



Deflectometría de arcoíris Schlieren en transferencias de calor por convección.

García Flores Jesús Octavio
octavio5545@ciencias.unam.mx

Haro Torralba Lundi Erick
lundi.eht@gmail.com

17-junio-2019

Resumen

Este trabajo presenta la técnica de deflectometría de arcoíris Schlieren para la investigación de transferencia de calor en una resistencia eléctrica convencional. La técnica se ha empleado para visualizar los cambios en los gradientes de densidad y temperatura. El estudio revela claramente el potencial de la técnica de deflectometría a color en comparación con otras técnicas, en el contexto de transferencia de calor con fluidos como medio de trabajo.

Introducción

Cuando hablamos de calefacción eléctrica, en realidad estamos pensando en calefacción por efecto Joule. Cuando se calienta agua mediante una resistencia eléctrica, puede verse la transferencia de calor hacia el agua como “ondas traslúcidas” que fluyen hasta la superficie. Esto se debe al cambio de dirección de la luz cuando pasa por distintos cambios de densidad que se presentan por el calentamiento. La convección impulsada por la flotabilidad se ha establecido en las proximidades de una resistencia eléctrica convencional en funcionamiento, sumergida en agua a distintas temperaturas y a presión atmosférica. No se puede notar a simple vista cómo son dichos cambios debido a la naturaleza del agua.

Shadowgraph y Schlieren:

La técnica de Shadowgraph (figura 1), es la más simple de todos los métodos de visualización de flujo óptico, pero a menudo es la mejor opción para obtener imágenes de ondas de choque y turbulencia debido a las uniformidades que se generan. La adición de una pantalla retro-reflectante y una

cámara de alta velocidad hacen de ésta una herramienta robusta para el estudio de eventos a gran escala en entornos hostiles. Esencialmente, en el método shadowgraph, trazas de rayos de luz desviados de su camino ideal por las uniformidades del índice de refracción se absorben selectivamente para mostrar una variación de la irradiancia en una imagen. La no uniformidad queda así revelada. La técnica Schlieren es en esencia un arreglo shadowgraph, colocando el filo de una navaja en el foco de salida, cubriendo parcialmente el objetivo, con el fin de visualizar cambios verticales u horizontales en el fenómeno.

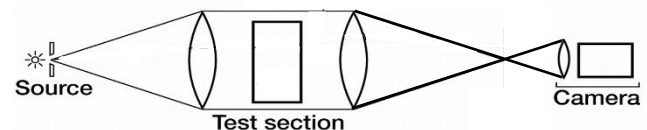


Figura 1. Arreglo experimental shadowgraph.

Rainbow Schlieren o Schlieren de color:

El método de Rainbow Schlieren Defletometry (RSD) es un tipo de arreglo experimental que puede cuantificar la densidad de un flujo de fluido

transparente, como los gases o el agua. Prácticamente es un instrumento de Shadowgraph que utiliza el color para realizar mediciones. 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 final, como se puede observar en la Figura 2. Al cambiar el borde de la navaja por el filtro de color también cambiará la imagen capturada, por lo tanto es imperativo utilizar una cámara de color y 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.

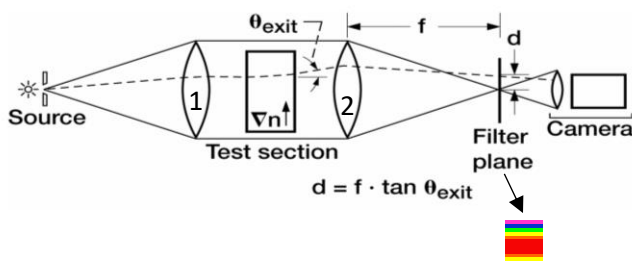


Figura 2. Arreglo Schlieren con filtro de colores.

Como el agua es un medio transparente, la técnica RSD es una buena elección para caracterizar el fenómeno de transporte de calor de una resistencia eléctrica sumergida en agua. Por hipótesis se espera lo siguiente:

- Un flujo laminar inicial.
- Un cambio del índice de refracción de la luz, por lo cual las imágenes obtenidas tendrán cambios de coloración conforme se da la transmisión de calor y dependerá de la dirección del filtro de color.
- Un intercambio de calor por convección natural y ebullición nucleada.

Los objetivos planteados son:

- Determinar el tipo de flujo (laminar o turbulento) al inicio del proceso de calentamiento y durante.

- Grabar imágenes que demuestren experimentalmente la refracción de la luz debido a cambios de temperatura y densidad del líquido y dar una correlación.
- Observar y comprobar el tipo de transferencia de calor en el fenómeno apoyándose en el coeficiente de transferencia.
- Comparar el efecto obtenido de la técnica Shadowgraph y con la de RSD.

Diseño experimental:

Los experimentos de ebullición de agua descritos en el presente trabajo se han realizado en una sección de prueba de dimensiones 20cm × 24cm × 20cm con paredes de vidrio transparente de 8 mm de espesor y con una resistencia eléctrica de 600W a 127V. El ensamblaje experimental se dividió principalmente en dos secciones: la parte superior para lograr y mantener las condiciones de calentamiento a granel, mientras que la sección inferior del ensamblaje aloja el sitio de ebullición y está equipado con ventanas ópticas. Como se muestra esquemáticamente, las condiciones de calentamiento se lograron utilizando la resistencia con una longitud de calentamiento de 15 cm (vertical) y un diámetro de 0.63cm. El sistema ha sido provisto de 3 sondas tipo K para la toma continua de temperatura del fluido (agua a 35 °C) a través de dos multímetros; una en la superficie de la resistencia, otra en la periferia cercana a ella y una última lejos del fenómeno de estudio (figura 3). Como fuente de luz se usó un led de 5V, encendido por una fuente externa reguladora de voltaje; con el fin de regular la intensidad de luz. Dicha fuente divergía de una abertura de 500 μm de diámetro colimándose a través de una lente convergente de 10cm de diámetro y foco a 19.4cm de distancia, obteniéndose rayos paralelos que pasaban a través de la sección de prueba (cámara de ebullición), de tal manera que su parte inferior simplemente rozara la superficie del sustrato calentado para permitir la visualización directa del desarrollo de los gradientes térmicos. Se enfocó la imagen con ayuda de otra lente convergente similar, pero con foco en 20.1cm, sobre un filtro de color graduado colocado en el plano focal de la lente. El filtro se compone de

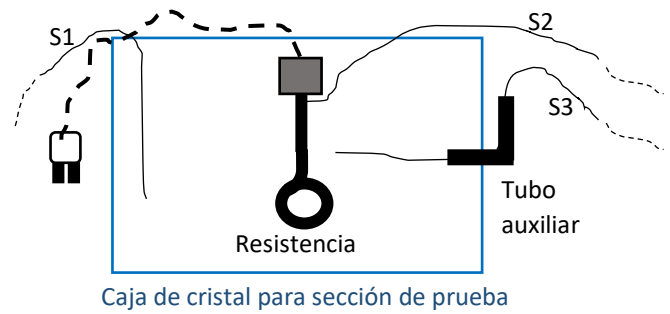
varias bandas de color cuya variación se ha visto afectada en una dirección (Figura 2). En condiciones generales, es decir, en ausencia de gradientes térmicos, el haz de luz colimado se ha enfocado en la banda de color central (rojo) para lograr una distribución de color uniforme en el plano de la imagen.



Figura 2. Filtros de color con 2mm de rojo: (a) 0.5cm x 0.7cm; 0.5mm por color, (b) 0.5cm x 0.4cm.; 0.2mm por color.

El filtro de color actúa como un filtro de paso de banda y permite solo una longitud de onda particular de luz que corresponde a la banda de color en el filtro en el que cae un rayo de luz determinado. Por lo tanto, la desviación angular / lateral de los rayos de luz causados por la presencia de gradientes térmicos en la cámara de prueba se puede estimar en función de la redistribución de color observada correspondiente a cada píxel de la imagen de Shadowgraph bidimensional registrada. En cualquier píxel de la imagen grabada, la redistribución del color es una combinación de colores RGB. Como parte del análisis de Shadowgraph, estos valores RGB se convirtieron primero en las escalas correspondientes de matiz, saturación e intensidad (HSI). El valor del tono resultante correspondiente a cada píxel de la imagen se ha empleado en el cálculo de la desviación angular del haz de luz. Para el análisis cualitativo, del filtro de color graduado se define el proceso de calentamiento. La calibración del filtro desarrollado se ha llevado a cabo en condiciones de temperatura controlada. Para una posición dada del filtro, la distribución del tono correspondiente se registra antes de que la etapa de traducción se mueva más lejos para permitir que el punto focal del haz de luz caiga en la siguiente banda de color. Siguiendo este procedimiento, la distribución de tonos para cada banda de color que cubren el filtro se ha registrado de forma secuencial haciendo uso del programa Davinci Resolve 15. Pruebas de insertado en el

plano focal: primero nada, después una navaja, una transparencia monocromática, y un filtro de color



introducidos sucesivamente en el plano de fuente de luz-imagen. Se usó una cámara Canon EOS REBEL T5.

Figura 3. Diagrama del objetivo prueba. Resistencia al centro y tres sondas: en superficie de resistencia (S2), lejos (S1), y cerca (S3).

Resultados:

Se lograron obtener las imágenes necesarias para hacer el contraste de las variaciones de la técnica Schlieren. De estas pruebas se hizo evidente que, en ausencia de filtros, sólo se observan las sombras generadas en Shadowgraph, dando menor información del fenómeno al ser un análisis monocromático (Figura 4).

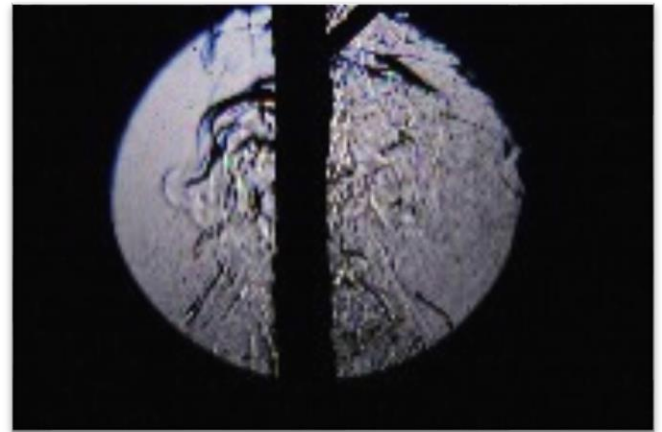


Figura 4. Foto tomada sin filtros ($T_0 = 21^\circ\text{C}$). EL color azul corresponde al filtro por defecto de la lente de la cámara. Exposición 4000^{-1}s , ISO 400.

En este caso, utilizando la navaja, pueden estudiarse los cambios horizontales del fenómeno, pero sigue habiendo sombras y pocos cambios de color, aunque

puede apreciarse muy bien la interacción de la superficie de la resistencia con el fluido (Figura 5).

Con el filtro de color puede notarse una mejora considerable para el fenómeno, ya que permite distinguir en ocasiones si lo observado está en el plano de estudio o no.



Figura 5. Foto tomada con navaja vertical ($T_0 = 21^\circ\text{C}$). Canon EOS REBEL T5. Exposición 4000^{-1}s , ISO 400.

En la Figura 6 puede notarse una franja horizontal (del lado derecho de la resistencia) que pertenece a un plano más cerca de la fuente de luz, mientras que las sombras negras y azules pertenecen a un plano más cercano al filtro. Las blancas pertenecen a rayos de luz que rodean el filtro, debido a cambios muy bruscos en el índice de refracción que se suponen por cambios grandes de temperatura, y a su vez de densidad, en el agua.

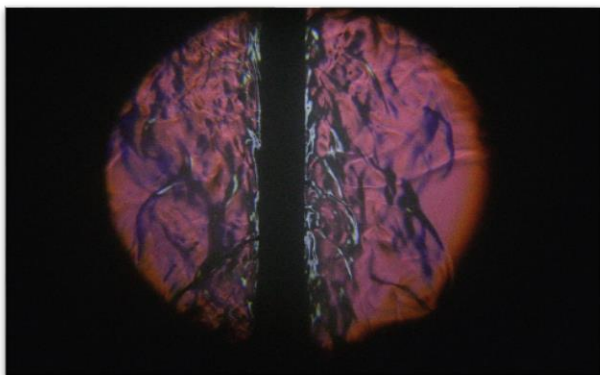


Figura 6. Foto tomada con diana tipo (a) con bandas verticales ($T_0 = 24^\circ\text{C}$). Exposición 4000^{-1}s , ISO 6400.

A diferencia del filtro en vertical, la interacción superficie-fluido no es clara, pero se notan mayores

cambios de color y se cree que se debe a que el flujo de agua es vertical, dando cambios del índice de refracción más visible cuando se observa con una diana como en la Figura 7.

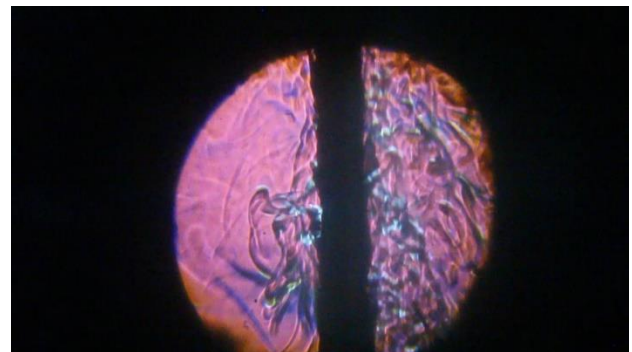


Figura 7. Foto tomada con diana tipo (b) con bandas horizontales ($T_0 = 27^\circ\text{C}$). Exposición 4000^{-1}s , ISO 6400.

En todas las pruebas no se logró determinar un flujo laminar al comienzo del fenómeno. Ya que la geometría completa de la resistencia no fue incluida en la visualización, no se sabe cómo es la dirección de todos los vórtices creados al inicio. Por lo tanto, aunque se visualice de forma laminar, se desconoce el régimen.

En las imágenes puede observarse la generación de burbujas en la superficie de la resistencia. Algunas se desprenden en ocasiones y viajan a la superficie a altas velocidades (respecto al fenómeno de transferencia), mientras que otras se mantienen adheridas a la resistencia.

Con los filtros de color se observan corrientes de difusión y cambios de dirección en los alrededores de la resistencia metálica que se adjudican al intercambio de agua a distintas temperaturas. Se hizo un seguimiento en video de los matices de manera individual para ver cuáles afectan en mayor relevancia al fenómeno (figura 7).

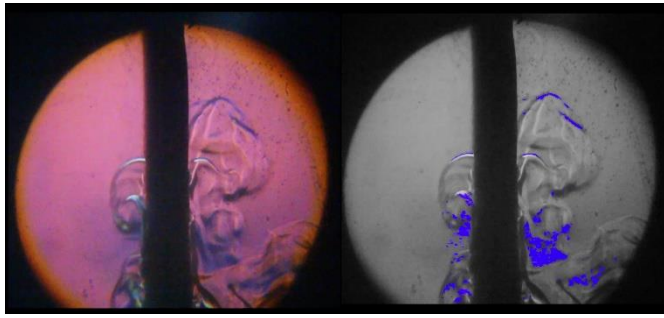


Figura 7. Ejemplo de edición de video, resaltando las tonalidades azules capturadas en la imagen. ISO 800

Conclusiones:

Para efectos de análisis, la técnica RSD puede arrojar mayor información respecto a los fenómenos de transferencia de calor en convección natural. El fenómeno aquí estudiado no representa específicamente a detalle un régimen laminar en ningún momento, refutando la primera hipótesis. Efectivamente, las imágenes obtenidas dan una referencia al cambio de coloración por cambio de densidad debido a que hay cambios en el índice de refracción, ya que de no haber se tendría una visualización parecida a un Shadowgraph convencional. Los cambios más grandes en el índice de refracción se representan en color blanco por las imágenes; esto hace referencia que se cree que se visualizan más los cambios en la densidad y no el movimiento del fluido. No se tuvo cuidado de considerar los cambios de color generados por la lente de la cámara al realizar la técnica RSD, lo cual deja cuestiones acerca de las tonalidades azules obtenidas en las imágenes y posteriormente en la edición de video. El intercambio de calor se da, no sólo por convección natural y ebullición nucleada, sino también por un fenómeno conocido como **ebullición de transición**, que aparece por la acumulación de burbujas en la superficie de la resistencia generando una capa de vapor.

Trabajo a futuro:

Debido a que no se ha logrado hacer una correlación densidad-temperatura del fenómeno, quedaría pendiente para un nuevo artículo. El estudio a través de la técnica RSD puede ser más controlado, haciendo un filtro de colores que cubran toda la

lente de la cámara o eliminando las posibles entradas de luz fuera de él. En las imágenes podrían estudiarse los fenómenos relacionados a las burbujas, como implosión, velocidad de ascenso o su generación en la superficie de la resistencia.

Referencias:

- [1] Yunus A. Çengel (2007), *Transferencia de calor y masa*, México, Mc. Graw Hill.
- [2] Bird Robert (2006), *Fenómenos de Transporte*, México, Limusa Wiley .
- [3] Surya Narayan, Atul Srivastava, Suneet Singh (2018), *Rainbow schlieren-based direct visualization of thermal gradients around single vapor bubble during nucleate boiling phenomena of water*.
- [4] William Daniel, Ajay K., Robert P., Semih M. (2013), *Ultra high speed rainbow schlieren deflectometry for whole field acoustic measurements in supersonic jets*.
- [5] Duncan Stevenson (2011). *Cuantitativa color schlieren techniques*.

Nota: Los videos del seguimiento de matices e imágenes se encuentran en el Taller de Hidrodinámica de la Facultad de Ciencias, UNAM, con nombre: *Deflectometría de arcoíris Schlieren en transferencias de calor por convección Octavio Erick 2019_2*.