

Variante del Sistema Schlieren para observación de cambios en el índice de refracción: Caso de estudio para una vela

M. Pérez Cortés¹, J. Lugo-Jiménez², A. Bassam¹, M. Flota-Bañuelos¹, M. Ortiz Gutiérrez³

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán
Av. Industrias no Contaminantes x Periférico Norte s/n, Cordemex, 150 Mérida, Yucatán, México
mariopc111@gmail.com

² Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán
Periférico Norte Tablaje 13615 C.P. 97119, Mérida, Yucatán, México
jorge.lugo@correo.uady.mx

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Michoacán, México

Abstract

The classic experimental technique of Schlieren system consists of a white light point source and a camera, besides others. In the proposal system we used a green laser instead of the white light and a parabolic mirror to obtain a real time image of the gradient variation of density in the observation screen. The camera will take pictures of the observation screen, unlike the classic technique where the camera take place in the alignment system.

Resumen

Los elementos del arreglo experimental de la técnica schlieren clásica, entre otros, son una luz puntual blanca y una cámara fotográfica. En el sistema propuesto usaremos un láser verde en lugar de la luz blanca, y un espejo parabólico para obtener una imagen en tiempo real de la variación de densidades en la pantalla de observación. La cámara tomará fotografías de la pantalla de observación, a diferencia de la técnica clásica en la que la cámara forma parte del sistema y está alineada con la luz blanca.

Keywords and phrases : Schlieren techniques, refractive index, diffraction experiments, experiments with laser

2010 Mathematics Subject Classification: 01A45, 78-05, 78A60

1. Introducción

Algunas historias cinematográficas donde los protagonistas observan un oasis imaginario en el desierto pueden no ser tan surrealistas. Este fenómeno conocido como espejismo se debe a la refracción de la luz en medios no homogéneos, donde la luz cambia su dirección de propagación debido a un cambio gradual en las propiedades físicas del medio tales como densidad, temperatura o presión.

Los espejismos se clasifican en inferiores y superiores. Un ejemplo de espejismo inferior ocurre cuando se observan imágenes de agua en movimiento sobre una carretera caliente. Esto se origina debido a un cambio

creciente de la temperatura del aire cercano a la superficie de la carretera, lo que provoca una disminución en la densidad del aire y, de aquí, una refracción gradual de los haces de luz que se observan. Por otro lado, los espejismos superiores ocurren en lugares fríos donde, al contrario que los espejismos inferiores, el índice de refracción disminuye con la altura (ver Figura 1).



Figura 1: Espejismos inferior (izquierda) y superior (derecha) debido a la distinta densidad atmosférica.

Los medios transparentes u objetos de fase son difíciles de observar. Desde hace más de trescientos años se ha perfeccionado una técnica para observar dichos objetos de fase, ésta se le conoce como Sistema Schlieren. En este artículo se hace una revisión de la técnica Schlieren, y se propone algunos cambios al sistema, para observar de forma simple, los cambios imperceptibles de densidad del aire en torno a la llama de una vela.

2. Refracción de la luz

Los fenómenos de refracción mencionados anteriormente son descritos por la ley de Snell, la cual determina el cambio en la dirección de propagación de la luz entre dos medios, mediante la ecuación

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2 \quad (2.1)$$

donde n_1 , n_2 son los índices de refracción característicos de los medios, y θ_1 , θ_2 corresponden al ángulo de incidencia y de refracción del rayo de luz respecto a la dirección normal en la frontera de los medios (ver Figura 2).

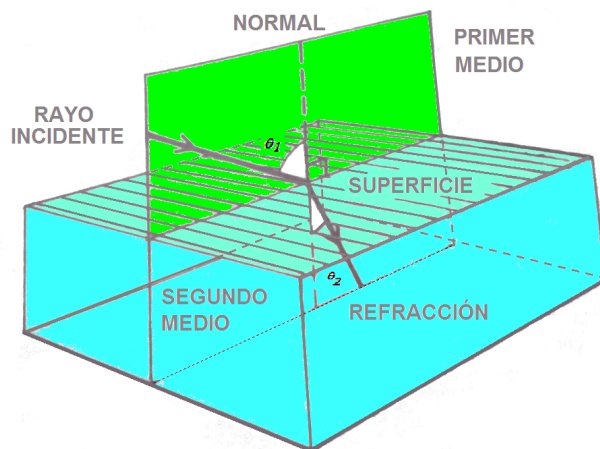


Figura 2: Fenómeno de la refracción de la luz al cruzar de un medio a otro. Adaptado del **Diccionario de Física** (1998).

En el caso de la propagación de la luz en medios no homogéneos se cumple la relación

$$n \operatorname{sen} \theta = cte \quad (2.2)$$

donde n y θ son el índice y ángulo de refracción del rayo luminoso en cada punto de su trayectoria. Expresado en forma diferencial se tiene

$$d(\ln n) = -\cot \theta d\theta, \quad (2.3)$$

esta ecuación es una interpretación de como varía el ángulo de refracción para un cambio dinámico del objeto de fase.

En el ejemplo de la carretera, cuando los días son extremadamente calurosos no sólo se observa el espejismo inferior, sino también los automóviles aparentan ondear en el horizonte. En este caso, no se ve un espejismo, sino que se observa directamente una deformación de la imagen debido a la variación de la densidad del aire entre el automóvil y el observador. Aquí, los rayos de luz no llegan directamente a los ojos del observador -en una línea recta-, sino que cada rayo de luz sigue una dirección cambiante con el tiempo.

En la Figura 3 se muestra un esquema de la interacción de la luz con el aire caliente de una vela. En este caso, el medio circundante tiene índices de refracción diferentes que dependen de la temperatura, por lo que la trayectoria de un rayo de luz tendrá ángulos de refracción distintos, lo que provocará una desviación continua de la luz que finalizará en un punto P ubicado en una pantalla de observación. Aquí, la pantalla de observación mostrará las variaciones de las sombras generadas debido a la dinámica que se introduce al sistema. Como se podrá deducir, modelar matemáticamente todo el proceso es sumamente complicado, ya que sólo se ha descrito un rayo de luz, mientras que una imagen real esta formada por una infinidad de rayos de luz. Sin embargo, un sistema computacional puede ayudar a resolver el problema mediante un procesamiento óptico de las imágenes.

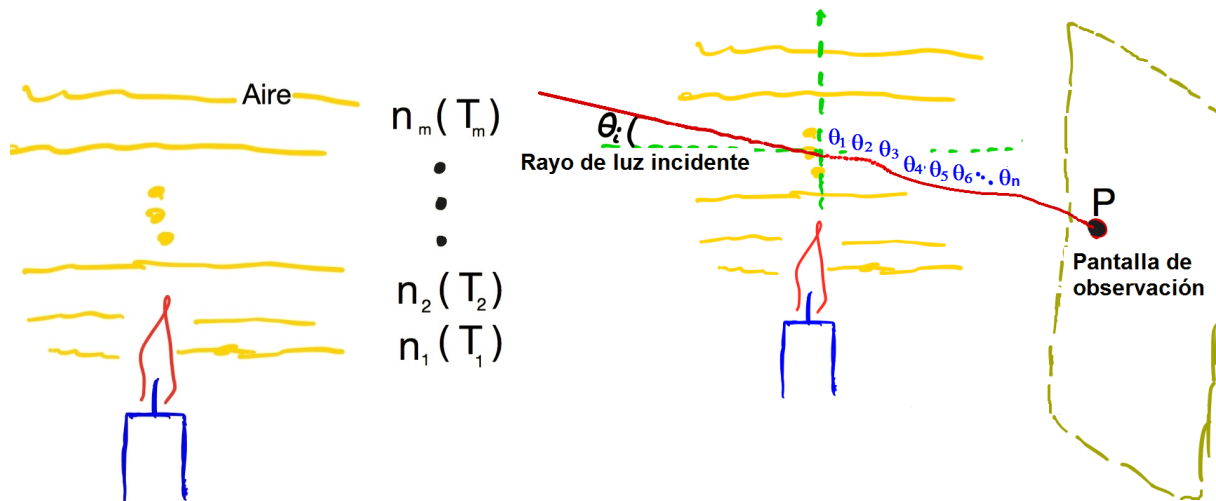


Figura 3: Esquema de la desviación de la luz debido a índices de refracción diferentes del aire.

3. Primeros experimentos

Robert Hooke en 1665 fue el primero en realizar experimentos para observar las desviaciones de la luz debido a los cambios de la densidad del aire. El método empleado por Hooke consistió en la observación directa de la perturbación de aire caliente a través de una interfaz claroscuro distante. Este método fue el antecedente al Sistema Schlieren (Hooke, 1665). Sin embargo, el método era arcaico y perjudicial para los ojos, por lo que una mejoría consistió en remplazar la interfaz claroscuro por la imagen de una vela sobre un lente (o espejo cóncavo) enfrente de la pupila del ojo (Settles, 2001). Ver Figura 4.

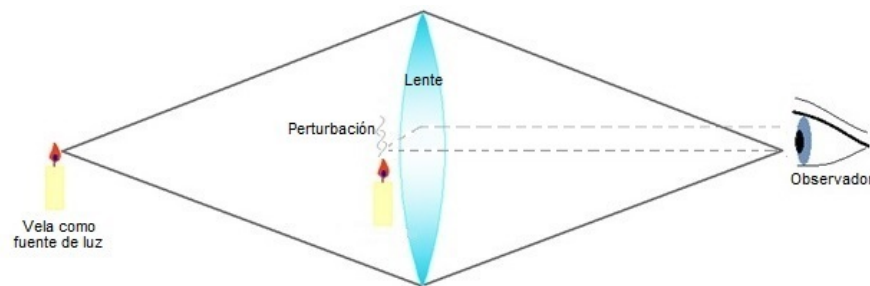


Figura 4: Segundo arreglo de Hooke (Hooke, 1665).

Actualmente, existen algunas variantes de la técnica Schlieren cada una de ellas con diversos arreglos ópticos posibles (Ihle *et al.*, 2009). Por ejemplo, un arreglo simple del sistema Schlieren puede consistir en un LED (*Light Emitting Diode*) como fuente de luz, un *pinhole* para asegurar que la fuente de luz sea puntual, dos lentes para colimar el rayo, un filo de navaja para incrementar el contraste de la imagen y una cámara (Huang *et al.*, 2007). Ver Figura 5.

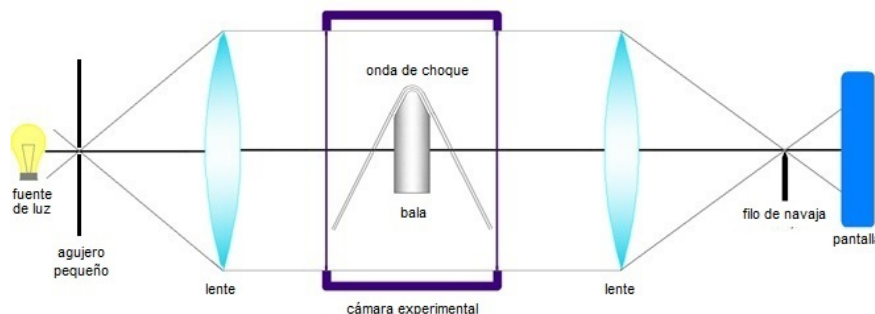


Figura 5: Arreglo Schlieren básico.

En este trabajo se modifica el arreglo básico Schlieren al sustituir la lente, la navaja y la cámara por un espejo parabólico. Adicionalmente se utiliza como fuente de luz intensa un láser verde con una longitud de onda de 520 nanómetros. El objetivo es obtener una imagen en tiempo real sobre una pantalla de visualización.

4. La difracción de la luz

Al colocar un cuerpo opaco entre una fuente puntual y una pantalla se proyecta una sombra compuesta de regiones claras y oscuras, diferentes a las que la óptica geométrica puede predecir. Dicho efecto es una característica de los fenómenos ondulatorios que ocurre cuando un frente de onda es obstruido. En este caso, la onda luminosa sufre una alteración de su amplitud o su fase. Se dice que existe *difracción* de la luz.

Si un obstáculo con una pequeña abertura se encuentra entre una pantalla de observación cercana y una fuente puntual de luz lejana, se observará en la pantalla la figura de la abertura y unas pequeñas franjas a su alrededor; si alejamos lentamente la pantalla, la imagen de la abertura adquirirá mayor estructura y las franjas se harán mas prominentes. Este fenómeno se conoce como difracción de Fresnel o de campo cercano.

Si la pantalla de observación se aleja lo suficiente del obstáculo, se producirá un cambio continuo en las franjas. A una distancia grande, la región iluminada se habrá extendido considerablemente, teniendo poco o casi nada de parecido con la abertura real. A partir de aquí, al alejar la pantalla sólo cambiará el tamaño y no la forma de la región. Este fenómeno es conocido como la difracción de Fraunhofer o de campo lejano (ver Figura 6). El cambio en los diagramas de difracción de estos dos fenómenos se observa en la Figura 7

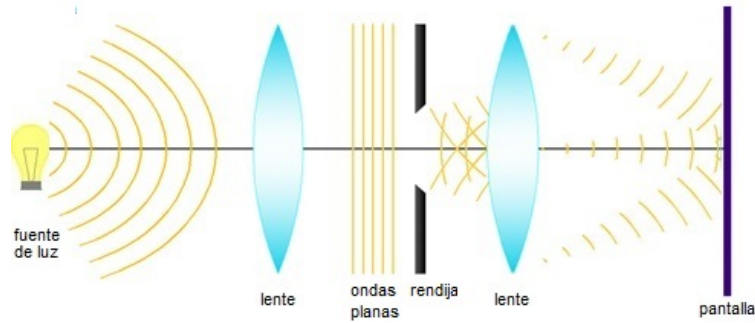


Figura 6: Arreglo para la observación de la difracción de Fraunhofer.

desde Fresnel en la base hasta Fraunhofer en la parte superior.

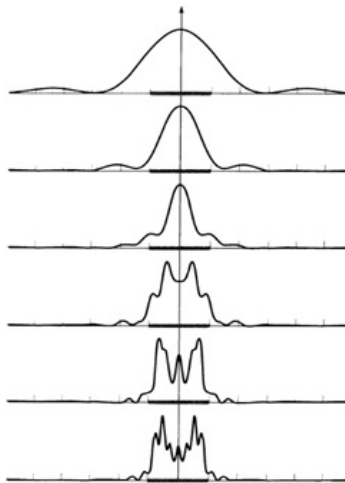


Figura 7: Sucesión de patrones de difracción a medida que la distancia aumenta (Hecht, 2003).

Supongamos que tenemos uno de los posibles sistemas para ver la difracción de Fraunhofer. Pero ahora, en vez de usar una apertura o algún tipo objeto, insertamos un objeto de fase. De nuevo el patrón de Fraunhofer se formará en la pantalla de observación, y si el plano es seguido por el objetivo de una cámara, una imagen se forma en el plano de la película. Entonces podemos fotografiar el objeto, pero los desfases aún serán invisibles. Si ahora colocamos una navaja en la distancia focal de la lente, obstruyendo parcialmente la luz, los desfases del objeto serán ahora visibles (Figura 8).

Si en el sistema de difracción de Fraunhofer con objeto de fase se intercambia la segunda lente y la pantalla por un espejo parabólico, todos los haces que lleguen paralelos a su eje óptico serán reflejados hacia su punto focal. Si un objeto cercano al espejo crea desfases, su luz se desviará hacia una nueva pantalla de observación ubicada frente al espejo. Aquí, la luz desviada y reflejada en el espejo formará una imagen de la fase de la perturbación debido a que por esta imagen pasa la luz y, por consiguiente, puede aparecer en una pantalla (Giancoli, 1991), tal como lo haría la lente sustituida en el arreglo original.

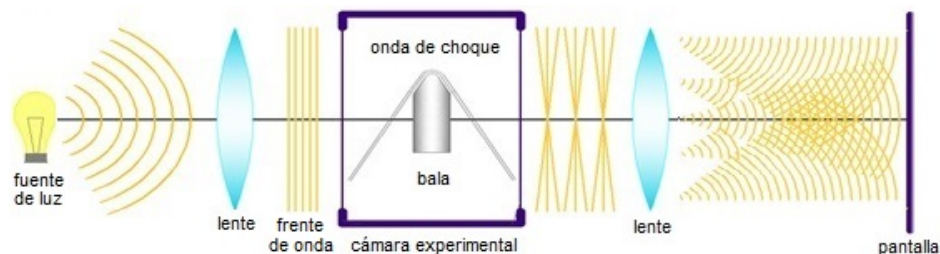


Figura 8: Sistema Fraunhofer con objeto de fase.

5. Diseño experimental

La Figura 9 muestra una representación básica del sistema Schlieren utilizado. El sistema funciona de la siguiente manera:

- 1) El espejo cóncavo concentra toda la información en su distancia focal o punto focal.
- 2) Se coloca el filtro o navaja a la distancia focal, el que es conocido como filtraje espacial dentro del ámbito de procesamiento de imágenes. A manera de ejemplo, en la Figura 9 se muestra un arreglo de cuatro fotografías: la primera es de *Lena* -la imagen más usada en el procesamiento de imágenes- que representará a la vela. La segunda es la transformada de Fourier de la imagen que muestra la concentración de la información por medio del espejo cóncavo. La tercera representa el filo de la navaja o mascarilla dentro del sistema. La cuarta fotografía se ve la imagen filtrada después de haber realizado la transformada inversa de Fourier obtenida por el filtro; aquí es donde se realiza el intercambio y combinación de las imágenes con sus frecuencias altas y bajas.
- 3) Finalmente, el ojo -o una cámara- sobre el eje óptico detectará los cambios en el sistema dinámico Schlieren logrando medir velocidades y detalles que se escapan a la vista normal.

La trayectoria del láser fue direccionada por medio de espejos hacia una lente positiva seguida de un pinhole de cien micrómetros, cuyo objetivo fue alinear la trayectoria de la luz hacia una lente negativa para expandir el haz llevándolo al centro de un espejo cóncavo de 24 pulgadas de diámetro (Figura 10). El haz reflejado fue direccionado a una pantalla de observación.

6. Resultados y conclusiones

La perturbación observada en las imágenes de la Figura 11 se debe al aire circundante que es calentado por la llama de una vela, la cual estuvo ubicada entre el espejo y la lente negativa.

El sistema aquí descrito permite utilizar con mayor facilidad el foco del espejo donde se coloca el filo de una navaja, mejorando así ligeramente el contraste. En este proceso se eliminó la típica navaja del sistema Schlieren, sin sacrificar detalle en la imagen, lo que significa que para observar cambios en la densidad o presión del aire de gran magnitud o intensidad no es trascendental utilizar el filtraje que realiza el filo de la navaja. Al usar un láser verde además de tener una fuente de luz más intensa que realza significativamente el contraste, obtenemos luz monocromática que brinda la oportunidad de hacer un estudio del gradiente de densidad de interferometría, y que sirve, además, para realizar una medición de la velocidad de la perturbación. Adicionalmente, el filtrado espacial se vuelve importante en función de la sensibilidad de las variaciones de la densidad del fluido que se desean observar.

También se observó que la imagen proyectada mostraba mayor nitidez cuando la vela se encontraba muy próxima al espejo, debido a la mayor cercanía de la fuente de iluminación.

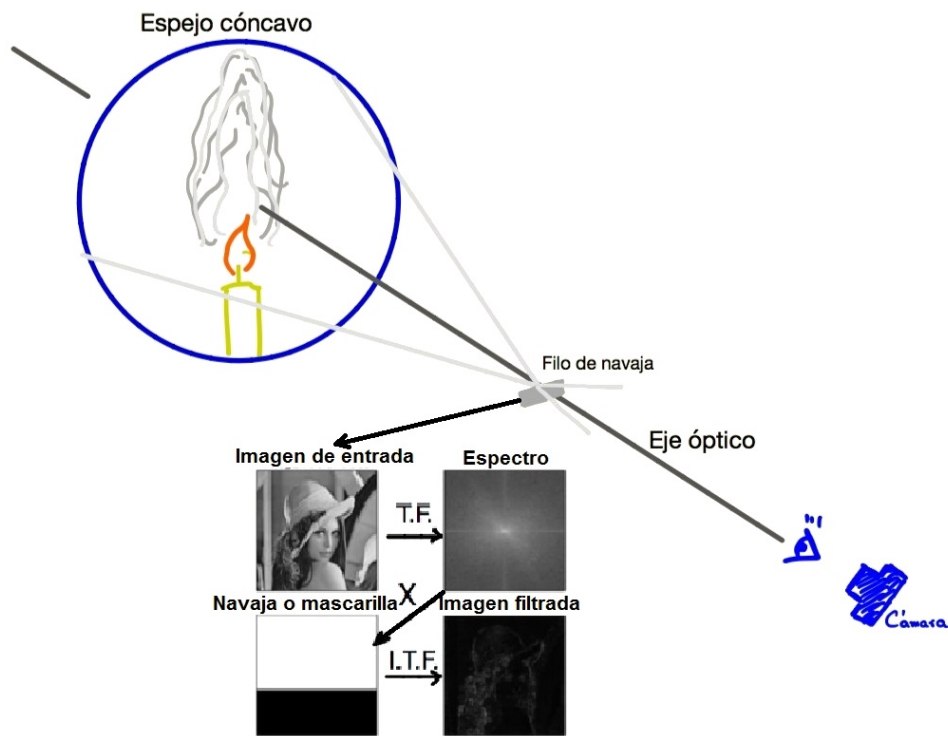


Figura 9: Dibujo esquemático del sistema Schlieren utilizado.

Finalmente, el espejo permite observar en la pantalla de observación los diferentes cambios de densidad del aire en tiempo real y sin la necesidad de tener una cámara de video o de fotografía. A diferencia del sistema Schlieren original, la serie de lentes usados además de servir para colimar el sistema fueron empleados para expandir el haz.

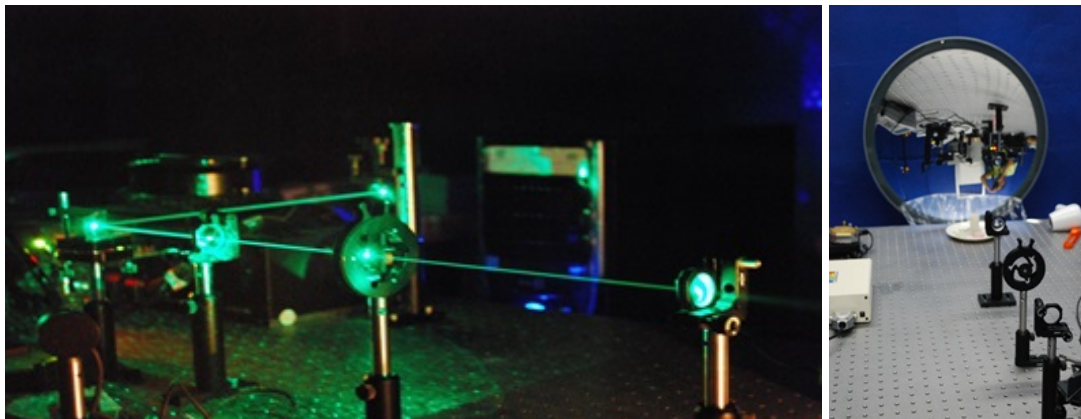


Figura 10: Arreglo experimental en funcionamiento con lentes y el rayo láser.

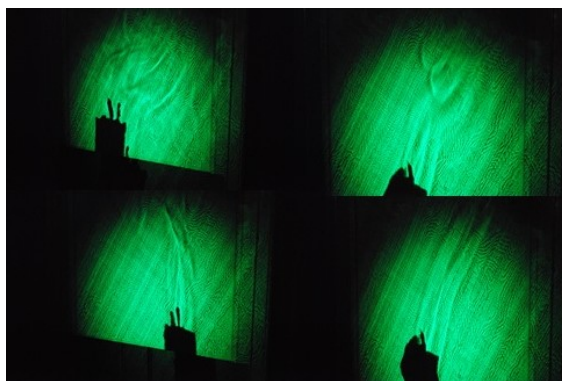


Figura 11: Imágenes de la perturbación generada por la llama de una vela.

7. REFERENCIAS

- Diccionario de Física, Colección Llave de la Ciencia, Editorial Norma, Colombia, 1998.
- Giancoli, D., Física: Principios con aplicaciones, 4a ed., Prentice-Hall Hispanoamericana, México (1991).
- Hecht, E. and Zajac, A., Óptica, 3a ed., Addison Wesley (2002).
- Hooke, R., *Micrographia: Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon*, (1665). Consultado 11/julio/2016.
<http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/HistSciTech.HookeMicro>
- Huang, C., Gregor, J., and Sullivan, J., *A modified Schlieren technique for microflow visualization*. Measurement Science And Technology, IOP Publishing, 18 (2007), 5, N32–N34.
- Ihle, C., Dalziel, S. and Niño, Y., *Simultaneous particles image velocimetry and synthetic Schlieren measurements of an erupting thermal plume*. Measurement Science And Technology, IOP Publishing, 20 (2009), 125402-125406.
- Settles, G., Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media, Springer-Verlag, Berlin (2001).
- Imágenes de espejismos en el texto (1/05/2016): <http://blogs.tn.com.ar/desmitificador/2012/04/13/>