

# VENTILACIÓN NATURAL DE DOS HABITACIONES: MODELADO EN EL LABORATORIO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

**L. P. Thomas<sup>1</sup>, B. M. Marino<sup>1</sup>, P. F. Linden<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> IFAS, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires  
Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina

<sup>2</sup> Department of Mechanical & Aerospace Engineering, University of California  
San Diego, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA, 92093-0411, USA  
lthomas@exa.unicen.edu.ar

Frente a la gran cantidad de energía demandada para enfriar o calefaccionar mecánicamente un edificio, la ventilación natural constituye una alternativa atractiva cuando se la aprovecha para producir ambientes confortables y con buena calidad del aire interior. La observación de las corrientes de ventilación natural en los experimentos de laboratorio facilita la comprensión de estos flujos y conduce al desarrollo de las reglas de diseño necesarias para obtener sistemas de ventilación eficientes. Presentamos aquí los resultados de experimentos de laboratorio realizados con criterios de similitud dinámico para estudiar la convección generada por una fuente puntual de calor y conducida por efecto Stack entre dos habitaciones interconectadas. En particular analizamos las características del flujo transitorio para diferentes posiciones y áreas de las dos aberturas localizadas en la pared vertical compartida por las habitaciones, encontrando un buen acuerdo con los resultados provistos por el modelo matemático que se desarrolla en un trabajo adjunto.

Mechanically ventilated buildings use a great amount of energy, so that the natural ventilation provides an attractive alternative if it produces comfortable indoors and a good quality of the air. The observation of the natural ventilation currents in the laboratory experiments facilitates the understanding of the ventilation flows inside the buildings, leading to the development of the practical design rules that are necessary to obtain efficient ventilation systems. We present here the results of laboratory experiments performed under dynamical similarity criteria to study the convection generated by a point heat source and driven by Stack effect between two interconnected rooms. Particularly, the features of the transient flow are analysed for different positions and areas of the two openings located on the vertical wall shared by both rooms. A good agreement between the results provided by the mathematical model developed in another work is found.

## 1 INTRODUCCIÓN

En general, las construcciones presentan geometrías complejas que dificultan estudiar las características de los flujos turbulentos generados en su interior. Entonces se recurre a experimentos de laboratorio y a modelos teóricos relativamente sencillos para proveer la información útil necesaria para el diseño de sistemas de ventilación eficientes. En efecto, la mayoría de las viviendas y edificios cuenta con el recurso del mezclado del aire con aquel procedente desde fuentes internas de calor y con el aire entrante a través de ventanas y puertas abiertas (las que a su vez pueden ser responsables de pérdidas o ingresos excesivos de calor). Aun para diferencias de temperaturas de unos pocos grados entre el aire exterior y el interior, las fuerzas de flotación son significativas para establecer un flujo de gravedad a través de una abertura abierta, bajo la forma de una intrusión de aire frío a lo largo del piso o de aire cálido a lo largo del cielo raso.

Estudiamos aquí un caso sencillo de la ventilación natural entre dos habitaciones separadas por una pared con dos aberturas. En una de ellas se coloca una fuente de aire caliente y en la otra existe una abertura que la comunica con el exterior. En esta situación es fácil prever que a partir de un ambiente con densidad uniforme, la habitación donde está la fuente se calentará primero, luego lo hará la otra habitación, para finalmente llegar a un estado estacionario. Los resultados experimentales

muestran este comportamiento general, y también que los tiempos involucrados y la evolución de las temperaturas en ambas cámaras dependen críticamente del tamaño y posición de las aberturas. También validan el modelo teórico de Thomas, Marino & Linden presentado en el trabajo adjunto en este volumen.

A continuación, tras describir los tipos de ventilación natural y exponer los principios de la modelización de laboratorio adoptada, se detallan la disposición experimental y la diagnóstica utilizadas, luego se presentan los resultados obtenidos y finalmente se dan las principales conclusiones.

## 2 TIPOS DE VENTILACIÓN

Existen dos causales básicas para la ventilación de un edificio: el viento externo y las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior (o efecto Stack).

### 2.1 Ventilación conducida por el viento

En general, las presiones son más altas sobre el lado del edificio contrario al viento que sobre el lado por donde viene el viento y sobre el techo, lo que da lugar a la formación de un flujo de aire dentro del edificio desde las aberturas a barlovento hacia las que están a sotavento. Estas diferencias de presión varían con la forma del edificio, la dirección del viento, y la presencia de edificios vecinos. La separación entre las construcciones es un factor importante para determinar la estructura del flujo

de aire alrededor del edificio, particularmente a barlovento. La velocidad del viento juega un papel menor en la determinación de dicha estructura, la cual está determinada básicamente por la dinámica de los fluidos inviscidos. Esta independencia del número de Reynolds  $Re$  es la razón de porqué el modelado en túneles de viento ha sido tan exitoso en determinar las características del flujo entorno del edificio <sup>(1)</sup>.

## 2.2 Ventilación conducida por el efecto Stack

En este caso, el flujo de aire es producido por la fuerza de flotación debida a diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de un edificio, y entre los diferentes ambientes interiores. Además, la tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse en la parte superior de la habitación produce una estratificación estable.

El factor determinante de la estratificación es la localización y el tamaño de las aberturas o respiraderos. Si el aire en la habitación es más cálido que el del exterior, entonces una simple abertura en la parte superior de la habitación permitirá el intercambio (Figura 1a). El aire frío entrante descenderá como una pluma turbulenta tendiendo a mezclarse con el aire en el interior de la habitación. Este tipo de ventilación, conocido como *ventilación por mezclado* se caracteriza por una distribución de la temperatura interior relativamente uniforme. Si la abertura se encuentra en la parte inferior de la habitación, no habrá intercambio hasta que el aire frío entrante ocupe una capa cuya altura llegue hasta el borde superior de la abertura (Figura 1b). Ninguno de estos casos constituye una forma eficiente de ventilar un ambiente. Si dos respiraderos son abiertos, el aire cálido fluye a través del superior mientras el aire más frío ingresa por el inferior (Figura 1c). Una interfase de densidad estable se forma entre las capas de aire cálido y la del frío. Esta forma de ventilación se conoce como *ventilación por desplazamiento* y se caracteriza por producir importantes variaciones de temperatura dentro de la habitación. Para la misma diferencia de temperatura y área de respiradero, la ventilación por desplazamiento es mayor. Estos ejemplos ilustran la importancia de la ubicación de los respiraderos para determinar la configuración del flujo y la ventilación resultante.

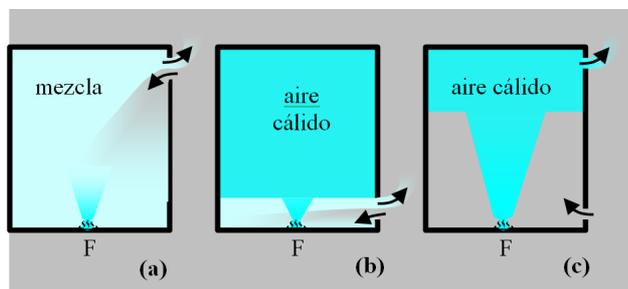


Figura 1: Esquemas que ilustran la ventilación por mezclado (a) y por desplazamiento (b) y (c).

## 3 SIMULACIONES DE LABORATORIO

La observación de los flujos de ventilación en los experimentos de laboratorio hace posible desarrollar modelos que ofrecen las reglas buscadas para el diseño de sistemas de ventilación eficientes. En contraste con la ventilación conducida por el viento, hasta hace algunos

años era difícil realizar estudios de la ventilación conducida por el efecto Stack a pequeña escala debido a los efectos viscosos propios de los flujos con  $Re$  bajos. En consecuencia, la mayoría de los estudios directos fueron realizados a escala completa (1:1) <sup>(2)</sup> y restringidos a ambientes simples. Para superar este problema, se desarrolló la metodología del modelado en pequeña escala usando agua y agua salada <sup>(3,4)</sup> en cuyo caso la fuerza de flotación es debida a la diferencia de salinidad entre los fluidos.

Expresando la gravedad reducida como:

$$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho} = g \frac{\Delta T}{T}$$

donde  $\Delta\rho/\rho$  es el cambio fraccional de la densidad producido por una diferencia de temperatura  $\Delta T/T$  (con  $T$  medida en °K), para flujos gobernados por el efecto Stack los parámetros adimensionales de interés como el número de Reynolds  $Re = UH/\nu$  y el número de Peclet  $Pe = UH/\kappa$ , con  $\kappa$ : coeficiente de difusión molecular,  $H$ : escala vertical típica y  $U$ : velocidad característica que escala con  $(g'H)^{1/2}$ , resultan

$$Re = \frac{(g'H)^{1/2} H}{\nu} \text{ y } Pe = \frac{(g'H)^{1/2} H}{\kappa}$$

Los experimentos de laboratorio de pequeña escala reducen  $H$  en al menos un factor 10, y usando aire  $Re$  y  $Pe$  son reducidos en al menos un factor  $10^{3/2} \approx 30$  respecto de las cantidades a escala completa. Trabajando con diferencias de salinidad en agua se obtienen valores más grandes de  $g'$  y más pequeños de  $\nu$  y  $\kappa$ , lográndose así los valores necesarios de  $Re$  y  $Pe$ . Tanto en los flujos de pequeña escala como en los de escala completa,  $Re > 10^3$  y  $Pe > 10^3$ , y el flujo resulta independiente de los efectos viscosos y difusivos, excepto para escalas muy pequeñas. Una diferencia de temperatura de 3°C en aire corresponde a una diferencia de densidad de 1% en agua aproximadamente. Comparaciones cuantitativas entre mediciones realizadas en modelos de laboratorio y a escala completa <sup>(2,5)</sup> confirman que los flujos naturales son bien representados cuando se trabaja en pequeña escala usando esta modalidad, con las siguientes ventajas:

- + El uso de agua permite lograr una fácil visualización del flujo empleando *shadowgrafía* o colorantes para marcar los distintos flujos actuantes.

- + Las mediciones cuantitativas de temperatura y velocidad del flujo pueden realizarse usando técnicas de procesamiento digital de imágenes <sup>(6,7)</sup>.

- + El rango correcto de los números adimensionales relacionados con la viscosidad y la difusión puede mantenerse, permitiendo mediciones cuantitativas útiles.

Más recientemente, esta técnica fue extendida al incorporar el empleo de cantidades de agua a diferentes temperaturas. Aunque no es posible obtener valores tan grandes de  $g'$  en este caso, las mediciones mostraron que el acuerdo cuantitativo entre los experimentos que usan estratificación térmica y aquellos con estratificación salina es muy bueno. Esta concordancia implica que se logran valores de  $Re$  y  $Pe$  suficientemente altos, posibilitando el uso de diferentes condiciones de contorno tales como paredes calentadas o enfriadas para simular otros efectos de la ventilación natural <sup>(8,9)</sup>.

El flujo debido a la presencia de una fuente de calor con un flujo calórico  $W$  es dado por

$$B = \frac{\gamma W}{\rho C_p} = g' Q$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente de expansión,  $C_p$  es la capacidad calorífica específica a presión constante del aire y  $Q$  es el caudal asociado. El flujo  $B$  se relaciona con el flujo de empuje o de flotación de un punto a otro. Debe señalarse, sin embargo, que los procesos difusivos que tienen lugar usando plumas originadas por la inyección de aire caliente y de una solución salina son diferentes. La analogía entre un flujo real y el de laboratorio se verifica, entonces, cuando predominan los procesos convectivos en las plumas.

#### 4 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El modelo físico empleado en este trabajo consiste en una caja de acrílico transparente de 0.248 m de altura, 0.60 m de largo y 0.20 m de ancho con una pared interior ubicada en la mitad de la caja que forma dos espacios iguales de 0.295 m de largo cada uno. La caja está inicialmente llena de agua ( $\rho = 0.998 \text{ g/cm}^3$ ). Una tobera especialmente diseñada para generar una pluma turbulenta introduce un flujo constante ( $Q_s = 2.57 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) de agua salada ( $\rho_s = 1.034 \text{ g/cm}^3$ ) que simula la generación de aire cálido por una fuente de calor<sup>(10)</sup>; está ubicada en la parte superior de una de las cámaras que llamamos "forzada". Las mediciones de densidad se efectúan con un densímetro de precisión Antón Paar DMA 5500 y las del caudal de agua salada con un medidor en línea. El flujo  $B = gQ_s(\rho_s - \rho_w)/\rho_w = 90.9 \text{ cm}^4/\text{s}^3$ . La parte superior de la cámara no-forzada tiene agujeros de diámetro 0.0342 y 0.0415 m para proveer una salida del fluido en exceso, el que es recogido para medir su volumen y su masa, y comprobar el valor de  $B$ .

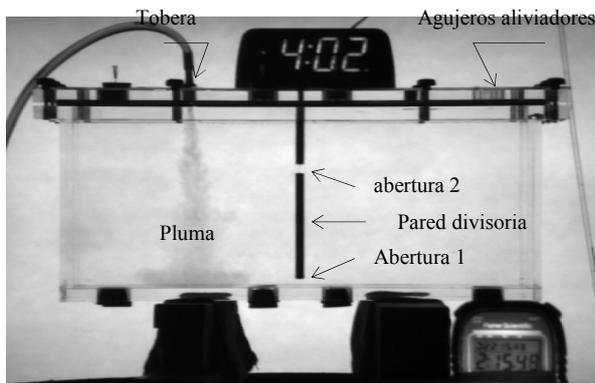


Figura 2. Vista lateral de la disposición del modelo físico.

La Figura 2 muestra una vista lateral durante un experimento típico después de un corto tiempo de iniciado. Un colorante neutro se agrega al agua salada para proveer la visualización del flujo y permitir la medición de la densidad. Se aprecia el ingreso de la pluma turbulenta de agua salada por la tobera que ya alcanzó el fondo de la cámara forzada. La pared vertical divisoria tiene dos aberturas rectangulares: en este caso, una sobre el fondo (1) y otra a una altura intermedia (2). Notar que el arreglo experimental se invierte para simular el flujo de ventilación natural en un edificio de dos

habitaciones interconectadas, una de ellas con una fuente de calor sobre el piso. Los parámetros que caracterizan los distintos experimentos se presentan en la Tabla 1.

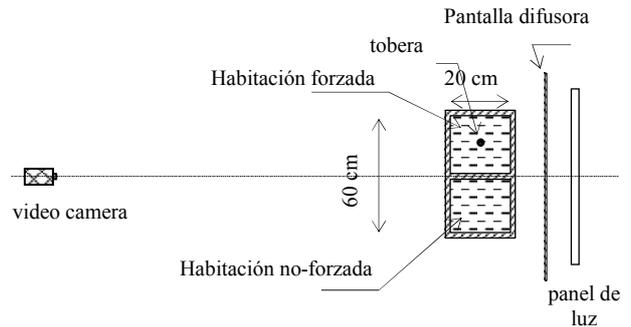


Figura 3. Esquema de la vista superior de la disposición experimental.

Un panel de tubos fluorescentes y una pantalla difusora son colocados a un lado del modelo y una video cámara a 5.2 m del otro lado como ilustra la Figura 3. El colorante agregado al agua salada reduce la intensidad de la luz proveniente del panel; dicha disminución está relacionada con la densidad del fluido promediada en el ancho de la caja, lo cual permite obtener su distribución. Las imágenes digitalizadas son procesadas con el software **DigImage**<sup>(11,12)</sup>.

Exp'to	Abertura 1		Abertura 2		$t_s$ (s)
	Altura $h_1$	Ancho	Altura $h_2$	Ancho	
1	0	0.013	0.241	0.013	460
2	0	0.007	0.247	0.007	705
3	0	0.013	0.158	0.013	2190
4	0	0.013	0.075	0.013	3780
5	0.063	0.013	0.241	0.013	520
6	0.165	0.013	0.241	0.013	870
7	0.083	0.013	0.158	0.013	1420
8	0	0.0015	0.0235	0.0015	6800
9	0.063	0.007	0.247	0.007	620

TABLA 1. Principales parámetros experimentales. La altura y el ancho de las aberturas se expresan en metros.

#### 5 RESULTADOS

Los experimentos se agrupan en cuatro series para analizar la influencia de cada parámetro por separado.

##### 5.1 Tamaño de las aberturas

La Figura 4 muestra, para tres experimentos, los perfiles de densidad de las dos habitaciones conectadas por dos aberturas de igual tamaño situadas en contacto una con el cielo raso y otra con el fondo sobre la pared compartida, siendo el tamaño de las aberturas distinto para cada experimento. El flujo entrante de agua salada a través de la tobera es constante y el mismo en los tres casos, por lo que la masa total a un dado tiempo en el interior de la caja es la misma con tal que el fluido mezclado no atravesase los agujeros de salida.

A  $t \approx 320 \text{ s}$  (Fig. 4a) se observa un cambio abrupto de densidad en ambas habitaciones, en los tres experimentos. Los perfiles de densidad son análogos para los dos casos de aberturas más grandes (líneas continua y de trazos). En el experimento realizado con las aberturas más pequeñas

(línea de puntos) la habitación forzada contiene fluido más denso que en los otros dos casos y parece llenarse casi independientemente de lo que sucede en la habitación no-forzada debido al escaso flujo entre las habitaciones. El valor de densidad más alto en ambos espacios sugiere que el mezclado global es menos intenso en este experimento.

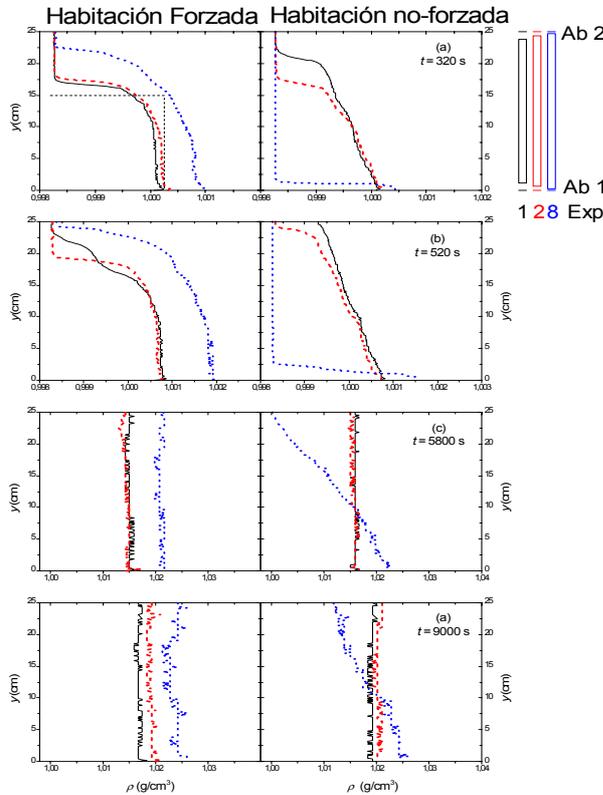


Figura 4. Perfiles de densidad promediada horizontalmente en ambas habitaciones para tres experimentos (1: línea continua, 2: línea de trazos, 8: línea de puntos).

A  $t \approx 520$  s (Fig. 4b) sólo en el experimento realizado con las aberturas de mayor tamaño (línea continua) el fluido mezclado ha alcanzado los agujeros de salida; esto sugiere que el mezclado es mayor en este caso puesto que el exceso total de la masa contenida en la caja es el mismo para los tres experimentos. Después de que el fluido mezclado alcanza el cielo raso de la habitación no-forzada, se establece un flujo de fluido marcado hacia el exterior a través de los agujeros. También se observa un flujo de fluido marcado a través de la abertura 2 que suaviza la estratificación de densidad en la habitación forzada. En el experimento en el que se usaron aberturas de tamaño intermedio (línea de trazos) el fluido coloreado no alcanzó la parte superior de la habitación no-forzada a este tiempo y por lo tanto persiste el salto de densidad en la habitación forzada; después de un cierto tiempo el fluido mezclado de la habitación no-forzada también alcanza la parte superior de la caja y los perfiles en ambas cámaras tienden a uniformizarse (Fig. 4c). Finalmente, los perfiles del caso de aberturas más pequeñas también muestran una tendencia a la uniformidad (Fig. 4d). Para tiempos grandes ambas habitaciones tienen la misma densidad uniforme tal como el modelo de Thomas, Marino & Linden (del trabajo adjunto) sugiere.

La Figura 5 muestra el exceso de masa  $m$  en cada habitación en función del tiempo para los mismos experimentos ilustrados en la Fig. 4. Los valores correspondientes a las habitaciones forzada y no-forzada se representan con símbolos huecos y con cruces, respectivamente. Los símbolos llenos representan la suma de estos resultados y corresponden al exceso de masa total en la caja. El tiempo  $t_s$  al cual el fluido mezclado comienza a perderse por los agujeros es diferente en cada caso (ver Tabla 1), por lo que se lo señala con una línea vertical en la figura, sugiriendo que el tamaño de las aberturas afectan su determinación. Los puntos de cada experimento están unidos por líneas del mismo tipo que los caracteriza en la Fig. 4. Como era de esperar, la masa total sigue una relación lineal con el tiempo hasta  $t = t_s$  apartándose de ella para  $t \geq t_s$ . El exceso de masa en la habitación forzada es siempre mayor al de la no-forzada; por lo tanto la diferencia de densidad entre ambas habitaciones genera un flujo del fluido denso desde la habitación forzada a la no-forzada, lo cual es corroborado en los experimentos.

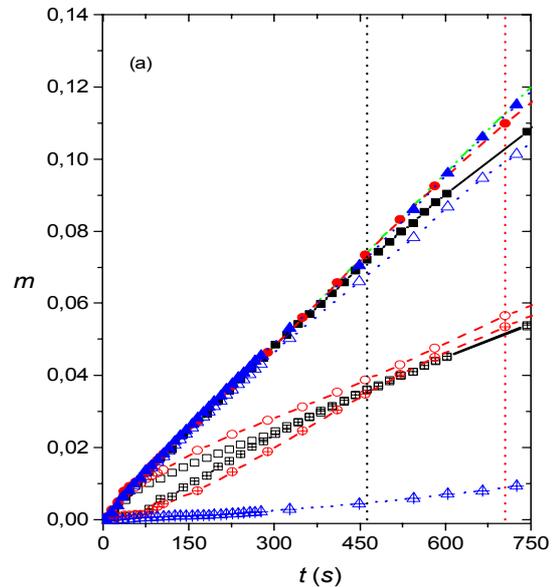


Figura 5. Evolución del exceso de masa (en unidades arbitrarias) en la habitación forzada (símbolos huecos), en la habitación no-forzada (símbolos con cruz), y en ambas habitaciones (símbolos llenos) para los mismos experimentos de la Fig. 4.

El exceso de masa de la habitación forzada es bastante mayor que el de la habitación no-forzada en el caso de las aberturas más pequeñas. Esto sugiere que el tamaño de las aberturas no sólo cambia  $t_s$  sino también la velocidad del mezclado en el interior de la caja.

## 5.2 Abertura 1 en una posición intermedia

La Figura 6 muestra los perfiles de densidad medidos a diferentes tiempos cuando la abertura 2 está en contacto con el cielo raso y la abertura 1, de igual tamaño, se localiza en diferentes posiciones intermedias sobre la pared compartida en cada experimento. Las posiciones se indican en el esquema de la parte superior derecha de la figura.

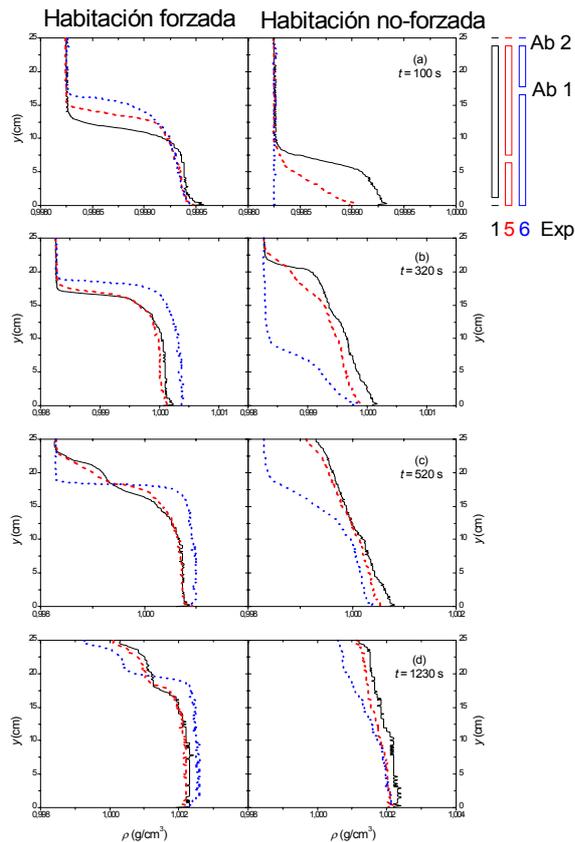


Figura 6. Perfiles de la densidad en ambas habitaciones para cuatro diferentes tiempos de tres experimentos (1: línea continua, 5: línea de trazos, 7: línea de puntos).

El perfil de densidad en la habitación forzada evoluciona como en una habitación aislada hasta que la interfase alcanza la abertura 1. De hecho, la habitación forzada concentra todo el fluido denso liberado por la tobera en el caso en que la abertura 1 ocupa la posición más alta (línea de puntos) a  $t = 100$  s. El experimento con la abertura 1 en una posición intermedia (línea de trazos) muestra una pequeña cantidad de fluido denso en la habitación no-forzada, donde el perfil de densidad no tiene una interfase definida. Además la densidad máxima en la habitación no-forzada es menor que para el experimento con la abertura 1 ubicada sobre el fondo (línea llena).

Cuando la abertura 1 ocupa una posición intermedia y para  $t \approx 320$  s los perfiles en ambas cámaras son similares a aquellos obtenidos cuando una de las aberturas está sobre el fondo. Por el contrario, la abertura 1 localizada en la posición más alta permitió pasar sólo algo de fluido denso a la habitación no-forzada. El perfil de densidad es suave allí, mientras la habitación forzada presenta un perfil del fluido denso con una interfase ubicada por encima de los otros dos casos. Luego, según Fig. 6c, esta interfase se hace más abrupta pero su velocidad disminuye como consecuencia del fluido evacuado a la habitación no-forzada. La mayor velocidad de transferencia a la habitación no-forzada hace que el exceso de masa allí aumente más rápido tendiendo a alcanzar los valores de los otros casos, pero de cualquier modo la interfase alcanza el contorno superior de la

habitación no-forzada después de 520 s. Finalmente para tiempos mayores todos los perfiles tienden a converger (Fig. 6d).

La evolución del exceso de masa  $m$  se muestra en la Figura 7. Los tiempos  $t_s$  (Tabla 1), indicados por las líneas verticales, son similares para los dos experimentos con la abertura 1 en las posiciones más bajas. En contraste, el experimento con la abertura 1 en la posición más alta sigue una evolución bastante diferente. Primero  $t_s$  es casi el doble del valor que tiene en los otros casos, pero también la diferencia del exceso de masa entre ambas habitaciones es más grande. En resumen, una posición más alta de la abertura 1 mantiene una considerable diferencia en el exceso de masa entre ambas habitaciones, reduce el mezclado global y aumenta  $t_s$ .

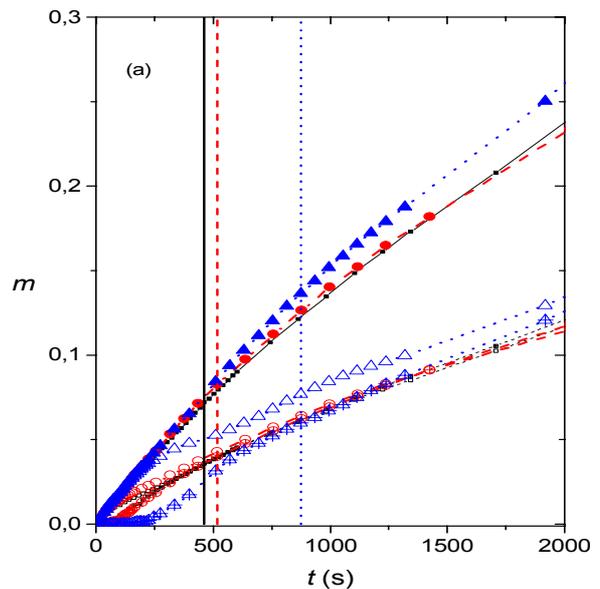


Figura 7. Idem fig. 5 para los mismos experimentos de la fig. 6.

### 5.3 Abertura 2 en una posición intermedia

Los perfiles de densidad obtenidos en los experimentos con la abertura 1 sobre el fondo y la abertura 2 de igual tamaño en diferentes posiciones sobre la pared compartida se muestran en la Figura 8. La estratificación en ambas cámaras está bien delimitada y los perfiles son análogos a  $t = 100$  s, sugiriendo que la posición de la abertura más alta no influenció el flujo interior en la caja todavía. La diferencia surge cuando la interfase en la habitación no-forzada alcanza la abertura superior (Fig. 8b). En tal situación la interfase en la habitación no-forzada comienza a elevarse lentamente con una velocidad impuesta por el flujo de masa. La densidad en la habitación forzada tiende a aumentar al igual que la del fluido que pasa a la habitación no-forzada donde genera un perfil de densidad no uniforme. La interfase y las capas que fueron atrapadas en la parte superior de la habitación no-forzada se elevan y eventualmente alcanzan el contorno superior (Fig. 8c). Finalmente el fluido mezclado comienza a dejar la caja y los perfiles tienden a uniformizarse para tiempos posteriores (Fig. 8d).

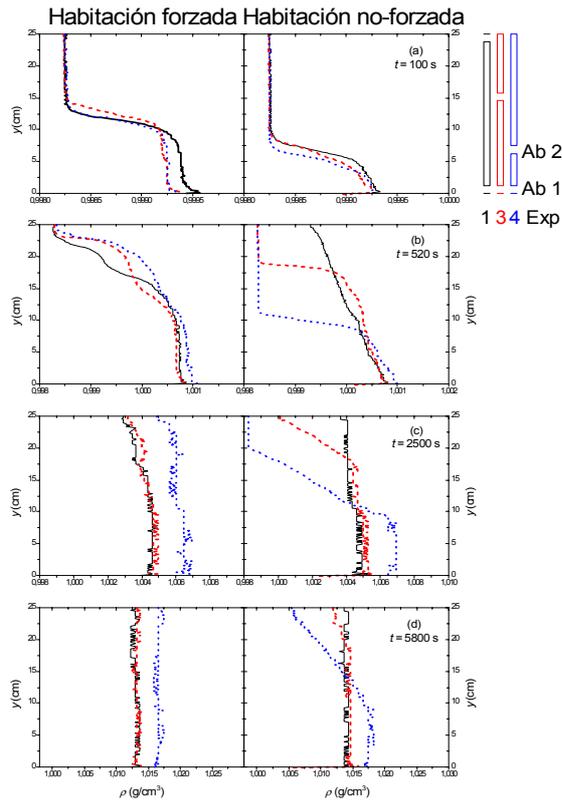


Figura 8. Perfiles de densidad en ambas habitaciones en tres experimentos (1: línea continua, 3: línea de trazos, 4: línea de puntos).

El exceso de masa evoluciona consistentemente. La Figura 9 muestra que cuanto menor es la posición de la abertura 2, mayor es el tiempo para el que el fluido mezclado comienza a dejar la caja, y mayor es la diferencia entre el exceso de masa contenido en ambas habitaciones. Notar que esta diferencia se mantiene para tiempos significativamente mayores que  $t_s$ .

#### 5.4 Aberturas localizadas a alturas intermedias

La Figura 10 muestra los perfiles de densidad obtenidos cuando aberturas de igual tamaño se localizan en posiciones intermedias de la pared compartida. Como era de esperar, a  $t = 100$  s los perfiles para el experimento 7 son análogos a aquellos obtenidos en el experimento 5 (Fig. 6). Esta semejanza es debida a que la posición de la abertura 2 no influencia significativamente el flujo en esta etapa. Luego la interfase en la habitación no-forzada alcanza la abertura 2 ( $t = 320$  s) y los perfiles son similares a los del experimento 3 (Fig. 8). En tal situación la interfase en la habitación no-forzada se mueve hacia arriba lentamente y la densidad en la habitación forzada aumenta estacionariamente; este comportamiento también se observa aquí. La interfase y las capas que son atrapadas en la parte superior de la habitación no-forzada suben continuamente, alcanzan el cielo raso y entonces los perfiles tienden a ser uniformes ( $t = 1230$  s).

La Figura 11 muestra la evolución de  $m$  en ambas cámaras. El tiempo de salida  $t_s$  para el experimento 7 es alrededor de tres veces el correspondiente al caso del experimento 1 o del experimento 5, y alrededor de dos tercios el del experimento 3 (ver Tabla 1). Esto sugiere

que la posición de la abertura 2 modifica  $t_s$  por estar relacionado con el mezclado interior en la caja. Notar también que la diferencia de densidad entre las habitaciones se mantiene para un tiempo mayor como se observa en la Fig. 10.

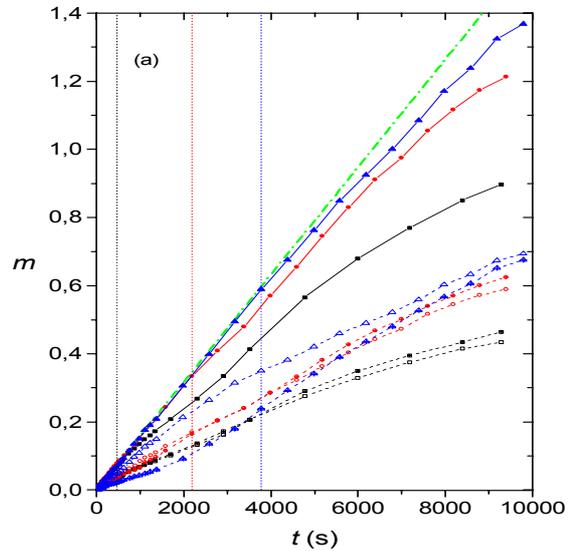


Figura 9. Idem fig. 5 para los mismos experimentos de la fig. 8.

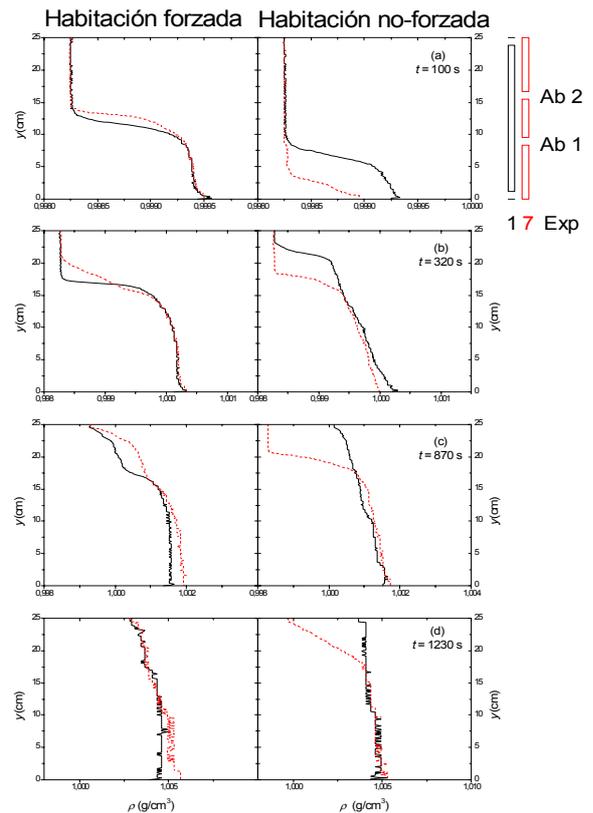


Figura 10. Perfiles verticales de densidad en ambas de dos experimentos (1: línea continua, 7: línea de trazos). Las aberturas de igual tamaño se localizan de acuerdo al esquema que aparece arriba a la derecha.

## 5.5 Comparación

La Figura 12 muestra una comparación de cuatro casos en los que  $h_1 < H/2$  y  $h_2 > H/2$  ( $H$ : altura total de la pared compartida). Aquí  $\tau = t/(S_f/B^{1/3}H^{2/3})$  es un tiempo característico con  $S_f$ : el área de la habitación forzada y  $H$ : altura de las habitaciones. La evolución de  $m$  en los experimentos 1 y 3 se acerca desde el comienzo porque la abertura 1 está sobre el fondo y entonces el flujo a la habitación no-forzada se establece en ambos casos después de que el fluido denso alcanza el cielo raso de la habitación forzada. Luego el exceso de masa del experimento 1 tiende al del experimento 5 una vez que la abertura 1 es alcanzada por el fluido denso en la habitación forzada probablemente porque la abertura 2 está sobre la parte superior de la pared compartida, y así los tiempos  $t_s$  son casi iguales. Lo mismo sucede para los experimentos 3 y 7, aun cuando los correspondientes  $t_s$  son algo diferentes. La similitud de la evolución para tiempos grandes ( $t \gg t_s$ ) indica que la tasa del fluido mezclado liberado desde los agujeros y, por lo tanto, el mezclado interior en la caja son principalmente afectados por la posición de la abertura 2.

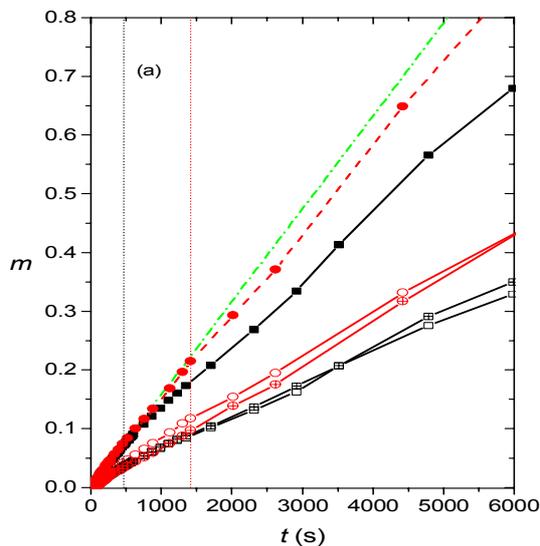


Figura 11. Idem fig 5 para los experimentos de la fig. 10.

## 6 CONCLUSIONES

Bajo requerimientos de similaridad dinámica, se modelan en el laboratorio los flujos de intercambio entre dos habitaciones interconectadas a través de un par de aberturas de distintos tamaños y posiciones, con una fuente de calor en una de ellas. Los resultados obtenidos muestran un buen acuerdo con los del modelo teórico de Thomas, Marino & Linden del trabajo adjunto.

La reducción del tamaño de las aberturas aumenta la diferencia de densidad promedio entre ambas habitaciones y  $t_s$ , lo cual es consistente con una reducción del mezclado. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 1 y la Fig. 6, una altura mayor de la abertura 1 cambia el tiempo en el cual la interfase la alcanza y la configuración del flujo inicial. Sin embargo,  $t_s$  y el mezclado final resultan poco afectados. Por el contrario, de acuerdo a la Tabla 1 y la Fig. 8, una reducción de la posición de la abertura 2 aumenta significativamente el

valor de  $t_s$  y disminuye el mezclado interno. La aparición de interfases bien definidas en ambas habitaciones y capas del fluido ambiente sin mezclar en la habitación no-forzada son las características sobresalientes para las situaciones en las que  $h_2 < H$ .

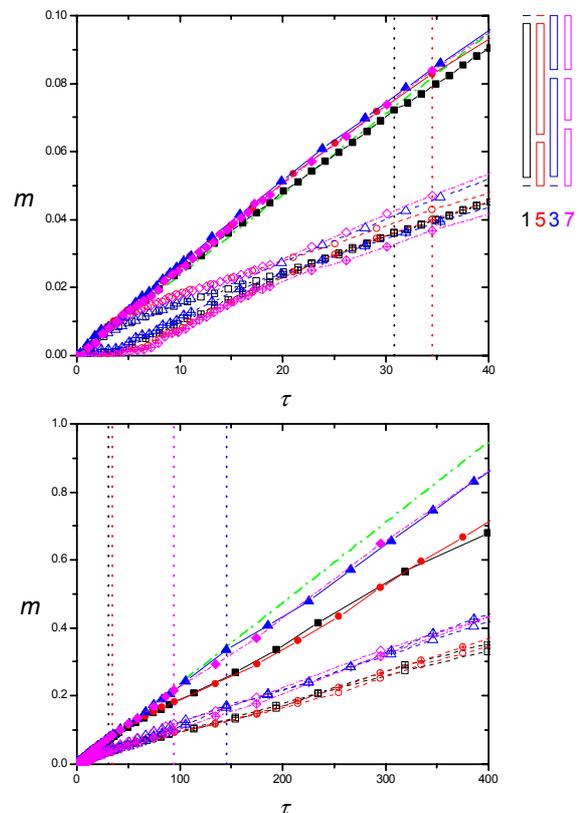


Figura 12. Evolución del exceso de masa en las habitaciones forzada (símbolos abiertos) y no-forzada (símbolos con cruz), y en ambas (símbolos llenos) para los experimentos 1, 5, 3 y 7. Las líneas verticales indican el momento en el que el fluido mezclado comienza a abandonar la caja. Observar el cambio de escalas entre (a) y (b).

## Referencias

- 1- Dascalaki., E. & Santamouris, M. *Natural Ventilation*. En *Passive Cooling of Buildings*, ed. M. Santamouris, D. Asimakopoulis, pp. 202-306. Londres: James & James, 1996.
- 2- Lane-Serff, G.F. *Heat flow and air movement in buildings*. Ph.D. Tesis. Cambridge University, R.U., 1989.
- 3- Linden, P.F., Lane-Serf, G.F. & Smeed, D.A. *J. Fluid Mech.* 212, 300-335, 1990.
- 4- Baker, N. & Linden, P.F. *Atrium Build. Archit. Eng.*, pp. 13-22, Ed. F. Mills. CICC Publications, Welwyn, R.U., 1991.
- 5- Savardekar, K. *Aspects of passive cooling. A study on natural ventilation*. M. Phil. Tesis, Cambridge Univ., R.U., 1990.
- 6- Hacker, J., Linden, P.F. & Dalziel, S.B. *Dyn. Atmos. Oceans* 24, 183-195, 1996.
- 7- Hunt, G. & Linden, P.F. *J. Fluid Mech.* 426, 355-386, 2001.
- 8- Sandberg, H. & Lindstrom, S. *Stratified flow in ventilated rooms: a model study*. Proc. ROOMVENT'90, Oslo, Norway, 1990.
- 9- Linden, P.F. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 31, 201-238, 1999.
- 10- Hunt, G. & Kaye, N. *J. Fluid Mech.* 435, 377-396, 2001.
- 11- Dalziel, S.B. *Dyn. Atm. Oceans* 20, 127-153, 1993.
- 12- Dalziel, S.B. *DigImage: System overview*. Cambridge Environmental Research Consultants, Reino Unido, 1995.