de luz blanca a fuentes LED con distintos anchos de banda discretos y limitados, ha demostrado poder realizar análisis de temperatura, procesos de absorción por las moléculas existentes en la reacción y visualizar localmente la generación de componentes espectrales en un análisis de campo completo.

Es claro que se necesita trabajar la interpretación de estos resultados con respecto a los procesos de combustión y su relación con la espectroscopía existente para realizar una mejor interpretación de lo resultados obtenidos.

### Referencias

Cisneros Martínez, J. A., Gómez Vieyra, A., Álvarez Herrera, C., Miranda Tello, J. R. (2016) Medición de la temperatura mediante un sistema schlieren monocromático para analizar procesos de combustión. *2do Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas/SOMI XXXI Congreso de Instrumentación*, ISBN 2395-8499

Fomin, N. A. (1998). *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*. Germany: Springer.

Kreis, T. (2004). *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Germany: Wiley-VCH.

- López, Y., Peña, G., Casillas, F., Rodríguez, M. (2016). Estudio de parámetros térmicos en dispositivos electrónicos mediante interferometría electrónica de patrones de moteado. *Revista de Energía Química y Física* 3, 47-51.
- 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. *Appl. Opt.* 52, 5562–5569.
- Martínez-González, A., Moreno-Hernández, D., León-Rodríguez, M., Carrillo-Delgado, C. (2016). Wide-range average temperature measurements of convective fluid flows by using a schlieren system. *Appl. Opt.* 55, 556-564.
- Merzkirch, W. (1987). *Flow Visualization*. United States of American: Academic Press.
- Ojo, A. O., Fond, B., Van Wachem, G. M., Heyes, A. L., Beyrau, F. (2015) Thermographic laser Doppler velocimetry. *Opt. Lett.* 40, 4759-4762.
- Ojo, A. O., Fond, B., Abram, C., Van Wachem, B. G. M., Heyes, A. L., Beyrau, F. (2017). Thermographic laser Doppler velocimetry using the phase-shifted luminescence of BAM:Eu<sup>2+</sup> phosphor particles for thermometry. *Opt. Express* 25, 11833-11843.
- Qi, C., Zheng, S., Zhou, H., (2017). Experimental investigation on gas-phase temperature of axisymmetric ethylene flames by large lateral shearing interferometry, *International Journal of Thermal Sciences* **115**, 104-111.
- Schwär, F., Weinberg, M. (1975). Measurement of Velocity by Applying Schlieren Interferometry to Doppler-Shifted Laser Light. *Proc. Roy. Soc.* A345, 469-476.
- Settles, G. S., Hargather, M. J. (2017). A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques. *Meas. Sci. Technol.* 28, 42001, 1-26.
- Singhal, G., Mainuddin, Rajesh, R., Beg, M. T., Tyagi, R. K., Dawar, A. L. (2015) Overview of Optical Techniques for Characterization of High-Power Infrared Gas Lasers. *IEEE Sensors Journal* 15, 4165-4173.
- Ramírez-Granados, J.C., Gómez-Luna, B., Moreno-Martínez, J., Almazan-Acevedo, J. (2016). Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja. *Revista de Energía Química y Física* 3, 57- 63.
- Valle-Hernández, J., Rojas-Ávila, A. Pacheco-Reyes, A., Castillo-Jiménez, V. (2016). Análisis térmico de un reactor termoquímico para la producción de hidrogeno con energía solar. *Revista de Aplicación Científica y Técnica* 2, 1-8.