

VISUALIZACIÓN DE PLUMAS Y MEDICIÓN DE GRADIENTES TÉRMICOS POR MEDIO DE SCHLIEREN SINTÉTICO

L. P. Thomas¹, B. M. Marino¹, R. Tovar², J. A. Castillo² y J. A. Rojas²

¹Instituto de Física Arroyo Seco, Fac. de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires
Pinto 399, 7000 Tandil, Buenos Aires, Argentina. Tel. (54) 2293-439660/61 – Fax 439669
e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

²Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.
Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, México. C.P. 62580. Tel/fax (55) 5622-9712/41

RESUMEN: Se describe la metodología por la cual se aplica la técnica de schlieren sintético a la visualización de plumas y a la medición de gradientes térmicos producidos por la presencia de fuentes de calor concentradas o extensas en el modelo de laboratorio de una habitación. El método se implementa con el objeto de estudiar la evolución de los flujos generados y los resultados se comparan con los obtenidos utilizando otras técnicas disponibles. Por ejemplo, a diferencia de lo que ocurre con la aplicación de schlieren clásico, el schlieren sintético puede implementarse fácilmente en modelos construidos a escala mayor, o incluso a escala real, destacándose por su bajo costo. Además permite obtener resultados cuantitativos muy útiles para el estudio detallado de la estratificación y de los flujos internos generados por calefactores, radiadores, cocinas y fuentes de calor en general, o de un calentamiento solar desparejo de los espacios internos de viviendas y edificios.

Palabras clave: Schlieren sintético, visualización de flujos, plumas, gradientes térmicos, modelos de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de calor como hornos, electrodomésticos, TV, computadoras, personas, radiadores y estufas, la iluminación solar directa en ciertos lugares, o las entradas de aire frío en ambientes calidos, generan flujos de aire conducidos por diferencias de temperaturas y estratificación en el interior de las viviendas. Estos deben tenerse en cuenta en el diseño para asegurar el confort de los ocupantes y la adecuada eficiencia de los sistemas de calefacción y enfriamiento.

Cuando las fuentes de calor ocupan un lugar pequeño respecto del tamaño del espacio considerado, el calor se transmite al aire circundante aumentando su temperatura y disminuyendo su densidad. Al aumentar la flotabilidad, se generan columnas de aire cálido o plumas ascendentes. El flujo es laminar cerca de la fuente y su velocidad aumenta a medida que se aleja de ella, desarrollándose posteriormente un flujo turbulento. En su movimiento ascendente, la columna de aire cálido se ensancha debido a la mezcla con el aire circundante. Además de la forma y temperatura de la fuente, varios efectos adicionales influyen en el movimiento del aire, como por ejemplo el momentum inicial del aire para fuentes con ventiladores, flujos convectivos locales, etc.

Las investigaciones sobre plumas turbulentas y convección comenzaron hace tiempo. Morton *et al.* (1956) encontraron una solución analítica para describir la evolución de las plumas turbulentas. Más tarde Baines y Turner (1969) y Linden *et al.* (1990) usaron la teoría de plumas turbulentas para describir la manera en que evoluciona la estratificación térmica generada por una fuente puntual en un ambiente cerrado, cuya solución se conoce como “modelo de llenado de caja” (o *filling box model* en inglés). Este proceso resulta del acoplamiento de la pluma térmica con el flujo interno. Cuando la pluma alcanza el techo, el flujo de aire caliente movilizad por la pluma forma una capa de menor densidad que se extiende por debajo del techo. En el límite inferior de la capa se produce una interfase o frente donde la temperatura cambia bruscamente. Si la pluma continúa alimentando esta capa, y dependiendo del número, tamaño y localización de las aberturas presentes, el frente desciende de acuerdo al modelo de Thomas *et al.* (2008). Finalmente, cuando la capa caliente alcanza el piso comienza un estado quasi-estacionario con una estratificación térmica denominada “estratificación de llenado de caja” (o *filling box stratification*) (Tovar *et al.*, 2007). Sólo en esta etapa las temperaturas aumentan proporcionalmente al ingreso de calor (Baines y Turner, 1969; Tovar *et al.*, 2007).

Cuando simultáneamente se tienen fuentes y lugares de absorción (sumideros) de calor, como en el caso de techos fríos (Juanico, 2006; Tovar y Castillo, 2009), y aberturas en diferentes posiciones conectando varios espacios (Tovar *et al.*, 2008; Thomas *et al.*, 2008) la situación es más compleja y se debe estudiar detalladamente la relación entre los flujos generados por cada elemento y las condiciones de contorno apropiadas. En este caso, generalmente se recurre a modelos a escala de laboratorio empleando criterios de similitud de la Mecánica de Fluidos para estudiar los flujos en condiciones controladas. Una posibilidad es emplear agua en vez de aire como sustancia de trabajo (Marino y Thomas, 2006; 2007). Para visualizar plumas y frentes térmicos se suele colorear el fluido emitido por la fuente (Marino y Thomas, 2006; 2007; Thomas *et al.*, 2008) o emplear técnicas ópticas como el schlieren clásico (Tovar y Castillo, 2009). La evolución de la estratificación del ambiente puede detectarse también por medio de un arreglo de sensores térmicos o por shadowgrafía (Vilte y De Paul, 2000; 2004; Tovar y Castillo, 2009).

¹ Investigador del CONICET

En este trabajo presentamos los resultados de la implementación novedosa de la técnica de schlieren sintético para determinar el campo del gradiente de densidad producido por las fuentes de calor usualmente presentes en las habitaciones de una vivienda. A continuación repasamos brevemente los fundamentos del schlieren clásico con el fin de señalar las ventajas comparativas del método propuesto a la vez que describimos la configuración experimental implementada para este trabajo. Luego presentamos los resultados de aplicar schlieren sintético y un adecuado procesamiento de imágenes para visualizar y medir gradientes térmicos. Finalmente, se presentan las conclusiones.

INSTRUMENTOS Y MÉTODOS

La técnica de schlieren clásico (Merzkirch, 1987; Tovar y Castillo, 2009) es comúnmente usada para visualizar el campo del gradiente de densidad en diferentes fluidos transparentes como aire o agua. El índice de refracción del fluido varía con la densidad y los haces de luz que lo atraviesan formando ángulos cercanos a la horizontal son desviados de acuerdo al gradiente de densidad. De acuerdo al esquema de la Fig. 1, para implementar el schlieren clásico se emplea un espejo parabólico o una lente convergente para generar haces paralelos de luz (líneas de trazo continuo) a partir de una fuente puntual, los cuales atraviesan el modelo y son focalizados por un segundo espejo parabólico o lente, mientras que los haces desviados por el modelo son detenidos por el canto de una cuchilla en el foco (línea de trazos). Así, las zonas del modelo donde se originan las desviaciones aparecen oscuras en la imagen capturada por la cámara. En general, las lentes y espejos parabólicos requeridos para focalizar los haces son caros y difíciles de ubicar, y permiten obtener un campo de visión limitado al tamaño de los espejos disponibles. Usando esta técnica es posible determinar la derivada primera del índice de refracción.

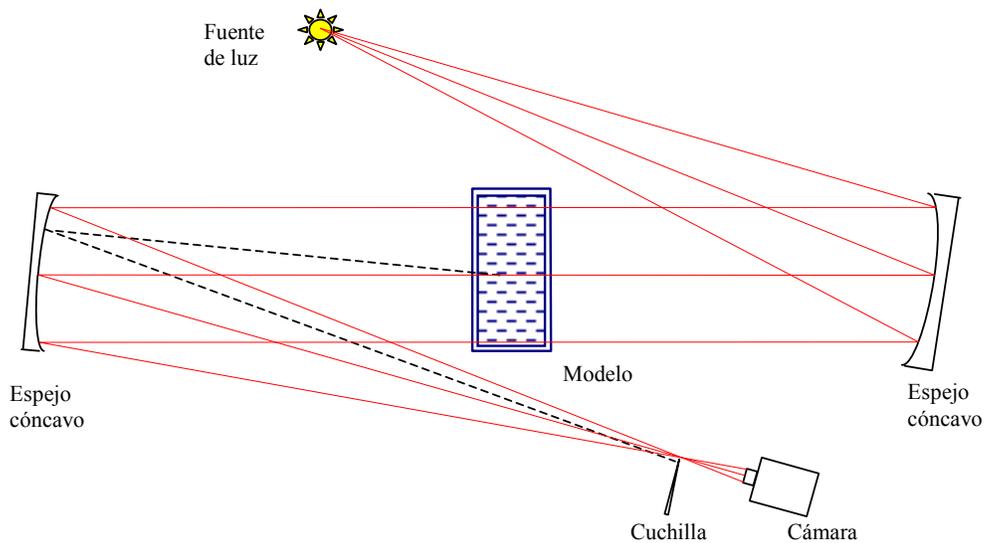


Figura 1. Disposición esquemática de elementos para aplicar el método de schlieren clásico.

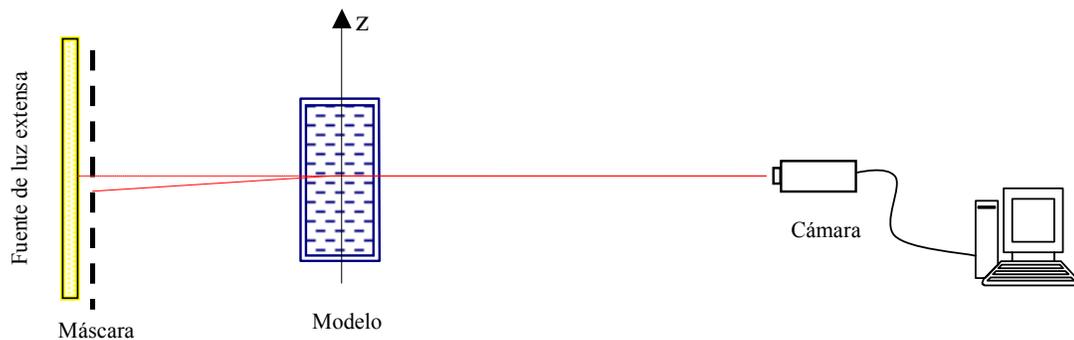


Figura 2. Disposición esquemática de elementos para aplicar el método de schlieren sintético.

El método de schlieren sintético (Dalziel, 2006; Thomas *et al.*, 2009) supera las dificultades mencionadas. No necesita lentes o espejos de calidad, y el posicionamiento y la alineación de los elementos no son críticos; además el dominio se puede escalar a cualquier dimensión sin encarecer ni dificultar la disposición experimental. Usa una máscara analizadora generada digitalmente, permitiendo medir cuantitativamente las variaciones de densidad respecto de un estado inicial. Las mediciones se realizan en las dos direcciones simultáneamente por lo que no es necesario rotar la cuchilla y repetir el experimento como en el schlieren clásico para obtener los gradientes en otra dirección.

La Fig. 2 muestra la disposición experimental típica para visualizar variaciones del índice de refracción aplicando la técnica de schlieren sintético. Los haces de luz (línea de trazo continuo) generados por una fuente de luz difusa pasan a través de una máscara y del modelo formando ángulos pequeños con la horizontal y son capturados por una cámara ubicada a una distancia mucho mayor que el tamaño de la sección de prueba. La línea de trazos representa a los haces que contribuyen a la iluminación de la zona donde existe un gradiente. La cámara detecta una máscara con leves distorsiones que son proporcionales al gradiente del índice de refracción en ese punto. Esto permite calcular las variaciones promedio de la densidad o temperatura del fluido en la sección transversal del modelo.

Las experiencias reportadas aquí se realizaron en el laboratorio del CIE-UNAM empleando una cámara de video Basler A102k con una resolución de 1392 x 1040 píxeles. La máscara localizada a 4.50 m de la cámara es una transparencia con pequeños círculos de 0.002 m de diámetro distribuidos aleatoriamente sobre un fondo negro. Antes de comenzar la experiencia se registra una secuencia de imágenes de la situación inicial. El modelo mostrado en la Fig. 3 consiste en un tanque rectangular con paredes de acrílico transparente de 0.60 m x 0.20 m x 0.25 m, lleno de agua, ubicado a 0.40 m de la máscara. En el piso se coloca un calentador eléctrico cilíndrico de 0.10 m de largo, 0.014 m de diámetro y una potencia de 41 W. La tapa del tanque es un intercambiador de calor metálico compuesto de una placa de cobre de 0.005 m de espesor soldada a un arreglo de 11 tubos de cobre de 0.01 m de diámetro. A través de los tubos se puede inyectar agua desde un baño térmico NESLAB de temperatura controlada para experiencias de techo frío. Las temperaturas en diferentes puntos del tanque también se midieron por medio de una red de 40 termopares conectados a un adquisidor Agilent 34970A. La visualización de la estructura del flujo por medio del schlieren clásico se hizo con espejos parabólicos de 0.71 m de diámetro y 7.36 m de distancia focal siguiendo el esquema representado en la Fig. 1.

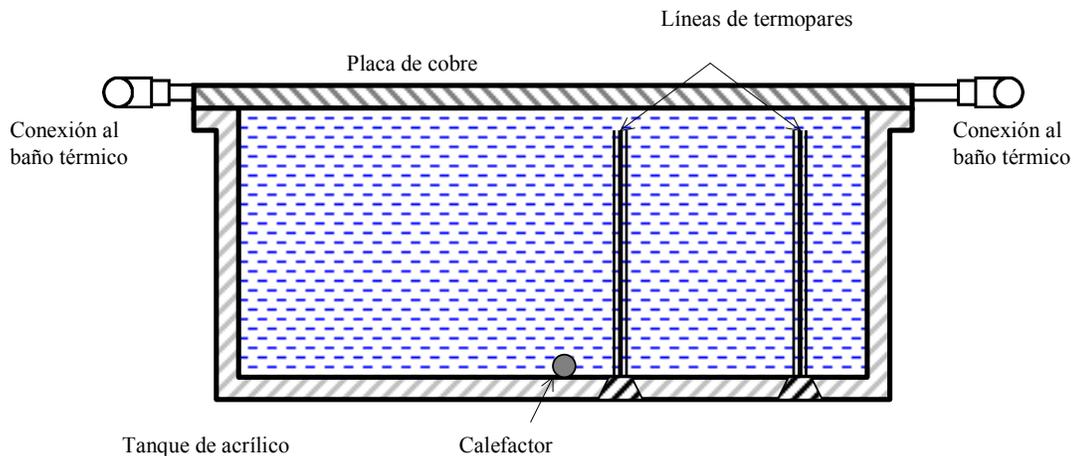


Figura 3. Esquema de una sección transversal del modelo físico.

Las imágenes fueron procesadas en el IFAS-UNCPBA utilizando el software *DigiFlow* (Dalziel, 2006) y programas propios. La secuencia de imágenes de la situación inicial se promedia para formar una imagen de referencia. Cuando la experiencia comienza, los pequeños cambios en el gradiente del índice de refracción producen la deflexión de los haces luminosos. Entonces las variaciones de las intensidades con respecto a la imagen de referencia correspondiente a cada punto luminoso de la máscara se detectan y cuantifican. El procesamiento permite la visualización cualitativa y rápida del flujo. Los resultados cuantitativos se obtienen realizando un procesamiento adicional en el que las desviaciones de la intensidad luminosa son convertidas en las componentes vertical y horizontal del gradiente de densidad o de temperatura, considerando la relación entre la densidad o temperatura y el índice de refracción para el fluido usado en el modelo, y las distancias y materiales involucrados.

RESULTADOS

En la Fig. 4 se presentan las imágenes procesadas correspondientes al inicio de una pluma y a la formación de la capa de fluido menos denso debajo del techo cuya interfase desciende paulatinamente. El calefactor se visualiza como un círculo negro en la zona central inferior de las imágenes. La pluma generada presenta un flujo laminar en la parte inferior donde su diámetro no aumenta demasiado. Las inestabilidades se desarrollan más lejos de la fuente, donde el flujo se vuelve turbulento, aumentando el diámetro de la pluma considerablemente gracias a un mayor mezclado convectivo. El fluido menos denso llega al borde superior y se extiende debajo de él formando una capa menos densa de densidad casi uniforme que se ensancha con el tiempo. La Fig. 5 muestra la imagen obtenida con schlieren clásico en una experiencia similar.

De especial interés resultan los frentes o interfaces entre el aire cálido y el aire sin calefaccionar. Para resaltar las variaciones de la densidad, se calcula el gradiente de densidad directamente de las imágenes. La Fig. 6 muestra en falso color la distribución de la magnitud del gradiente vertical de temperatura $T^{-1}\partial T/\partial z$. Las dos primeras imágenes corresponden a las dos

últimas mostradas en la figura 4 y las dos siguientes a tiempos posteriores. Las zonas oscuras representan gradientes verticales máximos y aquellas de color verde-azulado indican donde el gradiente es despreciable.

De este modo es posible visualizar mejor la formación y desarrollo de la capa de fluido menos denso debajo del techo. En efecto, en la Fig. 6a se observa una instantánea de la corriente de gravedad formada con fluido liviano que se está extendiendo debajo del borde superior de la caja. Cuando el frente de esta corriente alcanza las paredes laterales, a la vez que se diluye, desciende (Fig. 6b) generándose una diferencia de espesor de la capa de aire caliente que es más gruesa sobre las paredes que en la vecindad de la pluma. El aporte continuo de fluido menos denso por medio de la pluma lleva a la formación de una interfase cada vez mejor definida (Fig. 6c). Finalmente, la capa de aire cálido se intensifica y presenta una interfase aproximadamente horizontal (Fig. 6d) que desciende progresivamente.

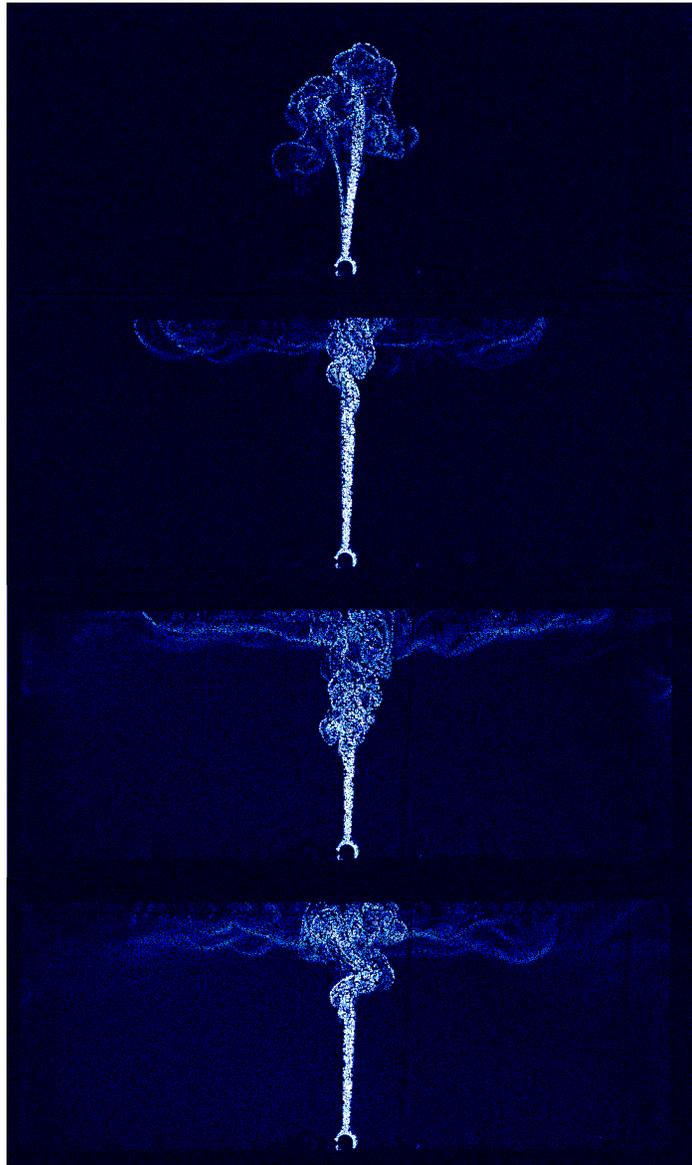


Figura 4. Imágenes obtenidas aplicando la técnica de schlieren sintético que brindan información cualitativa de la formación y evolución de una pluma generada por una fuente de calor en un medio inicialmente homogéneo a 40 s, 86 s, 168 s y 208 s después de encender el calefactor.



Figura 5. Imagen obtenida aplicando la técnica de schlieren clásico para un caso similar al de la figura 4.

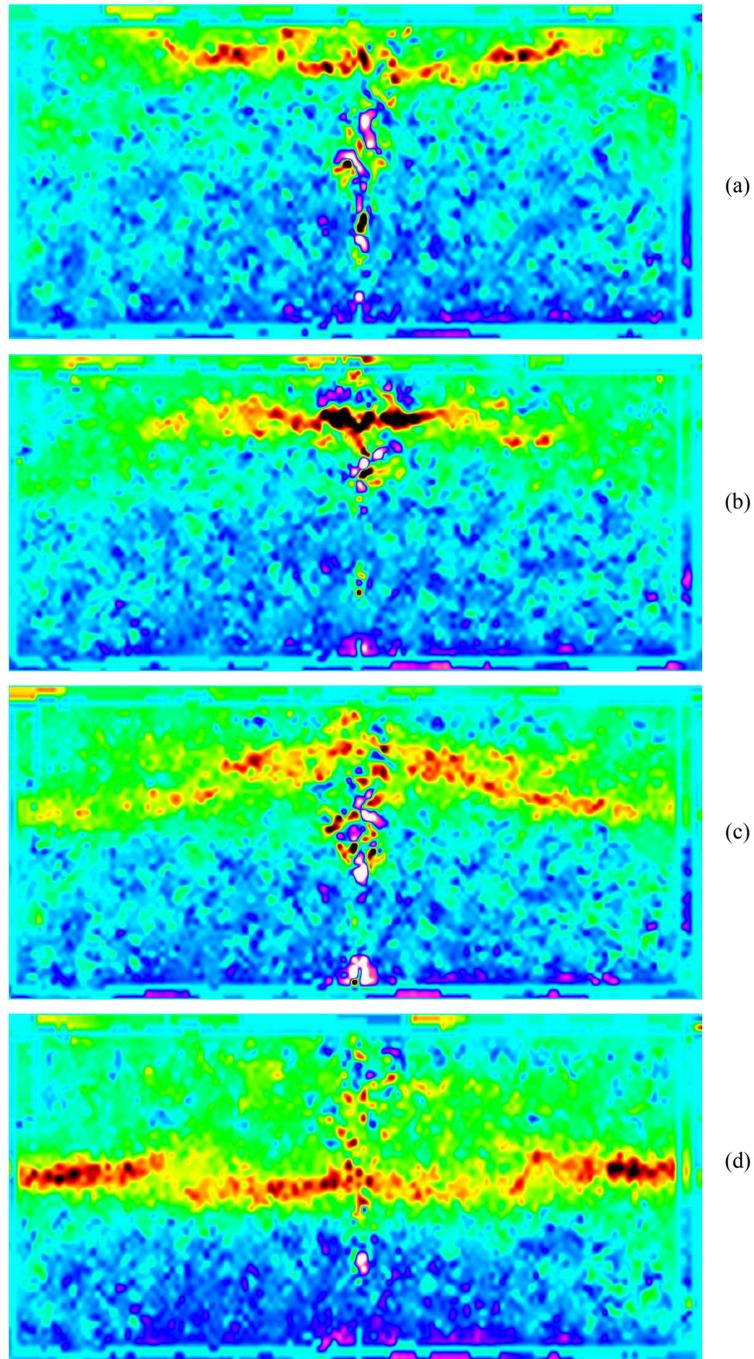


Figura 6. Distribución del gradiente vertical de densidad correspondiente a la experiencia mostrada en la figura 4 a 168 s, 208 s, 304 s y 588 s después de encender el calefactor.

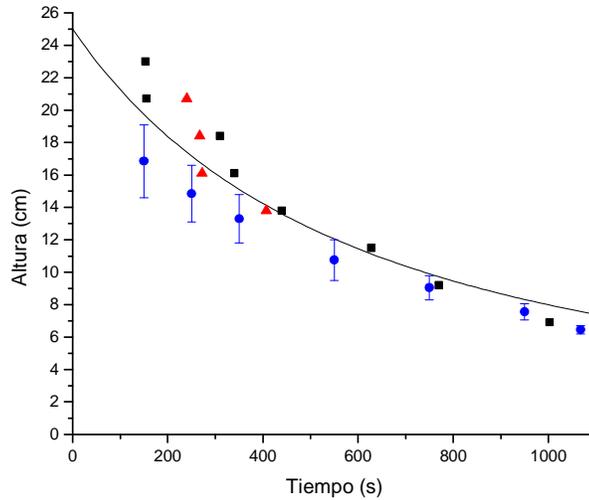


Figura 7. Evolución del frente de calor determinada por los termopares (cuadrados y triángulos) de acuerdo al método presentado por Tovar y Castillo (2009) y rangos de altura obtenidos con schlieren sintético (círculos y líneas verticales). La línea representa la solución teórica presentada por Thomas et al. (2008).

La Fig. 7 muestra la altura de la interfase en función del tiempo obtenida de diferentes formas. En la primera etapa de la evolución ($t < 400$ s), la capa de fluido menos denso no es uniforme y la altura obtenida con los termopares depende de la ubicación de los mismos (ver Fig. 3). La solución teórica con la hipótesis de una capa cálida uniforme tampoco representa bien los resultados experimentales en esta etapa. Las imágenes laterales como las mostradas en la Fig. 6 obtenidas con schlieren sintético sugieren que se debe indicar un rango de alturas. En las etapas finales del llenado de la caja, cuando se forma una capa uniforme de fluido cálido, las mediciones tienden a coincidir entre sí. Si bien la solución teórica provee los resultados para una etapa intermedia del llenado, presenta un alejamiento de éstos en los tiempos finales, lo cual será objeto de estudio de un trabajo posterior.

CONCLUSIONES

Presentamos la técnica de schlieren sintético para visualizar y cuantificar las variaciones de densidad y/o temperatura en modelos de viviendas a escala de laboratorio. Combinando la aplicación de sus principios físicos con el procesamiento de imágenes es posible relacionar el cambio de intensidad de pequeños círculos luminosos con la deflexión de la luz y calcular el gradiente de temperatura o densidad del fluido respecto de una imagen inicial de referencia.

La metodología presentada es más robusta que otras técnicas de visualización disponibles en lo que respecta al bajo costo de implementación, permite trabajar en un campo de visión más amplio y provee mediciones no-intrusivas. Además es altamente sensible y permite medir cambios del gradiente de temperatura ambiente tan pequeños como del 1%.

Un aspecto clave es el procesamiento de imágenes que, integrado a un software adecuado, permite visualizar *on-line* los resultados en forma cualitativa y posteriormente calcular los gradientes de densidad en dos direcciones y realizar procesamientos más complejos. Por lo tanto, la metodología presentada permite obtener con relativa facilidad resultados que son difíciles o imposibles de lograr con las técnicas clásicas. Los resultados pueden transformarse directamente en una matriz de números para realizar comparaciones cuantitativas con los resultados de modelos teóricos y detectar experimentalmente nuevos aspectos de procesos físicos involucrados en flujos complejos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Cooperación Internacional CONICET-CONACYT y los proyectos PICT ANPCyT 34088/05 (Argentina), CONACYT 25116 y el Programa de Intercambio Académico de la UNAM (México).

REFERENCIAS

- Baines W.D. y Turner J.S. (1969). Turbulent buoyant convection from a source in a confined region. *J. Fluid Mech* 37, 51-80.
- Dalziel S.B. *DigiFlow User Guide*. <http://www.damtp.cam.ac.uk/lab/digiflow/> (2006).
- Juanico L. (2006). Diseño de techo solar adaptable innovativo para refrigeración y calefacción hogareña pasivas. *AVERMA* 10, 5.21-28.
- Linden P.F., Lane-Serff G.F. y Smeed D.A. (1990). Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. *J. Fluid Mech.*, 212, 300–335.
- Marino B.M. y Thomas L.P. (2006). Modelado en el laboratorio de los flujos de ventilación natural usando criterios de similaridad dinámica. *AVERMA* 10, 139-146.
- Marino B.M. y Thomas L.P. (2007). Modelado en el laboratorio de la ventilación natural generada por diferencias de temperatura entre el exterior y el interior en una vivienda. *AVERMA* 11, 8.43-50.
- Merzkirch W. (1987) *Flow Visualization* 2nd ed., Academic Press, USA.
- Morton B. R., Taylor G.I. & Turner J.S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc. A.* 234,1-23.
- Thomas LP, Marino BM, Tovar R, Linden PF. (2008). Buoyancy-driven flow between two rooms coupled by two openings at different levels. *Journal of Fluid Mechanics* 594, 425-443.
- Thomas LP, Marino BM y Dalziel SB. (2009). Synthetic Schlieren: Determination of the density gradient generated by internal waves propagating in a stratified fluid. *J of Phys: Conf Series* **166**, 012007
- Tovar R, Linden PF, Thomas LP. (2007). Hybrid ventilation in two interconnected rooms with a buoyancy source. *Solar Energy* 81, 683-691.
- Tovar R. y Castillo JA. (2009). Enfriamiento pasivo por techos fríos en habitaciones. *Memorias de la 33 Semana Nacional de Energía Solar*, Guadalajara, México, 8 de septiembre al 3 de octubre 2009.
- Vilte M., De Paul I (2000). "Transferencia térmica por convección natural en un recinto cerrado en condiciones de equilibrio térmico y dinámico". *AVERMA* 4, 2.87-92.
- Vilte, M y De Paul I. (2004). Convección natural en aire, medidas de temperatura y visualización del flujo. *AVERMA* 8, 8.25-30.

ABSTRACT

We present the schlieren synthetic technique applied to visualize plumes evolution and measure thermal gradients variations produced by concentrated or extended heat sources in a laboratory model of a room. This methodology is used to study the evolution of the generated flows and the results are compared with those provided by other usual techniques. For example, unlike that obtained applying the classic schlieren technique, the synthetic schlieren may be implemented easily in models of larger scale, or even at real scale, at very low cost. It allows obtaining quantitative results that are useful to study in detail the evolution of the ambient stratification and the internal flows generated by heating systems, radiators, cooks and other common home heat sources, or by a differential solar heating of the internal spaces in houses or buildings.

Key words: Synthetic schlieren, flow visualization, plumes, thermal gradients, laboratory modeling