

## **FLUJOS GENERADOS POR UNA FUENTE DE CALOR EN UN RECINTO CON CIELORRASO A TEMPERATURA CONSTANTE Y ABERTURAS**

**L. P. Thomas<sup>1</sup>, B. M. Marino<sup>1</sup>, R. Tovar<sup>2</sup> y J. A. Castillo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Flujos Geofísicos y Ambientales, Fac. Ciencias Exactas, Univ. Nac. del Centro de la Prov. de Buenos Aires  
Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina. lthomas@exa.unicen.edu.ar

<sup>2</sup>Centro 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:**

Por medio de un modelo físico de laboratorio se estudia la evolución de la distribución de temperatura en el fluido que ocupa el interior de un espacio cuyo contorno superior se mantiene a temperatura constante y por debajo de la inicial, luego de encender una fuente de calor de tamaño reducido y abrir una abertura. La visualización del flujo resultante se realiza empleando la técnica de schlieren sintético, mientras un arreglo de termopares permite medir la temperatura a alturas específicas desde el piso. Se analizan las contribuciones de cada fuente o sumidero de calor y su influencia en el flujo transitorio hasta alcanzar el régimen estacionario final cuando se logra el balance de las diferentes contribuciones.

**Palabras clave:** ventilación, cielorraso enfriado, plumas térmicas, modelado físico, schlieren sintético

### **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día la ventilación ocupa un lugar importante en el proceso de diseño de un edificio ya que sus ocupantes esperan buenos estándares de calidad del aire interior y confort térmico. Durante las últimas décadas la investigación de la ventilación fue experimentando cambios notorios. Primero el esfuerzo se dirigió a comprender los mecanismos de la infiltración de aire en edificios para controlar y a veces reducir la ventilación fortuita y la conservación de la energía. Pero en algunos casos, la falta de una adecuada ventilación creaba problemas asociados con la calidad del aire en el edificio dando lugar al término genérico “síndrome del edificio enfermo”. Luego, los esfuerzos se concentraron en comprender las causas de los edificios enfermos, lo cual llevó a introducir nuevos conceptos de ventilación (tal como la edad del aire) y nuevas unidades de la calidad del aire, y a aumentar el flujo de aire hacia el exterior. Más tarde el énfasis por reducir el consumo energético y crear conciencia ambiental ha concentrado la atención de los investigadores sobre el potencial de la ventilación natural y el control del ocupante sobre el espacio. Asistimos entonces a la aparición de nuevos recursos complementarios basados en el uso de “sistemas pasivos”, llamados así por recurrir a las cualidades del propio ambiente para lograr el confort interior requerido (Givoni, 1969; Nahar *et al.*, 1999; Omer, 2008), como el techo verde, los techos fríos o los cielorrasos enfriados, etc., surgidos como resultado de la necesidad de mejorar la calidad de vida de las personas y el ahorro energético. Puesto que se estima que la gente gasta más del 90% de su tiempo en ambientes artificiales (en su residencia, lugar de trabajo o vehículo de transporte), el propósito de un sistema de ventilación adecuado es proveer el microclima aceptable en un dado ambiente (Awbi, 2003). En este contexto, el microclima se refiere tanto al ambiente/entorno térmico como a la calidad del aire y ambos factores deben considerarse en el diseño de un edificio.

El interés en el uso de la ventilación natural en edificios también persigue el fin de reducir el consumo energético implicado por el empleo de acondicionadores de aire para remover el calor generado por las diversas fuentes internas (Linden, 1999; Baker y Steemers, 2000). Afortunadamente, la ventilación natural (dependiendo de las condiciones atmosféricas exteriores) puede emplearse combinada con otros sistemas pasivos en un mismo edificio para asegurar la esperada calidad del aire interior y para establecer las condiciones propicias de bienestar antes de activar la ventilación forzada. Debido a esto, un número importante de investigaciones experimentales y teóricas fueron realizadas en relación con los mecanismos de ventilación natural, la mayoría de las cuales se concentraron en los flujos conducidos por la fuerza de flotación originada en la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior, o por el viento (Linden, 1999; Hunt y Linden, 1999, y referencias allí citadas). También se estudiaron las diferentes estratificaciones verticales generadas en ambientes adyacentes con distintas cargas de calor que pueden conducir flujos a través de las aberturas dispuestas en las paredes divisorias (Thomas *et al.*, 2008).

Un sistema que atrajo la atención por su potencial en el ahorro energético, su capacidad de establecer una adecuada calidad del aire interior y brindar confort térmico es el “cielorraso enfriado (CE)” (del inglés *cooled-ceiling*). El más difundido consiste en paneles radiantes mantenidos a temperatura constante por la circulación de agua a través de tubos metálicos interconectados que absorben el calor generado en el interior y el proveniente de las pérdidas generadas en la envolvente durante las horas de máxima temperatura exterior. Existen diferentes formas de mantener constante la temperatura de estos paneles (Alamdari *et al.*, 1998; Runsheng *et al.*, 2003; Dilip, 2006) y la humedad (Niu *et al.*, 2002). Sin embargo, el confort

---

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

logrado y la eficiencia del sistema están relacionados en buena medida con el enfriamiento del aire en el interior de la habitación por radiación y convección (Jeong y Mumma, 2007; Karadag, 2009), conjuntamente con la estratificación de ese espacio (Novoselac y Srebric, 2002). Estos sistemas eventualmente pueden integrarse a otros sistemas pasivos (Juanico, 2006; Jiang *et al.*, 2001).

El propósito de nuestro estudio es profundizar la comprensión de los flujos generados entre varios espacios relacionados y con el exterior continuando estudios previos (Thomas *et al.* 2008, 2011a, 2011b y referencias citadas). En este trabajo investigamos experimentalmente el flujo en un espacio único dotado de cielorraso enfriado, con fuente interna de calor y aberturas que pueden operarse alternativamente. Aplicando la metodología del modelado de pequeña escala que usa agua en lugar de aire (Linden *et al.*, 1990; Baker y Linden, 1991), Thomas *et al.* (2011a, b) estudiaron la evolución del flujo originado por una pluma térmica en una habitación cerrada con CE caracterizando los regímenes transitorio y estacionario a partir de los resultados conocidos del proceso convectivo generado por la combinación de una o más plumas en una habitación aislada (Morton *et al.*, 1956; Baines y Turner, 1969; Hunt *et al.*, 2001; Kaye y Hunt, 2004; Fitzgerald y Woods, 2010) y la comparación con los experimentos de Rayleigh-Benard (ver por ejemplo Getling, 1998). En el caso estudiado aquí, agregamos a dicha configuración ventilas, estudiamos la evolución del flujo de aire ocasionado por una fuente de calor y la interacción con el exterior, y analizamos los regímenes obtenidos. Para visualizar el progreso del flujo usamos la técnica de schlieren sintético reportada por Thomas *et al.* (2009) mientras que para cuantificar las variaciones de temperatura empleamos un arreglo de termopares. A continuación describimos brevemente la disposición experimental, luego presentamos los resultados y finalmente las conclusiones.

## DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL Y DIAGNÓSTICAS

La Fig. 1 ilustra el modelo físico empleado compuesto por un tanque con paredes de acrílico transparente de 1.60m×1.60m de base y 1.20m de alto, lleno de agua, que simula el ambiente. Desde la parte superior se suspende un recipiente rectangular también con paredes de acrílico transparente cuyas medidas interiores son 0.60m de largo, 0.20m de ancho y 0.25m de alto que simula el espacio cuyo flujo interno de aire se pretende estudiar. Aberturas de 0.025m de diámetro localizadas en una pared lateral se pueden abrir y cerrar permitiendo el intercambio de fluido entre el recipiente y su entorno. Antes de cada experimento, se hace circular el agua en el tanque y en el recipiente con bombas durante al menos media hora para uniformizar la temperatura inicial. El considerable volumen de agua contenido en el tanque evita las variaciones de temperatura durante los experimentos.

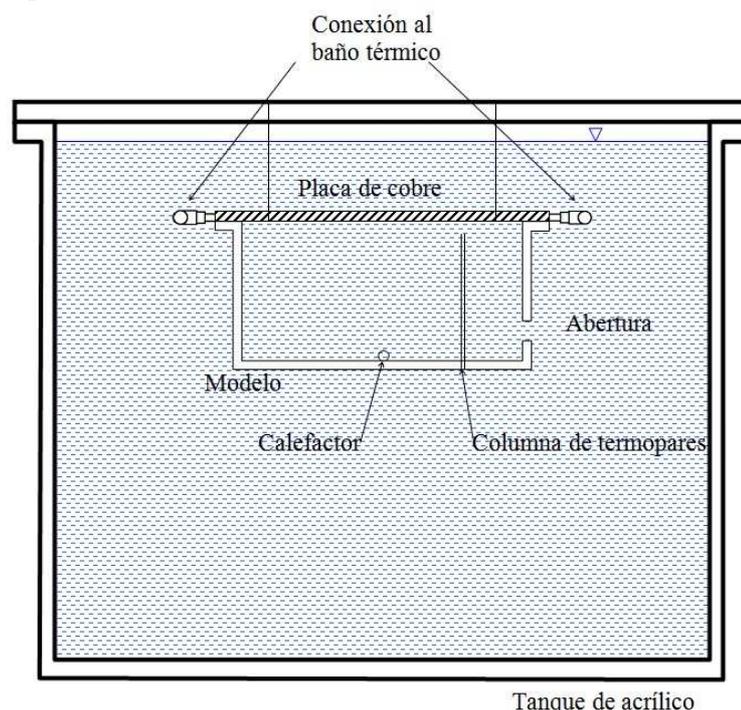


Figura 1. Principales componentes de modelo físico empleado.

El contorno superior del recipiente es un intercambiador de calor compuesto de una placa de cobre de 0.005m de espesor soldada a un arreglo de 2 combinaciones de 5 tubos (cada una) de cobre de 0.01m de diámetro conectados con sus entradas y salidas ubicadas en lados opuestos para producir una distribución homogénea de temperatura en la placa. Por los tubos se hace circular agua desde un baño térmico *NESLAB* de temperatura controlada. Los tubos y la tapa del tanque se aíslan por medio de una capa de neopreno de 0.02m de espesor. En el centro del contorno inferior se coloca un calentador eléctrico cilíndrico de 0.10m de largo, 0.014m de diámetro y 100W de potencia nominal. Cambiando la tensión eléctrica aplicada con un *Variac* se regula la potencia entregada en el rango 10-100W, la que se mantiene constante durante cada experimento. Las temperaturas en 5 puntos diferentes del intercambiador, la del calefactor, la del laboratorio y del fluido en el tanque se miden

a intervalos de 5s con una red de termopares tipo  $T$  conectados a un adquisidor *Agilent 34970A*. En el interior de la caja se disponen 10 termopares sostenidos por una varilla y distanciados 0.023m entre sí.

La visualización del flujo generado en el interior del recipiente se logra aplicando la técnica de schlieren sintético (Thomas *et al.*, 2009). Los haces generados por una fuente de luz difusa colocada detrás del tanque atraviesan una máscara y el modelo físico formando ángulos pequeños con la horizontal, antes de ser capturados por una cámara de video *Basler A102k* con una resolución de 1392×1040 píxeles ubicada a 4m del modelo. Inicialmente se adquiere una imagen cada 5s, y cada 10 min después de una hora del comienzo de la experiencia y hasta aproximadamente 12 h después. Las imágenes son post-procesadas utilizando principalmente el software *DigiFlow* (Dalziel, 2006).

## RESULTADOS

### a) Flujo de aire en un espacio cerrado con cielorraso enfriado

La Fig. 2 muestra una secuencia de imágenes del flujo generado por la reducción rápida de la temperatura del contorno superior, cuando la fuente de calor está apagada y las aberturas permanecen cerradas. Observamos que en la proximidad del cielorraso se genera una capa de fluido de temperatura similar a la de éste (Fig. 2a), la cual es más densa que el resto del fluido. Inestabilidades del tipo estudiado por Rayleigh-Benard (Thomas *et al.*, 2010a) se desarrollan formando pequeñas intrusiones o *fingers* que en conjunto definen un frente que desciende hasta llegar al piso del receptáculo (Figs. 2b-c). Posteriormente se genera un proceso convectivo que abarca todo el espacio mediante el cual el contorno superior absorbe la energía interna del fluido (esquemático por la línea blanca en Fig. 2e). Luego deducimos que, para alcanzar el estado estacionario de temperatura constante en todo el espacio, se suceden dos regímenes vinculados a la formación primero y al mantenimiento después de la convección.

La Fig. 3 muestra la evolución temporal de la diferencia térmica  $\Delta T$  entre la temperatura medida a lo largo de la columna de termopares en el fluido y la del contorno superior cuando ésta disminuye 4 °C en forma abrupta, para el caso mostrado en la Fig. 2. Se observa que todos los termopares miden temperaturas similares y que luego de 100s, aproximadamente, la diferencia de temperatura alcanza un máximo para luego disminuir levemente hasta los 350s. A partir de los 1000s se tiene una situación en la que el contorno superior enfría el fluido en forma exponencial con un tiempo característico de 5077s. En la medición del termopar más próximo a la placa superior aparecen fluctuaciones bruscas (líneas rojas verticales) que revelan la presencia de una capa límite con celdas convectivas no estacionarias generadas por el enfriamiento del fluido que está en contacto con el cielorraso. Estas fluctuaciones se originan en las pequeñas plumas de fluido de menor temperatura formadas debajo del cielorraso y que cambian de forma y ubicación a lo largo del tiempo (Thomas *et al.*, 2011b).

### b) Flujo de aire en un espacio cerrado con cielorraso enfriado y fuente de calor

En la Fig. 4 se presenta una secuencia de imágenes procesadas ilustrando el flujo generado en el interior del modelo físico cuando la temperatura del contorno superior disminuye 4°C y se enciende simultáneamente el calefactor (círculo negro en la zona central inferior), mientras las aberturas permanecen cerradas. La Fig. 4a muestra una pluma cuya parte inferior tiene un tamaño casi constante, indicando que el flujo es laminar en esa parte. Las inestabilidades se desarrollan lejos de la fuente en forma de vórtices donde generan un flujo turbulento y mayor mezclado convectivo del fluido menos denso de la pluma. Por su parte, la reducción de la temperatura del cielorraso genera (como en el caso (a)) intrusiones descendentes de mayor densidad que la del resto del fluido. Las intrusiones interactúan con la pluma desestabilizándola como se observa en las Figs. 4b-c. Por su parte, la pluma contrarresta el descenso de las intrusiones cerca de ella, mientras que las intrusiones más alejadas descienden hasta llegar al piso del receptáculo (4c). La interacción entre la pluma y las intrusiones descendentes es cada vez más intensa (4d) dando lugar a la formación de dos vórtices estables bien definidos (4e). La pluma central, entonces, actúa como una forzante del fluido hacia el contorno superior, que se enfría y desciende por las cercanías de las paredes laterales.

La Fig. 5 muestra la diferencia térmica  $\Delta T$  entre la temperatura medida en los diferentes niveles del fluido y la del contorno superior en función del tiempo para el caso mostrado en la figura anterior. La rápida disminución de la temperatura del cielorraso propicia la disminución de la temperatura en todo el fluido, y al ser las temperaturas en los diferentes niveles muy parecidas no se produce estratificación en el espacio interior. A diferencia del caso (a), en éste se alcanza una diferencia de temperatura máxima que es menor que la diferencia inicial impuesta por el contorno superior, lo cual revela un paulatino balance entre el calor liberado por la fuente y el absorbido por el cielorraso. Luego el régimen tiende a estabilizarse con una diferencia de temperatura algo menor que la máxima alcanzada, también con esporádicas aunque bruscas fluctuaciones de la temperatura medida en el termopar más próximo al techo.

### c) Flujo de aire en un espacio cerrado con cielorraso enfriado y una abertura abierta al exterior

En la Fig. 6 se presenta una secuencia de imágenes del flujo generado por la reducción de la temperatura del contorno superior, sin encender la fuente, y con una abertura abierta en la parte inferior derecha. Como en el caso (a), el cambio de temperatura del cielorraso genera intrusiones que descienden hasta el piso (6a-c). La temperatura externa es igual a la temperatura inicial del fluido interior, de modo que no hay flujo a través de la abertura hasta que la diferencia térmica entre el exterior y el interior en ese nivel es apreciable. Cuando esto ocurre se genera un intercambio por el que el fluido interno con menor temperatura sale y el fluido externo entra al receptáculo y asciende (6d-e) formando una pluma de características similares a la mostrada en la Fig. 4. Así, la abertura cumple un rol equivalente al de una fuente virtual en la pared que aumenta paulatinamente su intensidad. El caudal de aire saliente es el mismo que el entrante por conservación de la masa, y a su vez es equivalente al del fluido que ingresa en la pluma generada por esa fuente virtual.

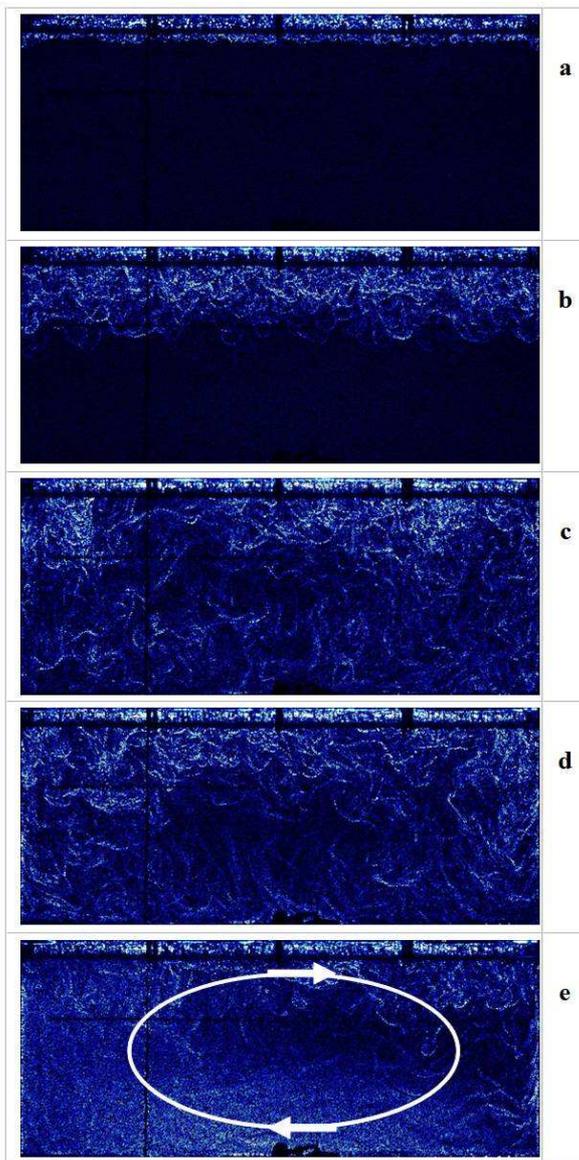


Figura 2. Imágenes obtenidas con schlieren sintético (a) 20, (b) 55, (c) 175, (d) 1000 y (e) 3180 s después de disminuir la temperatura del contorno superior en 4°C respecto de la temperatura inicial del fluido.

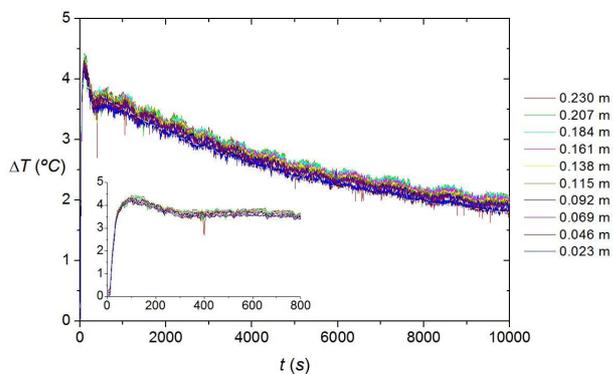


Figura 3. Evolución de la diferencia de temperatura  $\Delta T$  para el caso de la Fig. 2. En el gráfico inserto se muestra una amplificación de los primeros 800s. Se indican las alturas de los termopares respecto del piso.

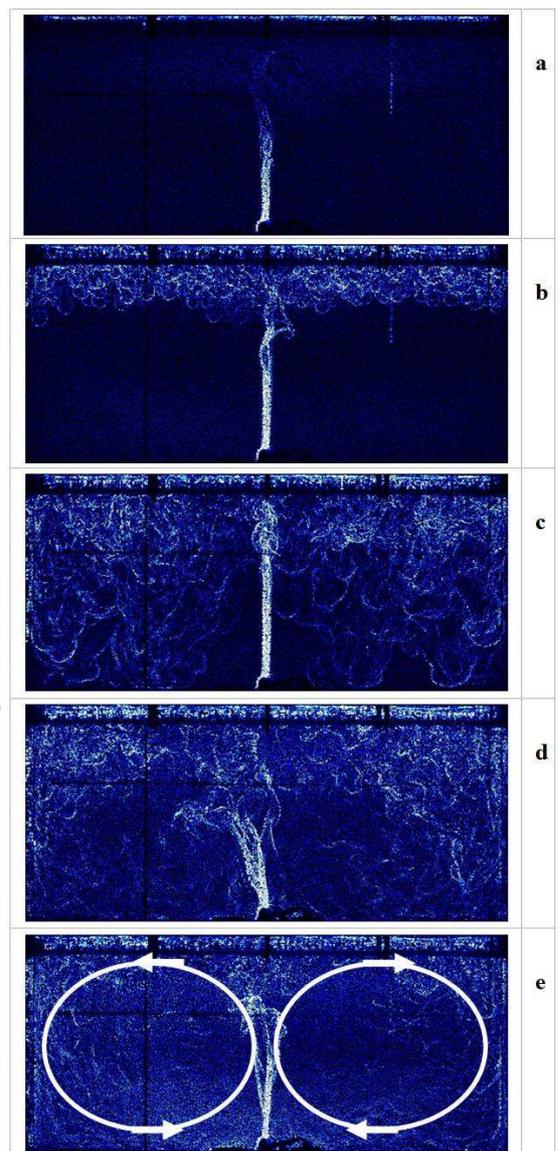


Figura 4. Imágenes obtenidas con schlieren sintético (a) 30, (b) 75, (c) 150, (d) 1000 y (e) 3195 s después de disminuir la temperatura del contorno superior en 4°C respecto de la temperatura inicial del fluido y encender la fuente de calor.

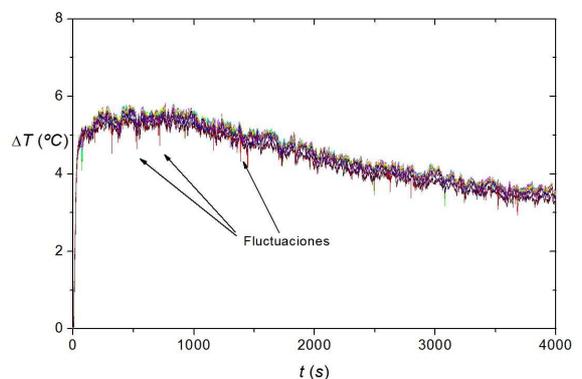


Figura 5. Evolución de la diferencia de temperatura  $\Delta T$  para el caso mostrado en la Fig. 4.

Las mediciones de temperatura mostradas en la Fig. 7 presentan un comportamiento similar al de la Fig. 5, confirmando la analogía entre los flujos generados por una abertura abierta al exterior y por una fuente interna. El caudal de fluido (a mayor temperatura) entrante depende de la temperatura interior y se logra disminuir el tiempo en el que se mantiene la máxima diferencia de temperatura. Debe observarse que la pluma generada por la abertura se ubica en un lateral, a diferencia de la originada por la fuente que está en el centro del espacio. El análisis detallado de la secuencia de imágenes permite detectar que el fluido enfriado por el contorno superior desciende en el receptáculo como indican las flechas (6e). Las fluctuaciones de la temperatura del fluido que se encuentra en las cercanías del contorno superior parecen disminuir con el tiempo.

#### *d) Flujo de aire en un espacio cerrado con cielorraso enfriado, fuente de calor y una abertura abierta al exterior*

La Fig. 8 muestra algunas de las imágenes obtenidas en el receptáculo con una abertura abierta, cuando se reduce la temperatura del contorno superior y se enciende la fuente al mismo tiempo. Inicialmente, el flujo presenta las mismas características señaladas en la situación mostrada en la Fig. 4. La fuente aporta fluido cálido que es enfriado por el cielorraso y no se aprecia un intercambio significativo con el exterior (8a-b). Cuando la temperatura disminuyó lo suficiente al nivel de la abertura, comienza el intercambio en ese lugar (8c), que se incrementa gradualmente (8d) desestabilizando el flujo que se había generado, formando vórtices que dan cuenta del movimiento de fluido cálido ascendente desde la fuente y la abertura, y del fluido descendente más frío proveniente de la vecindad del cielorraso. Finalmente, se llega a una situación similar a la de Fig. 6e donde estos vórtices no son tan importantes. Las mediciones de las variaciones de temperatura mostradas en la Fig. 9 muestran que en este caso también se obtiene un máximo como en las situaciones (b) y (c), pero el régimen estacionario se alcanza más rápidamente. Contribuyen a ello la fuente de calor y el flujo de fluido fresco proveniente del exterior que aumenta progresivamente hasta lograr el balance con la extracción de calor por el contorno superior. También aquí se observan fluctuaciones de la temperatura en la vecindad del cielorraso de magnitud aproximadamente constante sugiriendo ser generadas fundamentalmente por la condición de contorno superior.

## **RESUMEN Y CONCLUSIONES**

Analizamos experimentalmente la evolución del flujo generado en un espacio rectangular cuando la temperatura del techo se reduce bruscamente y se enciende una fuente de calor interna cuando existe una abertura lateral que permite el intercambio de fluido con el ambiente exterior, el cual se encuentra a la misma temperatura que la inicial del fluido que ocupa el interior. Se comparan cuatro casos particulares que permiten entender las principales características de los flujos desarrollados y se observan las similitudes y diferencias fluidodinámicas para cada caso. La técnica de schlieren sintético permite visualizar las variaciones de temperatura, mientras que una red de termopares se usa para medir la evolución de la temperatura en puntos específicos.

La utilización del cielorraso enfriado impide la formación de una estratificación significativa en el modelo físico y la temperatura en todos los niveles tiende exponencialmente a la impuesta por el contorno superior. El flujo en el interior del receptáculo muestra una tendencia a tomar la forma de un vórtice que abarca todo el espacio. Por otra parte, el uso de fuentes y aberturas tienen consecuencias análogas, ya que generan plumas de fluido que ascienden hacia el cielorraso. En estos casos la diferencia de temperatura alcanza un valor máximo que es mayor a la diferencia inicial de temperatura con el contorno superior para luego tender a una situación estacionaria. En el caso de emplear aberturas, sin embargo, la intensidad del intercambio depende de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, que en las situaciones estudiadas comienza desde cero hasta alcanzar el máximo para luego ajustarse a la situación estacionaria. Esta variación hace que, con aberturas, se alcance más rápidamente la máxima diferencia de temperatura con respecto a la del cielorraso y por ende la situación estacionaria. También, la generación de fluctuaciones en la capa límite próxima al contorno superior es algo menor que con una fuente, probablemente porque la fuente suministra fluido a una temperatura mayor que llega al techo como una pluma turbulenta. El flujo en el interior del modelo tiene la forma de dos vórtices que actúan en direcciones opuestas en el caso de la fuente centrada, mientras que la abertura lateral genera un flujo más uniforme. Cuando la fuente de calor se enciende y la abertura se abre simultáneamente, se generan las dos plumas que compiten e influyen entre sí. La producida por la fuente impone inicialmente las características del flujo. A medida que la pluma generada en la abertura gana intensidad, comienza una interacción que cambia el flujo hasta llegar al régimen estacionario donde las acciones de ambas plumas son importantes.

En este trabajo reportamos los resultados de algunos casos típicos que permiten inferir, en buena medida, las principales características de los flujos desarrollados cuando se disponen de un cielorraso a temperatura constante menor que la temperatura inicial del fluido, una fuente de calor y una abertura que comunica con un ambiente externo a la misma temperatura que la inicial interna. Existe un número apreciable de variantes de las situaciones presentadas. El techo, la fuente y la abertura podrían tener una temperatura, una potencia o un diámetro diferente, respectivamente. La temperatura exterior podría ser distinta a la temperatura inicial del interior de la caja. La fuente y la abertura podrían estar, también, en diferentes ubicaciones respecto a las reportadas. Hemos analizado una buena parte de estas situaciones por medio de más de treinta experimentos y los flujos desarrollados pueden caracterizarse a partir de los resultados de los cuatro casos presentados aquí.

La metodología que involucra el estudio de flujos de laboratorio en la que el aire es reemplazado por agua permite emplear técnicas como la de schlieren sintético para una fácil visualización del flujo y obtener resultados cuantitativos por medio de procesamiento digital de las imágenes que son de interés para el desarrollo de modelos analíticos y la comparación de sus resultados. Tales modelos analíticos están siendo desarrollados y formarán parte de un próximo trabajo. Por otro lado, los números adimensionales relevantes pueden mantenerse dentro de cierto rango en los modelos físicos para lograr una similaridad dinámica con situaciones reales, y los resultados en general pueden extrapolarse a los flujos producidos en situaciones y dimensiones que son más difíciles de analizar con detalle. La comparación con los prototipos a escala real y en configuraciones espaciales más complejas, como los que se dan en viviendas y edificios, forma parte también de otro futuro trabajo.

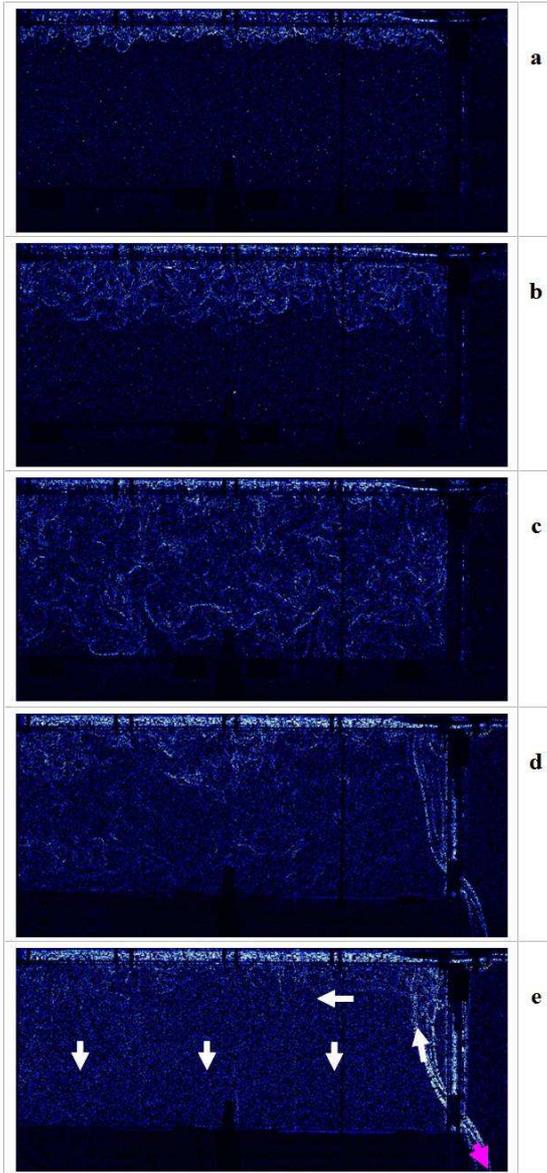


Figura 6. Imágenes obtenidas con schlieren sintético (a) 20, (b) 50, (c) 120, (d) 1000 y (e) 3655 s después de disminuir la temperatura del contorno superior cuando una abertura lateral es abierta. La temperatura inicial del fluido interior es igual a la del exterior.

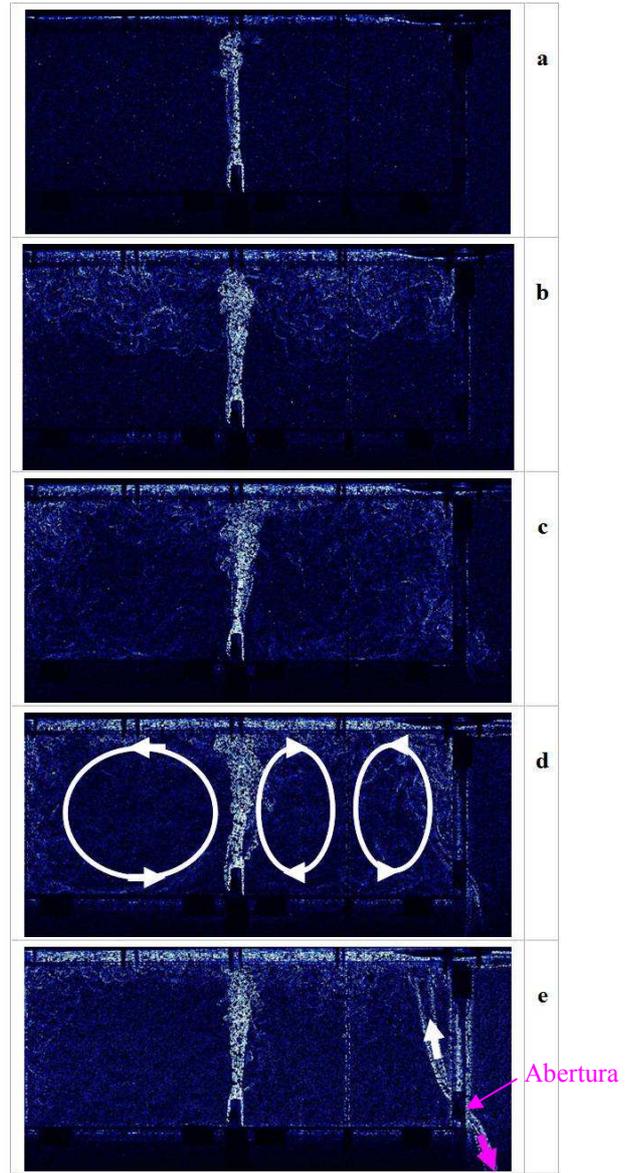


Figura 8. Imágenes obtenidas con schlieren sintético (a) 25, (b) 65, (c) 150, (d) 1000 y (e) 16665 s después de disminuir la temperatura del contorno superior cuando una abertura lateral es abierta y el calefactor encendido.

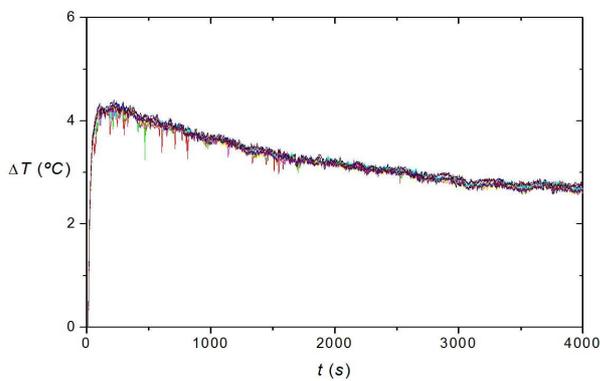


Figura 7. Evolución de  $\Delta T$  para el caso mostrado en la Fig. 6.

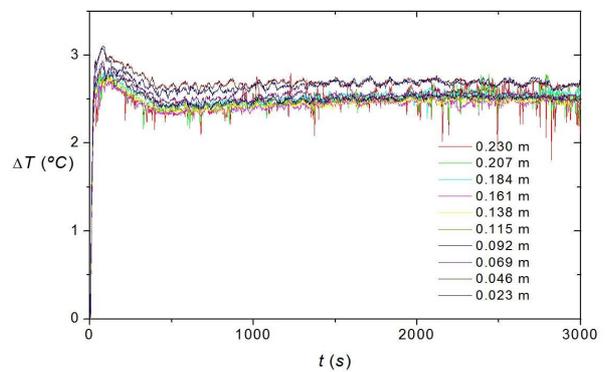


Figura 9. Evolución de  $\Delta T$  para el caso mostrado en la Fig. 8.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Cooperación Internacional CONICET-CONACYT y los proyectos PIP 054 CONICET (Argentina), CONACYT 25116 y el Programa de Intercambio Académico de la UNAM (México).

## REFERENCIAS

- Alamdari F., Butler D.J.G., Grigg P.F. y Shaw M.R. (1998). Chilled ceiling and displacement ventilation. *Renewable Energy* 15, 300-305.
- Awbi H. B. (2003) *Ventilation of Buildings*. Spon Press, London.
- Baines W.D. y Turner J.S. (1969). Turbulent buoyant convection from a source in a confined region. *J. Fluid Mech* 37, 51-80.
- Baker, N. y Linden, P.F. (1991) Physical models of air flows: a new design tool, en: Mills F. (ed), *Atrium Buildings Architecture and Engineering*, CICC Publications, Welwyn, Inglaterra, pp.13-22.
- Baker, N. y Steemers, K. (2000) *Energy and environment in architecture: a technical design guide*. E&FN Spon, Nueva York.
- Dalziel S.B. *DigiFlow User Guide*. <http://www.damtp.cam.ac.uk/lab/digiflow/> (2010).
- Dilip J. (2006). Modeling of solar passive techniques for roof cooling in arid regions. *Building and Environment*, 41, 277-287.
- Fitzgerald, S.D. y Woods, A.W. (2010) Transient natural ventilation of a space with localized heating, *Building and Environment* 45, 2778-89.
- Getling, A.V. (1998) *Rayleigh-Bénard convection: Structures and Dynamics*. Advanced Series in Nonlinear Dynamics, Vol. 11, World Scientific Publishing, Singapore.
- Givoni B. (1969). *Man, Climate and Architecture*, Elsevier Publishing Company Limited, England.
- Hunt, G.R., Cooper, P. y Linden, P.F. (2001) Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces, *Building and Environment* 36, 871-82.
- Hunt, G.R. y Linden, P.F. (1999) The fluid mechanics of natural ventilation – displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Building and Environment* 34, 707-720.
- Jeong J-W. y Mumma S.A. (2007). Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel *Building and Environment* 42, 3176–3185.
- Jiang, H., Okumura, A., Hoyano A. y Asano K. (2001). A Solar cooling project for hot and humid climates. *Solar Energy* 71, 135-145.
- Juanico, L. (2006). Diseño de techo solar adaptable innovativo para refrigeración y calefacción hogareña pasivas. *AVERMA* 10, 5.21-28. Ver también Juanico, L. (2008) A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling. *Solar Energy*, 82, 481-492.
- Karadag, R. (2009). The investigation of relation between radiative and convective heat transfer coefficients at the ceiling in a cooled ceiling room. *Energy Conversion and Management* 50, 1-5.
- Kaye, N.B. y Hunt, G.R. (2004) Time-dependent flows in an emptying filling box, *Journal of Fluid Mechanics* 520, 135-56.
- Linden, P.F. (1999) The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics* 31, 201–238.
- Linden, P.F., Lane-Serff, G.F. y Smeed, D. (1990) A Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation, *Journal of Fluid Mechanics* 212, 300-35.
- Morton B.R., Taylor G.I. y Turner J.S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc. A*. 234,1-23.
- Nahar N.M., Sharma P. y Purohit M.M. (1999). Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. *Energy Conversion and Management*, 40, 89-95
- Niu J.L., Zhang L.Z. y Zuo H.G. (2002). Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 34, 487-49.
- Novoselac, A. y Srebric, J. (2002). A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems. *Energy and Buildings*, 34,497-509.
- Omer A.M. (2008). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1562–1587
- Runsheng T., Etzion Y. y Erell E. (2003). Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings. *Renewable Energy* 28 1513–1522
- Thomas L.P., Marino B.M., Tovar R. y Linden P.F. (2008). Buoyancy-driven flow between two rooms coupled by two openings at different levels. *Journal of Fluid Mechanics* 594, 425-443.
- Thomas, L.P., Marino, B.M., Tovar, R., Castillo, J.A. y Rojas, J. (2009) Visualización de plumas y medición de gradientes térmicos por medio de schlieren sintético. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13, 08.139-145.
- Thomas, L.P., Marino, B.M., Tovar, R. y Castillo, J.A. (2011a) Convection generated by a small heat source in a box with a cooled upper contour at constant temperature. *IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series* 296: 012022.
- Thomas, L.P., Marino, B.M., Tovar, R. y Castillo, J.A. (2011b) Flow generated by a thermal plume in a cooled-ceiling system. *Energy and Buildings*, in press: doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.033.

## ABSTRACT

By mean of physical modeling we study the evolution of the temperature distribution in the fluid inside a space where the ceiling is maintained at constant temperature that is smaller than the initial one, after a heat source of small size is turned on and a window is opened. The generated flow is visualized employing the synthetic schlieren technique, while an array of thermocouples allows measuring the temperatures at specific points. The contributions of each heat source and sink are analyzed and their influence on the transient flow till reaching the final steady-state regime when the balance of such different contributions is established.

**Key words:** ventilation, cooled-ceiling, thermal plumes, laboratory modeling, synthetic schlieren